



HAL
open science

Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus

Geoffroy Séré

► To cite this version:

Geoffroy Séré. Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus . Sciences de l'environnement. Université de Lorraine, 34 cours Léopold, 54000 Nancy, 2018. tel-01785605

HAL Id: tel-01785605

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01785605v1>

Submitted on 4 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Lorraine
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires
Laboratoire Sols et Environnement

Ecole Doctorale Ressources, Procédés, Produits et Environnement

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme
d'Habilitation à Diriger des Recherches

par

Geoffroy Séré

Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus

Soutenue publiquement le 14 mars 2018 devant le jury composé de :

Isabelle COUSIN, Directeur de Recherches INRA, Rapporteur
Mathieu JAVAUX, Professeur Université Catholique de Louvain, Rapporteur
Christian WALTER, Professeur AgroCampus Ouest, Rapporteur
Sabine HOUOT, Directeur de Recherches INRA, Examinatrice
Jean Louis MOREL, Professeur Université de Lorraine, Examineur
Christophe SCHWARTZ, Professeur Université de Lorraine, Examineur
Laure VIDAL-BEAUDET, Maître de Conférences HDR AgroCampus Ouest, Examinatrice

« Bon ou médiocre, le sol est à la fin conquis ;
l'homme a mis en exploitation à peu près
tout l'espace dont il pouvait espérer tirer parti. »

Nouveaux Prétextes (1911), André Gide

REMERCIEMENTS

En premier lieu, j'aimerais remercier chaleureusement Christophe Schwartz qui a accepté d'être mon parrain d'HDR. Non seulement tu m'as transmis un sens aigu de l'exigence de la recherche, mais tu es également pour moi un partenaire incroyable qui transforme nos interactions professionnelles en perpétuel émerveillement scientifique et nous donne envie d'aller toujours plus loin, voire même... de faire un pas de côté.

Jean Louis Morel, vous m'avez embarqué dans le monde de la recherche il y a 16 ans en acceptant d'être mon tuteur de DEA. Depuis ce jour, vous n'avez eu de cesse de m'encourager avec amitié à dépasser mes propres limites en explorant un champ des possibles que vous avez contribué à éclairer de manière visionnaire. Pour tout cela, je vous exprime ma plus profonde gratitude.

Je suis tout particulièrement reconnaissant à Isabelle Cousin, Mathieu Javaux et Christian Walter d'avoir bien voulu accepté d'être les rapporteurs de mon travail. Je remercie également profondément Sabine Houot et Laure Vidal-Beaudet d'avoir siégé dans mon jury. Vos contributions, avis, suggestions me sont extrêmement précieux pour poursuivre mes réflexions. J'ai été particulièrement touché par votre bienveillance et votre empathie.

Que les chevilles ouvrières de ce travail trouvent ici l'expression très sincère de mes remerciements, les doctorants et post-doctorants : Anne Blanchart, Ryad Bouzouidja, Robin Dagois, Noémie Janot, Frédéric Rees ; les étudiants en stage : Clémentine Beau, Ivan Bever, Julien Brun, Marie Buyse, Virgine Casel, Mathilde Clabaut, Maha Deeb, Pierre-Louis Delebecq, Camille Fernandez, Gaëtan Fourvel, Violaine Galzin, Emilie Guéret, Adeline Jégouzo, Alice Kohli, Marianne Leclerc, Claire Mariatte, Léo Martin, Cinthia Meyer, Lucile Mineo-Kleiner, Augustin Monnier, Vivien Navelot, Claire Petter, Anaïs Piolet, Pauline Renaut, Gustave Rousseau, Axel Roy, Quentin Soraruff, Marie Stas, Marwa Tifafi. J'espère vous avoir suffisamment témoigné de ma reconnaissance et du plaisir que j'ai pu avoir à travailler avec chacun d'entre vous.

Cela fait bientôt 7 ans que j'ai la chance de partager notre bureau avec Françoise Watteau. A travers nos discussions informelles et chaleureuses, nos projets communs et ta co-animation de l'équipe Technosol, je peux mesurer la valeur de ton amitié !

Un grand merci à mes collègues enseignants chercheurs du département de science du sol Apolline Auclerc, Guillaume Echevarria, Pierre Léglize et Catherine Sirguy pour ce dynamisme et cette volonté d'essayer de nous améliorer en permanence qui nous anime. Je tiens bien sûr à remercier tous mes collègues du LSE pour leur gentillesse et leur implication. Je pense particulièrement à Stéphanie Ouvrard, Sonia Henry, Sophie Leguédois, Jean-Claude Bégin, Stéphane Colin et Alain Rakoto avec qui j'ai l'occasion de travailler fréquemment et dans une ambiance toujours chaleureuse et motivée.

Le GISFI est pour moi un lieu privilégié d'expérimentations, mais ce sont également des personnes avec qui j'ai toujours eu beaucoup de plaisir à travailler. Je suis donc très reconnaissant à Noële Enjelvin, Lucas Charrois, Rémi Baldo, Mélanie Malacarne, Adeline Combat, Yannick Cazes et Jade Diemunsch.

Tous mes remerciements vont aux partenaires scientifiques et industriels avec qui j'ai eu l'occasion de travailler et qui, en me permettant d'aborder des sujets scientifiques sous un autre angle, voire d'élargir le champ des questions m'ont permis de progresser dans mes recherches. Merci en particulier à Sophie Guimont pour son amitié, à Jean-Noël Consalès pour sa philosophie (« Rock'n'roll will never die ») et à Gilles Warot et Johan Chérel pour nos intenses sessions de travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux deux directeurs de l'ENSAIA avec qui j'ai eu l'opportunité de travailler et qui m'ont témoigné leur confiance et m'ont accompagné dans mes projets : Michel Fick et Guido Rychen.

Enfin, je remercie ici mes amis et ma famille. Merci beaucoup à mon père pour nos discussions et ses relectures précieuses. Merci à ma mère pour son soutien et son attention permanents. Marie, Guilhem et Emile, ce travail est une partie du reflet du bonheur que je vis au quotidien avec vous !

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION GENERALE	9
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	9
1.2. STRUCTURE ET ORGANISATION DU MEMOIRE	9
1.3. CADRE DES TRAVAUX	10
2. ENJEUX ET ETAT DE L'ART	12
2.1. ELEMENTS DE DEFINITION ET DE POSITIONNEMENT DU CONCEPT DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES	12
2.2. DYNAMIQUE TERRITORIALE DE L'ANTHROPISATION DES SOLS	13
2.3. LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES POUR REpondRE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DES MILIEUX ANTHROPISES.....	16
2.4. LES SOLS DES MILIEUX FORTEMENT ANTHROPISES SONT MAJORITAIREMENT DES TECHNOSOLS	17
2.5. SERVICES ECOSYSTEMIQUES ASSURES PAR LES TECHNOSOLS	18
2.6. EVALUATION DU FONCTIONNEMENT ET DE LA QUALITE DES TECHNOSOLS : PLACE DES PROPRIETES PHYSIQUES.....	19
2.7. LES TECHNOSOLS, DES SOLS SOUMIS A UNE PEDOGENESE PRECOCE.....	23
2.8. SYNTHESE ET PROBLEMATIQUE	33
3. COMMENT CONSTRUIRE UN SOL EN REPOSE A L'ANTHROPISATION DE LA COUVERTURE PEDOLOGIQUE ? 34	
3.1. ADAPTER LA COMPOSITION DES SOLS AUX USAGES	34
3.2. FORMULER DES DECHETS ET SOUS-PRODUITS POUR CONSTRUIRE DES SOLS	39
3.3. PRENDRE EN COMPTE LES CRITERES SOCIETAUX	45
3.4. CONCLUSION INTERMEDIAIRE.....	48
4. QUELLES FONCTIONS RENDUES PAR LES TECHNOSOLS CONSTRUITS ?	49
4.1. MATERIELS ET METHODE.....	49
4.2. STOCKAGE DE CARBONE.....	52
4.3. FILTRE ET ECHANGE.....	56
4.4. PRODUCTION DE BIOMASSE	61
4.5. HABITAT POUR LA FAUNE DU SOL.....	63
4.6. CONCLUSION INTERMEDIAIRE.....	65
5. QUELLE PEDOGENESE POUR LES TECHNOSOLS CONSTRUITS ET QUELLES CONSEQUENCES SUR LEUR FONCTIONNEMENT ?	68
5.1. MATERIEL ET METHODES.....	68
5.2. DYNAMIQUE DE LA STRUCTURE PAR OBSERVATION ET MESURE DIRECTES	69
5.3. SUIVI ET MODELISATION INDIRECTE DE LA DYNAMIQUE DE LA STRUCTURE	71
5.4. EVOLUTION DES PHASES MINERALES	75
5.5. TRANSFERT DE PARTICULES.....	77
5.6. IMPLICATIONS DE LA PEDOGENESE SUR LE FONCTIONNEMENT DES TECHNOSOLS CONSTRUITS	78
5.7. CONCLUSION INTERMEDIAIRE.....	80

6.	<u>COMMENT EVALUER LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LES TECHNOSOLS ?</u>	83
6.1.	LISTE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES ASSURES PAR LES TECHNOSOLS	83
6.2.	DEVELOPPEMENT D'UN CADRE METHODOLOGIQUE ADAPTE POUR L'EVALUATION DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LES TECHNOSOLS	86
6.3.	EVALUATION DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LES TECHNOSOLS	91
6.4.	CONCLUSION INTERMEDIAIRE	94
7.	<u>COMMENT OPTIMISER LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LES TECHNOSOLS ?</u>	96
7.1.	EN DEVELOPPANT L'INGENIERIE PEDOLOGIQUE	96
7.2.	EN POURSUIVANT LES RECHERCHES SUR LE FONCTIONNEMENT ET LA PEDOGENESE DES TECHNOSOLS	98
7.3.	EN FAISANT EMERGER L'AGRO-URBANISME	101
8.	<u>CONCLUSION</u>	105
9.	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	106
10.	<u>ANNEXES</u>	113
10.1.	LISTE COMPLETE ET CLASSEE DES PUBLICATIONS	113
10.2.	ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT	118
10.3.	ACTIVITES ADMINISTRATIVES ET ANIMATION DU COLLECTIF	119

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. STRUCTURATION DU MEMOIRE HDR EN CINQ QUESTIONS DE RECHERCHE.....	10
FIGURE 2 : ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN SERVICE ECOSYSTEMIQUE (CGDD, 2016)	12
FIGURE 3. EVOLUTION DE L'APPARITION DES TERMES « SERVICES ECOSYSTEMIQUES » DANS LES ARTICLES DE LA LITTERATURE (WEB OF SCIENCE) ENTRE 1988 ET 2014	13
FIGURE 4. ESPACES ARTIFICIALISES ENTRE 2006 ET 2012 SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS METROPOLITAIN (UE – SOeS, CORINE LAND COVER).....	14
FIGURE 5. TERRES COUVERTES DE SOLS PAR SURFACES ARTIFICIELS (ZONES BATIES ET NON BATIES) DANS DIFFERENTS PAYS DE L'UNION EUROPEENNE EN 2012 (EUROSTAT, 2016)	14
FIGURE 6. REPARTITION DES SUPERFICIES ARTIFICIALISEES PAR OCCUPATION DU SOL (AGRESTE, 2015).....	15
FIGURE 7. CONTRIBUTION DES APPROCHES DE REHABILITATION DE SOLS CONTAMINES AUX SERVICES ECOSYSTEMIQUES ET A LA SECURITE DES SOLS (DING ET AL., 2016)	16
FIGURE 8. NOMBRE DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DANS DES REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE COMPORTANT LES TERMES « URBAN SOIL », « INDUSTRIAL SOIL » ET "TECHNOSOL" COMME SUJET DE LEUR ETUDE (CONSULTATION WEB OF SCIENCE LE 17/07/17)	18
FIGURE 9 : DIAGRAMME CONCEPTUEL RELIANT LES PRINCIPALES PROPRIETES DU SOL AUX SERVICES ECOSYSTEMIQUES ET AU BIEN ETRE HUMAIN, EN PASSANT PAR LES FONCTIONS DU SOL (D'APRES ADHIKARI ET HARTEMINK, 2015)	21
FIGURE 10. CINETIQUES DE VARIATION TEMPORELLE DES PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL ET INFLUENCE DES FACTEURS EXTERNES	23
FIGURE 11. PROCESSUS PEDOGENETIQUES ET FACTEURS CONDUISANT A L'EVOLUTION D'UN TECHNOSOL CONSTRUIT (D'APRES SCHWARTZ ET AL., 2007)	24
FIGURE 12. SPECIFICITES POTENTIELLES DE LA PEDOGENESE DE SOLS FORMES A PARTIR DE MATERIAUX ANTHROPIQUES (HUOT ET AL., 2015A)	25
FIGURE 13. PROFILS DE TECHNOSOLS : A. ANCIENNE VOIE ROMAINE, B. INFRASTRUCTURES (FONDACTIONS) D'EPOQUE GAULOISE, C. REMBLAIS ET DALLE D'UN ANCIEN BATIMENT INDUSTRIEL, D. TERRIL DE SABLE DE FONDERIE, E. BASSIN DE DECANTATION SIDERURGIQUE (CREDITS PHOTO G. SERE) ...	26
FIGURE 14. SCHEMA ILLUSTRANT LE DEVELOPPEMENT D'HORIZONS D'ALTERATION A PARTIR D'UN PROFIL DE TECHNOSOL INITIALEMENT ORGANISE EN COUCHES.....	31
FIGURE 15. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES PROCESSUS PEDOGENETIQUES DE NATURE ET D'INTENSITE DIFFERENTE AFFECTANT UN TECHNOSOL (D'APRES UNE REPRESENTATION DE SIMONSON, 1959)	31
FIGURE 16. HYPOTHESE D'EVOLUTION D'UN TECHNOSOL CONSTRUIT (SERE, 2007).....	32
FIGURE 17. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES ENJEUX SCIENTIFIQUES TRAITES DANS L'HDR.....	33
FIGURE 18. EVALUATION DES FONCTIONS ET PROPRIETES ATTENDUES (PLUS LA VALEUR EST PROCHE DE LA PERIPHERIE, PLUS LE NIVEAU DE FONCTION ATTENDUE EST ELEVE ET INVERSEMENT) POUR 4 USAGES MODELES DE SOL URBAIN VEGETALISE	36
FIGURE 19. PROFILS DE SOLS CONSTRUITS IDEAUX POUR UNE VARIETE D'USAGES ET DE SITUATIONS.....	37
FIGURE 20. PROPRIETES ATTENDUES POUR UN SOL CONSTRUIT DESTINE A LA CULTURE DE CHANVRE	37
FIGURE 21. FRAGMENT DU TABLEAU DE NOTATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES EN FONCTION DES HORIZONS DE SOL CONSTRUIT.....	38
FIGURE 22. GRANDES CATEGORIES DE MATERIAUX SUSCEPTIBLES D'ETRE UTILISES EN CONSTRUCTION DE SOL POUR LA VEGETALISATION URBAINE (DAMAS & COULON, 2016)	40
FIGURE 23. RECENSEMENT DES GISEMENTS DE DECHETS ET SOUS-PRODUITS AUX ENVIRONS DE NANCY (PROJET PEDAGOGIQUE TUTEURE D'ETUDIANTS ENSAIA 3A SGE, 2014)	40
FIGURE 24. EFFET DU MELANGE DE DEUX MATERIAUX SUR LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (ROKIA ET AL., 2014).....	42
FIGURE 25. REGRESSIONS LINEAIRES OBTENUES EN COMPARANT LES VALEURS MODELISEES ET EXPERIMENTALES POUR A. C_{TOT} , B. P_{OLSEN} , C. CEC, D. PH_{EAU} , D. HUMIDITE A CAPACITE AU CHAMP, E. MASSE VOLUMIQUE – LES VALEURS DE R^2 CALCULEES SONT RESPECTIVEMENT DE 0,6 ; 0,7 ; 0,9 ; 0,1 ; 0,9 ET 0,9. (ROKIA ET AL., 2014)	42
FIGURE 26. VUE DES PROFILS DE SOL CONSTRUITS MIS EN PLACE A L'OCCASION DE MA THESE (PARCELLES LYSIMETRIQUES) ET DES PROJETS BIOTECHNOSOL, SITERRE ET LORVER.....	43
FIGURE 27. VUES DES PARCELLES BIOTECHNOSOL (EN HAUT) EN MARS 2008 ET LORVER (EN BAS) EN JUIN 2017.....	44
FIGURE 28. PHENOMENE DE LESSIVAGE DE PARTICULES FINES DEPUIS LA SURFACE DES SOLS CONSTRUITS SITERRE	45
FIGURE 29. IMPACTS ESTIMES PAR ACV POUR 4 SCENARIOS (LORVER CHANVRE, REF CHANVRE, LORVER TCCR, REF TCCR) - CAS DES IMPACTS FAVORABLES AUX SCENARIOS LORVER (RODRIGUES, 2016)	47
FIGURE 30. SYNTHESE DES FOCUS GROUPE DES DIFFERENTES ETAPES D'ANALYSE ET NOTE GLOBALE POUR CHAQUE MATERIAU TESTE (RAPPORT FINAL SITERRE, 2015).....	48
FIGURE 31. ORGANISATION ET COMPOSITION DES SOLS CONSTRUITS ETUDIES POUR L'ETUDE DU FONCTIONNEMENT	49
FIGURE 32. DEVELOPPEMENT DE LA VEGETATION SUR TECHNOSOL 2, AVANT (2000), PENDANT (2007) ET APRES LA CONSTRUCTION DU SOL (2008 A 2012)	50
FIGURE 33. SCHEMA D'UNE COLONNE LYSIMETRIQUE PERMETTANT LE SUIVI DE PARAMETRES PHYSIQUES ET HYDRIQUES DU SOL ET LE PRELEVEMENT DE LA SOLUTION DU SOL.....	50

FIGURE 34. EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE ORGANIQUE DANS LES 30 PREMIERS CM DE TECHNOSOLS 1 ET 2 ET COMPARAISON AVEC DES SOLS NATURELS.....	53
FIGURE 35. COMPARAISON DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE ENTRE TECHNOSOL CONSTRUIT ET SOL NATUREL SUR TOUTE L'EPAISSEUR DU PROFIL ..	54
FIGURE 36. COMPARAISON DE L'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE DANS LES 30 PREMIERS CM ENTRE LES TECHNOSOLS ETUDIES ET DES DONNEES DE LA LITTERATURE SUR D'AUTRES TECHNOSOLS	54
FIGURE 37. COMPARAISON ENTRE LES DONNEES MESUREES ET MODELISEES DE STOCK DE CARBONE ORGANIQUE DANS LES 30 PREMIERS CM DES TECHNOSOLS 1 ET 2	55
FIGURE 38. SIMULATION DE L'EVOLUTION DU STOCK EN CARBONE ORGANIQUE DANS LES 30 PREMIERS CM D'UN TECHNOSOL CONSTRUIT.....	56
FIGURE 39. BILANS HYDRIQUES DES TECHNOSOLS 2 ET 3, SUR 2 ANS ET SUR 6,5 ANS	57
FIGURE 40. EVOLUTION DES RAPPORTS ETR/PLUVIOMETRIE ET DRAINAGE/PLUVIOMETRIE POUR LES TECHNOSOLS 2 ET 3 SUR 2 ANS ET SUR 6,5 ANS ..	58
FIGURE 41. EVOLUTION DES QUANTITES D'EAU STOCKEES DANS TECHNOSOLS 2 ET 3	59
FIGURE 42. EVOLUTION DES HUMIDITES VOLUMIQUES A 50, 100 ET 150 CM AU SEIN DU TECHNOSOL 2 AU COURS DE 6,5 ANNEES.....	60
FIGURE 43. CONCENTRATIONS EN ZINC ET NICKEL DANS LES PECOLATS COLLECTES A LA BASE DE TECHNOSOL 1 ET TECHNOSOL 3 EN FONCTION DU VOLUME D'EAU DRAINE	61
FIGURE 44. PRODUCTIONS DE BIOMASSE SECHE SUR TECHNOSOL 1, TECHNOSOL 2 ET TECHNOSOL 3	62
FIGURE 45. INTERPRETATION AGRONOMIQUE (POTENTIEL FOURRAGER) DES ESPACES VEGETALES PRESENTES SUR LA PARCELLE TECHNOSOL 2 EN 2016	62
FIGURE 46. EVOLUTION DES PROFILS ET DENSITES RACINAIRES DE TECHNOSOL 1.....	63
FIGURE 47. NOMBRE MOYEN D'INDIVIDUS (MACROFAUNE) PAR MAILLE DANS TECHNOSOL 2 ET TECHNOSOL 4 AU COURS DU TEMPS (CORTET ET AL., 2015)	64
FIGURE 48. EVOLUTION TEMPORELLE ET SPATIALE DE LA DENSITE EN MACROFAUNE DU SOL ET DE SURFACE DE TECHNOSOL 2 ET TECHNOSOL 4 (CORTET ET AL., 2015).....	65
FIGURE 50. ORGANISATION ET COMPOSITION DE TECHNOSOL 5	68
FIGURE 51. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE DES PROFILS DE TECHNOSOL 1, TECHNOSOL 3 ET TECHNOSOL 4	70
FIGURE 52. EVOLUTION TEMPORELLE DE LA MACROPOROSITE (EN HAUT), MESOPOROSITE (INTERMEDIAIRE) ET MICROPOROSITE (EN BAS) POUR TECHNOSOL 1, TECHNOSOL 3 ET TECHNOSOL 4	71
FIGURE 53. EVOLUTION DE LA QUANTITE D'EAU TOTALE STOCKEE DANS DES SOLS AU SEIN D'UN GRADIENT D'AGE ET D'ANTHROPISATION (TIFAFAI ET AL., 2017)	72
FIGURE 54. EVOLUTION DE L'INDICATEUR "CRITICAL WATER STORAGE CAPACITY" POUR UN TECHNOSOL ANCIEN (T1) ET UN TECHNOSOL RECENT (T3) (TIFAFAI ET AL., 2017)	73
FIGURE 55. COMPARAISON ENTRE LA TENEUR EN EAU MESUREE A 50 CM DE PROFONDEUR DANS TECHNOSOL 2 ET SIMULATIONS EN CONSIDERANT DES PROPRIETES CONSTANTES OU DYNAMIQUES	73
FIGURE 56. COMPARAISON ENTRE DONNEES EXPERIMENTALES (COURBE BLEUE) ET SIMULEES (COURBE VERTE) A PARTIR DU MODELE ETABLI SUR LES DONNEES TECHNOSOL 1 DE LA PREMIERE ANNEE ET TESTEES SUR LES ANNEES SUIVANTES (EN LIGNE)	74
FIGURE 57. EVOLUTION DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE A SATURATION ESTIMEE PAR MODELISATION ENTRE 2009 ET 2012, AINSI QUE DISTRIBUTION DE TAILLE DE PORES SUR LA MEME PERIODE POUR TECHNOSOL 1	75
FIGURE 58. EVOLUTION DU FER EXTRACTIBLE ET DE LA CONCENTRATION EN CALCITE DANS TECHNOSOL 3 A T0 ET APRES 2 ANS EN LYSIMETRE	76
FIGURE 59. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN SO_4^{2-} ET Ca^{2+} DANS LES PERCOLATS COLLECTES SUR TECHNOSOL 1 POUR DES COLONNES DE LABORATOIRES, DES COLONNES DE LYSIMETRIQUES ET DES PARCELLES EXPERIMENTALES	77
FIGURE 60. EVOLUTION AVEC LA PROFONDEUR DE LA CONCENTRATION EN CARBONE ORGANIQUE, EN AZOTE TOTAL ET EN PARTICULES INFERIEURES A 2 MM DU SUBSTRAT INITIAL ET DU SUBSTRAT APRES 4 ANS SOUS DIFFERENTES COUVERTURES DE SOL	78
FIGURE 61. EVOLUTION DU POTENTIEL REDOX DANS TECHNOSOL 1 EN FONCTION DE LA PROFONDEUR ET DU TEMPS	79
FIGURE 62. A) COURBES CUMULEES DES PRECIPITATIONS (Q_{IN}) ET FLUX D'EAU SORTANT D'UN SUBSTRAT NEUF ($Q_{OUT\ S0}$) ET D'UN SUBSTRAT EVOLUE ($Q_{OUT\ S4years}$) ; B) COURBES INSTANTANEEES DES FLUX DE PRECIPITATIONS (RAINFALL), D'EAU SORTANT D'UN SUBSTRAT NEUF (RUNOFF – VIRGIN) ET D'UN SUBSTRAT EVOLUE (RUNOFF – AGED) (DE VILLE ET AL., 2017)	80
FIGURE 63. EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DES CONCENTRATIONS EN AZOTE TOTAL ET EN PHOSPHORE DISPONIBLE DANS TECHNOSOL 2 ET TECHNOSOL 4.....	80
FIGURE 64. SCHEMA CONCEPTUEL REPRESENTANT L'EVOLUTION DES PROPRIETES, DES FONCTIONS ET DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR UN TECHNOSOL AU COURS DU TEMPS (LSE, 2013)	82
FIGURE 65. EVOLUTION DU SCHEMA RELATIONNEL FAISANT LE LIEN ENTRE INDICATEURS DU SOL - FONCTIONS DU SOL – COUVERTURE DU SOL - SERVICES ECOSYSTEMIQUES	87
FIGURE 66. SCHEMA DU MODELE D'EVALUATION SEMI-QUANTITATIVE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR UN TECHNOSOL	91
FIGURE 67. EXEMPLE DE FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL DESTISOL APPLIQUE A UN PROJET D'AMENAGEMENT D'UNE FRICHE URBAINE	92
FIGURE 68. PRINCIPALES ETAPES DE LA DEMARCHE DE CONSTRUCTION DE SOL EN VUE DE REHABILITER OU D'AMENAGER UN SITE DEGRADE.....	97
FIGURE 68. MISE EN ŒUVRE ET RESULTAT D'UNE EXPERIMENTATION IN SITU DE CULTURES DE LEGUMES SUR TECHNOSOL 2 (PROJET AGROTECHNOSOL)	100

FIGURE 69. LOGIGRAMME DE L'OUTIL D'AIDE A LA DECISION SUPRA..... 104

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. ORGANISATION THEMATIQUE ET CHRONOLOGIQUE DES PROJETS DE RECHERCHE ET DES THESES ET POST-DOCS ENCADRES	11
TABLEAU 2. EVALUATION SEMI-QUANTITATIVE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR QUATRE TYPES DE SOLS URBAINS, D'APRES MOREL ET AL. 2014	19
TABLEAU 3. NOMENCLATURE DES OCCUPATIONS BIOPHYSIQUES DES SOLS DES TERRITOIRES ARTIFICIALISES.....	34
TABLEAU 4. ADAPTATION DE LA TYPOLOGIE DES ESPACES VERTS URBAINS DE L'ASSOCIATION DES INGENIEURS TERRITORIAUX DE FRANCE (DAMAS ET COLON, 2016).....	35
TABLEAU 5. EVOLUTION DE LA DENSITE EN DIFFERENTES ESPECES AU COURS DU TEMPS (HEDDE ET AL., SOUMIS) ; CONTAINMENT = TECHNOSOL 4 ; WATER BUFFER = TECHNOSOL 2.....	64
TABLEAU 6. PROPOSITION DE LISTE ETENDUE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LES TECHNOSOLS.....	84
TABLEAU 7. PROPOSITION DE LISTE REDUITE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR LES TECHNOSOLS.....	85
TABLEAU 8. LISTE D'INDICATEURS DU SOL A CONSIDERER DANS LA DEMARCHE D'EVALUATION DE LA QUALITE DU SOL	88
TABLEAU 9. LISTE DE FONCTIONS DU SOL A CONSIDERER DANS LA DEMARCHE D'EVALUATION DE LA QUALITE DU SOL	89
TABLEAU 10 : NOMENCLATURE DES COUVERTURES DE SOL.....	89

1. Introduction générale

1.1. Contexte et objectifs

Ce Mémoire s'appuie sur des travaux de recherche menés de 2002 à 2017. Ils se sont efforcés d'apporter des éléments de réponse aux enjeux environnementaux associés aux milieux fortement anthropisés que sont les zones urbaines et industrielles, en particulier dans leurs composantes pédologiques. En effet, de par sa position aux interfaces, le sol est bien souvent l'un des compartiments les plus affectés par les activités humaines. En même temps, il constitue également la clé de la réussite d'opérations de réhabilitation et de gestion durable de l'environnement. L'étude approfondie du fonctionnement et de l'évolution des sols modifiés ou créés par l'Homme – les Technosols – est alors susceptible de remettre en cause certains paradigmes en liens avec la science des sols développée historiquement sur sites forestiers et agricoles. Si une meilleure connaissance des Technosols ne remet pas en cause l'assertion selon laquelle les sols sont une ressource non renouvelable – c'est-à-dire dont le taux de remplacement est inférieur à celui de sa consommation –, elle la nuance dans une certaine mesure. Il est bien connu et largement documenté que les interventions de l'Homme peuvent conduire à une dégradation significative des propriétés des sols. Néanmoins, il a aussi été démontré que les actions humaines, non seulement pouvaient épargner certaines fonctions essentielles des sols, mais permettaient aussi, dans certaines situations, d'influencer les propriétés des sols pour générer les conditions d'une augmentation du niveau de services écosystémiques rendus. Il ne s'agit donc pas ici d'avancer que nous sommes actuellement capables de recréer artificiellement des écosystèmes analogues dans leur complexité à la couverture pédologique naturelle, mais que des solutions existent qui permettent de contrebalancer, à une échelle encore très locale, les effets délétères de l'anthropisation des territoires. Ces approches, qui peuvent être regroupées sous le terme de génie pédologique, nécessitent cependant des interventions humaines plus ou moins intenses (depuis la mise en œuvre d'un diagnostic de la qualité des sols, jusqu'au transport, au mélange et à la mise en place de volumes conséquents de matériaux pour construire des sols). N'y aurait-il alors pas une certaine forme de cohérence à intensifier la gestion de sols en milieux urbains et industriels, eux qui ont déjà subi de fortes pressions anthropiques ? Si la mise en œuvre du génie pédologique impose bien entendu une connaissance approfondie du fonctionnement et des processus pédogénétiques affectant les sols très anthropisés qu'il entend modifier ou créer, il s'agit tout autant de pouvoir appréhender, dans la durée, les impacts des modes de gestion sur leurs fonctionnalités et leur capacité à rendre des services.

1.2. Structure et organisation du Mémoire

Le contexte des recherches évoquées ici nécessite un ancrage bibliographique pour décrire à la fois la dynamique d'artificialisation des territoires et les travaux conduits pour appréhender le système sol de ces milieux anthropisés. Ainsi, une revue de la littérature permettra en premier lieu d'éclairer :

- Les caractéristiques de l'anthropisation des sols à différentes échelles et les enjeux sociétaux qu'elle implique ;
- La manière dont les Technosols peuvent répondre aux problématiques des territoires anthropisés par la fourniture de services écosystémiques, ce qui implique en particulier de pouvoir évaluer leur qualité ;
- Le fait que les Technosols sont des écosystèmes dynamiques, soumis à une pédogenèse précoce susceptible de faire évoluer significativement leurs propriétés physico-chimiques.

Partant de cet état des lieux qui soulignera la nécessité de mieux connaître les Technosols pour répondre aux enjeux des milieux anthropisés, mon propos sera structuré en cinq questions (Figure 1). La première abordera les développements récents du génie pédologique, puis je poursuivrai par les travaux que j'ai pu mener à la fois sur l'étude du fonctionnement des Technosols construits et sur leur pédogenèse. Ensuite, je traiterai des recherches auxquelles j'ai récemment contribué sur l'évaluation des services écosystémiques rendus par les Technosols en général. Enfin, je détaillerai les principales pistes de recherche que j'entends mener à l'avenir et qui vise à mobiliser et amplifier les connaissances sur les

Technosols afin d'envisager comment optimiser les services écosystémiques rendus par les milieux anthropisés.

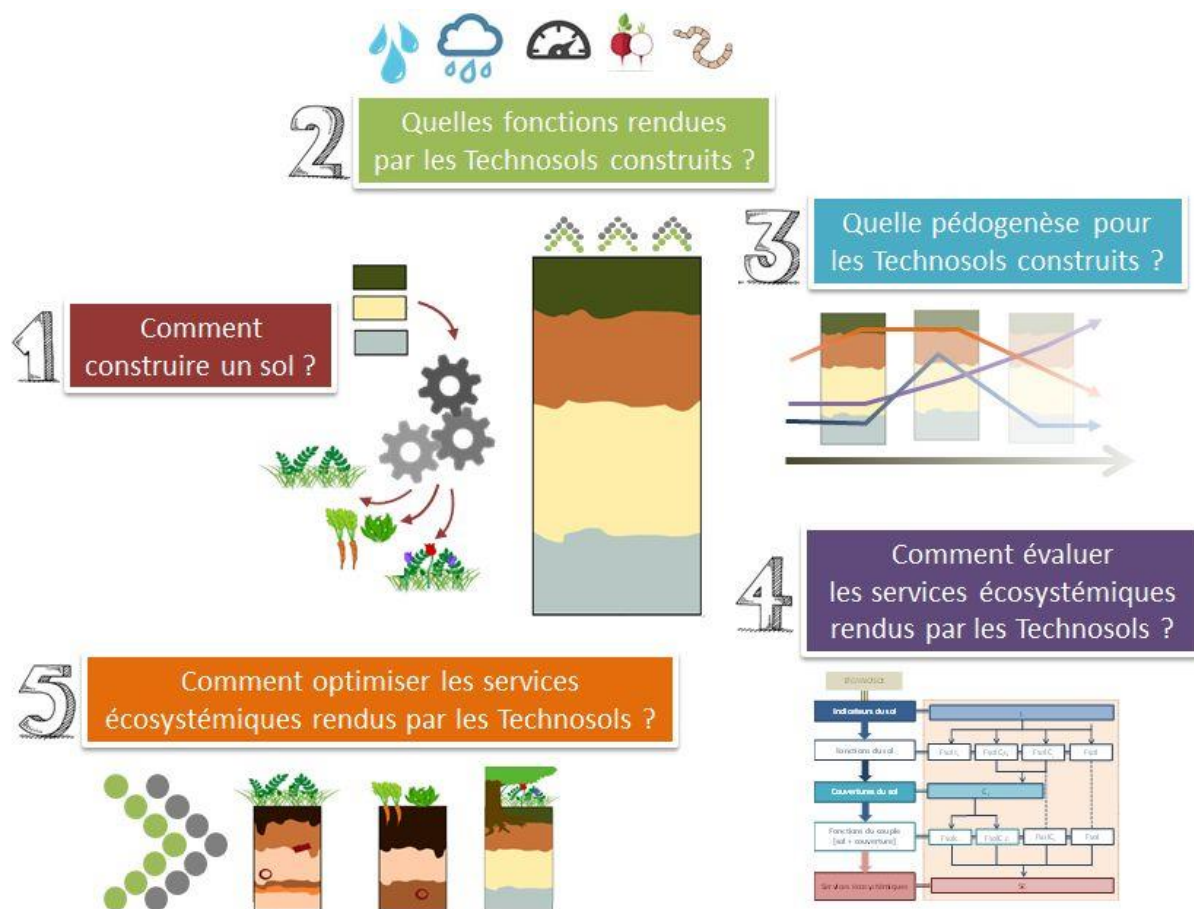


Figure 1. Structuration du Mémoire HDR en cinq questions de recherche

1.3. Cadre des travaux

Après ma thèse en 2007, j'ai assuré les fonctions de chef de projet au sein du Département Réhabilitation et Gestion de Sites du Groupe TVD (devenu depuis Valterra). Cette étape dans ma carrière m'a permis de concevoir et de mettre en œuvre des diagnostics et des plans de gestion de sites contaminés, mais surtout de contribuer au développement technique de la construction de sol. Ensuite ayant été recruté en tant que Maître de Conférences en 2009, j'ai eu la chance de co-encadrer des doctorants : Ryad Bouzouidja (2011-2014) « Fonctionnement hydrique d'un Technosol superficiel - application à une toiture végétalisée » et Anne Blanchart (2015-2018) « Prise en compte des potentialités des sols dans les programmes d'aménagement urbain ». J'ai également eu l'opportunité de travailler en étroite collaboration avec trois chercheurs post-doctorants : Frédéric Rees (2015-2016) « Modélisation du transport réactif dans des Technosols construits pour la production de biomasse : évolution du stock de carbone organique », Robin Dagois (2016-2017) « Monitoring des pools de matières organiques dans des Technosols construits pour la production de biomasse » et Noémie Janot (2017-2019) « Modélisation de la géochimie de Technosols construits à partir de stériles miniers de Terres rares ». J'ai été associé à plusieurs programmes de recherche dans lesquels j'ai pu jouer différents rôles. Je figurais parmi les partenaires au sein de Biotechnosol (2008 – 2011, GESSOL), Sols Urbains (2011 2016, Grand Nancy), OSER TERRA (2016 – 2017, Métaprogramme INRA) et AgroTechnosol (2015 – 2016, OTELo/Région Lorraine). J'ai assumé des responsabilités de tâches pour Siterre (2011 – 2014, ADEME), Lorver (2013 – 2017, FEDER/Région Grand Est), Destisol (2015 – 2017, ADEME), Astral (2016 – 2019, PSDR) et Bioxyval (2016 – 2018, ADEME). Enfin, j'ai assuré les fonctions de porteur avec Simon Edelblutte (LOTERR, EA Université de Lorraine) pour le projet REVERTER (2013 – 2014) et j'ai piloté le projet MOLETTE (2014 – 2015, PEPS) (Tableau 1).

La mise en perspective de ces collaborations est révélatrice de l'évolution de mes thématiques scientifiques au cours des dix dernières années. Ainsi, mes travaux se sont dans un premier temps essentiellement centrés sur la construction de sols puis sur l'étude de leur fonctionnement (incluant les toitures végétalisées), ainsi que sur leur évolution pédogénétique. Nombre de projets dans lesquels j'ai été impliqué ont ainsi pu associer au moins deux de ces trois volets (*i.e.* Biotechnosol, SITERRE, LORVER). A partir de 2012 – année qui correspond à la période à partir de laquelle le concept a diffusé au sein du LSE par l'intermédiaire de J.L. Morel -, la question de l'évaluation des services écosystémiques a pris une place de plus en plus importante, notamment dans des travaux pluridisciplinaires (*e.g.* géographie, économie, urbanisme, sociologie) (Tableau 1).

Tableau 1. Organisation thématique et chronologique des projets de recherche et des thèses et post-docs encadrés

		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Construction de Technosols	Thèse G. Séré											
	Chef de projet TVD											
	SITERRE											
	LORVER											
	Bioxyval											
Fonctionnement des Technosols construits	Thèse G. Séré											
	Thèse R. Bouzouidja											
	Post-doc F. Rees											
	Post-doc R. Dagois											
	Post-doc N. Janot											
	Biotechnosol											
	SITERRE											
	AgroTechnosol											
LORVER												
Astral PSDR												
Pédogenèse des Technosols construits	Thèse G. Séré											
	Thèse R. Bouzouidja											
	Biotechnosol											
	SITERRE											
	MOLETTE											
LORVER												
Evaluation des services écosystémiques rendus par les Technosols	Thèse A. Blanchart											
	Grand Nancy											
	REVERTER											
	DESTISOL											
	Astral PSDR											
	OSER TERRA											

2. Enjeux et état de l'art

Bien que fortement impactés par les activités humaines, les Technosols, classe à laquelle appartient l'essentiel des sols des milieux urbain et industriel, sont capables de rendre des services écosystémiques essentiels à la viabilité des sociétés humaines. Mais aujourd'hui encore, ils sont une ressource insuffisamment reconnue pour la conception et la construction de la ville durable (Morel *et al.*, 2014).

2.1. Éléments de définition et de positionnement du concept de services écosystémiques

Initialement emprunté au monde de l'économie, le terme « service écosystémique » a été proposé pour la première fois en 1997 par un livre pionnier (Daily, 1997) et par un article fondateur (Costanza *et al.*, 1997). Sa première définition – largement discutée et débattue depuis - était : « les biens (tels que la nourriture) et les services (tels que l'assimilation des déchets) de l'écosystème représentent les bénéfices que les populations humaines tirent, directement ou indirectement, des fonctions de l'écosystème » (Costanza *et al.*, 1997). Des organisations institutionnelles, comme le Commissariat Général au Développement Durable en France, se sont appropriées ce concept et en ont proposé des déclinaisons plus orientées. Les biens et services écosystémiques sont alors définis comme des avantages socio-économiques retirés par l'Homme de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes que l'Homme peut éventuellement modifier ou exploiter en apportant du capital ou du travail (CGDD, 2016) (Figure 2). Dans tous les cas, ces définitions permettent d'introduire et de positionner d'autres concepts. En premier lieu, il faut citer celui de capital naturel qui décrit les constituants biotiques et abiotiques des écosystèmes. En second lieu, apparaît la notion de fonction écologique qui recouvre « les processus et fonctions de l'écosystème, en particulier les interactions biologiques, chimiques et physiques entre les composants de l'écosystème » (Commissariat général au développement durable, 2016). Les fonctions et processus ne sont pas des produits finis ; ce sont des intermédiaires à la production finale de services écosystémiques. » (Boyd *et al.*, 2007). Enfin, le terme « avantages » exprime de manière complémentaire les intérêts directs et indirects que les bénéficiaires humains retirent du fonctionnement des écosystèmes.

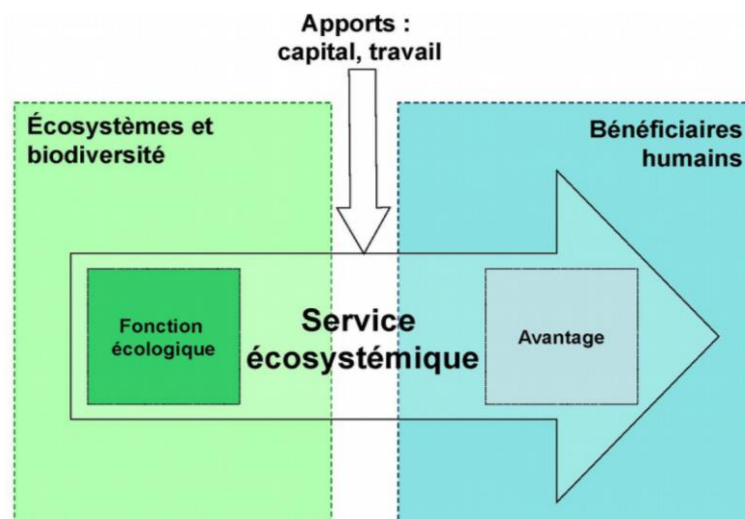


Figure 2 : Éléments constitutifs d'un service écosystémique (CGDD, 2016)

Le nombre de publications scientifiques citant les services écosystémiques ne cesse d'augmenter depuis 1975, en particulier depuis la fin des années 90 (Haase *et al.*, 2014) (Figure 3).

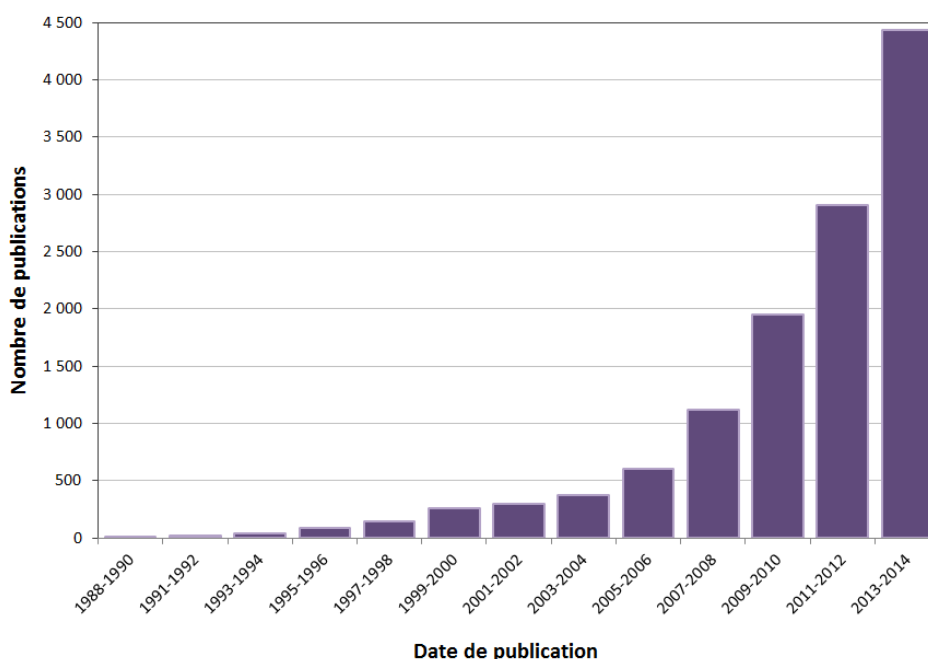


Figure 3. Evolution de l'apparition des termes « services écosystémiques » dans les articles de la littérature (Web of Science) entre 1988 et 2014

Dans les publications scientifiques, les services rendus par les écosystèmes sont souvent présentés sous formes de listes et de classifications. Elles varient en fonction du contexte de l'étude considérée et en fonction des avancées scientifiques. Ces listes ont intégré progressivement des valeurs écologiques, économiques et socio-culturelles supplémentaires, puis se sont ouvertes progressivement à l'aide à la décision. Ils sont la plupart du temps regroupés en trois catégories : « régulation », « approvisionnement » et « culturel ». En 2003, le Millenium Ecosystem Assessment a proposé de catégoriser les services écosystémiques sur la base de regroupements fonctionnels, organisationnels et descriptifs (MEA, 2003) en ajoutant également une catégorie « support » témoignant de la capacité de l'écosystème à maintenir ses propriétés et son intégrité. Cette catégorie, très discutée, a été progressivement abandonnée, dans la plupart des classifications, au profit du terme de « capital naturel ».

Comme nous l'avons vu, le concept de services écosystémiques fait l'objet d'études de plus en plus nombreuses car la gestion raisonnée et optimisée des écosystèmes apparaît indispensable à la viabilité de nos sociétés (Gómez-Baggethun et Barton, 2013). Cependant pour ce qui concerne les écosystèmes terrestres, elles se focalisent aujourd'hui dans une large mesure sur les systèmes forestiers et les agrosystèmes. Ceci s'explique en premier lieu par le fait que ces milieux font l'objet, depuis plusieurs millénaires, d'une gestion de plus en plus intense par l'Homme. D'autre part, leur exploitation s'est justement longtemps attachée à tirer profit d'un nombre restreint de services (*i.e.* approvisionnement en biomasse à vocation alimentaire et non alimentaire), même si la gamme des services et fonctions qu'ils peuvent potentiellement offrir est beaucoup plus vaste (*e.g.* régulation des pluies acides, prévention de l'érosion, habitat pour la biodiversité, tourisme, stockage de carbone). Au contraire, malgré leur importance croissante au sein de nos territoires, les sols artificialisés, en particulier de milieux urbains et industriels, restent peu étudiés pour leur contribution à la fourniture de services écosystémiques (Blanchart *et al.*, 2017).

2.2. Dynamique territoriale de l'anthropisation des sols

Logiquement, la cartographie des occupations de sols au sein du territoire français met en évidence une concentration des zones artificialisées dans les agglomérations (Figure 4). De manière complémentaire, l'artificialisation se manifeste aussi par un développement le long des grands axes de communication. De tout temps, l'extension des zones artificialisées s'est effectuée de manière majoritaire en périphérie

immédiate des espaces urbains et industriels existants ; ceci est encore vrai entre 2006 et 2012 (Figure 4). Ceci justifie le terme d'étalement urbain fréquemment utilisé pour décrire ce processus.

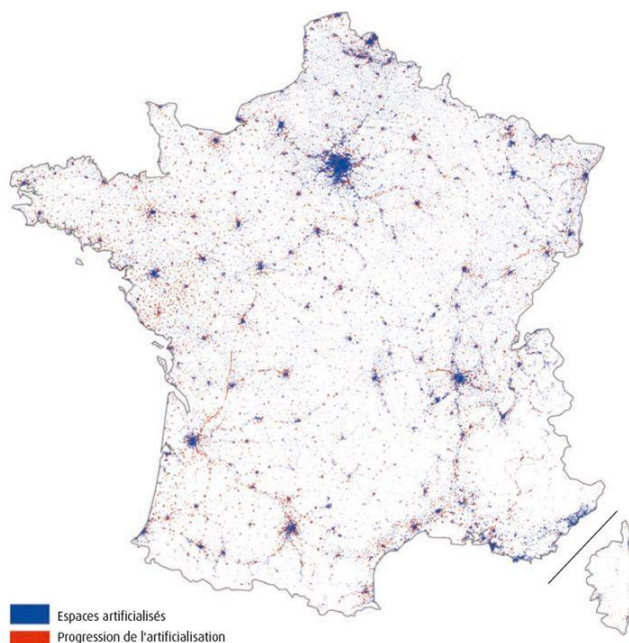


Figure 4. Espaces artificialisés entre 2006 et 2012 sur le territoire français métropolitain (UE – SOeS, CORINE Land Cover)

L'artificialisation des sols se traduit concrètement par la construction de bâtiments, d'infrastructures de transport et de stationnement, voire d'espaces végétalisés à vocation ornementale. Elle est souvent liée au développement économique et à la croissance démographique des territoires, mais également aux évolutions des attentes des populations en termes de modes de vie.

Selon la méthode Eurostat, le terme « Terres couvertes de sols par surfaces artificielles » désigne de manière explicite les surfaces imperméabilisées. La France comptabilise 5,2 % de sols imperméabilisés. C'est supérieur à la moyenne européenne (4,1 %), mais inférieur à la plupart de nos voisins immédiats européens (Figure 5). La surface de zones bâties apparaît comparable à la moyenne européenne (1,5 % en France et 1,3 % pour l'UE), alors que les surfaces de zones non bâties (*i.e.* voies de circulation, parkings) sont significativement plus élevées.

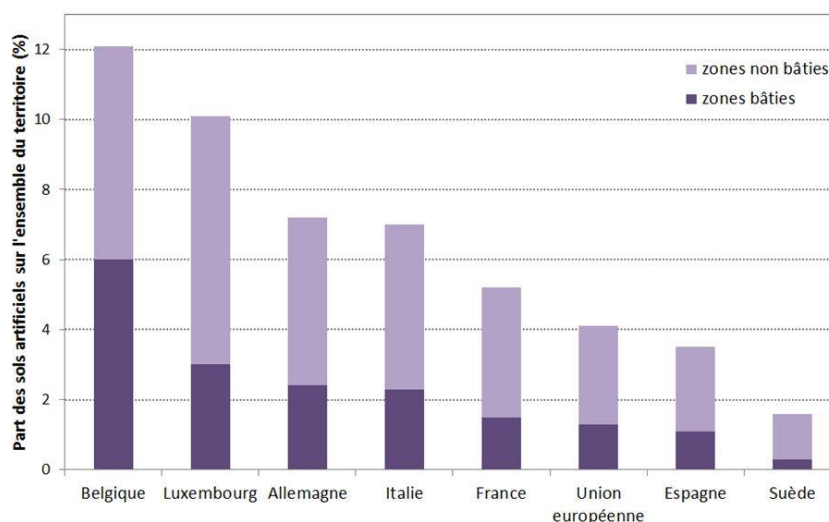


Figure 5. Terres couvertes de sols par surfaces artificielles (zones bâties et non bâties) dans différents pays de l'Union Européenne en 2012 (Eurostat, 2016)

Les données Françaises acquises par la méthode Agreste sont différentes puisque la classe des sols artificialisés recouvre une plus grande diversité d'occupation de sols (y compris les espaces verts aménagés) qui ne sont pas nécessairement imperméabilisés. Cette comptabilité conduit à une estimation des surfaces de sols artificialisés équivalentes à 9,3 % du territoire métropolitain (5,1 millions d'ha) (Agreste, 2015). Après que le taux d'artificialisation ait connu un maximum entre 2006 et 2008 (+ 1,8 % par an), celui-ci s'est ensuite stabilisé autour de 0,5 % par an entre 2008 et 2015 (Agreste, 2015 ; CGDD, 2015). Le dernier fait d'importance est que l'anthropisation des sols s'effectue très majoritairement au détriment des surfaces agricoles. Il est intéressant de noter que l'habitat individuel est la première cause d'artificialisation des terres (Agreste, 2015). Ceci est cohérent avec les évolutions sociétales précédemment évoquées qui se traduisent par une envie de la population française de vivre dans des zones d'habitation de moyenne densité. Ces données sont également cohérentes avec la forte proportion de zones non bâties en France qui s'expliquent par le besoin de relier ces habitants aux réseaux routiers, tout en leur offrant des espaces de stationnement.

Le ralentissement récent de l'étalement urbain est à chercher d'une part dans la crise économique française en 2008 et d'autre part dans des choix politiques qui se sont traduits dans les réglementations et les documents d'urbanisme. Ainsi, les politiques locales d'urbanisme ont pu s'attacher à préserver davantage les espaces agricoles, naturels et forestiers, en application des lois du 3 août 2009 (Grenelle I) et du 12 juillet 2010 (Grenelle II) sur l'environnement, et de la Loi de modernisation de l'agriculture et de la pêche du 27 juillet 2010 (Agreste, 2015). Cette politique émergente du renouvellement urbain vise bien à encourager la construction de la ville sur elle-même.

L'artificialisation du territoire engendre globalement une dégradation des services écosystémiques rendus. En se faisant au détriment de terres agricoles, elle conduit en premier lieu à réduire le service d'approvisionnement alimentaire et elle augmente aussi les besoins en autres services écosystémiques. Les effets de l'artificialisation sur la destruction d'habitats naturels et, indirectement, sur la fragmentation et le cloisonnement des milieux naturels ont également été documentés (CGDD, 2015). L'une des conséquences problématiques de l'anthropisation les plus mises en lumière récemment est la réduction de l'infiltration de l'eau - et donc de l'augmentation du ruissellement - du fait de l'imperméabilisation des sols induite par la construction de bâtiments, routes ou parkings (Figure 6). Les services de régulation des inondations et des glissements de terrain font alors défaut, entraînant de graves dégâts matériels.

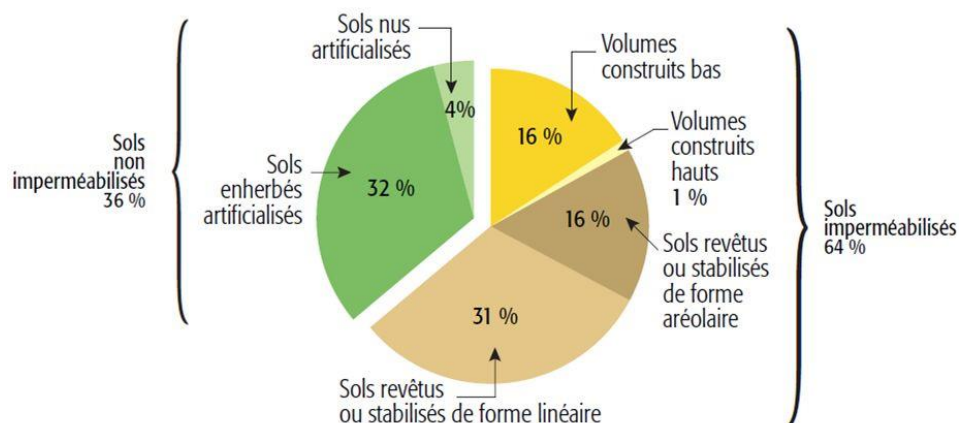


Figure 6. Répartition des superficies artificialisées par occupation du sol (Agreste, 2015)

Les données présentées ici l'indiquent : si le grignotage des espaces artificialisés n'est pas stoppé, les mesures qui ont été prises permettent aujourd'hui de limiter l'étalement urbain. Il apparaît ainsi que, au-delà du souci central de protéger les sols naturels et agricoles, l'un des prochains enjeux majeurs serait de mieux connaître et de mieux gérer les sols déjà artificialisés pour répondre aux enjeux environnementaux spécifiques aux zones urbaines et industrielles.

2.3. Les services écosystémiques pour répondre aux enjeux environnementaux des milieux anthropisés

De nos jours, 54% de la population mondiale vit en milieu urbain et selon l'Organisation des Nations Unies, ce taux devrait atteindre 66% d'ici à 2050 (UN, 2014). Associé à cette croissance majeure, le phénomène d'étalement urbain (qui est loin de diminuer au niveau mondial !) pourrait se traduire par un triplement des superficies artificialisées à l'échelle planétaire d'ici à 2030 (Schneider *et al.*, 2009). Des données similaires, spécifiques aux zones accueillant des activités industrielles, sont beaucoup plus complexes à trouver car elles sont assimilées aux zones urbaines.

Aujourd'hui, les milieux anthropisés et en particulier les zones urbaines concentrent de nombreuses questions environnementales (*e.g.* qualité de l'air, atténuation de l'îlot de chaleur urbain, régulation du risque inondation, autosuffisance alimentaire, dissémination de contaminants) (Craul, 1992, Jenerette *et al.*, 2011, ONU, 2014). Dans un contexte de forte expansion urbaine, ces enjeux locaux s'ajoutent aux enjeux globaux (*e.g.* régulation climatique, qualité des milieux) et font des zones anthropisées des espaces où se concentrent désormais une réelle attention aux questions environnementales (Bolund et Hunhammar, 1999, Chambers *et al.*, 2016). Ceci se traduit de manière emblématique par la place de plus en plus forte donnée au végétal en ville (Vidal-Beaudet, 2015). Il y joue un rôle social, culturel et écologique (Nielsen and Hansen, 2007). En effet, la nature en ville permet d'améliorer notre santé physique et mentale, l'air que nous respirons ou encore l'eau que nous utilisons (Douglas et James, 2015). A ce titre, le sol est un compartiment essentiel de l'écosystème urbain, contribuant directement ou indirectement à notre qualité de vie (de Hollander et Staatsen 2003 ; van Kamp et al. 2003). Toutefois, les approches actuelles ne contribuent guère à intégrer les sols urbains comme une ressource potentielle fournissant des services.

La gestion actuelle des sols anthropisés illustre bien les limites dans les approches qui sont développées. Un bon exemple est la question de la gestion des sols contaminés. Les techniques de réhabilitation - qu'elles reposent sur le traitement, le confinement ou l'évitement - se focalisent essentiellement sur le devenir des polluants sans réintégrer la contribution de cette couverture pédologique - même fortement dégradée - au sein des territoires. C'est ce que nous avons voulu évoquer dans un article de synthèse sur les services écosystémiques rendus par les sols contaminés en Chine (Ding *et al.*, 2016) et par le schéma ci-dessous qui poursuit la chaîne des implications, au-delà de la question de la gestion de la pollution (Figure 7).

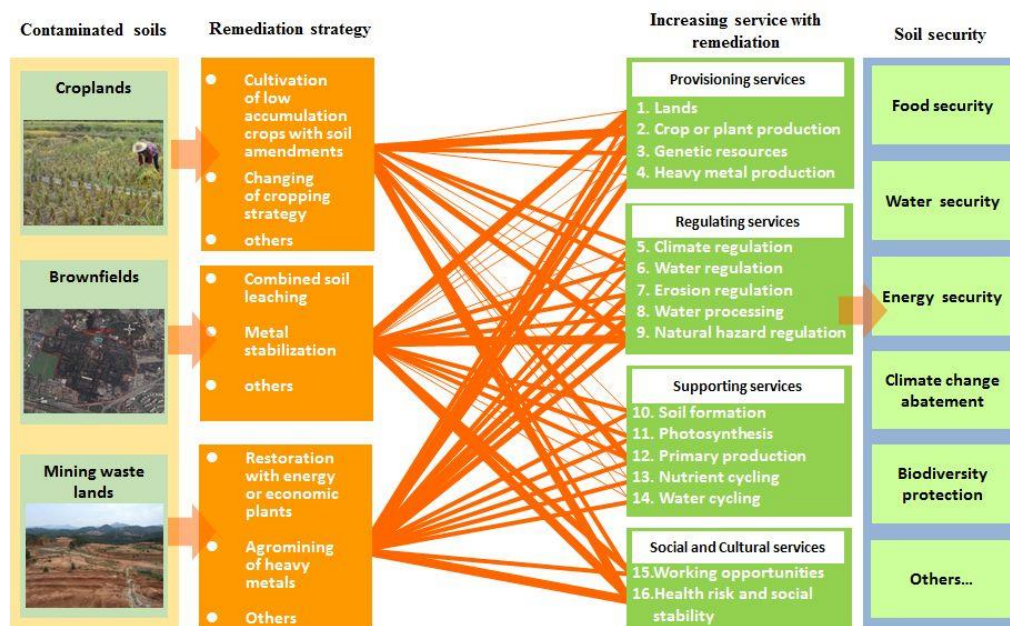


Figure 7. Contribution des approches de réhabilitation de sols contaminés aux services écosystémiques et à la sécurité des sols (Ding *et al.*, 2016)

La transposition du concept de services écosystémiques dans les environnements urbains et l'aménagement urbain est récente (Bolund et Hunhammar, 1999). L'écosystème urbain émerge progressivement comme un sujet de plus grand intérêt, avec une description et une classification des services écosystémiques urbains (TEEB, 2011). Cependant, les travaux menés jusqu'à présent se réfèrent majoritairement à des sujets/services spécifiques, tels que le stockage du carbone dans les villes (Davies *et al.*, 2011 ; Jim et Chen, 2009, Lorenz *et al.*, 2009 ; Pouyat *et al.*, 2009), la production de biomasse (Lehmann, 2010) et la régulation de l'îlot de chaleur urbain (Cameron *et al.*, 2012; Jenerette *et al.*, 2011, Lehmann *et al.*, 2014, Norman *et al.*, 2012).

Les surfaces artificialisées se développent en premier lieu pour assurer des « services anthropiques » (*e.g.* activités économiques, logement, transports, soins de santé). Néanmoins, la prise de conscience croissante des enjeux environnementaux précédemment évoqués fait apparaître la nécessité de prendre en compte et d'optimiser aussi les « services écosystémiques » rendus par les écosystèmes anthropisés, dont les sols sont des constituants essentiels.

2.4. Les sols des milieux fortement anthropisés sont majoritairement des Technosols

Définir l'objet sol des milieux fortement anthropisés n'est pas aisé. En effet, les acteurs de l'aménagement du territoire (*e.g.* élus, aménageurs, urbanistes) et des sciences du sol (*e.g.* agronomes, pédologues) n'ont pas la même porte d'entrée pour décrire cet objet. Les premiers adoptent une démarche orientée vers la spatialisation pour décrire les sols en milieu urbain ; considérant que tout sol situé dans une aire urbaine fait référence à un sol urbain. Au contraire, les pédologues s'attachent à caractériser un sol par son origine et sa genèse, en particulier par la prise en compte de l'impact de l'Homme sur ses propriétés intrinsèques. Ainsi, la classification internationale (IUSS, 2014) classe les sols contenant plus de 20% d'artefacts (*i.e.* matériaux créés, substantiellement modifiés ou amenés à la surface par des activités humaines) dans les 100 premiers cm ou présentant une couche imperméable continue en surface ou en profondeur comme des Technosols. Une définition approchante est donnée dans la classification française qui décrit les Anthroposols comme des sols fortement modifiés ou fabriqués par l'Homme (RPF, 2008). En première intention, les pédologues ne définissent pas les sols en fonction de leur position géographique au sein des territoires. Néanmoins, du fait de l'historique d'utilisation des sols en milieux anthropisés, il se trouve qu'une portion très significative de la couverture pédologique de ces espaces est constituée de Technosols ou d'Anthroposols. Ceci explique que le groupe de travail de l'IUSS (Union Internationale de Sciences du Sol intitulé) SUTIMA (Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas) soit celui qui ait contribué à l'émergence puis à la diffusion de la définition de Technosol à partir de 2004 et de l'intégration de cette classe dans la classification internationale (IUSS, 2006). Ainsi, si une forte proportion des sols des milieux urbains et industriels peut être rattachée à une classe ou groupe décrivant les sols anthropisés, il est important de rappeler qu'une part significative d'entre eux sont très faiblement modifiés et donc à classer parmi les sols naturels. Enfin, si les sols anthropisés se caractérisent par une forte proportion de couvertures de sol scellées, ils se distinguent aussi par une gamme particulièrement large de couvertures, terme qui décrit la « couche » superficielle qui recouvre le sol (*e.g.* scellé, semi-scellé, sol nu, agricole, potager, arbre, pelouse).

A partir de 2009, le nombre de publications utilisant ou étudiant le concept de Technosol a connu une croissance, certes limitée, mais régulière (98 publications recensées dans Web of Science) (Figure 8). Néanmoins, ce terme - plus restreint et qui reste très technique - restent largement moins utilisés que les termes plus généraux comme « urban soil » (719 publications recensées dans Web of Science) et « industrial soil » (159 publications recensées dans Web of Science) ; il semble alors constituer un marqueur des recherches conduites par des pédologues.

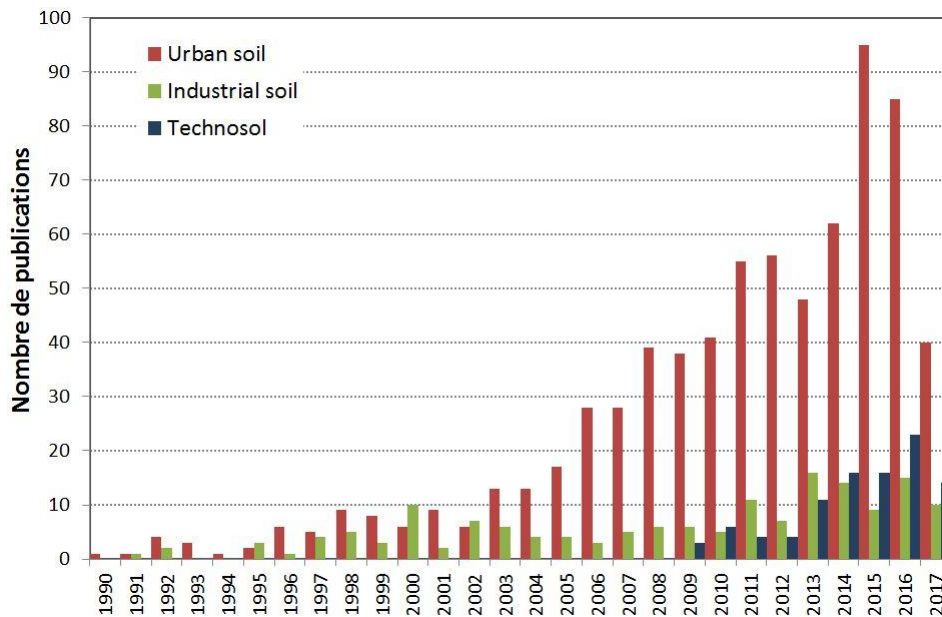


Figure 8. Nombre de publications scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture comportant les termes « Urban soil », « Industrial soil » et "Technosol" comme sujet de leur étude (consultation Web of Science le 17/07/17)

2.5. Services écosystémiques assurés par les Technosols

2.5.1. Intérêt témoigné à l'étude des services écosystémiques assurés par les Technosols

L'analyse bibliométrique indique une croissance constante du nombre de publications scientifiques entre 1995 et 2016 concernant les services écosystémiques, y compris celles traitant des services écosystémiques en milieu urbain et rendus par les sols (Blanchart *et al.*, 2017). Néanmoins, seules cinq publications mentionnent explicitement les termes « Technosol » et « ecosystem services » conjointement. Ce très faible nombre d'articles – dont tous sauf un sont français par ailleurs – semble traduire le fait que la communauté de science du sol et de pédologie, qui travaille avec les outils de classification, s'est encore très peu appropriée le concept de services écosystémiques.

La complexité et les particularités de l'environnement urbain nécessitent alors une adaptation des listes des services écosystémiques par rapport aux classifications précédemment établies. Effectivement, les études sur zones urbaines citent parfois des services écosystémiques absents des listes de de Groot (2010, 2002) ou du MEA (2005, 2003). Par exemple, Bolund & Hunhammar (1999) et Gómez-Baggethun & Barton (2013) tiennent compte de la réduction des nuisances sonores et du drainage de l'eau. Ces services sont également cités par Dobbs *et al.* (2011), qui y ajoutent encore "filtration des particules de poussière" et "productivité" (comprenant l'apport de biomasse sous forme d'arbres). L'apport énergétique est proposé comme service de support et le stockage de carbone comme service de régulation par Lauf *et al.* (2014). Gómez-Baggethun & Barton (2013) argumentent qu'à chaque type d'habitat correspond une liste de services. Il convient alors d'adapter les classifications à l'écosystème considéré.

2.5.2. Nature des services écosystémiques assurés par les Technosols

Il est alors possible de décliner la contribution de la couverture pédologique des milieux fortement anthropisés aux différents enjeux environnementaux précédemment évoqués en listant la manière dont ils y répondent, par le biais de services écosystémiques. Par extension, le compartiment végétal est intégré dans cette analyse considérant ses forts liens d'interdépendance avec le sol. Nous avons proposé récemment une description détaillée de la manière dont le système « sol urbain » ou « sol urbain + plante » pouvait assurer des services écosystémiques utiles à la viabilité des territoires anthropisés (Blanchart *et al.*, 2017).

2.5.3. Evaluation des services écosystémiques assurés par les Technosols

La relation entre la valeur économique de services écosystémiques à échelle urbaine et la gestion de l'occupation du sol a été montrée en Chine. Li *et al.* (2010) ont étudié les changements d'occupation de sol (terre cultivée, forêt, verger, pelouse, construction, plan d'eau, zone humide et sol nu) sur plusieurs années. Selon cette même étude, la valeur monétaire totale des services écosystémiques varie suivant le pourcentage de surface destinée à rendre des services (espaces verts et zones humides principalement). Les espaces verts, parcs et jardins auraient une influence particulièrement positive sur les services écosystémiques en milieu urbain. Lovell *et al.* (2010) relie des couvertures de sol avec des fonctions de l'écosystème qui sont évaluées par un score à dire d'experts. La méthode est conçue pour évaluer la multifonctionnalité de terrains agricoles, mais pourrait être utilisée sur des terrains urbains à petite échelle, selon Lovell & Taylor (2013).

Cette méthode d'attribution de scores a également été utilisée par Morel *et al.* (2014) pour proposer, pour la première fois, une évaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par les Technosols. Ils ont classé les sols urbains en quatre catégories de types ou de couvertures du sol selon leur capacité à rendre des services écosystémiques : sol scellé, sol de décharge, sol végétalisé pseudo-naturel et sol végétalisé transformé/construit par l'Homme (Tableau 2). Une perspective d'approfondissement de ce travail serait d'intégrer, en plus des fonctions du sol « écologiques », les fonctions du sol « non écologiques » (Blum *et al.*, 2005). Parmi les fonctions non écologiques, se retrouvent la base physique pour les activités humaines, la source de matériaux de construction et la fonction de support d'infra et superstructures. Les auteurs insistent sur les nombreuses interactions existantes entre les fonctions du sol et les activités humaines.

Tableau 2. Evaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par quatre types de sols urbains, d'après Morel et al. 2014

Services écosystémiques		Végétalisé Pseudo-naturel	Végétalisé Transformé/construit	Décharge	Scellé
Approvisionnement	Nourriture	++	++	(+)	0
	Biomasse non alimentaire	++	++(+)	++	0
	Réservoir de minéraux	+	+	+++	0
	Eau douce	0	+	0	+++
Régulation	Stockage de l'eau	++	+++	++	+
	Contrôle des inondations et du ruissellement	+++	++(+)	+	+(+)
	Atténuation de la pollution	++	+++	++	+++
	Climat global	+++	++	++	+
	Climat local	+++	++	+	0
	Biodiversité	+++	+++	++	0
	Espèces invasives	0	++	0	0
Culturel	Purification de l'air	+++	++	+	0
	Contrôle du bruit	++	+++	++	+
	Récréation/tourisme	+++	++	0	0
	Héritage de l'histoire humaine	+	+	+++	++
	Paysage	++	+++	+	+
Education	+++	+++	++	+	

2.6. Evaluation du fonctionnement et de la qualité des Technosols : place des propriétés physiques

2.6.1. Développement d'outils d'évaluation de la qualité des sols anthropisés

Evaluer les niveaux de services écosystémiques rendus par les sols et en particulier par les Technosols impose d'évaluer leur qualité (terme utilisé ici pour désigner la capacité des sols à assurer des fonctions exprimées par l'Homme). Des approches ont été développées dans cet objectif qui ont permis de créer des outils. Généralement, le procédé comprend une sélection d'indicateurs, puis l'intégration des résultats en un indice principal (Andrews *et al.*, 2004). Ces évaluations ont généralement pour but de déceler les défauts de fonctions agricoles. Elles sont fondées sur un système de notes qui pondèrent de

manière quantitative les valeurs indicatrices mesurées (Schindelbeck *et al.*, 2008; Velasquez *et al.*, 2007; Vrščaj *et al.*, 2008). Ainsi, l'outil européen « urban SMS » (<http://www.umweltbundesamt.at/en/urbansms>, consulté en ligne le 12 septembre 2017) a été développé suivant la méthode de Vrščaj (2008) dans le but de mettre en valeur les fonctions de sols urbains dans les processus d'aménagement. Cette méthode a cependant été critiquée comme étant difficilement applicable et transposable, car les indicateurs utilisent des paramètres difficiles d'accès pour les sols urbains et ne répondent pas au besoin d'indicateurs pour la gestion des sols urbains (Neel, 2012). Schindelbeck *et al.* (2008) ont approfondi la méthode de pondération par notes à l'aide de courbes normalisées. Celles-ci furent ensuite retravaillées dans les publications de Volchko *et al.* (2013a; 2013b). Les courbes ont été définies suivant des données expérimentales (valeur du paramètre – réponse à la fertilité), permettant de noter précisément les valeurs de chaque paramètre. Les auteurs du projet Snowman MCA (2014) s'en sont également inspirés pour mettre en œuvre une analyse multicritère évaluant la gestion du sol et les alternatives pour des remédiations durables.

D'autres méthodes permettent d'évaluer les sols sur base de sélection d'indicateurs. Dans le projet Uqualisol (GESSOL¹) c'est le caractère multifonctionnel du sol qui offre une orientation du choix d'usage. Il ne s'agit pas de mettre en évidence une ou plusieurs fonctions (le terme service écosystémique n'est pas utilisé dans ce programme), mais bien de développer un outil permettant d'une part d'estimer la plurifonctionnalité des sols et visant à préserver les sols les plus multifonctionnels lors de changements d'usages. Dans le projet européen ENVASSO², d'autres indicateurs ont été sélectionnés pour leur capacité à évaluer, non pas directement les fonctions du sol, mais les menaces relatives au sol : l'érosion, la perte de matière organique, la contamination, la compaction, la salinisation, la perte de biodiversité, l'imperméabilisation, les glissements de terrain et les inondations. Ce projet cherche ainsi à définir, à l'aide d'inventaires, des bases pour construire un système de surveillance des sols en Europe, à l'échelle continentale (rapports disponibles sur <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso>, consulté le 12 septembre 2017).

Les approches évoquées reposent sur un certain nombre de principes extrêmement intéressants. En premier lieu, elles sont la plupart du temps basées sur des systèmes de notation qui conduisent à une évaluation semi-quantitative. Ce type d'évaluation est bien adapté au contexte urbain. En effet, les notes sont une traduction très explicite pour le décideur qui peut facilement conduire à une prise de décision, tout en évitant l'écueil d'une évaluation trop précise qui serait forcément entachée d'une forte incertitude. Ensuite, ces méthodes font fréquemment appel à un mélange d'indicateurs reposant à la fois sur des observations, des mesures, des analyses, voire des calculs. Cette variété permet de décrire dans une large mesure la complexité du système sol et des interactions en son sein. Enfin, la plupart de ces études font le lien entre indicateurs et fonctions des sols et témoignent ainsi d'une prise en compte du fonctionnement du sol comme interface vivante.

Néanmoins, il apparaît que chaque méthode présentée est essentiellement adaptée à un contexte de recherche bien précis. Bien que les informations qu'elles contiennent soient utiles, aucune des études prises en exemples ne suffit en elle-même à répondre aux objectifs d'évaluation des liens entre indicateurs, fonctions des sols urbains et services écosystémiques. La première limite qui peut être mise en avant est la faible prise en compte de la diversité de couvertures du sol en milieux industriel et urbain (Beaudet, 2015). Dans un second temps, la plupart des grilles de notation des indicateurs utilisent des référentiels empruntés au milieu agricole. Encore une fois, compte-tenu des spécificités des couvertures mais aussi des constituants des Technosols, cette transposition ne peut être pleinement satisfaisante.

¹ Fonctions environnementales et gestion du patrimoine sol. Programme de recherche soutenu par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie de France. Synthèses et rapports disponible sur www.gessol.fr (consulté le 22 mars 2015).

² "ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring", Scientific Support to Policy, Joint Research Centre, 6e programme d'action de la Commission européenne.

La dernière limite qui peut être soulignée ici est que la plupart de ces approches reposent sur l'interprétation des propriétés bio-physico-chimiques des horizons de surface des sols. Si cette interface est essentielle à la compréhension du fonctionnement des Technosols, leur hétérogénéité de constitution impose aussi de considérer toute leur épaisseur. Ceci est particulièrement visible pour ce qui concerne le stockage de carbone dans les sols urbains qui peut se concentrer dans des couches / horizons profonds (Pouyat *et al.*, 2002).

2.6.2. Lien entre indicateurs, fonctions et services écosystémiques assurés par les sols

Le besoin d'intégrer le fonctionnement des sols dans les prises de décision sur l'aménagement du territoire apparaît actuellement comme une tendance émergente (Hewitt *et al.*, 2015). La conséquence est alors logiquement la nécessité de relier l'état des sols aux services écosystémiques, en passant par la description/mesures d'indicateurs mais aussi les fonctions du sol (Mc Bratney *et al.*, 2014). Adhikari et Hartemink (2015) font le constat, dans leur synthèse des travaux existants, que si le lien entre indicateurs et fonctions est fréquemment fait dans la littérature (comme nous l'avons noté dans la section précédente), le lien avec les services écosystémiques est plus rarement documenté. Dans ce travail de revue séminale, ces auteurs ont notamment conçu un diagramme permettant d'investiguer ces liens (Figure 9).

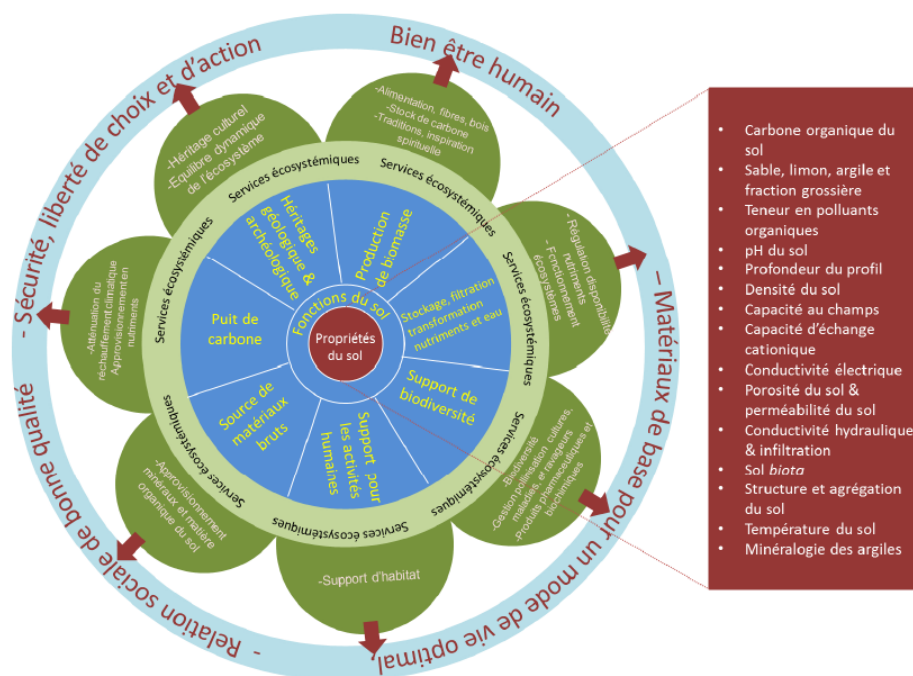


Figure 9 : Diagramme conceptuel reliant les principales propriétés du sol aux services écosystémiques et au bien être humain, en passant par les fonctions du sol (d'après Adhikari et Hartemink, 2015)

Ils explicitent ensuite les propriétés du sol qui ont été reliées aux différents services écosystémiques par de précédents auteurs. Ils font également état des disparités dans l'étude des services écosystémiques assurés ou reliés aux sols dans la littérature scientifique. Il apparaît en effet que les services d'approvisionnement et de régulation sont beaucoup plus étudiés que les services culturels. Parmi ceux-là, les questions d'approvisionnement en alimentation, fibre et combustible, de régulation du climat global et de contrôle des inondations sont très majoritaires. Enfin, les auteurs encouragent à la fois des recherches pluridisciplinaires et une approche holistique de ces questions (Adhikari et Hartemink, 2015).

2.6.3. La complexité du choix des indicateurs

Le choix des indicateurs est une étape à la fois décisive et complexe pour l'évaluation de la qualité des Technosols. Les fonctions du sol sont interconnectées de manière complexe et sont interdépendantes. De plus, certaines fonctions ou propriétés sont plus difficilement mesurables que d'autres. Par exemple,

sachant que les microorganismes dégradent la matière organique et libèrent ainsi des nutriments, il apparaît qu'un paramètre biologique comme la biomasse microbienne fait partie des indicateurs du cycle des nutriments. Cependant, des indicateurs chimiques comme le carbone organique du sol, l'azote total, le phosphore disponible et la capacité d'échange cationique sont tout aussi importants pour décrire cette fonction du sol (Williams et Hedlund, 2014). Face à la complexité du compartiment sol, il est difficile de déterminer quel indicateur est indispensable et quel indicateur risque d'induire l'interprétation en erreur. Il paraît donc important de cadrer la méthode de sélection, afin que celle-ci réponde aux objectifs de l'étude. De plus, le nombre de paramètres permettant de décrire la qualité des sols est très important et concerne aussi bien des propriétés physiques, mécaniques, chimiques, biologiques, toxicologiques et écotoxicologiques (Beudet, 2015).

Trois principaux outils d'évaluation de la qualité des sols présentés à la section 2.6.1 ont été analysés au regard des indicateurs qui sont mesurés et utilisés pour évaluer la qualité des sols au regard des usages qu'ils peuvent rendre. Une synthèse de ces indicateurs a été présentée dans un de nos articles récents (Blanchart *et al.*, 2018).

2.6.4. Les propriétés physiques des sols comme révélatrices du fonctionnement global

Un objectif récurrent des auteurs travaillant sur l'évaluation de la qualité des sols est la recherche d'indicateurs intégratifs permettant de réduire le nombre de paramètres des outils ou modèles développés.

Le terme de propriétés physiques des sols recouvre un grand nombre de paramètres qui, pour la plupart, sont très étroitement liés entre eux. Il est cependant possible de classer ces propriétés en fonction de l'influence que les facteurs externes (*i.e.* matériaux parents, hydrogéologie, topographie, climat, activité biologique) vont avoir sur eux (Figure 10). Il apparaît alors que certains paramètres varient à l'échelle décennale, centennale, voire millénaire au cours de l'évolution du sol causée par des processus pédogénétiques comme le lessivage ou l'altération des phases minérales (*i.e.* texture, densité réelle) (Duchaufour, 1983). D'autres varient selon une fréquence annuelle, selon l'expression « soil beat » trouvée par Mora & Lazaro (2014), sous l'influence du couvert végétal, de l'activité de la faune du sol et des conditions saisonnières (*i.e.* structure, conductivité hydraulique à saturation, porosité, capacité de rétention en eau, masse volumique apparente) (Gupta *et al.*, 2006 ; Farkas *et al.*, 2006 ; Schwen *et al.*, 2011 ; Jangorzo *et al.*, 2013 ; Kohler-Milleret *et al.*, 2013 ; Watteau *et al.*, 2013). L'intensité de ces variations est le plus souvent limitée. Enfin, certaines propriétés sont particulièrement sensibles aux facteurs externes comme l'humidité, voire l'hydromorphie qui dépendent autant des paramètres cités précédemment que de facteurs tels que la présence d'une nappe superficielle, la nature des matériaux parents, la topographie ou encore le climat (Duchaufour, 1983).

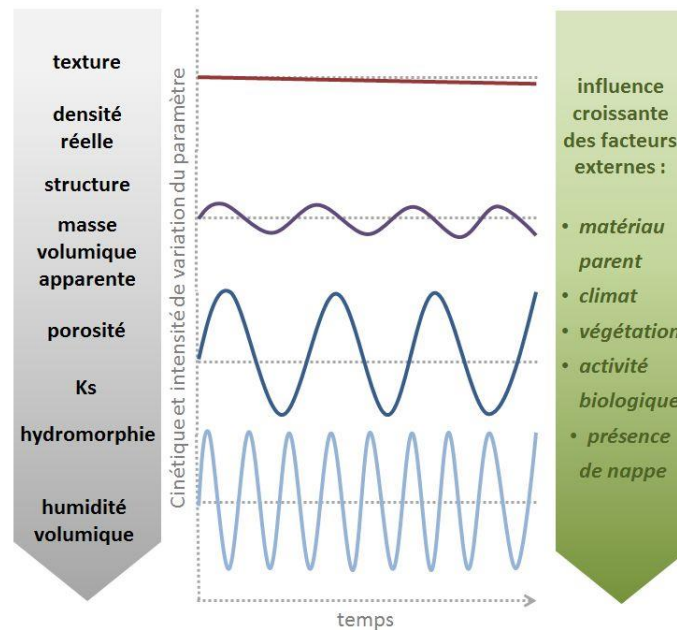


Figure 10. Cinétiques de variation temporelle des propriétés physiques du sol et influence des facteurs externes

Au vu de cette formalisation du lien entre fonctionnement du sol et variation des paramètres d'état des sols, il apparaît naturel de considérer la structure des sols comme une propriété intégratrice car elle répond avec une amplitude limitée aux modifications cycliques de l'environnement du sol (*e.g.* climat, cycle végétatif des plantes annuelles) et, avec une plus grande intensité, à des changements d'usage ou de gestion, voire à la pédogenèse. La structure des sols représente l'arrangement spatial, au sein d'un volume de sol, des constituants organiques et minéraux, ménageant entre eux la porosité du sol. Prenant en compte le concept d'agrégat, elle peut aussi être définie comme l'ensemble des caractères liés à la disposition spatiale des éléments qui constituent le sol, ainsi qu'à la nature et à l'intensité des liaisons qui existent entre eux (Watteau, 2013). La structure qui est une évaluation qualitative du mode d'organisation du sol intègre un certain nombre d'autres propriétés quantifiables (*e.g.* texture, porosité, masse volumique apparente, conductivité hydraulique). Elle est de plus couramment utilisée dans l'évaluation de la fertilité physique du sol car elle traduit la capacité d'ancrage et les échanges potentiels d'air et d'eau de la plante via son système racinaire. A travers l'examen de la motte et du profil cultural, la structure a d'ailleurs toujours été au centre de l'examen du sol agricole pour en évaluer ses potentialités et adapter un itinéraire technique adapté (Soltner, 1979). De manière plus précise, plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser la stabilité structurale (*i.e.* une méthode d'évaluation de la capacité du sol à préserver sa structure sous l'impact d'un stress) comme indicateur de la qualité d'un sol (Arshad et Coen, 1992 ; Watteau, 2013). Ceci étant, sans atteindre le même niveau de précision, l'examen visuel de la structure permet néanmoins d'apprécier aussi bien le niveau et le mode d'agrégation, que la friabilité de cette structure (Ball *et al.*, 2007). Ainsi l'évaluation visuelle de la structure, par sa significativité sur le mode de fonctionnement du sol et sa robustesse, peut constituer une approche centrale pour l'appréciation de la qualité d'un sol.

2.7. Les Technosols, des sols soumis à une pédogenèse précoce

2.7.1. Définitions de la pédogenèse

Reprenons tout d'abord la définition très générale de la pédogenèse donnée par Simonson (1959) qui décrit l'évolution pédogénétique comme « un ensemble de processus d'additions, de pertes, de transformations ou de transferts subi par un matériau *in situ* ». Des définitions successives ont été proposées qui précisent la nature de la formation et de l'évolution d'un sol :

- « La transformation d'une roche en un sol est désignée comme la formation du sol.../... Différents facteurs (*i.e.* climat, organismes, topographie, temps) entraînent l'évolution d'un matériau parent exposé à la surface de la Terre.../... faisant du sol un système dynamique dont les propriétés évoluent constamment dans une direction définie, qui exprime la recherche d'un nouvel état d'équilibre » (Jenny, 1941)
- « Le sol.../... prend naissance, il évolue sous l'action des facteurs du milieu dits « actifs », climat et végétation, aux dépens d'un matériau minéral : il passe donc par des phases successives de jeunesse, puis de maturité, aboutissant ainsi à un état d'équilibre stable avec la végétation naturelle ; celle-ci incorpore au sol de la matière organique (qui contracte) des liens plus ou moins étroits avec la matière minérale et oriente la formation du sol dans une direction déterminée » (Duchaufour, 1983)
- « le processus élémentaire de pédogenèse est une combinaison de plusieurs processus, physiques, biologiques et chimiques, étroitement corrélés entre eux : i) altération chimique de la masse minérale, ii) transformation de la matière organique, iii) ségrégation et migration, iv) cimentation, v) déformation (cryogénique, vertique, biogénique) (Gerassimov, 1974)

Nous avons, il y a 10 ans, représenté les processus et les facteurs conduisant à la pédogenèse de Technosols construits, en adaptant ces théories (Figure 11). Cette formalisation permet d'exprimer de manière simple l'évolution du système, notamment en le décomposant. Ceci présente l'intérêt de faciliter l'étude découpée de l'influence des différents facteurs et des caractéristiques des différents processus. Il est cependant clair qu'en conditions réelles les différents facteurs interagissent entre eux et conduisent à des cinétiques et des intensités variables des processus qui entraînent une évolution permanente du système (Cornu, 2005).

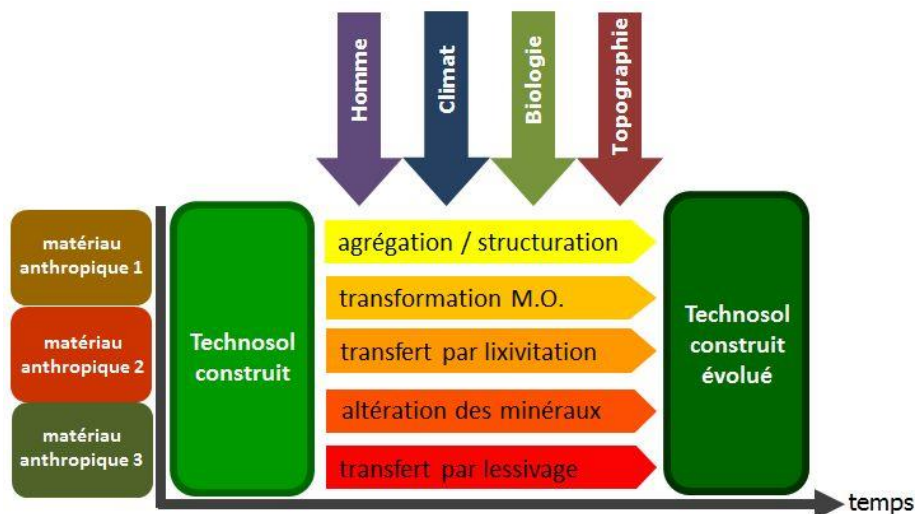


Figure 11. Processus pédogénétiques et facteurs conduisant à l'évolution d'un Technosol construit (d'après Schwartz et al., 2007)

Au-delà de ce cadre général, Huot *et al.* (2015a, 2017) sont allés plus loin en effectuant tout d'abord un impressionnant travail de synthèse des données de la littérature sur le sujet, puis en proposant un nouveau cadre conceptuel décrivant les spécificités de la pédogenèse des Technosols en général (Figure 12). Nous nous appuyons sur l'organisation de ce schéma pour la structure de cette section : i) les spécificités de ce qu'on pourrait appeler les conditions lithologiques (mode de mise en place des Technosols, diversité et nature des constituants, variabilité spatiale, discontinuité temporelle), ii) la nature, l'intensité, la cinétique et la temporalité des processus pédogénétiques à l'échelle du profil, iii) un questionnement autour des évolutions à long terme des Technosols.

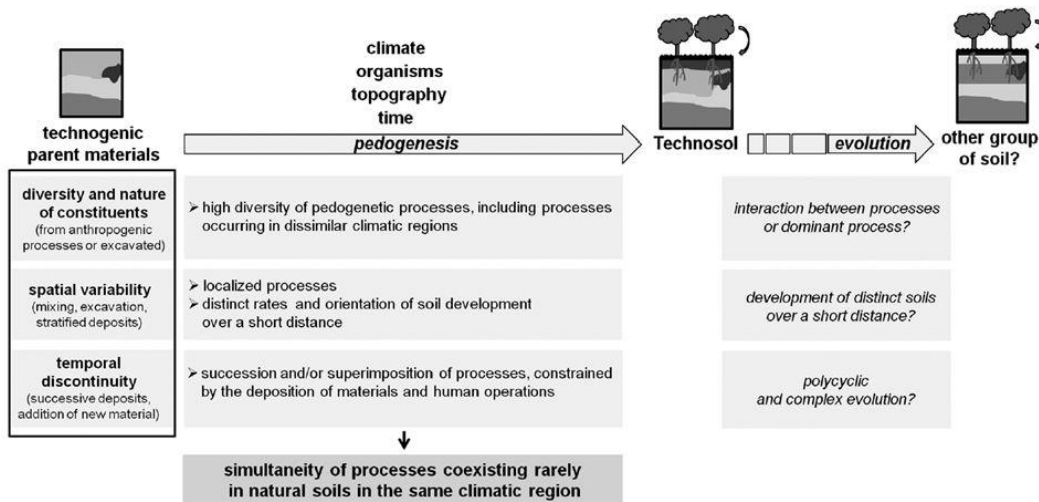


Figure 12. Spécificités potentielles de la pédogenèse de sols formés à partir de matériaux anthropiques (Huot et al., 2015a)

2.7.2. De la genèse à la pédogenèse des Technosols : caractéristiques des matériaux parents et du mode de mise en place

La première caractéristique forte de la pédogenèse des Technosols concerne évidemment la nature, la disposition et le mode de dépôt de leurs matériaux parents (voir aussi section 2.4). En effet, par définition de la classe des Technosols, ils sont composés, dans le premier mètre, d'au moins 20% d'artéfacts : « matériaux créés, substantiellement modifiés ou excavés à la surface par l'Homme » (pour être rattachés à la classe des Technosols, ils peuvent aussi présenter une couche continue de matériaux artificiellement indurés ou cimentés) (IUSS, 2014). Sans être exhaustif, les artéfacts constitutifs des Technosols sont de natures très diverses : remblais, déblais, matériaux de déconstruction, déchets industriels et ménagers, résidus miniers, sédiments de curage, produits résiduaux organiques (IUSS, 2014). Cette liste de constituants fait ressortir, en creux, un aspect essentiel pour comprendre le mode de mise en place des Technosols : l'apport d'artéfacts au sol vise fréquemment, avant tout, à se débarrasser d'un déchet. Cependant, les apports intentionnels ne sont pas exceptionnels, que ce soit pour surélever un terrain (*e.g.* remblais), pour améliorer les propriétés géomécaniques (*e.g.* infrastructures) et agronomiques (*e.g.* amendements) du sol, voire pour reconstituer ou construire un sol (*e.g.* génie pédologique). Pour complexifier cette description, il s'avère que les Technosols sont fréquemment constitués d'un mélange d'une grande diversité de ces matériaux parents créés, modifiés ou transportés d'origines anthropique, géologique ou pédologique (les artéfacts) ; ceux-ci sont même régulièrement mélangés au sol en place (Figure 13).

Plusieurs propriétés des artéfacts sont à l'origine des spécificités de l'évolution pédogénétique des Technosols. En premier lieu, ils ont des propriétés qui peuvent s'éloigner très significativement des matériaux parents géologiques naturellement présents localement. A titre d'exemple Huot *et al.*, 2014 ont étudié un bassin de décantation constitué de boues issues du traitement de fumées provenant d'une ancienne usine sidérurgique, elles contenaient à la fois des minéraux manganiques, des carbonates et de nombreuses phases amorphes silicatées : ce mélange de matériaux s'éloigne très significativement des alluvions et des roches calcaires présentes sur le territoire environnant. Nous avons, à l'époque, utilisé le terme « ectopique » (le terme vient du grec « ex topos » qui signifie « en dehors du lieu ») pour décrire ces matériaux (Séré, 2007). Par ailleurs, les artéfacts créés par l'Homme ne sont pas directement issus de processus de diagenèse ou de métamorphisme comme les matériaux parents d'origine géologique. Par conséquent, ils contiennent fréquemment des phases facilement altérables ou très réactives. Des exemples sont décrits dans la littérature pour ce qui concerne les cendres, les matériaux de déconstruction ou les résidus miniers qui contiennent des minéraux comme le gypse, les sulfures et l'oxyde de calcium (Abel *et al.*, 2014 ; Néel *et al.*, 2003 ; Uzarowicz *et al.*, 2017). Il a

également été montré que les apports massifs de produits résiduaux organiques conduisaient à une transformation rapide (*i.e.* < quelques années) (*i.e.* décomposition, minéralisation) de la matière organique, en particulier lorsqu'ils étaient déposés ou épandus en surface (Kost *et al.*, 1997 ; Payet, 2001 ; Pearce & Boone, 1998). De manière plus générale, à l'exception des couches de matériaux indurés ou cimentés fréquents dans les sols fortement anthropisés, les artefacts de toute origine sont la plupart du temps divisés, voire finement divisés (*i.e.* fraction < 2 mm majoritaire) (Séré, 2007), à la différence de matériaux parents massifs, d'origine géologique, sur lesquels se développent les sols naturels. Ainsi, lorsque ces matériaux se retrouvent exposés à l'action des facteurs climatiques et biologiques, voire lorsqu'ils se retrouvent en interaction avec les autres constituants du Technosol, ils subissent une évolution caractérisée par une cinétique inhabituellement rapide et intense que nous avons qualifié de pédogenèse précoce (Séré *et al.*, 2010). Ce terme a été progressivement repris par la suite pour décrire plus en détail ces premiers stades de développement des Technosols (Huot *et al.*, 2013 ; Jangorzo *et al.*, 2013 ; Uzarowicz *et al.*, 2017). L'explication proposée est le fort contraste entre les conditions où ont été formées les artefacts et celles où ils se retrouvent au sein du Technosol qui engendre un déséquilibre thermodynamique (Séré *et al.*, 2010). Néanmoins, il est également important de signaler que les Technosols sont aussi constitués, dans une large mesure, de matériaux qui sont au contraire très récalcitrants ou résistants et dont les potentiels d'évolution sont très lents ou limités (*e.g.* black carbon, verre, brique) (Howard *et al.*, 2015 ; Nehls & Shaw, 2010 ; Nehls *et al.*, 2013). Au-delà, la question de la cinétique d'évolution des constituants des Technosols, met en évidence les fortes incertitudes qui subsistent, dans la littérature scientifique, sur la vitesse des processus pédogénétiques dans les sols naturels (Cornu *et al.*, 2014).

Enfin, les pratiques anthropiques d'apports non intentionnels et successifs des artefacts induisent d'autres spécificités. Il y a en effet une grande variabilité spatiale aussi bien verticale qu'horizontale et à différentes échelles (depuis celle du territoire, jusqu'au micromètre) au sein des Technosols (Figure 13). Ceci est décrit depuis déjà plusieurs années (Baumgartl, 1998 ; Néel *et al.*, 2003). Cependant, des travaux plus récents ont permis de souligner aussi l'importance de cette variabilité spatiale à l'échelle du mm ou du cm ; elle contribue en effet à créer de petites hétérogénéités (*e.g.* fente de dessiccation, interface entre des couches aux propriétés contrastées, zone d'écoulement préférentiel) qui sont le siège potentiel de réactions spécifiques (Huot *et al.*, 2014). Enfin, les apports successifs de matériaux d'origines différentes (Huot *et al.*, 2015a), voire de modification des interactions avec l'environnement (confinement, végétalisation) génèrent *de facto* des discontinuités temporelles et spatiales fortes dans la dynamique de pédogenèse (Figure 13). Ce point est intéressant car, comme souvent lorsque l'on compare les sols naturels aux Technosols, les événements qui affectent ces deux types de sols sont dans une large mesure semblables (Cornu, 2005) ; cependant, dans le cas des Technosols, ils sont plus fréquents et souvent plus intenses (Leguédois *et al.*, 2016).

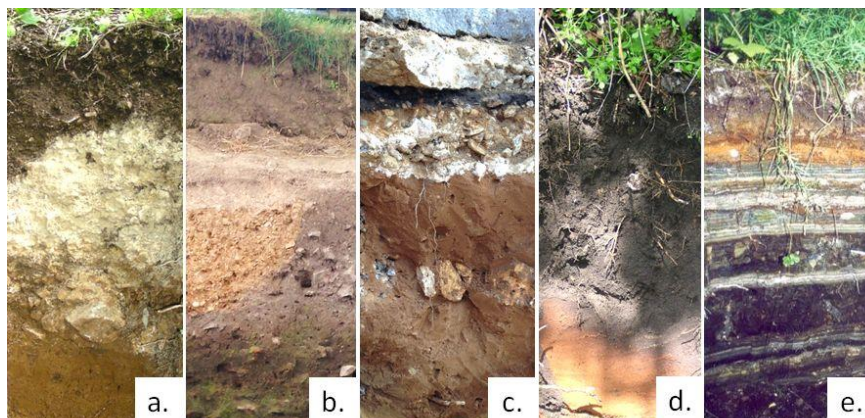


Figure 13. Profils de Technosols : a. ancienne voie romaine, b. infrastructures (fondations) d'époque gauloise, c. remblais et dalle d'un ancien bâtiment industriel, d. teruil de sable de fonderie, e. bassin de décantation sidérurgique (crédits photo G. Séré)

En résumé, l'origine et la nature des matériaux parents créent fréquemment des assemblages sans équivalent dans la nature, dont les constituants sont pour partie très réactifs et pour partie récalcitrants et dont le mode de dépôt conduit à une forte variabilité spatiale et à de potentielles discontinuités temporelles. Il en résulte des sols particulièrement complexes à différents niveaux et échelles. Ils associent en effet des matériaux aux réactivités contrastées avec une organisation physique susceptible de générer des micro-hétérogénéités. Ajoutés au fait que la date de début d'évolution des Technosols, en particulier construits, est souvent connue de manière assez précise, ceci explique que les Technosols puissent être perçus comme des modèles pour l'étude (des terrains de jeu ?) de la pédogenèse des sols (Leguédois *et al.*, 2016 ; Huot *et al.*, 2017).

2.7.3. Processus pédogénétiques

Les travaux conduits jusqu'alors indiquent que les processus pédogénétiques qui opèrent dans les Technosols sont similaires à ceux observés dans les sols naturels (Scholtus *et al.*, 2015, Huot *et al.*, 2015b ; Leguédois *et al.*, 2016). Ceci est en quelque sorte une déception car, après avoir rêvé à un processus original de « technosolisation », aucun indice de réactions intervenant de manière exclusive dans les sols fortement anthropisés n'a pu être mis en évidence. Néanmoins, il apparaît clairement que la diversité des processus pédogénétiques en jeu, sur un laps de temps donné, au sein d'un même Technosol, est généralement supérieure à celle décrite pour des sols naturels - conséquence logique de la présence d'artéfacts précédemment détaillée -. Rappelons ici, en nous basant sur le travail de synthèse de Bockheim et Gennadiyev (2000), que les 17 processus pédogénétiques identifiés conduisent à 30 groupes distincts de sols de la WRB ; chaque groupe de sol se caractérisant par un horizon diagnostique ne résultant, au maximum, que de deux processus conjoints.

Altération des phases minérales

Le fractionnement physique des artéfacts est encore peu abordé et pour l'instant essentiellement de manière descriptive. Ainsi, Charzynski et Hulisz (2013) décrivent le mode de formation de Linc Technosols qui sont le résultat de l'altération et de la fragmentation d'enrobés, de pierres, mais surtout de ciments pour donner des sols très superficiels et souvent éphémères. Il est souligné le fait que ces réactions de fractionnement ont essentiellement pour origine la colonisation par les organismes vivants (*i.e.* contraintes mécaniques exercées par les racines, exsudation de composés organiques) et les alternances gel/dégel.

Les réactions chimiques sont traitées de manière plus approfondie, en particulier parce qu'elles sont observables et mesurables sur des laps de temps d'autant plus courts que les minéraux concernés sont réactifs. Une revue de la littérature existante a été effectuée qui a permis d'identifier les travaux menés sur ce sujet (Huot *et al.*, 2015, 2017). Les paramètres qui contrôlent l'essentiel des évolutions minéralogiques sont les variations de pH et de potentiel redox. Ainsi, l'oxydation des sulfures et la formation de sulfates qui en résultent est un processus fréquent dans le cas de matériaux excavés vers la surface par l'Homme depuis des environnements réducteurs (*e.g.* résidus miniers contenant des sulfures, Hayes *et al.*, 2014 ; Uzarowicz and Skiba, 2011 ; sédiments de curage, Vandecasteele *et al.*, 2009 ; matériaux géologiques excavés, Scholtus *et al.*, 2014). La mobilisation, le transfert, puis la précipitation d'oxydes de fer et de manganèse sous la forme de concrétions, de taches ou de ciments sont également influencés par les variations de conditions redox qui résultent en particulier des alternances humectation/dessiccation dans des matériaux riches en fer (*e.g.* dépôts sidérurgiques, Huot *et al.*, 2014 ; artefacts ferreux, Howard *et al.*, 2015 ; sol amendé avec des ciments ferreux, Obear *et al.*, 2014). L'acidification est la conséquence de l'activité biologique (production d'acides, respiration, absorption de cations), de la lixiviation des cations en solutions et de l'altération de minéraux (*e.g.* oxydation de sulfures). Une baisse de pH associée aux flux d'eau conduit à la dissolution de sels et de carbonates. C'est le cas par exemple de la bauxite et du gypse dont l'altération et la lixiviation des ions libérés ont été observées sur des pas de temps courts (1 an) (Séré *et al.*, 2010 ; Scholtus *et al.*, 2014 ; Santini & Fey, 2015). La présence fréquente d'oxyde de calcium (chaux) dans les matériaux parents

(*e.g.* mortier, béton) conduit à une première phase de carbonatation dont la durée peut s'étendre jusqu'à une soixantaine d'année (Grünewald *et al.*, 2007). Les matériaux carbonatés entraînent une décarbonatation qui débute rapidement après la mise en place du sol, mais dont la durée s'étend en général au-delà des périodes de suivi (Séré *et al.*, 2010 ; Scholtus *et al.*, 2014). Ce processus est d'autant plus long à toucher l'intégralité du sol qu'il est fréquemment associé à de la recarbonatation sous forme de calcite secondaire en croûte ou en revêtement plus bas dans le profil (Bragina & Gerasimova, 2014 ; Huot *et al.*, 2014 ; Zanuzzi *et al.*, 2009). Il est intéressant de noter que dans certains cas, cette décarbonatation d'artéfacts peut elle-même entraîner une alcalinisation du sol acide sous-jacent (Kida & Kawahigashi, 2015 ; Alexandrovskiy *et al.*, 2012). Les pH alcalins induits par la présence d'artéfacts peuvent aussi induire l'altération de verres silicatés et favoriser la néoformation, à partir des produits d'altération, d'aluminosilicates mal cristallisés (Huot *et al.*, 2014 ; Sauer & Burghardt, 2006 ; Zevenbergen *et al.*, 1999 ; Zikeli *et al.*, 2002).

Les résultats évoqués soulignent évidemment les cas de figure ou les phases minérales dont l'évolution est significative au cours de la période de suivi. Ceci ne doit en aucune manière masquer le fait que, comme ceci a été explicité dans la section 2.7.2, de nombreux constituants minéraux des Technosols sont très peu sensibles à l'altération.

Transformation des matières organiques

Pour un type bien particulier de Technosols, les Edifisols qui résultent de l'altération des matériaux constitutifs des bâtiments (*e.g.* murs, toits, gouttières) et de la colonisation progressive par des organismes, Markiewicz *et al.* (en cours de publication) se sont intéressés aux propriétés de ce qu'ils appellent le système techno-humus. Au-delà de la mise en évidence d'une grande variabilité dans la composition de ces matières organiques (*e.g.* débris végétaux, déchets alimentaires, poussières) entre les différents Edifisols étudiés, la caractéristique principale de ces humus est leur faible niveau de maturité, au regard des différentes fractions humiques analysées. Il est ainsi proposé par les auteurs que cette immaturité de l'humus soit un des éléments caractéristiques des Edifisols. Cette étude tire son intérêt du fait qu'elle s'intéresse à des Technosols jeunes (< 10 ans) dont les matériaux parents sont totalement dépourvus de constituants organiques et dont la seule source de matières organiques soit l'apport de litière. Néanmoins, les auteurs ne proposent pas de comparaison avec des sols naturels en conditions naturelles : superficiels (Regosols) ou faiblement différenciés (Fluvisols) (Watteau, communication personnelle) qui permettrait d'identifier ou non une spécificité de ce techno-humus. Il apparaît cependant que les processus d'humification se mettent bel et bien progressivement en place même sur des pas de temps très courts.

Comme indiqué dans la section précédente, les artéfacts contiennent fréquemment de fortes proportions de matières organiques, en particulier dans le cas des produits résiduels organiques (*e.g.* compost, déchets verts, sous-produits d'épuration). Une très large bibliographie existe sur l'effet de l'apport d'amendements organiques sur les sols. Il apparaît ainsi que ces pratiques augmentent fortement, pendant un temps court suivant l'apport, la biomasse microbienne, l'activité enzymatique ou encore la minéralisation d'azote (Debosz *et al.*, 2002). Les auteurs ont également montré que ces effets s'atténuent rapidement au bout de quelques semaines. Ces résultats confirment non seulement l'importance de la composition des matériaux parents, mais aussi celle de l'action de l'Homme lorsqu'il réalise les mélanges, dans cette évolution (pédogenèse ?) précoce. Sur des pas de temps plus longs, outre la formation de nouveaux horizons qui sera traitée ultérieurement, Scalenghe et Ferraris (2009) ont clairement montré, sur une chronoséquence de 40 ans sur matériau géologique concassé, l'augmentation continue de la concentration en carbone organique (de 4 g.kg⁻¹ initialement jusqu'à 42 g.kg⁻¹ après 40 ans). Dans un contexte sensiblement différent (sols développés sur des matériaux de remblais issus de la seconde guerre mondiale), Wessolek *et al.* (2011) ont décrit une stagnation des concentrations en carbone organique dans les horizons de surface après une douzaine d'années. Sur des pas de temps plus courts, des résultats témoignent de l'augmentation des teneurs en matières

organiques pour les horizons de surface de Technosols développés sur des cendres volantes, des résidus bitumineux et sur des boues sidérurgiques (Huot *et al.*, 2014 ; Uzarowicz *et al.*, 2017). Cependant, l'intérêt de ces deux derniers cas d'étude réside dans le fait que les matériaux parents contenaient initialement des matières organiques d'origine anthropique (*i.e.* sous-produits pétroliers, agents de floculation, lubrifiants et produits d'épaississement). Il apparaît alors clairement que le carbone organique d'origine biologique (racines, litière, fèces, organismes en décomposition) se trouve essentiellement à proximité de la surface du sol, alors que le carbone organique d'origine anthropique est distribué plus ou moins régulièrement tout au long du profil. Une des découvertes majeures de ces travaux est de démontrer que dans certaines conditions (présence de MO en profondeur, abondance de cations bi-trivalents) cette matière organique contenue dans les artefacts est préservée de toute transformation majeure. En supposant que des mécanismes de stabilisation induits par la présence de cations et de minéraux viennent protéger physiquement ces constituants organiques de toute dégradation – comme c'est le cas dans les Rendosols par le processus de mélanisation –, les auteurs suggèrent même que les Technosols peuvent constituer des archives archéologiques capables de préserver ces éléments (Huot *et al.*, 2014).

Ainsi, comme souvent dans le cas des Technosols, trois processus différents et simultanés peuvent être décrits : i) incorporation de matières organiques d'origine biologique ; ii) transformation et minéralisation de matières organiques d'origines biologique et anthropique ; iii) stabilisation de matières organiques (essentiellement) d'origine anthropique. La similitude avec la pédogenèse des sols naturels apparaît à nouveau clairement.

Agrégation / structuration

Comme pour les sols naturels, les agents de la structuration sont également à l'œuvre dans les Technosols. Ainsi, sous l'effet de l'activité des organismes du sol et du développement de la végétation, l'acquisition progressive d'une structure grumeleuse a été observée à la surface de dépôts de matériaux technogéniques (Arocena *et al.*, 2010; Grünwald *et al.*, 2007), comme sur des sites réhabilités (Pini *et al.*, 2009; Santini and Fey, 2015; Zanuzzi *et al.*, 2009). Plus finement, l'effet des organismes du sol a été mesuré, en particulier leur contribution à l'augmentation de la microporosité et à la formation d'agrégats (Jangorzo *et al.*, 2013, 2015). Même si l'effet du facteur climatique, en particulier les alternances d'humectation et dessiccation, est moins bien renseigné, il a cependant été décrit sous la forme de la présence de fentes de dessiccation (Alexandrovskiy *et al.*, 2012 ; Néel *et al.*, 2003). Une étude récente s'intéresse de manière dédiée à l'effet de la formation de fentes sur les propriétés physico-chimiques et notamment la création d'une macroporosité par ce mécanisme (Pellegrini *et al.*, 2016).

De manière plus originale, les Technosols se singularisent par leur propension à se tasser, c'est-à-dire à se compacter sous leur propre poids et donc à augmenter la masse volumique apparente (Ciarkowska *et al.*, 2016 ; Gorbov *et al.*, 2016). Ceci s'explique essentiellement par le fait que les matériaux ont été déposés foisonnants, sans être nécessairement compactés de manière optimale.

Enfin, le facteur anthropique apparaît comme essentiel dans la dynamique de structuration des constituants des Technosols. En effet, en mélangeant – de manière intentionnelle ou non – des matériaux aux propriétés physico-chimiques contrastées, l'Homme apparaît comme déterminant dans la structure initiale de ces sols. Un nombre croissant d'études porte sur cette question. Non pas nécessairement pour étudier ce processus pédogénétique (ou diagénétique... attendu qu'il intervient avant même la mise en place du sol), mais pour chercher un optimum de fertilité physique pour des substrats construits. C'est le cas des travaux conduits sur des mélanges entre des matériaux terreux, des déchets verts et des boues d'épuration (Grosbellet *et al.*, 2011; Vidal-Beaudet *et al.*, 2016) ; ils mettent en évidence des différences très significatives de l'effet des différents matériaux et des différentes proportions sur des paramètres comme la capacité de rétention en eau ou la macroporosité. De manière analogue, Paradelo & Barral (2013), puis Deeb *et al.* (2016) ont étudié en détail l'influence d'une dose croissante de compost de déchets verts apporté à un matériau terreux ou à des produits

commerciaux (bentonite et sable fin) sur la compactibilité et les propriétés hydro-structurales. Il en ressort notamment que le comportement de ces mélanges n'est pas linéaire en fonction des doses de matériaux apportés, mais pourrait suivre des paliers. Du fait des propriétés hydro-structurales très contrastées des matériaux minéraux et organiques, la structure des mélanges résultants de leurs associations est complexe. Ceci souligne encore une fois l'importance de la formulation initiale des matériaux parents. Sous un angle plus pédogénétique, il a été démontré que des associations organo-minérales incluant des artéfacts pouvaient se former au cours du temps, notamment sous l'action des organismes du sol (Badin *et al.*, 2009; Monsérié *et al.*, 2009).

Transferts

Le lessivage de particules fines a pu être observé dans certains Technosols, via le remplissage partiel de fentes (*e.g.* sol formé sur des matériaux de déconstruction, Alexandrovskiy *et al.*, 2012 ; sol formé sur des stériles miniers, Néel *et al.*, 2003 ; sol sur bassin de décantation, Huot *et al.*, 2014). La lixiviation d'éléments solubles est largement documentée pour ce qui concerne en particulier les risques de transferts de contaminants vers les eaux souterraines et ne sera pas abordé ici. Nous évoquerons simplement la conséquence directe des processus d'altération précédemment traités en rapportant les flux de composés solubles (sulfates, carbonates, chlorures) mesurés à la base de différents Technosols, y compris sous des surfaces imperméabilisées (Kida and Kawahigashi, 2015).

Horizonation

Un des processus les plus impressionnants observable dans les Technosols est bien entendu l'apparition de nouveaux horizons. En effet, ces sols permettent dans certaines situations, en l'espace de quelques mois, voire de quelques années d'observer une différenciation des couches ou horizons présents initialement (Séré *et al.*, 2010). Dans le Référentiel Pédologique Français (2008), un horizon est décrit comme le résultat de la « subdivision d'une couverture pédologique en volumes considérés comme suffisamment homogènes ». Il est explicité très clairement que le concept d'horizon résulte du besoin pour « le cerveau humain lorsqu'il se trouve face à des continuums, de les découper en unités élémentaires ». Ainsi, dans le cas des Technosols pour lesquels des horizons diagnostics n'ont pas encore été classifiés, la notion d'horizon et de développement de nouveaux horizons permet de mettre en lumière les évolutions induites par le fonctionnement du sol et ce qu'il faut bien appeler sa pédogenèse.

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, la plupart des travaux sur la pédogenèse des Technosols attestent du développement d'horizons de surface (horizons organiques et horizon organo-minéral sous-jacent) par dépôt et apport de matières organiques d'origine biologique (Scalenghe & Ferraris, 2009 ; Howard *et al.*, 2015; Sokolov *et al.*, 2015; Sourkova *et al.*, 2005). L'épaisseur de cet horizon a tendance à croître avec le temps (Bini & Gaballo, 2006).

L'apparition de l'horizon minéral de profondeur issu de l'altération (physico-chimique) du matériau parent a été jusqu'à présent peu étudié, même s'il en est fait mention dans certains travaux (Scalenghe & Ferraris, 2009 ; Uzarowicz *et al.*, 2017). Ceci s'explique dans une certaine mesure par le fait que cet horizon C se forme en général aux dépens d'un matériau géologique dont il conserve en grande partie la structure lithologique originelle. Dans le cas des Technosols, l'essentiel de l'évolution pédogénétique se fait par évolution directe des matériaux parents déposés (voire organisés) en couches et non par le processus habituel de stratification pédologique (en ce sens, les Technosols se rapprochent des sols alluviaux et colluviaux). C'est ce que l'école Russe de pédologie appelle une mémoire du sol de type "livre" (préservation de la mémoire par couches, comme les milieux sédimentaires) par opposition aux sols naturels, de type "palimpseste", avec un effacement progressif de cette mémoire par altération des horizons profonds (Prokof'eva & Poputnikov, 2010; Targulian & Goryachkin, 2004) (Huot, communication personnelle). Ce type d'évolution suggère alors que, pour les Technosols, le produit de

l'altération des matériaux parents est à chercher éventuellement au sein du profil de sol si celui-ci est constitué initialement de matériaux apportés en couches (Figure 14).

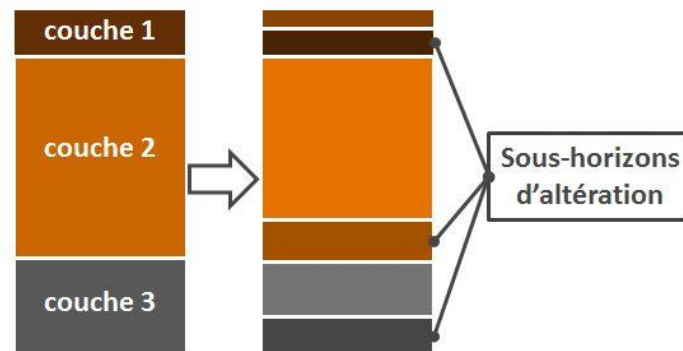


Figure 14. Schéma illustrant le développement d'horizons d'altération à partir d'un profil de Technosol initialement organisé en couches

Enfin, la formation d'horizons d'accumulation d'éléments lixiviés vers la profondeur a été rapportée (*e.g.* horizon sodique, Santini & Fey, 2015 ; horizon gypsique, Zikeli *et al.*, 2002 ; horizon calcique, Howard *et al.*, 2015 ; ciment ferreux, Obeir *et al.*, 2014).

Cette section a permis de montrer que l'ensemble des processus pédogénétiques précédemment présentés se traduisait dans la réalité de la diversité des Technosols par le développement et la formation d'horizons (Figure 15). En revenant à l'approche conceptuelle de Simonson (1959) qui décrivait la pédogenèse comme une combinaison de processus affectant les horizons d'un sol avec des importances relatives variables d'un sol à l'autre, nous pouvons ainsi confirmer que l'évolution pédogénétique des Technosols rentre tout à fait dans le cadre de la formation des sols naturels. Rappelons néanmoins que les Technosols peuvent être le siège de combinaisons originales de processus pédogénétiques par rapport à celles observées dans les sols naturels se formant dans des conditions pédoclimatiques similaires.

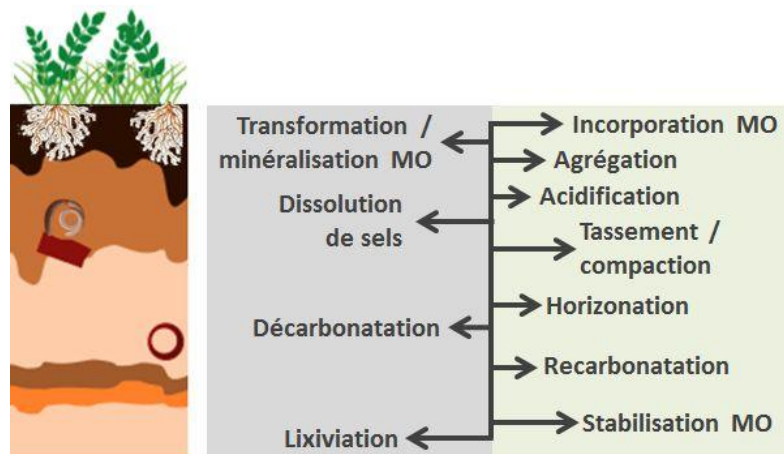


Figure 15. Représentation schématique des processus pédogénétiques de nature et d'intensité différente affectant un Technosol (d'après une représentation de Simonson, 1959)

2.7.4. Technosol, seulement une étape ?

Une des questions centrales qui occupe alors la communauté de scientifiques travaillant sur les Technosols est de savoir ce que ces sols d'origine artificielle vont devenir à moyen et long terme. Nous avons contribué à cette réflexion en suggérant l'hypothèse – fondée sur les résultats obtenus en conditions contrôlées et réelles - que les Technosols sont amenés, au bout d'un laps de temps d'évolution plus ou moins long, à pouvoir être rattachés à une autre référence de sol naturel (Séré,

2007 ; Séré *et al.*, 2010). Le caractère « *technic* » de ces sols resterait perceptible, mais ne conditionnerait plus leur pédogénèse (Figure 16).

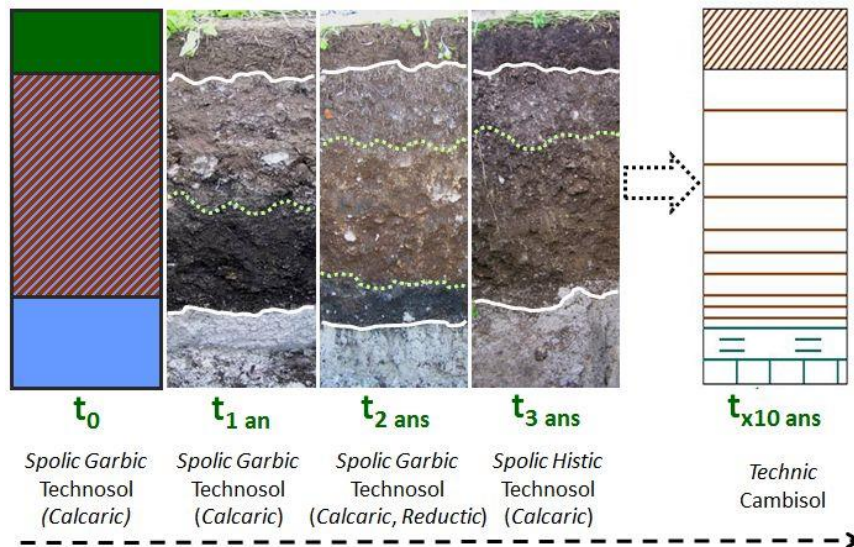


Figure 16. Hypothèse d'évolution d'un Technosol construit (Séré, 2007)

Ainsi, Markiewicz *et al.* (en cours de publication) suggère que le Techno-humus qu'ils ont décrit sur les Edifisols ne soit qu'une première étape vers la formation d'un humus analogue aux horizons organiques de sols naturels. De tels sols superficiels peuvent logiquement se rapprocher progressivement de Regosols technic (IUSS, 2014), voire même selon la description du Référentiel Pédologique Français (2008) être d'ores et déjà rattachés à cette référence : « sols véritablement très jeunes, d'origine anthropique après troncature complète de couvertures pédologiques antérieures ». Le cas de figure fréquemment rencontré est celui de sols développés sur des matériaux d'origine géologique qui ont été excavés ou concassés par l'action de l'Homme (Scalenghe et Ferraris, 2009). Dans ce cas, comme nous l'avons évoqué précédemment, leur cinétique d'évolution est alors très rapide. Scholtus *et al.* (2014) ont à ce sujet démontré que la dynamique pédogénétique observée dans ces sols est tout à fait comparable à des sols naturels développés sur des matériaux parents analogues. Au-delà, Huot *et al.* (2015) a recensé les recherches prospectives qui font l'hypothèse d'une évolution de Technosols tendant vers des sols climaciques : Cambisol (Séré *et al.*, 2010), Andosol et Ferralsol (Santini & Frey, 2015) et podzolisation et gleyfication (Solokov *et al.*, 2015).

Ces hypothèses tendent à démontrer qu'en termes de pédogénèse, les Technosols ne se démarquent des autres classes de sols que par la simultanéité, l'intensité et la rapidité de plusieurs processus pédogénétiques. Ceci est vrai dans les premiers stades d'évolution. Au-delà de ces phases initiales, il pourrait alors être suggéré de conserver la mémoire de l'origine de ces sols, mais en les rattachant plutôt à une classe bien connue et abondamment décrite. En effet, l'une des lacunes majeures des référentiels existants pour des sols très anthropisés – en particulier le Référentiel Pédologique Français et la World Reference Base for Soil Resources qui ont été utilisés ici – est que la classification « Technosol » ou « Anthroposol » ne décrit en rien le fonctionnement et la dynamique d'évolution de ces sols. A l'inverse, les groupes ou classes de ces deux référentiels décrivant les sols naturels expriment, souvent par définition même, de manière explicite les potentialités des sols qui y appartiennent. De plus, ces deux classifications proposent un grand nombre de qualificatifs qui permettent de décrire tant l'origine que certains traits saillants des sols d'origine anthropique : *e.g.* technic, toxic, spolic, urbic (IUSS, 2014) ; *e.g.* technologique, holo-organique, archéo-anthropique (RPF, 2008). Ainsi, nous avons proposé que les classes « Technosol » et « Anthroposol » ne soient utilisées que pour rattacher les sols très anthropisés durant les premiers temps de leur évolution (la phase de « jeunesse » décrite par Duchaufour, 1983) (Séré *et al.*, 2010). Il est cependant utile d'ajouter ici que, selon les conditions (*e.g.* scellement, apport continu) dans lesquels ils se trouvent : i) ces premiers stades d'évolution peuvent

s'étaler sur des temps longs, ii) les Technosols peuvent être soumis à de fortes modifications qui engendreraient alors une nouvelle trajectoire évolutive (évolution polycyclique).

2.8. Synthèse et problématique

Les Technosols sont amenés à couvrir des surfaces de plus en plus importantes de nos territoires. Ce sont des objets complexes et hétérogènes présentant, sous un même terme, une grande variabilité de composition et de fonctionnement. Les Technosols sont aussi des écosystèmes affectés par des processus pédogénétiques qui, pour compliqués à démêler qu'ils puissent être, sont analogues à ceux que subissent les sols naturels. Les potentialités de ces sols apparaissent sous-évaluées, autant du fait de cette complexité que parce qu'ils sont perçus en premier lieu par les risques sanitaires et environnementaux qu'ils peuvent représenter. Cette synthèse a permis de mettre en lumière les travaux, de plus en plus nombreux, qui s'attachent à caractériser leurs potentialités pour répondre aux enjeux sociétaux auxquels doivent faire face les milieux très anthropisés.

La problématique au cœur de ce travail est donc bien de réfléchir et de proposer des solutions et des approches raisonnées pour gérer la couverture pédologique des territoires urbains et industriels afin d'apporter des réponses aux problématiques environnementales (Figure 17). Une telle gestion implique de prendre en compte leurs propriétés et leur diversité, ainsi que leur caractère dynamique pour en tirer le plus grand bénéfice. Le concept de services écosystémiques est au cœur de ce travail car, au-delà des débats théoriques qui agitent les communautés scientifiques sur ce thème, il permet surtout de faire un lien entre la connaissance du fonctionnement des écosystèmes (des sols) et les attentes des gestionnaires des territoires anthropisés (urbanistes, aménageurs, élus).

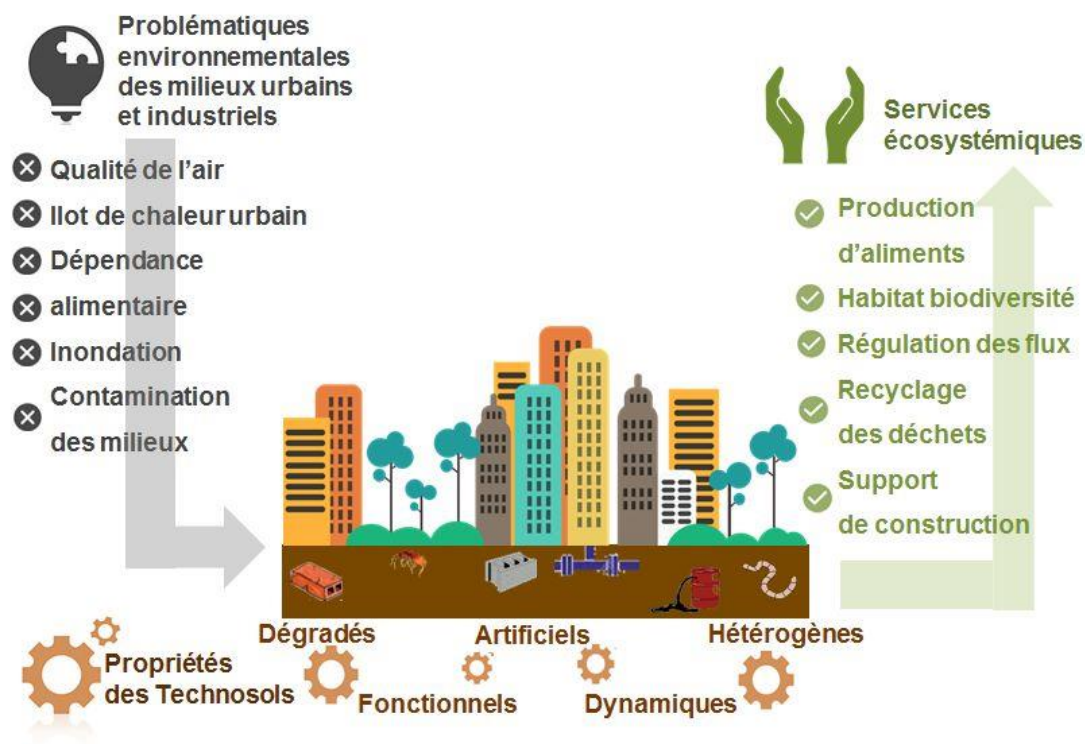


Figure 17. Représentation schématique des enjeux scientifiques traités dans l'HDR

3. Comment construire un sol en réponse à l’anthropisation de la couverture pédologique ?

Comme cela a été évoqué, l’anthropisation conduit fréquemment à une baisse de la qualité des sols. Le génie pédologique constitue alors un élément de réponse face à cette dégradation. En offrant un cadre conceptuel où il est possible de construire des sols « à façon », en se rapprochant le plus possible d’un sol idéal attendu, ce procédé génère aussi de nombreuses questions scientifiques.

Cette section précisera donc en premier lieu une démarche pour traduire les usages des sols en termes de propriétés attendues. Ensuite, les travaux que nous avons conduit pour formaliser l’établissement de la recette - par analogie avec la cuisine -, c’est-à-dire la manière d’associer, de mélanger et d’organiser des matériaux d’origines diverses pour obtenir un sol qui se rapproche le plus possible des propriétés idéales, seront présentés. Enfin, des résultats sur l’évaluation des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux du procédé de construction de sol seront évoqués.

3.1. Adapter la composition des sols aux usages

3.1.1. Identifier les usages attendus en milieux urbains et industriels

Dans les espaces anthropisés, les usages et services attendus par les sols sont nombreux : i) support des infrastructures et superstructures (*e.g.* immeubles, voies de circulation automobile, ferrée et fluviale, parkings), ii) abri des réseaux qui parcourent les villes (*e.g.* canalisations et câbles), iii) substrat pour les végétaux (*e.g.* arbres isolés, plantes dans les parcs, plantes potagères de jardins), iv) support d’activités industrielles et agricoles, v) source de matériaux (*e.g.* remblais), vi) activités récréatives (*e.g.* stades, terrains de jeux, bacs à sables), vii) enfouissement de divers matériaux et déchets (*e.g.* décharges contrôlées ou sauvages) et viii) interface avec les autres environnements (air et eau) et les organismes vivants (homme, animaux domestiques ou non) (Damas & Coulon, 2016). Comme cela a été précédemment évoqué, de nombreux services anthropiques (*e.g.* transport, logement) et écosystémiques (*e.g.* régulation des inondations, atténuation de l’îlot de chaleur urbain, réservoir de vestiges archéologiques, filtration de l’air, stockage de carbone) sont attendus des Technosols.

Une première approche pour décrire la gamme des usages des sols en milieu urbain et industriel est la nomenclature de Corine Land Cover pour la classe des « Territoires artificialisés » (Tableau 3). Cette classification, adaptée aux petites échelles, traduit bien entendu la part importante accordée aux occupations de sol dédiées aux services anthropiques et met en évidence la faible considération accordée aux services écosystémiques rendus par les sols. Par ailleurs, la typologie actuelle traduit peu la diversité des sols végétalisés et ne permet pas vraiment de refléter certains nouveaux usages des sols en ville comme l’agriculture urbaine.

Tableau 3. Nomenclature des occupations biophysiques des sols des Territoires artificialisés

Zones urbanisées	Tissu urbain continu
	Tissu urbain discontinu
Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	Zones industrielles et commerciales
	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
	Zones portuaires
	Aéroports
Mines, décharges et chantiers	Extraction de matériaux
	Décharges
	Chantiers
Espaces verts artificialisés, non agricoles	Espaces verts urbains
	Equipements sportifs et de loisirs

Ainsi, il est nécessaire de préciser la variabilité des couvertures de sols végétalisées. La répartition, la nature et la densité de végétation est variable et doit répondre aux attentes fonctionnelles et paysagères de la ville. Une typologie des espaces urbains végétalisés est alors nécessaire car à chaque type d'espace sont associées des modalités de gestion et d'entretien. Le groupe de travail national "espaces verts, nature et paysage" de l'Association des ingénieurs territoriaux de France (AITF) a pris l'initiative d'établir une typologie des espaces verts en 1995. Cette typologie considère treize types d'espaces verts. Cette classification peut également être complétée avec les nouveaux dispositifs très techniques de végétalisation qui émergent, tels que les toitures végétalisées, murs végétalisés, agriculture urbaine. Nous avons donc adapté ceci en proposant une classification détaillée (Tableau 4).

Tableau 4. Adaptation de la typologie des espaces verts urbains de l'Association des Ingénieurs Territoriaux de France (Damas et Coulon, 2016)

N°	Type d'usage	Description
1	Squares et parcs	<i>Lieu de séjour à caractère horticole</i>
2	Accompagnement voies circulation	<i>Train, tram, métro, voies d'eau</i>
3	Accompagnement de bâtiments publics	<i>Espace ayant pour fonction majoritaire l'accompagnement du bâtiment</i>
4	Accompagnement habitations	<i>HLM municipaux, lotissements, ZAC</i>
5	Accompagnement locaux industriels et commerciaux	<i>Abord centre commercial, zones artisanales, zones industrielles</i>
6	Accompagnement locaux sociaux éducatifs	<i>Enseignement, maisons de quartier, résidences pour personnes âgées, maisons de jeunes, crèches</i>
7	Terrains de sport	<i>Surfaces à destination des clubs sportifs (sauf surfaces couvertes)</i>
8	Accompagnement d'aménagements sportifs	<i>Espaces verts d'accompagnement de terrains de sport</i>
9	Cimetières	
10	Campings	<i>Espaces comprenant des structures d'hébergement à caractère temporaire</i>
11	Jardins familiaux, partagés	
12	Établissements horticoles	<i>Etablissements de production végétale à vocation publique</i>
13	Espaces naturels aménagés	<i>Grands parcs urbains ou coulée vertes à entretien plus ou moins sommaire</i>
14	Arbres d'alignements	<i>Sur sol minéral ou végétalisé, fosses de plantation</i>
15	Jardins spécialisés ou décoratifs	<i>Toiture végétalisée, aménagements esthétiques</i>

Pour conclure cette section, il est utile de rappeler qu'en milieux fortement anthropisés les exigences sur la capacité des sols à garantir l'usage attendu sont extrêmement fortes. Ainsi, bien plus qu'en milieu forestier et même agricole, une intensification très forte des sols est usuelle (modification des propriétés physico-chimiques, apport de matériaux ou de structures exogènes) pour garantir le succès de la végétalisation.

3.1.2. Définir les fonctionnalités attendues des sols en fonction des usages

Derrière cette diversité d'occupation de sols, les fonctionnalités attendues par ces sols sont également très variables. Considérons, à titre d'exemple, le cas des sols urbains végétalisés. Un usage "squares et

parcs” se caractérise par des exigences de portance en surface vis-à-vis du piétinement, de besoins élevés en eau pour la plante, mais aussi d’innocuité vis-à-vis de la santé humaine compte tenue de la fréquentation du public. Un usage “arbre d’alignement” requiert un volume de sol à explorer suffisant et des besoins en eau importants vis-à-vis de l’enracinement des arbres ; il doit fréquemment offrir une capacité de portance en surface suffisante pour porter un revêtement et assurer une fonction de voirie piétonne, de circulation de vélos, voire de stationnement de véhicule léger (Damas et Coulon, 2016). Ainsi, pour chaque usage futur attendu, il est possible de décrire les exigences du type de sol au regard des principales grandes fonctions du sol (Damas et Coulon, 2016) :

- fonction de support : de l'activité humaine (voirie légère et lourde, réseau VRD, etc.), de végétation (herbacée, arbustive, arborée), de biodiversité ;
- fonction d’alimentation en eau : circulation, flux d'eau, rétention de l'eau, stockage dans les pores, filtration de l'eau ;
- fonction de filtre et d’échange : cycle et rétention des polluants et sels (rétention physico-chimique, cycle de dégradation chimique des polluants, stockage de polluants) ; cycle et rétention des nutriments et du carbone (stockage de carbone, décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments).

Dans le cadre du programme SITERRE, nous avons effectué cette évaluation des fonctions attendues pour plusieurs grandes classes de sols urbains végétalisés (Figure 18).

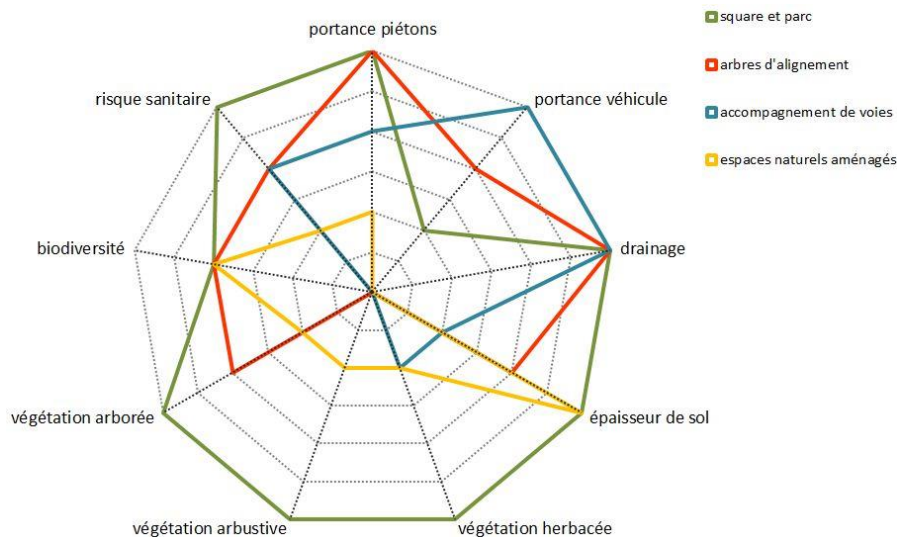


Figure 18. Evaluation des fonctions et propriétés attendues (plus la valeur est proche de la périphérie, plus le niveau de fonction attendue est élevé et inversement) pour 4 usages modèles de sol urbain végétalisé

En complément de cette semi-quantification des niveaux de fonction attendus par le sol à construire, il s’agit ensuite de décliner ces éléments en “profil de sol idéal”. Pour cela, il est nécessaire d’indiquer le nombre d’horizons requis ainsi que les rôles qui sont attendus pour chacun d’entre eux, tout en appréhendant leur organisation (position dans le sol construit, épaisseur). Déjà au moment du dépôt du brevet du procédé de construction de sol (Séré *et al.*, 2007), nous avons proposé une typologie d’horizons de sol construit en : 1) horizon de croissance destiné à favoriser la germination ou la reprise des plants dans le premier temps de leur croissance, 2) horizon de développement qui vise à favoriser l’ancrage des racines et l’approvisionnement en nutriments, 3) horizon technique qui doit permettre de répondre à certaines fonctionnalités spécifiques attendues (*e.g.* confinement hydrique du sous-sol, réserve en eau, portance du sol).

Nous avons décliné et amélioré cette démarche au fur et à mesure des projets dans lesquels j’ai eu la chance d’être impliqué. Le profil de sol imaginé est bien le résultat des attentes en termes d’usages, de besoin des plantes et des éventuelles contraintes de l’environnement (*e.g.* climat, nature du sous-sol,

présence de contamination) (Figure 19). Le niveau de complexité du profil doit également intégrer les moyens matériels envisagés pour la mise en œuvre du sol construit.

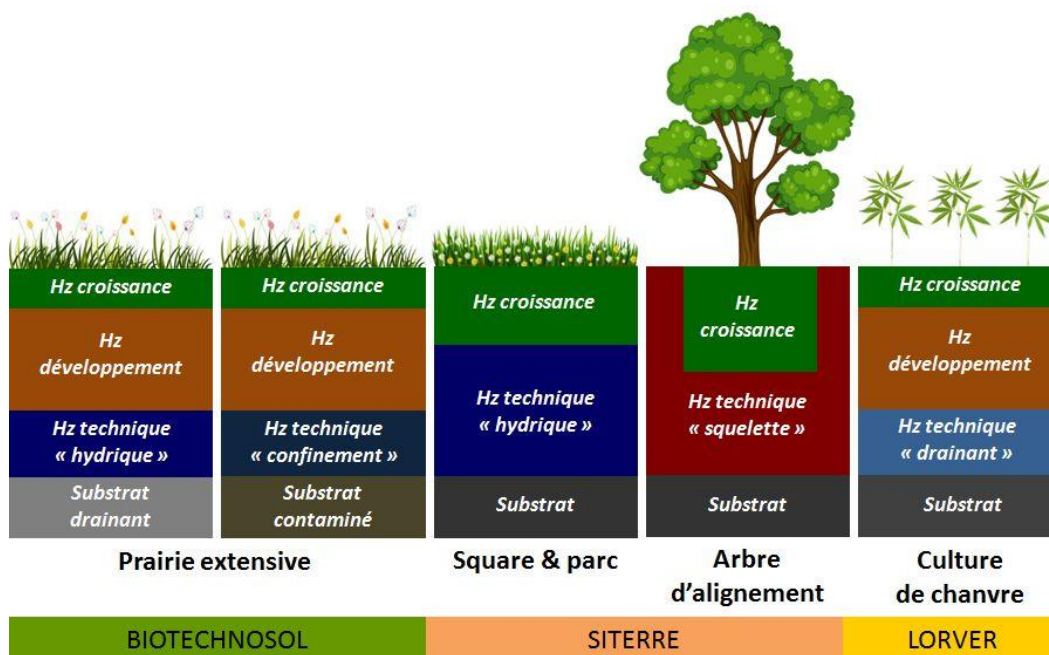


Figure 19. Profils de sols construits idéaux pour une variété d'usages et de situations

3.1.3. Construire un référentiel de propriétés de sols attendues

L'étape suivante du processus est de traduire cette organisation et ces niveaux de fonctions en termes de propriétés attendues optimales des différents horizons du sol à construire. Dans le domaine agricole, même si la logique de fertilisation est basée sur la compensation des exportations, il est néanmoins possible, à partir de la bibliographie existante, d'évaluer les quantités de nutriments nécessaires au développement d'une culture et donc de définir les attendus en termes de fertilité chimique. Les conditions physiques (*e.g.* profondeur d'enracinement, niveau d'humidité) adaptées au bon développement de la plante sont quant à elles bien renseignées. Il est alors possible, comme nous l'avons fait dans le cadre du projet LORVER où les sols construits avaient pour objectif d'accueillir des cultures de chanvre, d'ortie et de ligneux, de définir un profil de sol idéal (Figure 20).

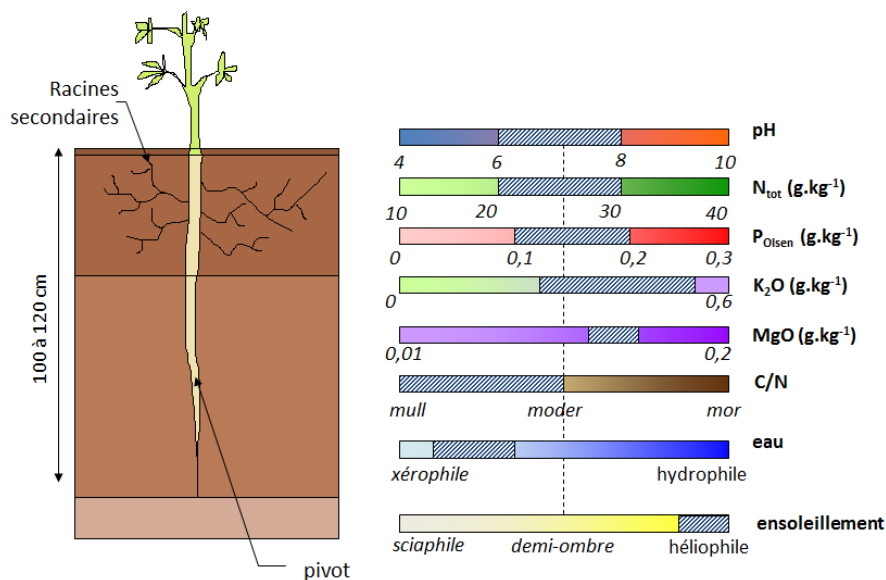


Figure 20. Propriétés attendues pour un sol construit destiné à la culture de chanvre

Néanmoins, plusieurs limites apparaissent dans la logique précédemment exposée pour une parfaite transposition à la construction de sol. En premier lieu, si la bibliographie sur les exigences des plantes en agriculture est abondante, elle l'est beaucoup moins pour ce qui est de la végétalisation urbaine. Par ailleurs, même si les conditions optimales sont connues, elles ne se traduisent pas directement en propriétés de sols attendues, mais bien plutôt en termes de fonctionnement du sol. Par exemple, une plante xérophile cultivée en climat tempéré nécessite un sol drainant, favorisant l'évacuation des excès d'eau. Cependant, au-delà de cette information, une étape supplémentaire est nécessaire pour traduire ceci en gammes de valeurs acceptables de macroporosité et de conductivité hydraulique à saturation. Enfin, dans la logique de l'approche initiée et présentée dans la section précédente, il est indispensable de lier l'évaluation semi-quantitative des fonctions attendues aux gammes de valeurs acceptables des principales propriétés des sols.

C'est ainsi que, dans le cadre du projet SITERRE, nous avons développé un modèle de détermination des propriétés idéales de sol construit. La sélection des propriétés physico-chimiques les plus importantes à considérer pour l'évaluation de la capacité des sols à assurer les usages attendus en milieu urbain a été effectuée. Elle se base sur une analyse de la littérature existante qui a été en partie reprise dans la section 2.6.1. Dans sa première version, ce modèle fonctionne avec deux types d'informations. Tout d'abord, en croisant les données de la bibliographie et les dires d'experts des partenaires du projet, nous avons établi un système de correspondance entre des gammes de valeurs numériques de chaque propriété et des notes de 0 (le plus défavorable) à 3 (le plus favorable). Ensuite, nous avons indiqué, en fonction des niveaux de fonctions attendues précédemment définies, les notes idéales (non pas pour chaque usage de sol, mais pour chaque type d'horizon de sols construits) (Figure 21).

Paramètres	Unité	Note	Gammes de valeurs			Hz croissance	Hz squelette	Hz technique
			Règle	Borne Inf	Borne Sup	note objectif		
Granulo < 2 mm	%	0	<		40	3	0	2
		1	entre	40	60			
		2	entre	60	80			
		3	>	80				
macroporosité	m ³ m ⁻³ pores > 30µm	0	<	0,05		3	2	2
		1	entre	0,05	0,1			
		2	entre	0,1	0,2			
		3	>	0,2				
Réserve utile	mm eau /cm sol	0	<		0,5	3	1	2
		1	entre	0,5	1			
		2	entre	1	1,5			
		3	>	1,5				
Masse volumique apparente	g.cm ⁻¹	0	>	1,7		2	1	2
		1	entre	1,5	1,7			
		2	entre	1,2	1,5			
		3	<	1,2				
M.O.	g.kg ⁻¹	0	<		10	3	1	1
		1	entre	10	40			
		2	>		100			
		3	entre	40	100			
N _{total}	g.kg ⁻¹	0	<		2	3	1	1
		1	entre	2	10			
		2	>		20			
		3	entre	10	20			

Figure 21. Fragment du tableau de notation des propriétés physico-chimiques en fonction des horizons de sol construit

Un tel référentiel est complexe à produire et nécessitera encore de multiples étapes pour intégrer cette complexité. En premier lieu, il se base sur un nombre limité de paramètres (12, dont 8 chimiques et 4 physiques) et ne décrit donc que partiellement la fertilité d'un sol qui intègre un nombre bien plus grand de propriétés. Notre approche a sciemment été de poser les premières pierres d'un ouvrage, tout en connaissant ses limites. Nous avons ainsi considéré non seulement que cela permettait de rationaliser la démarche de construction de sol, mais aussi que ceci pouvait contribuer à l'amélioration des pratiques actuelles d'utilisation de matériaux en végétalisation urbaine. En effet, la plupart des Cahiers des Clauses

Techniques Particulières des chantiers d'aménagement d'espaces verts se contentent de cahier des charges pour le moins sibyllins pour ce qui est des propriétés des terres végétales à utiliser (Damas & Coulon, 2016). Puis, comme nous l'évoquerons par la suite, même s'il intègre 12 propriétés différentes des sols, le fonctionnement du modèle multicritère qui a été développé dans SITERRE impose, au cours de l'évaluation, de ne considérer les paramètres qu'un par un sans intégrer les relations entre eux. Pourtant, il est connu par exemple qu'une teneur en matières organiques s'interprète différemment en fonction de la texture du sol. Par ailleurs, après de longues discussions, nous avons décidé de ne pas pondérer les paramètres les uns par rapport aux autres dans la recherche. Pourtant, il est clair que certains paramètres peuvent être plus critiques que d'autres pour garantir le bon développement d'une plante. Néanmoins pour répondre à ceci, nous avons à la fois adapté le système de notation de chacun des paramètres (en particulier le choix des limites) et considéré que les notes-objectifs par horizon constituaient une manière de traduire cette exigence.

Ainsi, la version actuelle de notre système de notation reste-t-il largement perfectible, mais constitue une première approche de rationalisation afin de contribuer à une définition d'un cadre méthodologique des pratiques d'agronomie urbaine liées à la gestion de sols.

3.2. Formuler des déchets et sous-produits pour construire des sols

3.2.1. Identifier les gisements

La construction de sol cherche à limiter la consommation de ressources naturelles et donc de matériaux nobles. Le procédé repose au contraire sur la valorisation de déchets ou sous-produits issus des activités anthropiques. Un autre point important dans l'identification de matériaux potentiels pour la construction de sols est de n'écarter aucune option. C'est ainsi que, dans le cadre du projet SITERRE, nous avons réalisé un recensement global à partir du Catalogue européen des déchets (Annexe II de l'article R. 541-8 du CE), le référentiel officiel européen des matières premières secondaires. La méthodologie de sélection se fonde sur un certain nombre de critères qui relèvent aussi bien de la dangerosité des matériaux, de leur praticité d'utilisation en construction de sol (*e.g.* les produits liquides ou ayant une siccité trop faible sont écartés, ainsi que ceux générant une odeur incompatible avec leur utilisation en milieu urbain dense), que de la représentativité des gisements (*e.g.* les produits ayant une production très ponctuelle d'un point de vue temporel ou géographique ont également été écartés). Enfin, le processus de sélection s'est conclu en ne conservant que les matériaux présentant un intérêt potentiel pour la construction de sol du fait de leur fertilité, de leur capacité à retenir ou à drainer l'eau ou de leurs propriétés géomécaniques.

A l'issue de ce processus, 11 catégories de matériaux ont semblé présenter un intérêt pour la mise en œuvre du génie pédologique pour la végétalisation urbaine (Figure 22). Ils se répartissent en déchets minéraux d'une part et organo-minéraux d'autre part. Ils sont issus aussi bien de procédés industriels (*e.g.* sous-produits papetiers, déchets de brique), d'activités de la ville (*e.g.* compost, déchets provenant du nettoyage des rues, déchets de déconstruction de bâtiments) que de sous-produits de l'aménagement des territoires et de l'entretien des infrastructures (*e.g.* terres excavées, c'est-à-dire des horizons profonds de sols, ballasts usagés). Tous ces matériaux, à l'exception du compost NFU 44-095, sont classés comme des déchets. En effet, ce dernier est issu du compostage d'un mélange de déchets verts et de boue de station d'épuration ; c'est un produit normalisé susceptible d'être commercialisé. Le point commun entre tous ces matériaux est un déficit de filières existantes et viables pour absorber l'intégralité de leur production au niveau national. Dans d'autres contextes, en particulier pour la réhabilitation de friches industrielles avec des usages *a priori* moins sensibles, d'autres matériaux ont été envisagés comme les terres issues de procédés de dépollution (*e.g.* biotierre, désorption thermique) ou encore les sédiments de curage.



Figure 22. Grandes catégories de matériaux susceptibles d'être utilisés en construction de sol pour la végétalisation urbaine (Damas & Coulon, 2016)

Un autre postulat de la construction de sol est d'utiliser exclusivement des produits disponibles localement afin de limiter l'impact environnemental de la pratique. Nous verrons d'ailleurs dans la section 3.3 que les transports des matériaux représentent l'essentiel des impacts générés par le procédé. Il s'agit donc, dans cette étape de la démarche d'effectuer un recensement des gisements en récoltant les informations suivantes : i) nature, ii) tonnage, iii) temporalité de la production, iv) distance du lieu d'utilisation, v) type de camion susceptible de transporter le matériau, vi) coût (positif ou négatif). Ce travail de recensement avait notamment été conduit en 2014 dans le cadre d'un projet pédagogique autour de la métropole nancéenne (Figure 23). Il avait également été effectué en 2006-2007 pour la mise en place des parcelles Biotechnosol, puis plus tard en 2015-2016 pour les parcelles LORVER.

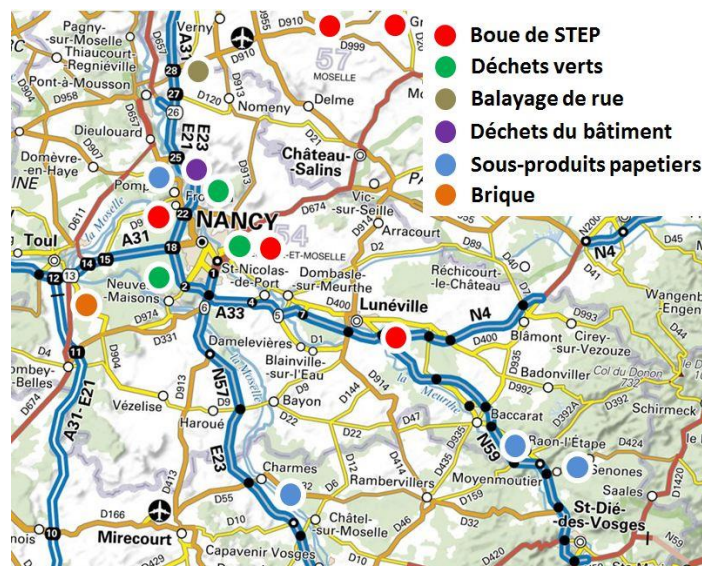


Figure 23. Recensement des gisements de déchets et sous-produits aux environs de Nancy (projet pédagogique tuteuré d'étudiants ENSAIA 3A SGE, 2014)

3.2.2. Modéliser les propriétés de mélanges de déchets

Un enjeu scientifique et technique majeur du procédé est la proposition de formulations de déchets et sous-produits adaptés pour la construction de sol. Plus concrètement, il s'agit de définir quels matériaux

associer, dans quelles proportions et éventuellement avec quel mode de mise en œuvre (*i.e.* criblage, chaulage, compactage) pour se rapprocher le plus possible des paramètres idéaux de chaque horizon définis précédemment. Le raisonnement doit évidemment se faire à l'échelle de tout le chantier de construction de sol, ce qui peut représenter plusieurs dizaines de milliers de tonnes de matériaux. Cette étape est complexe car elle doit, *a minima*, intégrer l'ensemble des éléments suivants :

- ne considérer que des mélanges avec des matériaux dont les gisements sont disponibles en quantités suffisantes pour effectuer tout le chantier ;
- proposer des proportions de matériaux qui soient réalistes en termes de mise en œuvre (*e.g.* il est par exemple déconseillé, en phase chantier, d'envisager un mélange intégrant un matériau à un ratio inférieur à 5 % ; de même, des mélanges intégrant plus de 3 matériaux sont trop complexes à réaliser) ;
- simuler les propriétés d'un mélange à partir de la connaissance de matériaux seuls ;
- intégrer, dans la mesure du possible, les modifications de propriétés intervenant dans les semaines/mois suivants la réalisation des mélanges et la mise en place du sol construit.

Il n'y a aucune difficulté théorique à prendre en compte les deux premiers points. Le dernier est, à l'opposé, extrêmement complexe comme en témoignent certains des travaux que nous avons menés et qui sont présentés au chapitre 5. Les recherches que nous avons conduites pour apporter des éléments de réponse à la modélisation des propriétés de mélanges de déchets et sous-produits vont donc être ici présentées. Elles se basent dans une large mesure sur les travaux conduits dans le cadre du projet SITERRE, plus particulièrement au cours du stage de Master 2 de Maha Deeb (2012) et de la thèse de Sarah Rokia (2014). Ils ont été exposés dans l'article Rokia *et al.* (2014).

Considérant les 11 matériaux modèles de SITERRE et le fait que seuls des mélanges binaires (2 matériaux) ou ternaires (3 matériaux) sont possibles, 165 combinaisons potentielles de matériaux sont réalisables. Chaque combinaison peut évidemment se décliner sous la forme d'association de matériaux à différents ratios. Il apparaît ainsi que le nombre de mélanges possibles est, si ce n'est infini, du moins très élevé. Il est donc nécessaire de développer un moyen de modéliser les propriétés des mélanges. Pour cela, nous avons mis en œuvre une approche en deux temps : 1) réalisation et caractérisation agronomique (C_{tot} , P_{Olsen} , CEC, pH, humidité à la capacité au champ, masse volumique apparente) de 75 mélanges (15 combinaisons binaires, 10 combinaisons ternaires, testées à différents ratios de matériaux) avec 3 répétitions ; 2) établissement de modèles polynomiaux pour chacune des propriétés. Pour la première partie, voici une partie des résultats obtenus qui montrent clairement que, pour différents ratios de combinaisons de matériaux organo-minéraux et minéraux, les courbes obtenues pour les paramètres étudiés sont très différentes. En effet, si les relations sont très proches de la linéarité ($R^2 > 0,8$) pour la masse volumique apparente (Figure 24), la CEC et l'humidité à capacité au champ, ce n'est pas du tout le cas pour le pH ($R^2 < 0,1$). Pour le phosphore disponible et le carbone total, les résultats sont intermédiaires ($0,6 < R^2 < 0,8$). Si certains de ces résultats semblent logiques – il est bien connu que le pouvoir tampon, qui se traduit par l'évolution du pH, n'est pas une fonction linéaire – d'autres, comme le comportement faiblement linéaire de la concentration en carbone total, sont surprenants. Ceci s'explique principalement par une forme de biais méthodologique qui est pourtant difficilement évitable. En effet, les analyses agronomiques sont traditionnellement réalisées sur la fraction fine (< 2 mm). Or, les mélanges en conditions réelles sont réalisés sur la fraction totale. Dans le cadre de cette expérimentation, pour se rapprocher des conditions réelles, les mélanges (et donc les proportions indiquées en abscisse) avaient été effectués avec des matériaux tamisés à 4 mm. Il apparaît ainsi que l'importance, variable d'un matériau à l'autre, des fractions grossières des matériaux testés joue un rôle prépondérant dans les propriétés des mélanges.

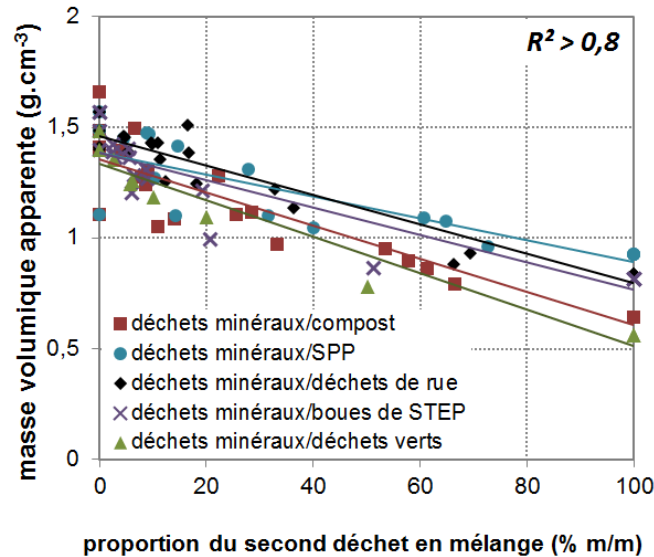


Figure 24. Effet du mélange de deux matériaux sur la masse volumique apparente (Rokia et al., 2014)

Dans le cadre de ce premier essai de modélisation, nous avons eu l'occasion de travailler avec Frantz Fournier, un collègue modélisateur du LRGP (UMR 7274 CNRS), qui nous a proposé six modèles polynomiaux sur la base des données expérimentales précédemment évoquées (Figure 25). Le résultat confirmait les résultats expérimentaux puisque les modèles prédisaient correctement les propriétés les plus linéaires mais étaient peu adaptés au pH en particulier. Par la suite, nous avons comparé les simulations effectuées avec les 6 différents modèles polynomiaux avec un modèle unique pour tous les paramètres. Celui-ci, plus simple, intégrait cette fois, outre le ratio de chacun des matériaux, le pourcentage de fraction fine. Il s'est avéré que ce modèle unique, testé sur de nouveaux mélanges réalisés à posteriori, était certes moins performant que les modèles polynomiaux pour certains paramètres et/ou certains mélanges, mais que sa robustesse était globalement supérieure. C'est pour cette raison que ce modèle « volumique » a pour l'instant été utilisé dans la première version de l'outil SITERRE décrit dans la section 7.1. Néanmoins, il est clair que cette question de la modélisation des paramètres de mélanges de déchets et sous-produits reste un enjeu fort à la fois scientifique – car elle nécessite d'appréhender les interactions physico-chimiques induites par l'action de mélange - et technique – car elle sous-tend la fiabilité de cette étape cruciale de formulation -.

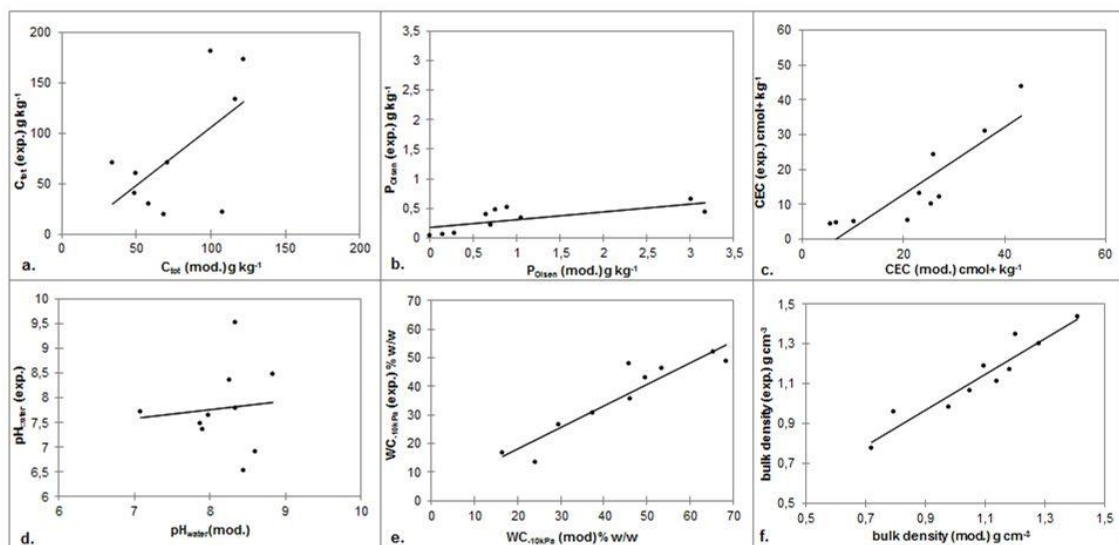


Figure 25. Régressions linéaires obtenues en comparant les valeurs modélisées et expérimentales pour a. C_{tot} , b. P_{Olsen} , c. CEC, d. pH_{eau} , e. humidité à capacité au champ, f. masse volumique – les valeurs de R^2 calculées sont respectivement de 0,6 ; 0,7 ; 0,9 ; 0,1 ; 0,9 et 0,9. (Rokia et al., 2014)

3.2.3. Mise en œuvre de la construction de sol

Cette section présente l'analyse critique basés sur les retours d'expériences de chantiers de construction de sol afin d'initier une réflexion sur la mise en œuvre de matériaux pour construire des Technosols.

Mélange des matériaux parents et construction du sol

Pour le premier chantier que nous avons réalisé, en 2003, dans le cadre de la mise en place des parcelles lysimétriques de sols construits, nous avons procédé de manière très fine en mélangeant les matériaux à l'aide du godet d'une pelle mécanique. Ce brassage était fait en tas car les volumes en jeu étaient limités (environ 300 m³). Il était effectué pendant plusieurs heures jusqu'à atteindre un niveau de mélange visuellement satisfaisant. Pour la mise en place des deux parcelles de 0,5 ha Biotechnosol en 2007, le mélange sous-produit papetier + chaux (environ 800 m³) a été effectué selon la méthode décrite précédemment ; pour le mélange sous-produit papetier + terre de désorption (environ 8000 m³) des bennes agricoles étaient remplies avec les proportions choisies des deux matériaux, puis les mélanges étaient déversés sur le site et régalez couche par couche à l'aide du godet d'un chargeur. Dans le cas des sols construits de SITERRE, les différents mélanges (environ 4 m³) ont été effectués avec un godet malaxeur. Enfin, pour le chantier LORVER (environ 18000 m³), deux techniques ont été utilisées : i) pour les mélanges des horizons de profondeur les matériaux étaient placés dans une benne et apportés en tas après passage dans un épandeur adapté, puis régalez couche par couche à l'aide du godet d'un bulldozer sur chenilles marais ; ii) pour l'horizon de surface (mélange terre bioremédiée + compost), le compost a été épandu en surface et mélangé à la terre à l'aide d'une charrue à disque et dents vibrantes suivi d'un passage de herse rotative.

Les apparences des différents profils de sols construits issus de ces 4 opérations sont explicites (Figure 26). Le classement des mélanges en fonction de leur homogénéité est clairement : 1) SITERRE ; 2) parcelles lysimétriques ; 3) LORVER ; 4) Biotechnosol. Logiquement, plus les modalités de mélange ont été poussées en termes de temps passé ou de moyens techniques mis en œuvre (ce qui dépendait aussi largement des volumes à manipuler), plus les mélanges présentent une répartition homogène des constituants élémentaires. Il est en particulier intéressant de noter l'apparition encore visible après quelques mois d'une stratification au sein d'horizons de même constitution pour LORVER et Biotechnosol inhérente au mode de dépôt.

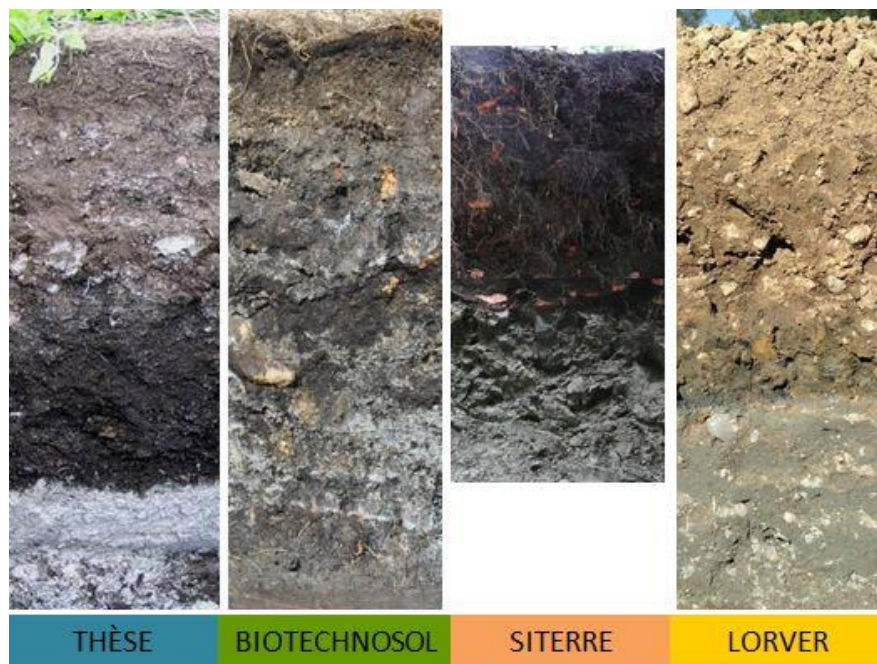


Figure 26. Vue des profils de sol construits mis en place à l'occasion de ma thèse (parcelles lysimétriques) et des projets Biotechnosol, SITERRE et LORVER

Même si nous évoquerons dans le chapitre 5 certains processus localisés qui sont les conséquences des hétérogénéités liées au protocole de mélange, nous n'avons, à ce jour, pas d'élément probant pour quantifier l'influence de la qualité du mélange sur le fonctionnement et l'évolution des sols construits. Rappelons cependant que nous avons évoqué précédemment (section 2.7.3) l'influence majeure de cette action anthropique de mélange sur la structuration initiale des Technosols.

Enfin, nous pouvons évoquer ici les difficultés inhérentes à la réalisation de ces opérations de mélange et de dépôt. Nous avons pu en faire l'expérience lors du chantier LORVER. En effet, l'utilisation de matériaux foisonnés, peu stables et – comme c'est le cas des sous-produits papetiers – à très forte capacité de rétention en eau, rend très complexe leur manipulation en conditions pluvieuses. Ainsi, la mise en place des parcelles LORVER a été retardée de plusieurs mois par des pluies très fréquentes qui empêchaient les engins de chantier de circuler sur les premières couches de sols construits mises en place. En résumé, nous n'avons pas encore identifié de méthode adéquate pour réaliser des chantiers de grands volumes dans des conditions optimales et avec un résultat satisfaisant, mais il s'avère que les conditions climatiques au moment de la mise en place ont une importance cruciale sur la durée et la qualité du chantier.

Hydromorphie temporaire initiale

Dans le cas des deux chantiers de grande ampleur (Biotechnosol et LORVER), nous avons été confrontés à un fonctionnement hydrique particulier des sols construits dans les mois suivants leur mise en place. En effet, des accumulations d'eau éparses (Biotechnosol) et localisées (LORVER) sont apparues dès les premières fortes pluies (Figure 27).



Figure 27. Vues des parcelles Biotechnosol (en haut) en mars 2008 et LORVER (en bas) en juin 2017

L'hypothèse la plus probable est que le compactage inhérent au passage des engins lors de la mise en place des différents horizons ait tassé les sols et réduit fortement leur conductivité hydraulique verticale. La conséquence directe de ce phénomène est la formation de microreliefs à la surface des parcelles (tassement préférentiel + déplacement de particules). Ceci est en particulier gênant pour le développement de la végétation. Il est à noter qu'au bout d'une période variable qui dépend fortement des conditions climatiques, mais aussi du niveau de développement de la végétation, l'hydromorphie de surface a disparu et n'a plus jamais été visible.

Implantation de la végétation

Deux problèmes distincts ont été rencontrés liés au développement de la végétation dans les premiers stades. Le premier est une conséquence directe du phénomène d'hydromorphie de surface évoqué précédemment. En effet, non seulement, certaines plantes supportent mal ces conditions d'excès d'eau (*e.g.* le chanvre), mais l'érosion localisée a également fait ressortir des grains. Le second problème rencontré est celui de la migration des particules fines depuis la surface vers la profondeur ; ceci a en particulier été observé pour les lysimètres SITERRE qui utilisaient des mélanges associant des matériaux grossiers et des matériaux fins (Figure 28). Ce lessivage a donc laissé en surface (premiers centimètres) un substrat très peu adapté à la germination des graines. Il s'est donc avéré nécessaire d'apporter par la suite une couche de lit de semence obtenu par tamisage du mélange utilisé.

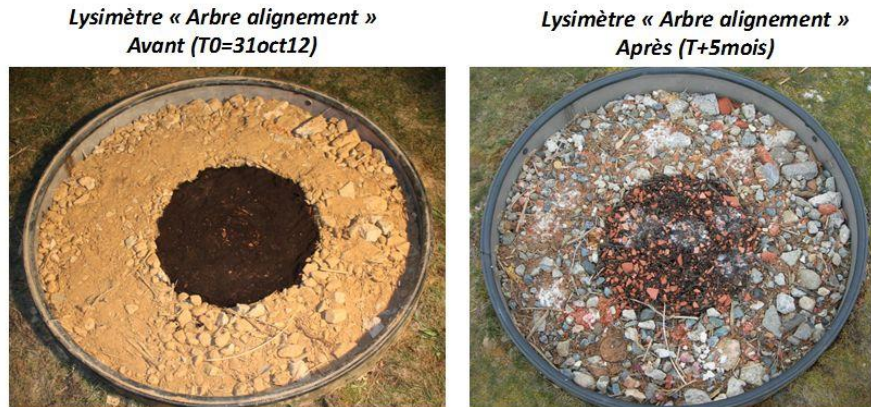


Figure 28. Phénomène de lessivage de particules fines depuis la surface des sols construits SITERRE

3.3. Prendre en compte les critères sociétaux

En plus des critères techniques évoqués dans la section ci-dessus, d'autres critères doivent être intégrés au choix des mélanges à réaliser pour la constitution des horizons de sol construits. En effet le succès de l'opération dépend également :

- de la viabilité économique : en fonction du budget disponible pour le chantier, les proportions de matériaux à coût positif (qui devront être achetés) ou à coût négatif (pour lesquels le producteur du déchet paye en vue de son recyclage) pourront être reconsidérées ; ce point ne sera pas traité de manière dédiée dans cette section et sera abordé dans le chapitre 7.1 ;
- des impacts environnementaux : ceci concerne aussi bien les émissions de gaz à effet de serre lors du transport, du mélange et de la mise en place des matériaux que les effets potentiels sur les compartiments de l'écosystème ;
- de l'acceptabilité sociétale : l'utilisation de déchets et sous-produits à la perception potentiellement controversée par les riverains en lieu et place de matériaux d'origines naturelles dont personne ne questionne l'origine n'est pas à négliger.

3.3.1. Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux de la construction de sol ont été abordés de manière différente dans les projets SITERRE et LORVER.

Dans le premier cas, les conséquences environnementales ont été intégrées de deux manières. Tout d'abord, le bilan carbone d'une opération a été déterminé. Il prend alors en compte uniquement le transport (depuis le lieu de production jusqu'à la plateforme de mélange, puis éventuellement jusqu'au site d'utilisation). Ce module se base sur la consommation en carburant des véhicules et permet surtout de comparer l'impact de différents scénarii de mélange entre eux. Plusieurs simulations ont été conduites par le partenaire Actéon. Elles ont permis la comparaison de solutions SITERRE avec des solutions conventionnelles récemment mises en œuvre par des collectivités pour trois scénarios d'usage différents, sur trois localisations différentes (Angers, Nancy, Île de France). Les bilans carbone estimés

étaient de 3 à 10 fois plus défavorable aux solutions conventionnelles par rapport aux solutions SITERRE (Rapport final SITERRE, 2015). D'autre part, les risques sanitaires potentiels ont été considérés par la définition de scénarios d'exposition dépendant de l'usage. Dans ce cas, une démarche d'EQRS générique a été conduite en considérant les risques vis à vis des promeneurs adultes et enfants, ainsi que des personnes chargées de l'entretien. Chacun des scénarios présente des hypothèses d'ingestion, d'inhalation, de contact cutané, et de doses associées qui dépendent du temps de présence, de doses journalières ingérées/inhalées/contact cutané, et de l'âge des cibles (Damas & Coulon, 2016). Les résultats obtenus font ressortir le fait que la voie d'exposition par ingestion est prépondérante. L'évaluation conduite par l'équipe du BRGM montre de légers dépassements pour certains polluants (As, Cr et Sb). Dans le cas du chrome et de l'arsenic, le modèle a été appliqué pour les formes les plus toxiques de ces deux éléments en l'absence de données analytiques précises sur celles qui sont effectivement présentes dans le mélange. Il n'est donc pas possible de confirmer ce risque, qui est ici majoré dans le cas de cette évaluation. Concernant l'antimoine (Sb), un seul des mélanges testés au cours du projet présente un risque significatif ; il en ressort qu'une vigilance particulière est à porter à cet élément. Au final, l'expertise a conclu que les risques pour l'Homme de la construction de sol en végétalisation urbaine sont globalement acceptables mais devront néanmoins être considérés avec attention lors de la mise en œuvre des sols.

Dans le cadre du projet LORVER, Jérémy Rodrigues a réalisé sa thèse autour de l'analyse de cycle de vie intégrative de filières de production de biomasse à usage industriel sur sols construits (Rodrigues, 2016). L'une des contributions principales de ce travail est la définition des modes d'organisation alternatifs à la filière LORVER, en sachant que celle-ci intègre à la fois : i) la réhabilitation de friche par construction de sol, ii) le recyclage de déchets et sous-produits, iii) la production de biomasse non alimentaire sur sol construit. Ainsi, les alternatives qui ont été retenues et qui sont regroupées dans un scénario REF se fondent sur : i) une production de biomasse non alimentaire sur sol de friche non réhabilité ce qui implique des rendements plus faibles que dans le scénario LORVER, ii) le recyclage ou l'élimination des déchets et sous-produits par des filières en place (*i.e.* enfouissement en ISDI, épandage agricole, compostage), iii) l'utilisation d'espaces agricoles supplémentaires pour atteindre le même rendement que le scénario LORVER dans la production de biomasse non alimentaire. Les impacts environnementaux considérés concernent à la fois la santé humaine, la qualité de l'environnement et l'état des ressources naturelles. In fine, 4 scénarios sont considérés sachant que LORVER repose sur la construction de deux sols construits distincts pour la culture de chanvre d'une part et de ligneux (TTCR) d'autre part et que deux scénarios REF ont été créés. Les résultats de l'évaluation sont contrastés. Certains impacts sont plus élevés pour les scénarios LORVER, alors que d'autres sont plus faibles (Figure 29). Les impacts négatifs s'expliquent principalement par le fait que LORVER implique le transport de très importantes quantités de matériaux (plus de 30000 tonnes), parfois sur des distances allant jusqu'à 70 km. Par ailleurs, si la construction de sol évite l'enfouissement de déchets inertes (ce qui est un point favorable en termes d'impacts), il consomme des sous-produits papetiers dont la valorisation alternative en épandage agricole présente notamment l'intérêt de se substituer à la chaux (produit ayant un très fort impact environnemental) ; en effet, dans les scénarios REF, l'épandage de sous-produits papetiers permet d'économiser de la chaux, ce qui n'est pas le cas dans les scénarios LORVER. Les points positifs de la construction de sol mis en évidence par l'ACV se situent essentiellement à deux niveaux : la diminution de l'artificialisation des sols et le stockage de carbone.

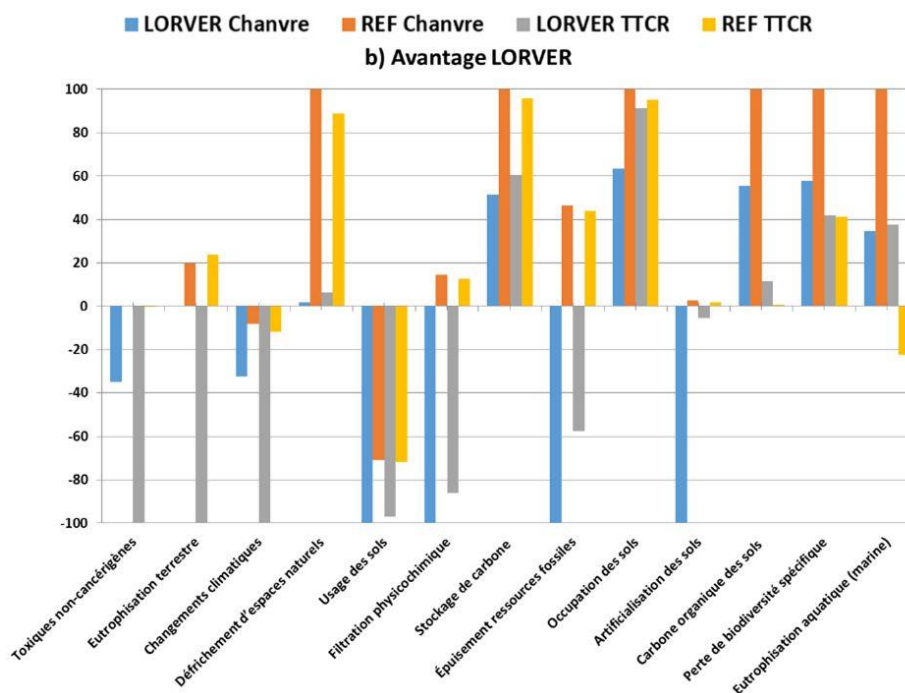


Figure 29. Impacts estimés par ACV pour 4 scénarios (LORVER Chanvre, REF Chanvre, LORVER TTCR, REF TTCR) - cas des impacts favorables aux scénarios LORVER (Rodrigues, 2016)

3.3.2. Acceptabilité sociale

Toujours dans le cadre du programme SITERRE, les conditions d'acceptation à considérer pour une mise en œuvre opérationnelle des déchets et sous-produits potentiellement utilisables en construction de sol ont été explorées. Ceci s'est fait dans le cadre de focus groupes, c'est-à-dire de discussions interactives dans un cadre non contraignant et détendu. Cette approche permet d'obtenir des informations sur les préférences et valeurs des personnes concernant un sujet défini. Ces entretiens ont été conduits par le partenaire Actéon (Rapport final SITERRE, 2015).

Différentes étapes d'évaluation ont été conduites auprès des personnes interrogées qui devaient se prononcer sur leur perception des 11 matériaux SITERRE et leur acceptation à voir ces matériaux utiliser pour une utilisation en végétalisation urbaine. Les résultats sont très contrastés avec des niveaux d'acceptation très contrastés (Figure 30). Les matériaux les plus favorablement perçus sont les déchets de brique, les déchets verts et le compost. A l'inverse, les sous-produits papetiers, les boues de station d'épuration et les déchets du bâtiment sont perçus très négativement. Il s'avère qu'à l'échelle de chaque matériau, l'acceptabilité est influencée essentiellement par la connaissance ou le préjugé intellectuel du matériau. En ce sens, c'est ce qui se dégage des mots qui prime. Ainsi, le rapport au mot s'avère très important. Le grand public est hétérogène face à la sémantique et n'associe pas les mêmes choses selon la consonance de certains mots. Des efforts de communication, d'information et d'explication autour des matériaux, de leurs origines et des impacts qu'ils véhiculent semblent des éléments déterminants dans l'acceptabilité en vue de l'utilisation de certains matériaux (Rapport final SITERRE, 2015).

	Visuel	Nom	Visuel + nom	reconnaissance (%)	Cités pour mélange	Utilisés pour mélange consensuel	Interdis	Note globale (linéaire)
DV	4,6	4,5	4,6	39%	1,4	4	1	3
CO	3,2	4,2	4,6	37%	4,6	3	0	3
SP	-3,6	-1,9	-4,2	17%	0,6	1	4	0
DR	4,4	-6,8	0,5	19%	2,0	2	1	1
BE	0,0	-1,0	0,1	45%	6,8	2	0	2
BA	-2,8	-4,3	-2,8	34%	2,0	4	0	1
BS	0,4	-6,2	-5,0	2%	1,8	1	2	0
TA	3,1	-1,0	1,8	40%	1,6		1	1
BR	4,4	0,2	4,1	98%	2,2	3	0	3
DB	-0,8	-5,5	-4,1	44%	1,0		4	0

Figure 30. Synthèse des focus groupe des différentes étapes d'analyse et note globale pour chaque matériau testé (Rapport final SITERRE, 2015)

3.4. Conclusion intermédiaire

Le procédé de construction de sol, même s'il bénéficie aujourd'hui de dix ans de recul reste une écotechnologie jeune qui demande encore des développements ultérieurs. Ceci est clair pour ce qui concerne la mise en œuvre et l'application en conditions réelles ; les applicateurs sont confrontés à des difficultés techniques parfois significatives. Nos travaux ont également souligné la complexité de pouvoir appréhender les propriétés bio-physico-chimiques de mélanges de matériaux d'origine anthropique et les résultantes en terme de fonctionnement et d'évolution de ces sols (ces aspects seront évoqués dans les deux chapitres suivants). En proposant une inversion de paradigme qui consiste à définir *a priori* les propriétés idéales du sol à construire pour remplir une fonction, le génie pédologique constitue à la fois un levier d'amélioration de la gestion des milieux anthropisés et une source de questionnements scientifiques.

Publication(s)

Rokia S., Séré G., Schwartz, Deeb M., Fournier F., Nehls T., Damas O., Vidal-Beudet L., 2014, Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes, Waste Management, vol.34, 11, p 2155-2162

Séré G., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2008. Procédé de valorisation de déchets et sous-produits en construction de sol pour la réhabilitation de sites dégradés, Déchets Science & Technique, vol 50

Séré G., Renat J.C., Schwartz C., 2007, Procédé de traitement d'un sol dégradé et de construction d'un sol artificiel, n° d'enregistrement national 07 57036

Ouvrage(s) et Chapitre(s) d'ouvrage(s)

Vidal-Beudet L., Cannavo P., Schwartz C., Séré G., Legret M., Béchet B., Peyneau P.E., Bataillard P., Coussy S., Damas O., 2017, Using wastes for fertile urban soil construction – The French research project SITERRE, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p

Damas et Coulon, 2016, Créer des sols fertiles, 335p, Editions Le Moniteur

Rapport(s) & Mémoire(s) de stage(s)

Rodriguez J., 2016, Analyse de cycle de vie intégrative de filières de production de biomasse à usage industriel par la valorisation de délaissés, Thèse Université de Lorraine, 226p

SITERRE, Rapport final, 2015, Procédé de construction de Sols à partir de matériaux Innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière, ADEME, 396p

Deeb M., 2012, Modélisation de la fertilité physico-chimique de mélanges de sous-produits urbains utilisés en construction de sol, Mémoire de Master 2 Université de Lorraine, 50p

Roy A., 2012, Détermination des paramètres optimaux pour le mélange de deux matériaux technogéniques, Mémoire de Master 1 Université de Lorraine, 22p

4. Quelles fonctions rendues par les Technosols construits ?

4.1. Matériels et Méthode

4.1.1. Sols construits étudiés

Dans ce chapitre, les résultats présentés ont été obtenus sur 4 Technosols construits (Figure 31).

Les deux premiers d'entre eux correspondent à la modalité « Eponge végétale », mise en œuvre à la fois en 2004 dans le cadre de ma thèse (Séré, 2007 ; Séré *et al.*, 2009), qui sera par la suite appelée Technosol 1, et dans le cadre du projet Biotechnosol en 2007 qui sera appelé Technosol 2 (Cortet *et al.*, 2015). Ils ont été respectivement suivis entre 2004 et 2016 et entre 2007 et 2016. Technosol 3 correspond à la modalité « square et parc » mise en œuvre dans le cadre du programme SITERRE (Damas & Coulon, 2016) qui a été suivi de novembre 2012 (date de sa mise en place) à septembre 2014 (date de son démantèlement). Technosol 4 correspond à la modalité appelée « Confinement » mis en place dans le cadre de Biotechnosol en 2007. Il se distingue de Technosol 1 et Technosol 2 par la présence en profondeur d'un horizon de sous-produits papetiers chaulés et compactés.

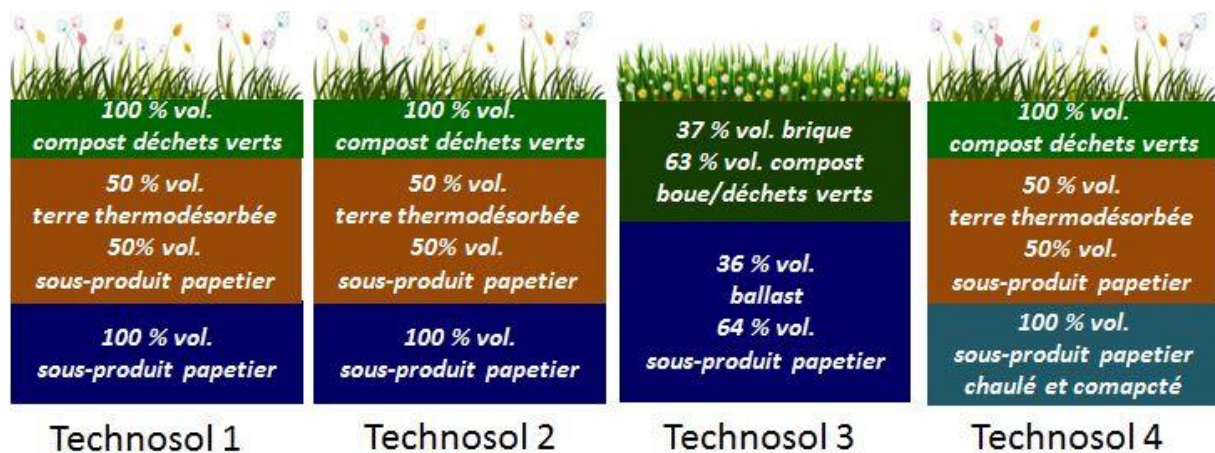


Figure 31. Organisation et composition des sols construits étudiés pour l'étude du fonctionnement

Les compositions complètes de ces sols construits sont détaillées dans les références présentées ci-dessus.

4.1.2. Dispositifs expérimentaux

Parcelles expérimentales

Technosol 1 a été étudié dans des parcelles lysimétriques de 100 m² (Séré, 2007 ; Séré *et al.*, 2009). En mai 2005, du ray-grass (*Lolium perenne* var. *Tove*) et de la luzerne (*Medicago sativa*) ont été semés à des densités respectives de 24 g.m⁻² et 20 g.m⁻². Des tontes annuelles sans exportation ont ensuite été réalisées en septembre de chaque année. Technosol 2 et Technosol 4 ont été mis en place sur deux parcelles expérimentales de 0,5 ha (Cortet *et al.*, 2015). En novembre 2007 un mélange d'herbacées (30 % *Lolium perenne* var. *Tove*, 40 % *Festuca arundinacea*, var. *Fuego*, 30 % *Dactylis glomerata*, var. *Amba*) a une densité de 10 g.m⁻². Des tontes annuelles sans exportation ont ensuite été réalisées en septembre de chaque année (Figure 32).



Figure 32. Développement de la végétation sur Technosol 2, avant (2000), pendant (2007) et après la construction du sol (2008 à 2012)

Lysimètre équipé

Technosol 2 et Technosol 3 ont été étudiés en lysimètres sur la station expérimentale du GISFI (Figure 33) (fournisseur UGT) qui dispose également d'une station météorologique. Les colonnes sont équipées à trois profondeurs (50, 100 et 150 cm) de sondes TDR (humidité volumique), d'équitensiomètres en surface et de tensiomètres à convertisseur de pression de tensiomètres en profondeur (potentiel matriciel), de sondes de températures et de bougies poreuses. A ces trois profondeurs, se trouvent également des bougies poreuses en céramique. Pour déterminer la quantité d'eau de drainage, des compteurs à bascule sont utilisés. Ces paramètres sont acquis avec une fréquence horaire grâce à une unité de saisie de données, reliée à un ordinateur central.

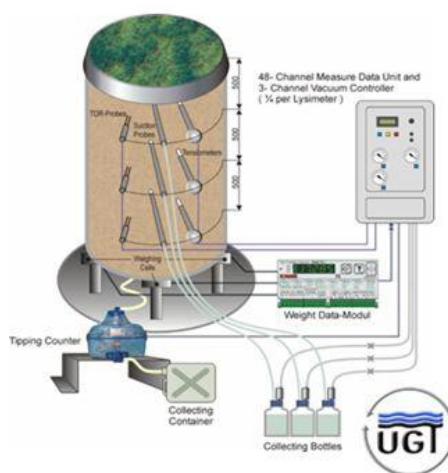


Figure 33. Schéma d'une colonne lysimétrique permettant le suivi de paramètres physiques et hydriques du sol et le prélèvement de la solution du sol

4.1.3. Échantillonnage et caractérisation

Prélèvements

Des prélèvements de sol ont été effectués : d'échantillonnage à partir de fosses pédologiques ouvertes en 2006, 2010 et 2014 pour le Technosol 1 et d'échantillonnage de surface sur différentes mailles en 2008, 2009, 2010, 2011, 2014 et 2015 pour Technosol 2 et Technosol 4.

La production de biomasse aérienne et le développement racinaire ont été mesurés toutes espèces végétales confondues au cours du temps. Le protocole d'échantillonnage pour l'évaluation de la croissance de la végétation a consisté en la délimitation de la zone à prélever à l'aide d'un quadrat de 1 x 1 m, puis le prélèvement de l'intégralité des parties aériennes de la végétation par quadrat, avec une débroussailluse ou un ciseau à herbe, au-dessus du tapis végétal sec. Les prélèvements sont pesés, afin d'obtenir la quantité de biomasse végétale fraîche, puis mis à sécher à l'air ambiant, afin d'obtenir la quantité de matière sèche. En fonction des dispositifs, de 1 (SITERRE) à 24 répétitions ont été faites.

Le développement racinaire des végétaux dans les profils de sols a été déterminé par mise en œuvre de la méthode développée par Tardieu et Manichon (1986).

Analyses physico-chimiques

Pour chaque échantillon, des analyses de carbone organique, et d'azote en suivant la norme NF ISO 10694 et de carbonate de calcium en suivant la norme NF ISO 10693 ont été réalisées. La masse volumique apparente a été mesurée par deux techniques différentes : soit par prélèvement de cylindre de 251 cm³, comme indiqué dans la norme NFX31-503, soit par pesée de l'intégralité du matériau excavé et mesure du volume lors de la réalisation des fosses pédologiques.

Le dosage des anions et cations majeurs (Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺, NH⁴⁺ et Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) en solution a été effectué, après filtration à 0,45 µm, par chromatographie ionique (IC 25, Dionex). Le dosage d'éléments géochimiques (Al, Fe, Mn, Si) et d'éléments traces métalliques (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en solution a été effectué, après filtration à 0,45 µm et acidification (10% HNO₃), par spectromètre ICP-AES (ICP séquentiel AES Liberty RL, Varian).

Données d'analogues naturels

Afin de comparer les données obtenues sur les Technosols construits, nous avons recueilli des données de sols naturels développés sur matériaux parents carbonatés sous des couverts analogues (prairie avec ou sans pâture). Six parcelles agricoles de la station expérimentale de l'INRA à Mirecourt (88) ont été sélectionnées grâce à l'aide de M. Jean-Louis Fiorelli (UP INRA SAD-ASTER) qui nous a également fourni les données analytiques.

Echantillonnage et identification de la macrofaune

Les échantillonnages sur la parcelle ont été effectués durant trois années consécutives de 2008 à 2011. Deux types d'échantillonnages ont été réalisés en avril de chaque année (voir détails dans Cortet *et al.*, 2015) : i) un tri manuel sur la base du prélèvement de litière et d'un bloc de sol pour la macrofaune du sol, ii) la mise en place de pièges d'interception (pièges barber ou pot-pièges) pour déterminer l'activité des macro-invertébrés mobiles en surface. Au total, pour chacune des méthodes, 24 échantillons ont été prélevés chaque année, sur chacune des zones identifiées de 20m x 20m. L'identification des macro-invertébrés a été faite sous loupe binoculaire, à l'aide de clefs de détermination et de guides. Les traitements statistiques appliqués ont été explicités dans le rapport de projet (Cortet *et al.*, 2015)

4.1.4. Modélisation de la dynamique du carbone

Présentation du modèle utilisé

Le modèle RothC (Coleman *et al.*, 1996) a été choisi. Il permet de déterminer l'évolution du stock de carbone organique en différenciant plusieurs compartiments de matière organique, correspondant chacun à des temps moyens de résidence dans le sol différents :

- **DPM** (« Degradable Plant Material ») : Fraction facilement dégradable de biomasse végétale apportée au sol
- **RPM** (« Recalcitrant Plant Material ») : Fraction récalcitrante de biomasse végétale apportée au sol

- **BIO** (« Biomass ») : Biomasse microbienne (y compris nécromasse)
- **HUM** (« Humus ») : Matière organique du sol stabilisée et résistante à la dégradation
- **IOM** (« Inert Organic Matter ») : Matière organique inerte et quasiment non dégradable

La vitesse de dégradation pour chaque compartiment i correspond à une cinétique du premier ordre caractérisé par une constante de temps k_i , avec un stock de C organique au temps t $C_i(t)$ décrit par la relation :

$$C_i(t) = C_{i0} * \exp(-k_i t)$$

où C_{i0} représente le stock initial du compartiment i .

A chaque itération suivant le pas de temps choisi (en général le mois), le produit de dégradation est réparti entre du carbone minéralisé, s'échappant sous forme de CO_2 dans l'atmosphère, et entre les deux compartiments BIO et HUM (aucun produit de dégradation ne peut circuler vers le compartiment IOM). Le modèle intègre les apports de C liés à la plante en répartissant automatiquement l'apport entre DPM et RPM suivant un ratio constant. Des apports d'amendements au cours du temps, répartis entre les cinq compartiments, sont possibles. Le modèle intègre d'autres facteurs, liés aux conditions météorologiques (température et humidité du sol, déterminée par bilan hydrique à partir de la pluviométrie) et à la teneur en argile du sol (effet de protection de la matière organique contre la dégradation). La présence ou non d'un couvert végétal influence également les constantes de dégradation.

Adaptation et paramétrisation du modèle

Le modèle RothC a été développé sur des sols naturels et repose sur l'hypothèse d'un horizon de sol unique de surface, homogène et relativement peu profond (*e.g.* 0 - 30 cm). Le modèle RothC, version 26.3, a été adapté ici grâce à l'aide de Delphine Derrien (UR INRA BEF) à une utilisation sur un fichier Microsoft Office Excel 2013, qui permet, contrairement à l'interface Windows proposée par les auteurs du modèle, de définir l'ensemble des constantes de temps, des ratios entre compartiments et des paramètres liés aux facteurs d'influence. La teneur en argile et l'épaisseur de l'horizon de surface considéré sont ainsi modifiables au cours du temps.

L'utilisation du modèle RothC implique de définir la répartition initiale du C organique des différents matériaux parents à l'origine des Technosols construits dans les cinq compartiments prévus par RothC. Cette répartition est estimée d'après une série d'hypothèses et de mesures qui ont été réalisées uniquement sur les matériaux parents du Technosol 2. La répartition entre les différents compartiments de matière organique estimée pour le Technosol 2 est donc retenue aussi pour le Technosol 1. Le détail de la paramétrisation du modèle (répartition initiale du C entre les différents pools pour chaque matériau, répartition temporelle des entrées de C liées aux plantes, données climatiques, prise en compte du tassement et de l'évolution de l'épaisseur, évolution de la teneur en argile) est présenté dans le rapport final de post-doc (Rees, 2016).

4.2. Stockage de carbone

Cette section traite en particulier du suivi des stocks de carbone dans les Technosols construits et des essais de modélisation de l'évolution des stocks de carbone organique qui ont été conduits dans le cadre du post-doc de Frédéric Rees (2015 - 2016) au sein du projet LORVER (2012 – 2018) et font l'objet d'une publication en cours de soumission (Rees *et al.*, en préparation).

4.2.1. Monitoring des stocks de carbone

En premier lieu, il apparaît que le stock de carbone organique dans les 30 premiers cm des deux Technosols construits est significativement supérieur aux sols naturels de référence (entre 125 et 190 $t \cdot ha^{-1}$ pour les Technosols et entre 90 et 100 $t \cdot ha^{-1}$ pour les sols naturels) (Figure 34). Sur la période considérée, le stock de carbone organique est resté constant pour les sols naturels, alors qu'il a sensiblement décliné pour les Technosols construits. En effet, même si les valeurs initiales diffèrent entre les deux sols étudiés (Technosol 1 = 190 $t \cdot ha^{-1}$; Technosol 2 = 153 $t \cdot ha^{-1}$) du fait de différences de

composition et de mise en place, la dynamique globale est similaire. Une décroissance très prononcée intervient au cours des quatre premières années, puis le stock remonte progressivement avant d'atteindre ce qui pourrait être un plateau comparable pour les deux sols (autour de 150 t.ha⁻¹).

Les trois temps de la dynamique observée peuvent s'expliquer ainsi :

1. Les matériaux parents utilisés pour la construction des différents horizons de ce sol (y compris le second horizon qui, dans l'estimation proposée ici concerne l'épaisseur 10-15 jusqu'à 30 cm) sont particulièrement riches en matières organiques ce qui explique le stock initial beaucoup plus élevé que les sols naturels analogues ;
2. Différents pools de matières organiques plus ou moins dégradables, voire récalcitrantes sont apportées par la diversité des matériaux parents (*e.g.* depuis le compost jusqu'à la terre thermo-désorbée, en passant par le sous-produit papetier) ; parmi ceux-ci, une partie du carbone organique a vraisemblablement subi une minéralisation intense dans les premiers mois suivants la construction de sol ce qui pourrait s'apparenter au *priming effect* largement étudié dans la littérature (*e.g.* Mondini *et al.*, 2006) ;
3. La ré-augmentation progressive du stock peut s'expliquer par deux mécanismes différents : d'une part le tassement du sol qui affecte notamment les premiers horizons et conduit à une augmentation de la masse volumique apparente (Séré *et al.*, 2010) et d'autre part, l'apport supplémentaire de carbone rhizosphérique par la biomasse qui s'est développée sur le sol (Cortet *et al.*, 2015) ;

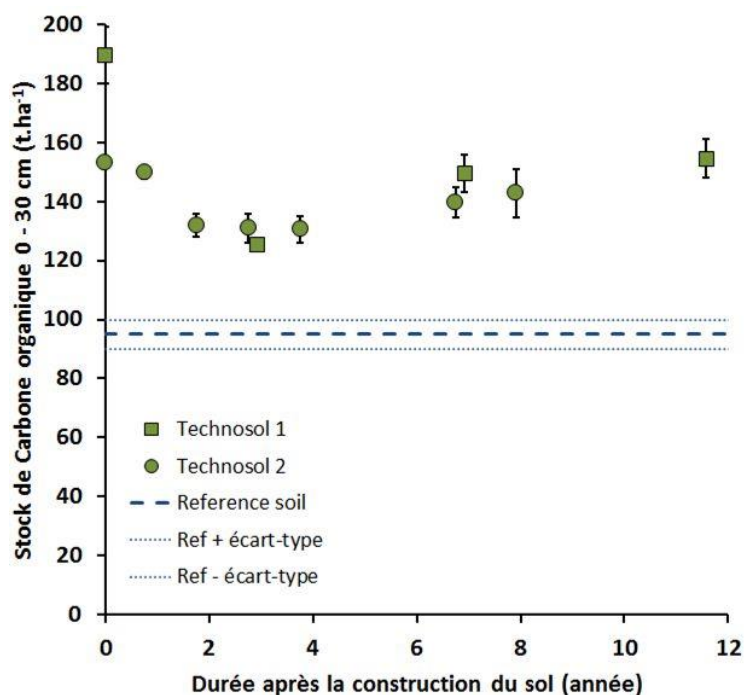


Figure 34. Evolution du stock de carbone organique dans les 30 premiers cm de Technosols 1 et 2 et comparaison avec des sols naturels

Encore plus impressionnante est la différence de stock si l'épaisseur totale des sols est considérée (Figure 35). Même si, comme nous l'avons vu, le stock total décroît dans le sol construit – mais uniquement sur les horizons superficiels - le stock de carbone organique reste 4 fois supérieur dans le Technosol que dans les sols naturels étudiés.

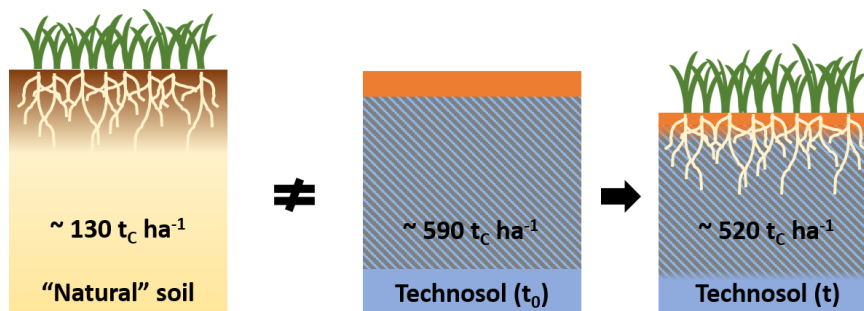


Figure 35. Comparaison des stocks de carbone organique entre Technosol construit et sol naturel sur toute l'épaisseur du profil

A titre de comparaison, nous avons également calculé les stocks d'azote dans les mêmes conditions (Rees *et al.*, en cours). Si la même tendance d'évolution que pour le carbone organique est observable dans les Technosols, les stocks sont, cette fois, inférieurs aux sols naturels étudiés.

4.2.2. Comparaison des stocks de carbone avec d'autres Technosols construits

Nous avons débuté un travail complexe consistant à comparer nos résultats avec des données de la littérature sur d'autres Technosols (Figure 36). Il existe à ce jour très peu de données consolidées associant des mesures fiables de concentrations en carbone organique et de masse volumique apparente avec un suivi dans le temps.

Deux situations contrastées se présentent dans la littérature que nous avons analysée. D'une part des exemples de sol construit avec de fortes doses de produit résiduaire organique (Vidal-Beaudet *et al.*, 2012) comparables à Technosols 1 et 2 et d'autre part des Technosols formés sur des matériaux parents pauvres en matière organique (Scalenghe & Ferraris, 2009 ; Rumpel & Kögel-Knager, 2002 ; Akala & Lal 2001) et éventuellement enrichi par de faibles doses d'amendement (Bolan *et al.*, 2013). Dans le cas du sol construit mis en place par Vidal-Beaudet *et al.* (2012), même si le stock initial est sensiblement plus faible, il est comparable et sa dynamique d'évolution (sur une période plus courte) est semblable. A l'inverse, pour les trois autres exemples étudiés, les stocks croissent très rapidement dans les premières années, mais restent très inférieurs aux Technosols précédemment évoqués.

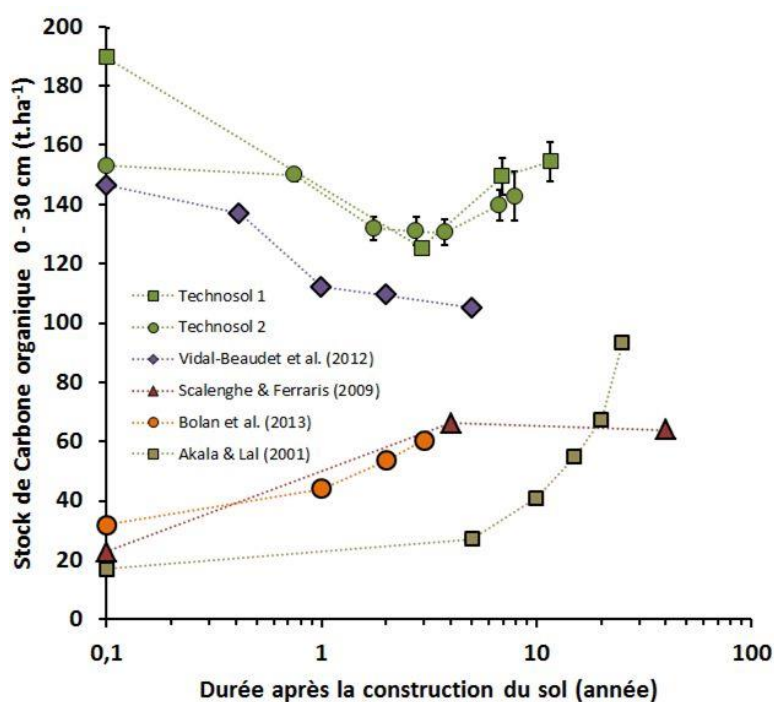


Figure 36. Comparaison de l'évolution des stocks de carbone organique dans les 30 premiers cm entre les Technosols étudiés et des données de la littérature sur d'autres Technosols

Les dynamiques observées sont différentes, mais elles traduisent toutes des variations de stocks très prononcées dans les premiers de temps de la pédogénèse des Technosols. En regardant les tendances, on se surprend même à envisager l'hypothèse d'une convergence du stock de carbone organique vers une valeur similaire pour tous les Technosols dans des conditions climatiques, d'usage et de topographie analogues. Ceci étant évoqué, en tout état de cause, il est légitime de s'interroger sur l'évolution à plus long terme et plus généralement sur la pérennité de ces stocks de carbone.

4.2.3. Modélisation

La comparaison entre les données expérimentales évoquées précédemment et les résultats de la modélisation avec Roth C sont présentés en Figure 37. En première approche, nous pouvons affirmer que les données simulées par le modèle - avec les paramètres de calibration choisis - reproduisent avec succès les ordres de grandeur des données expérimentales. De manière plus détaillée, il apparaît que la décroissance du stock prédite par le modèle est moins rapide que celle qui a été mesurée. Par ailleurs, la réaugmentation du stock ne semble pas traduite, dans l'intervalle de temps étudié, par le modèle.

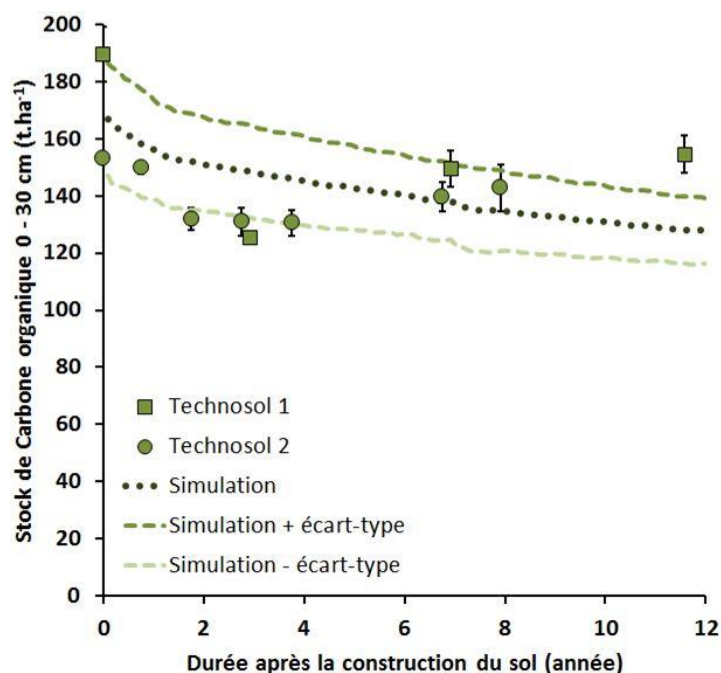


Figure 37. Comparaison entre les données mesurées et modélisées de stock de carbone organique dans les 30 premiers cm des Technosols 1 et 2

Les tendances qui se dégagent de la modélisation sur 12 ans apparaissent encore plus clairement lorsqu'une période beaucoup plus longue est étudiée (Figure 38). Pour cette simulation, il a été considéré que l'apport de carbone rhizosphérique serait constant au cours du temps et sans exportation de biomasse (c'est qui avait été mis en place sur les parcelles expérimentales pendant les 12 ans de suivi). Il est alors possible d'observer les deux phases successives observées sur les données expérimentales : décroissance initiale rapide de 0 à 35 ans, suivie d'une augmentation progressive de 35 à 200 ans environ. Ceci est suivi d'une phase d'augmentation de très faible intensité, de l'ordre de 0,1 t.ha⁻¹ tous les 50 ans.

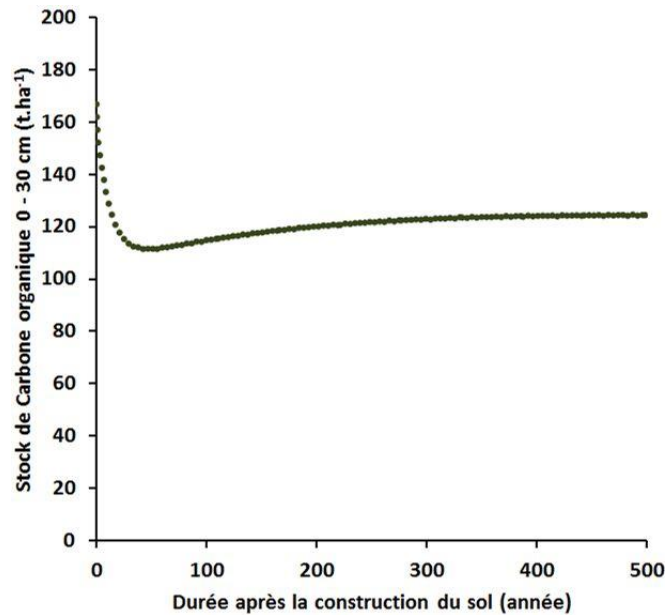


Figure 38. Simulation de l'évolution du stock en carbone organique dans les 30 premiers cm d'un Technosol construit

A première vue, la cinétique des processus d'entrée, de transformation et de minéralisation du carbone organique telle que décrite par le modèle, n'est pas conforme à la réalité. En effet, si la tendance globale simulée est similaire aux valeurs mesurées, il apparaît que les variations du stock ont été beaucoup plus rapides selon le suivi qui en a été fait. Cependant, nous pouvons faire l'hypothèse que la différence peut aussi s'expliquer dans une certaine mesure par les variations de masse volumique apparente susceptibles d'intervenir dans les différents horizons du sol construit.

4.3. Filtre et échange

La question de la capacité des Technosols construits à réguler les flux d'eau et à limiter les transferts a été abordée grâce à un dispositif expérimental d'exception : les colonnes lysimétriques équipées de la station expérimentale du GISFI. Elles permettent un suivi de l'hydrodynamique des sols particulièrement fin via l'acquisition d'un très grand nombre de données. De plus, dans le cadre du GISFI, nos collègues techniciens, présents sur la station, assurent la maintenance et le prélèvement régulier d'échantillons de percolats et de solutions du sol. Comme nous le verrons dans cette section, l'un des intérêts de cette démarche est que la puissance de ces outils génère des hypothèses scientifiques qui vont au-delà des questions que nous nous posons initialement.

4.3.1. Bilans hydriques

Suivi temporel des composantes du bilan hydrique

Les données acquises permettent de reconstituer les différentes composantes du bilan hydrique (précipitations, évapotranspiration réelle, eau drainée à la base du lysimètre) calculé ici pour Technosol 2 et Technosol 3 (Figure 39). Il est à noter que les 2 Technosols n'ont pas été étudiés sur les mêmes périodes de temps, ni sur la même durée. Par conséquent, les courbes représentant les pluviométries cumulées ne sont pas superposées. Le premier résultat marquant est le fait que, dans les deux cas, il y a une période de latence (3 mois pour Technosol 2 ; 2 mois pour Technosol 3) suivant la mise en place avant que des eaux de drainage soient collectées à la base du lysimètre. Ceci s'explique par une équilibration hydrique des sols. En effet, les matériaux parents sont généralement, lors de leur mise en œuvre, à une humidité inférieure à la capacité au champ. Un autre comportement commun et très logique est la traduction littérale du rythme saisonnier en climat océanique dégradé : l'ETR est maximale à partir du mois de mars jusqu'au mois de septembre ; le drainage suit une logique inverse, puisqu'il est fréquemment nul pendant les périodes les plus chaudes et élevé pendant les périodes froides. Par

contre, il apparaît clairement dans les résultats que l'ETR calculée est supérieure pour le Technosol 3 que pour le Technosol 2 (ceci peut être dû à des différences de fonctionnement hydrique entre les sols, mais plus sûrement à des différences de conditions climatiques et de développement de la végétation). Les quantités d'eau drainées sont similaires, même si un épisode de drainage majeur intervenant 15 mois après la mise en place de Technosol 3 est observé (il correspond à une période de précipitations d'intensité très forte). En résumé, les bilans hydriques obtenus témoignent d'un fonctionnement hydrique globalement normal - dans le sens où il est analogue à des bilans hydriques observés sur ce type de dispositif expérimental avec des sols naturels de texture équivalente - des deux Technosols, avec des différences sensibles entre les deux.

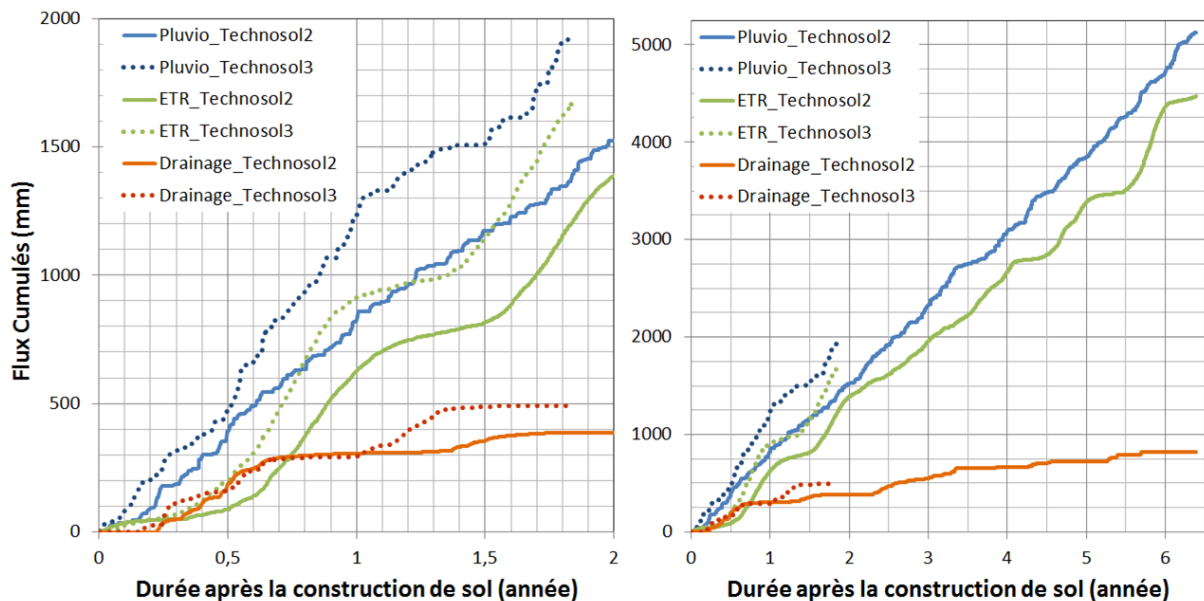


Figure 39. Bilans hydriques des Technosols 2 et 3, sur 2 ans et sur 6,5 ans

Afin de normaliser les termes du bilan hydrique mesurés dans des conditions climatiques différentes, nous avons tracé les termes ETR et drainage en fonction du relevé de précipitations (Figure 40). Il est alors intéressant d'observer une convergence assez rapide, au bout de quelques mois, entre les courbes des deux Technosols construits. Ceci signifie que, dans une large mesure, malgré leurs différences de composition les deux sols se comportent de manière similaire. Comme évoqué précédemment, il apparaît que les oscillations des deux courbes de rapport (ETR et drainage) sont en opposition de phase. Enfin, le suivi sur le plus long terme de Technosol 2 semble indiquer une décroissance progressive du rapport drainage/précipitations et une légère augmentation du rapport ETR/précipitations. Ceci s'explique très probablement par le fait que la densité de végétation, nulle initialement, ait augmenté progressivement conduisant à une augmentation du prélèvement et de la transpiration d'eau.

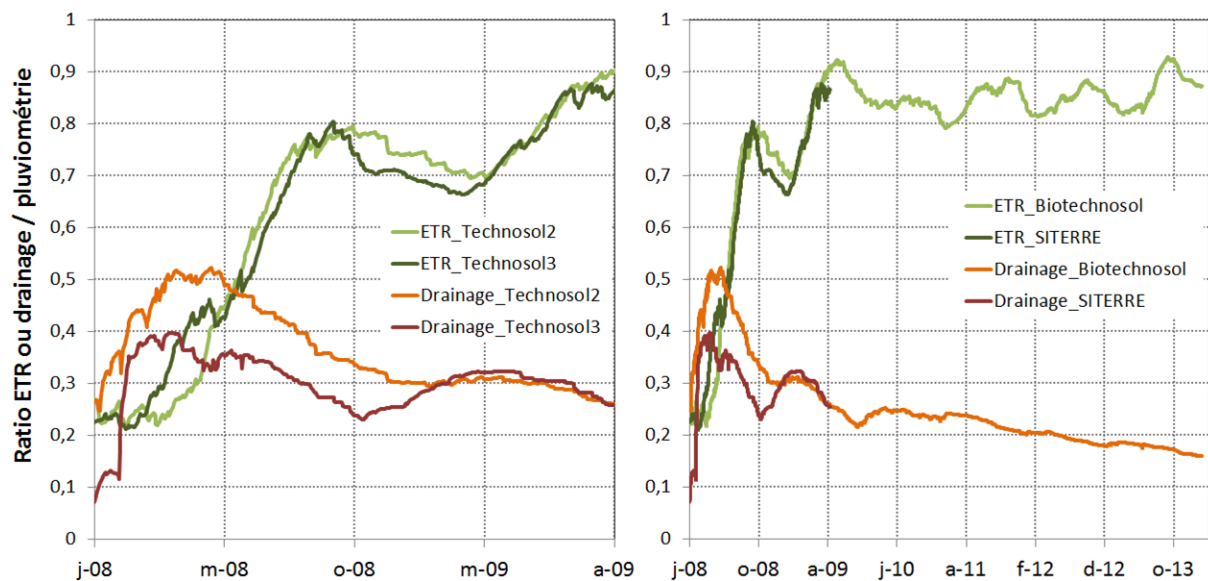


Figure 40. Evolution des rapports ETR/pluviométrie et drainage/pluviométrie pour les Technosols 2 et 3 sur 2 ans et sur 6,5 ans

Les différentes expériences de manipulation des données de suivi des lysimètres ont fait progressivement apparaître que l'un des paramètres les plus riches en information est la quantité d'eau stockée dans la porosité du sol (Figure 41). Cette donnée traduit de manière très sensible les conditions saisonnières : il est clair que le stock d'eau augmente généralement à partir de début septembre pour atteindre un maximum relatif en décembre-janvier, suivi d'une période plateau plus ou moins long, avant une décroissance très marquée, jusqu'à atteindre un minimum relatif en juin, avant un plateau similaire précédant la ré-augmentation. Cette information exprime aussi très bien les conditions climatiques d'une année sur l'autre : les suivis réalisés attestent du fait que, au-delà des différences de fonctionnement hydriques des sols étudiés, les années climatiques sont différentes (*e.g.* l'été 2010 n'a pas conduit à une décroissance du stock d'eau car il était humide et froid pour la saison). Au-delà de cette traduction des conditions météorologiques, la quantité d'eau stockée dans le profil de sol exprime aussi les différences de propriétés entre les sols étudiés. Il apparaît ainsi très nettement que Technosol 3 a une capacité de rétention en eau beaucoup plus élevée que Technosol 2, même si celle-ci commençait à décroître à la fin de la période de suivi. Ceci peut probablement s'expliquer par la composition de Technosol 3 qui comporte une grande quantité de sous-produits papetiers, ainsi que de la brique et du compost qui sont des matériaux capables de retenir des volumes d'eau conséquents dans leur porosité. Au-delà, un autre résultat de ce suivi est la mise en évidence de la décroissance globale des quantités d'eau stockées dans les deux sols, mais nous y reviendrons ultérieurement.

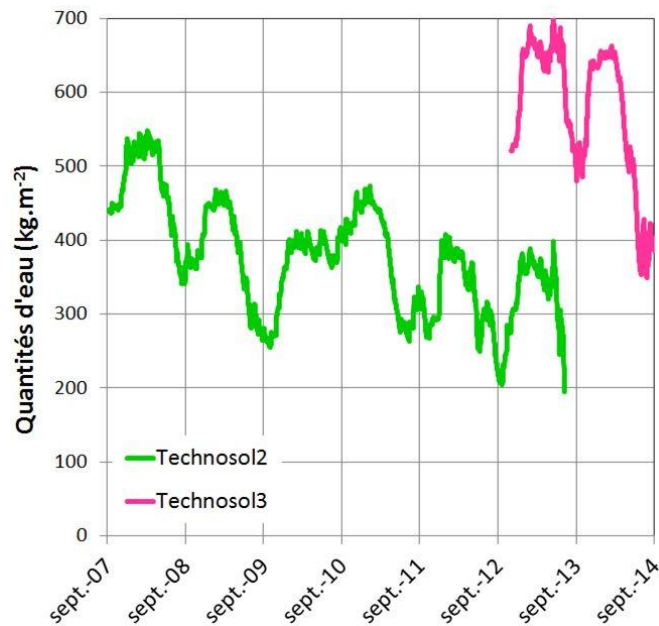


Figure 41. Evolution des quantités d'eau stockées dans Technosols 2 et 3

Les deux sols construits ont une hydrodynamique qui semble correspondre aux fonctionnalités qui étaient attendues : rétention d'eau disponible pour les plantes et limitation du drainage (qui correspond à la fin des périodes de suivi à 16 % du volume de pluie pour Technosol 2 et 26% pour Technosol 3).

Hydrodynamique des Technosols

Plus finement, le suivi des sondes TDR qui enregistrent les teneurs en eau à trois profondeurs dans le sol permet de comprendre les écoulements et les évolutions au sein du profil (Figure 42). Les sondes à 50 et 100 cm sont toutes les deux localisées dans l'horizon de mélange terre/sous-produit papetier ; la sonde à 150 cm est localisée dans la couche de sous-produit papetier pur. La comparaison des teneurs en eau aux deux premières profondeurs montre une ligne de base identique (autour de 30 % d'humidité volumique), mais des variations d'intensité plus forte pour la sonde à 50 cm (entre 20 et 60 % d'humidité). Ceci s'explique par la plus grande proximité avec la surface : les précipitations, lorsqu'elles sont d'une intensité suffisante, atteignent rapidement cette profondeur ; l'évaporation et surtout le prélèvement d'eau par les racines, sont beaucoup plus sensibles à 50 qu'à 100 cm. En effet, la teneur en eau à 100 cm est quasiment constante au cours du temps. La seule exception notable est la forte décroissance des humidités aux trois profondeurs à l'été 2014 (fin de l'année 5) qui traduit un épisode de faibles précipitations et de chaleur marquée. Pour ce qui est de l'humidité à 150 cm, la ligne de base est significativement plus élevée (autour de 50 % d'humidité volumique). Ceci s'explique par le fait que les propriétés hydriques du sous-produit papetier pur sont significativement différentes de celles du mélange (Séré *et al.*, 2010). Par ailleurs, l'amplitude des variations est également plus marquée qu'à 100 cm (entre 40 et 70 % d'humidité volumique). C'est très probablement dû à la configuration des colonnes lysimétriques. En effet, la condition de pression qui s'impose à la base du lysimètre est la pression atmosphérique (au niveau de la bonbonne de collecte des eaux de drainage). Ainsi, pour qu'il y ait écoulement à la base du lysimètre, soit 185 cm), le sol doit être à un potentiel matriciel de 0, c'est-à-dire à l'humidité volumique à saturation. Par voie de conséquence, et de manière assez similaire aux variations enregistrées à 50 cm, l'humidité à 150 cm varie assez fortement en fonction des flux d'eau de drainage et de l'assèchement global du sol. Il est essentiel de garder en tête cette spécificité du lysimètre en tant qu'outil d'observation car le fonctionnement hydrique qui est observé ici est très significativement différent de ce qui peut intervenir en conditions réelles avec un matériau parent ou un sol en dessous du sol construit.

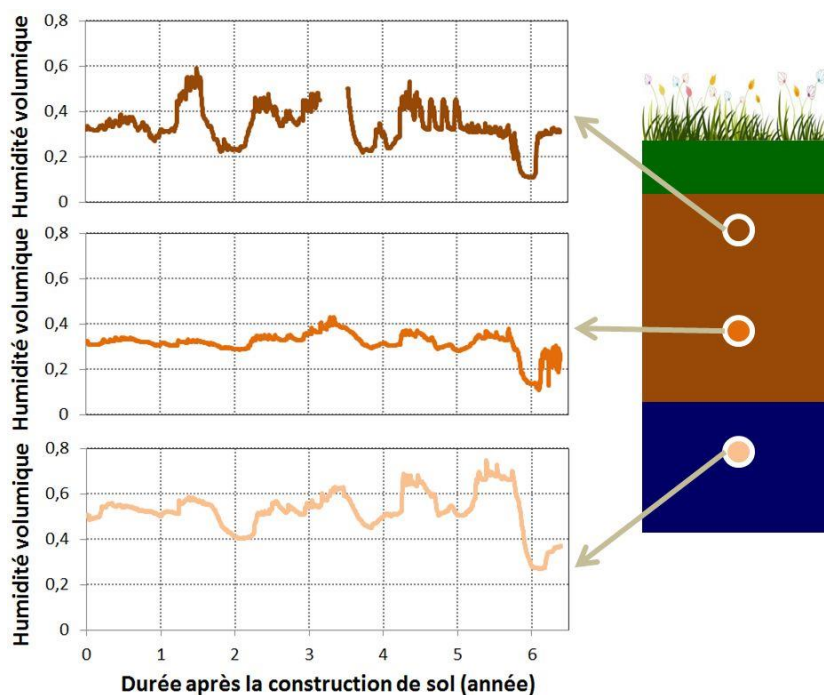


Figure 42. Evolution des humidités volumiques à 50, 100 et 150 cm au sein du Technosol 2 au cours de 6,5 années

Pour illustrer les différences de propriétés hydriques des différents horizons constitutifs, les prélèvements et analyses de sol réalisés sur les différents horizons du Technosol 2, après 1 et 3 ans révèlent des caractéristiques contrastées (cf. section 5.1). Il apparaît ainsi que la réserve en eau utile varie beaucoup au long du profil à t_{1an} (39 % dans le compost, 30% dans le mélange et 58 % dans le sous-produit papetier pur). De plus, pour ajouter à cette variabilité, il apparaît que cette propriété, essentielle à la compréhension de l'hydrodynamique du sol, varie aussi au cours du temps, comme en témoigne les valeurs à t_{3ans} (40 % dans le compost, 20 % dans le mélange et 60 % dans le sous-produit papetier pur).

4.3.2. Flux de polluants

Dynamique temporelle des relargages de contaminants

La construction de sol se caractérise par l'utilisation de matériaux parents d'origine anthropiques qui sont susceptibles de présenter des concentrations résiduelles en contaminants. Il est alors primordial de caractériser les flux potentiels de polluants vers les nappes. Dans le cas des éléments traces métalliques, deux comportements distincts ont été observés pour ce qui concerne les Technosols étudiés. En premier lieu, dans le cas du Zn, mais aussi de manière identique pour le Cu, le Cr et le Pb, les concentrations dans les percolats collectés à la base des dispositifs lysimétriques sont décroissantes au cours du temps (Figure 43). Ceci est en particulier marqué dans le cas de Technosol 3 où les concentrations en Zn chutent brutalement entre le premier percolat collecté ($[Zn] = 2720 \mu\text{g.L}^{-1}$) et les suivants ($[Zn] < 350 \mu\text{g.L}^{-1}$). Cependant des variations ponctuelles de moyenne amplitude des concentrations sont observées ; elles sont fréquemment fortement corrélées avec les volumes de percolat collecté (plus le volume de percolat est faible, plus il est concentré en élément et inversement). La comparaison des concentrations mesurées pour les 4 ETM évoqués fait apparaître qu'elles sont significativement plus faibles que la limite de qualité eaux brutes (Arrêté du 11 janvier 2007) (Figure 43). Aucune valeur limite de qualité eaux brutes n'existe pour le Ni, nous avons ainsi comparé les concentrations mesurées à la limite de qualité eau potable (Arrêté du 11 janvier 2007). Il apparaît que les concentrations mesurées dans les percolats de Technosol 3 sont toutes supérieures à cette valeur limite, alors qu'elles varient autour de celle-ci pour les percolats de Technosol 1 (Figure 43). Si, sur le

long terme les concentrations semblent décroître pour Technosol 3, les variations semblent plutôt cycliques pour Technosol 1.

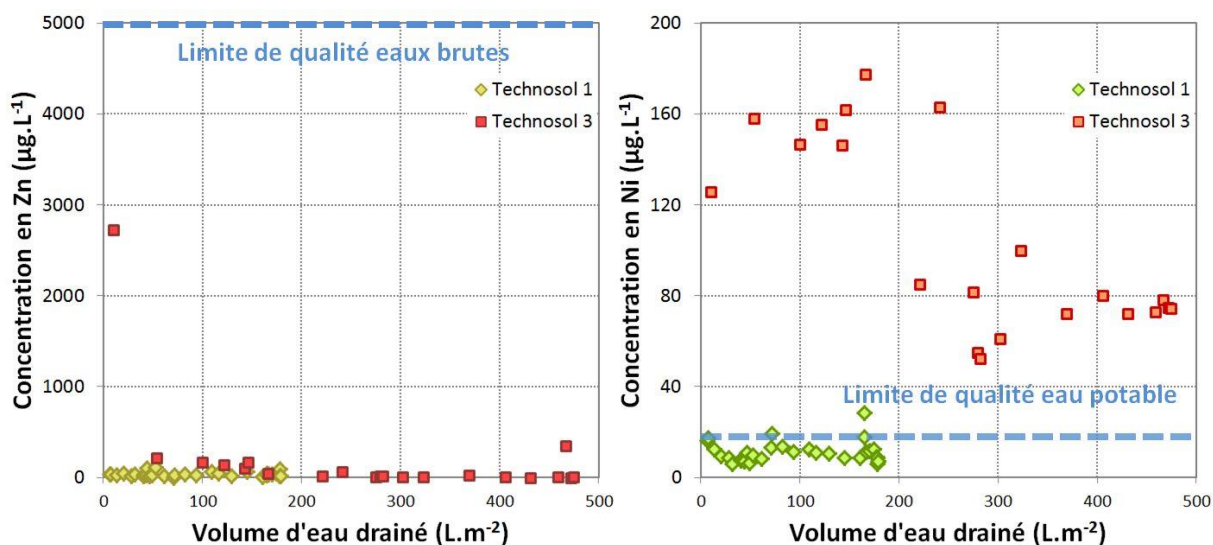


Figure 43. Concentrations en zinc et nickel dans les pecolats collectés à la base de Technosol 1 et Technosol 3 en fonction du volume d'eau drainé

Bilan de flux

Lors de ma thèse (Séré, 2007), nous avons porté nos efforts sur la réalisation de bilans de flux à l'échelle du profil en nous basant en particulier sur les données expérimentales des parcelles lysimétriques. Cet exercice s'était avéré complexe, autant pour la charge expérimentale qu'il représente (*i.e.* monitoring continu de tous les flux) que du fait de l'hétérogénéité des matériaux étudiés. En effet, le calcul des stocks d'éléments se base sur des analyses ponctuelles d'échantillons prélevés à un moment donné. Nous avons précédemment largement illustré les caractéristiques intrinsèques des matériaux constitutifs des Technosols qui soulignent les potentielles incertitudes liées à cette évaluation. Néanmoins, effectuer un bilan de flux est essentiel car il permet de positionner l'importance dans le temps des risques de transferts de substances ayant un impact négatif sur l'environnement.

Sur les résultats précédemment présentés, le bilan de flux fait apparaître que de 0,04 % (pour le Pb) à 3,11 % (pour le Ni) des éléments traces métalliques contenus dans Technosol 1 ont été lixiviés hors du profil en l'espace de 3 ans. Pour ce qui est de Technosol 3, les quantités lixiviées sont encore plus faibles : de 0,01 % (pour le Cr et le Pb) à 0,03 % (pour le Zn, en l'espace de 2 ans de suivi).

4.4. Production de biomasse

La vocation première de tous les Technosols que nous avons construits était bien de produire de la biomasse. Dans un premier temps, l'objectif étant simplement de végétaliser des sites dégradés, la végétation semée se rapprochait de la composition de prairies extensives. Plus récemment, nous avons fait des essais de production de biomasse à vocation alimentaire (Agrotechnosol) et non alimentaire (LORVER) pour lesquels les premiers résultats obtenus seront évoqués, mais non détaillés.

4.4.1. Rendement en biomasse sèche

Volontairement, les semis ont systématiquement été réalisés quelques mois après la mise en place des sols construits, après leur stabilisation. Le premier résultat important qui apparaît en regardant les résultats obtenus sur les trois Technosols construits est que les rendements en biomasse sèche obtenus (de 1,8 à 6,5 t.ha⁻¹) sont comparables, voire supérieurs à ceux obtenus pour des analogues naturels en conditions similaires (de 2 à 4,5 t.ha⁻¹) (données AGRESTE) (Figure 44). Les rendements mesurés sur les trois Technosols sont du même ordre de grandeur, d'autant qu'une très forte variabilité temporelle est observée. Seul Technosol 2 a pu faire l'objet d'un suivi annuel. Il met en évidence les fortes variabilités d'une année sur l'autre (notamment du fait des conditions météorologiques). Une tendance

globale à l'augmentation peut néanmoins être soulignée. Il apparaît également que les écart-types sont très élevés ce qui traduit une très forte variabilité spatiale au sein des parcelles expérimentales. Ceci peut s'expliquer aussi bien par les hétérogénéités de surface provenant des accumulations d'eau à la surface (encore visibles, même des années après la construction du sol) (cf. section 3.2.3), mais aussi par l'hétérogénéité de la répartition des espèces végétales, certaines prenant le dessus dans certaines zones.

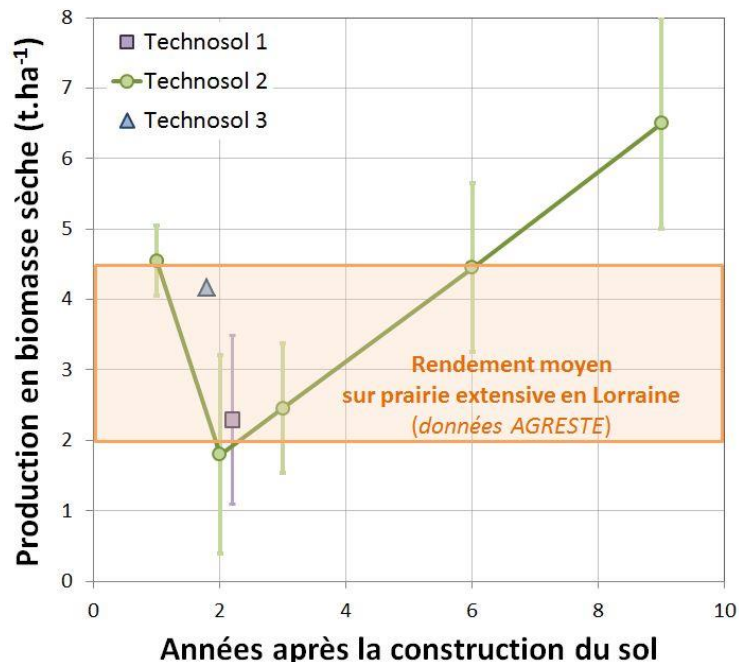


Figure 44. Productions de biomasse sèche sur Technosol 1, Technosol 2 et Technosol 3

Enfin, le dernier prélèvement réalisé en 2016 a été l'occasion d'une collaboration avec Alice Michelot-Antalik (LAE, UMR 1121 Université de Lorraine/INRA). Outre la mesure de la biomasse produite, elle a effectué un recensement des espèces végétales présentes. En utilisant E-floraSys, l'application permettant de connaître les caractéristiques écologiques et agronomiques d'espèces prairiales, elle a pu analyser les propriétés de la parcelle expérimentale. Il en ressort que, malgré le bon rendement ($6,5 \pm 1,5 \text{ t.ha}^{-1}$), la valeur fourragère de la parcelle est modérée à faible du fait de nombreuses espèces de très faible intérêt (*e.g.* chardon, ortie) (Figure 45). En effet, la valeur pastorale est de 49/100, à comparer aux meilleures prairies permanentes en Lorraine (85 – 90) et aux prairies les plus pauvres implantées sur des zones de Causse (15 – 20) (S. Plantureux, communication personnelle).

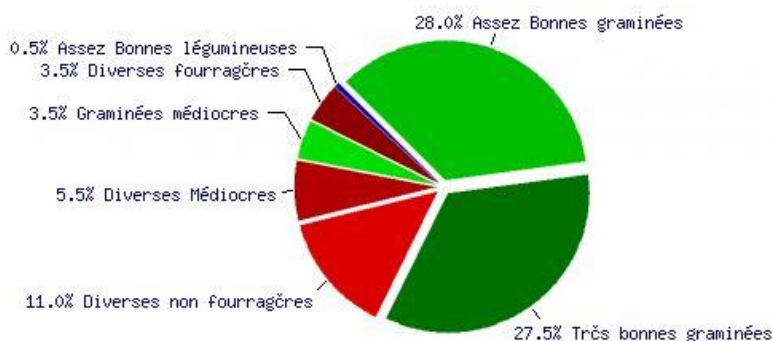


Figure 45. Interprétation agronomique (potentiel fourragère) des espèces végétales présentes sur la parcelle Technosol 2 en 2016

4.4.2. Profil et densité racinaires

Approche parfaitement complémentaire de la description pédologique des profils de sol, la détermination du profil racinaire et l'évaluation de la densité racinaire nous est très vite apparue comme un outil

indispensable. Outre le fait que ces paramètres traduisent le développement de la végétation d'une manière différente du rendement, ils reflètent l'évolution de la fertilité physique des sols construits. Le Technosol 1 est celui sur lequel nous disposons d'un suivi temporel (Figure 46). La densité racinaire, initialement nulle croît progressivement pour passer à 31% après 3 ans et atteindre 62% au bout de 5 ans. Un plateau semble alors atteint puisque cette densité a même décliné légèrement au bout de 10 ans. Au contraire, il est très intéressant de constater que la profondeur d'enracinement augmente sur les 10 ans de suivi. Alors que les racines étaient cantonnées dans les 50 premiers centimètres jusqu'à 3 ans, elles ont commencé à atteindre la base du profil au bout de 5 ans et se retrouvent en abondance dans cet horizon profond au bout de 10 ans. Le développement initialement limité aux horizons supérieurs peut s'expliquer par les conditions nettement réductrices qui étaient observées dans les horizons profonds (Séré *et al.*, 2010). Comme nous aurons l'occasion de l'évoquer ultérieurement, l'évolution des conditions physiques (*i.e.* potentiel redox et masse volumique apparente) et la profondeur d'enracinement sont étroitement liés dans les Technosols construits : les conditions initialement défavorables empêchent le développement des racines, mais cette exploration racinaire en contribuant à structurer le sol et en prélevant de l'eau font progressivement disparaître ces conditions.

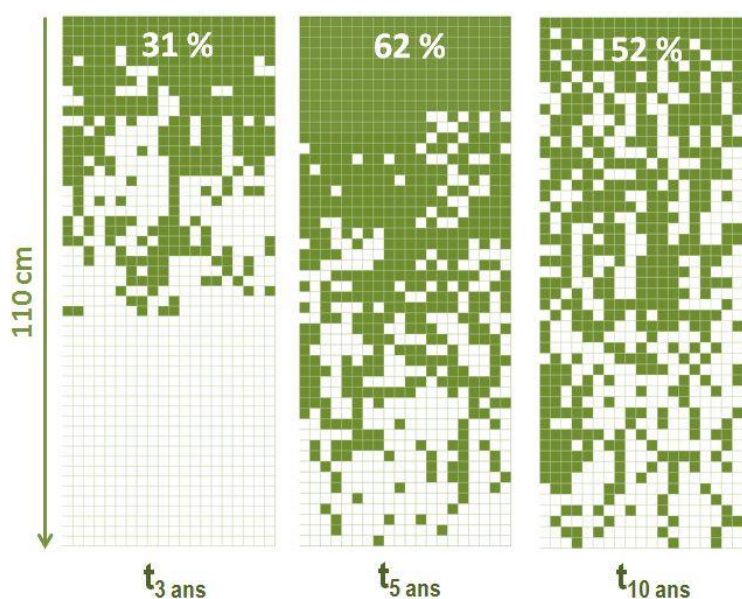


Figure 46. Evolution des profils et densités racinaires de Technosol 1

Sans présenter de manière exhaustive tous les résultats obtenus, les densités racinaires mesurées sur Technosol 2 (3 ans après leur construction) variaient de 16 à 33% (Cortet *et al.*, 2015). La localisation des racines était, de manière très similaire à Technosol 1 à cette période, essentiellement limitée aux trente premiers centimètres. Une certaine variabilité spatiale a pu être notée qui fait écho à l'hétérogénéité évoquée ci-dessus. Dans le cas de Technosol 3, la densité racinaire était de 22,4 % au bout de 2 ans (Damas et Colon, 2016). Dans ce dernier cas, nous avons noté que le premier horizon (mélange de brique et de compost) était presque entièrement colonisé, alors que le second (mélange de ballast et de sous-produits papetiers) beaucoup plus compact et très humide était pratiquement dépourvu de racines.

4.5. Habitat pour la faune du sol

Les Technosols construits constituent une réelle opportunité expérimentale pour les biologistes du sol car ils leur offrent la possibilité d'étudier la colonisation et les équilibres biologiques qui se créent. Même si l'étude de la biodiversité des sols ne fait pas partie de mes champs thématiques, j'ai eu l'occasion de travailler avec des spécialistes du domaine, en particulier dans le cadre du programme Biotechnosol. J'évoquerai donc succinctement ici certains résultats qui concernent particulièrement la macrofaune du sol et de surface, d'une part afin de compléter le panel des fonctions rendues par ces écosystèmes et d'autre part afin d'aborder les facteurs abiotiques conditionnant les paramètres biologiques.

4.5.1. Aspects temporel de la colonisation biologique

Une augmentation de la densité des invertébrés a été observée entre 2008, 2009 et 2010 ($p < 0,002$) (Figure 47). En effet, la densité totale moyenne était nulle en 2008, puis de 176 ind.m⁻² en 2009 et doublait en 2010 pour atteindre une densité moyenne de 404 ind.m⁻².

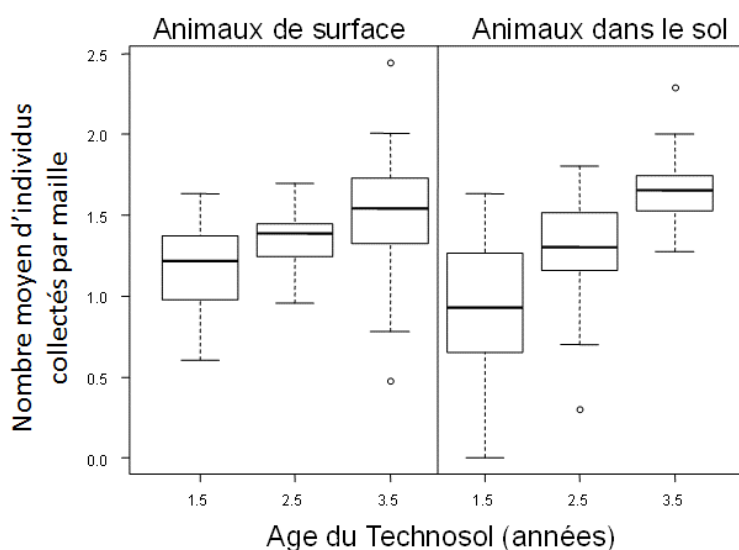


Figure 47. Nombre moyen d'individus (macrofaune) par maille dans Technosol 2 et Technosol 4 au cours du temps (Cortet et al., 2015)

Les résultats détaillés mettent tout d'abord en évidence l'absence complète d'individus échantillonnés quelques mois après la mise en place des Technosols. De plus, les différences entre modalités sont notables pour une même année de prélèvement, mais s'avèrent peu significatives sur toute la période étudiée (Tableau 5) (Hedde *et al.*, soumis).

Tableau 5. Evolution de la densité en différentes espèces au cours du temps (Hedde et al., soumis) ; Containment = Technosol 4 ; Water buffer = Technosol 2

Parameter	Technosol type	Containment				Water buffer			
		Soil age (yr)	0.5	1.5	2.5	3.5	0.5	1.5	2.5
Density (individuals m ⁻²)	all	0.0 (0.0) d	267.6 (61.9) b	298.2 (62.5) b	1044.4 (224.3) a	0.0 (0.0) d	109.5 (23.4) cd	374.2 (55.9) b	619.1 (72.1) a
	Tipulidae (l.)	0.0 (0.0) c	0.0 (0.0) cb	4.4 (2.1) ab	36.4 (21.5) a	0.0 (0.0) c	7.4 (3.7) cb	19.7 (8.4) ab	66.5 (24.6) a
	Lumbricidae	0.0 (0.0) c	11.6 (8.3) b	27.6 (13.6) b	352.0 (58.4) a	0.0 (0.0) c	0.0 (0.0) c	19.7 (15.2) b	182.2 (38.0) a
	Araneae	0.0 (0.0) d	21.8 (6.9) b	26.2 (8.3) ab	50.9 (13.4) a	0.0 (0.0) d	7.4 (2.4) c	43.1 (11.5) a	27.1 (6.4) ab
	Carabidae	0.0 (0.0) c	11.6 (8.3) b	27.6 (6.6) a	50.9 (14.7) a	0.0 (0.0) c	11.1 (3.9) b	43.1 (11.2) a	34.5 (7.7) a
	Gastropoda	0.0 (0.0) c	0.0 (0.0) c	0.2 (0.2) b	0.3 (0.2) b	0.0 (0.0) c	0.2 (0.2) b	1.3 (0.5) a	0.2 (0.1) b
	Isopoda	0.0 (0.0) d	8.7 (5.6) bc	29.1 (16.0) abc	72.7 (21.7) a	0.0 (0.0) d	1.2 (1.3) cd	32.0 (13.6) ab	16.0 (5.3) b
Density-activity (individuals per trap)	all	0.0 (0.0) c	20.1 (2.9) b	23.9 (3.9) ab	35.5 (8.1) a	0.0 (0.0) c	17.2 (3.6) b	23.5 (2.3) ab	36.1 (6.1) a
	Araneae	0.0 (0.0) c	10.3 (2.2) b	15.3 (4.2) ab	23.0 (5.6) a	0.0 (0.0) c	10.3 (2.4) b	9.7 (1.7) ab	21.8 (4.6) a
	Carabidae	0.0 (0.0) d	5.9 (1.2) b	2.5 (0.7) cd	7.8 (2.7) b	0.0 (0.0) d	3.5 (1.1) bc	5.2 (1.1) ab	9.2 (1.7) a
	Isopoda	0.0 (0.0) c	0.0 (0.0) c	0.4 (0.2) bc	2.2 (0.5) a	0.0 (0.0) c	0.0 (0.0) c	0.1 (0.1) c	0.8 (0.4) ab

L'augmentation notable qui est observée est caractéristique des premiers stades de successions végétales et semble refléter une bonne qualité de litière (Doblas-Miranda *et al.*, 2008). Même s'il est complexe de trouver des éléments de comparaison, la densité moyenne de macrofaune dans une prairie de Normandie atteignait 1259 ind.m⁻² (Decaëns *et al.*, 1998), 70% de la macrofaune correspondant à des vers anéciques vivant la plus grande partie de leur temps en profondeur. Si sur Technosol 4, la densité maximale observée atteignait 1268 ind.m⁻², les espèces présentes sont très différentes de l'analogue normand car aucun ver anécique ne fut collecté sur les deux Technosols (les seuls vers présents étaient épigés et représentaient 7% des invertébrés). Ainsi, les densités d'invertébrés observées dans les Technosols construits sont en partie comparables à celles d'une prairie, mais après 3 ans, les communautés collectées ne présentent pas la composition typique d'une prairie analogue.

4.5.2. Aspects spatiaux de la colonisation biologique

Après 1,5 ans de différenciation, les moyennes de densité différaient entre les bordures NE et S ($p < 0.05$) mais pas entre les autres bordures (Figure 48). Ainsi, il semblerait que la voie préférentielle de colonisation se situait au niveau du NE de la parcelle (368 ind.m^{-2}) et celle la moins favorable était celle du S (86 ind.m^{-2}). La parcelle située dans un paysage peri-urbain subit l'influence au N-E d'un bois d'où peut provenir la macrofaune et masque l'effet des infrastructures du GISFI excepté à l'est. A l'inverse, la route au SE limite initialement la colonisation. De nombreuses études montrent que la construction de routes représente une barrière sur certains taxons tels que les carabes (Mader, 1995). Toutefois, l'année suivante (2,5 ans de différenciation), ce « corridor » de colonisation ne semble plus être prépondérant au vu de l'homogénéisation de la répartition des densités. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que la parcelle soit colonisée par des macro-invertébrés ailés comme certains coléoptères occultant l'effet de bordure observé après 1,5 ans. Ainsi le temps de différenciation à un effet significatif sur les densités d'invertébrés alors que les modalités n'influencent pas la répartition de la macrofaune totale. Dans une moindre mesure, les tous premiers stades de la colonisation sont influencés par le paysage autour de la parcelle

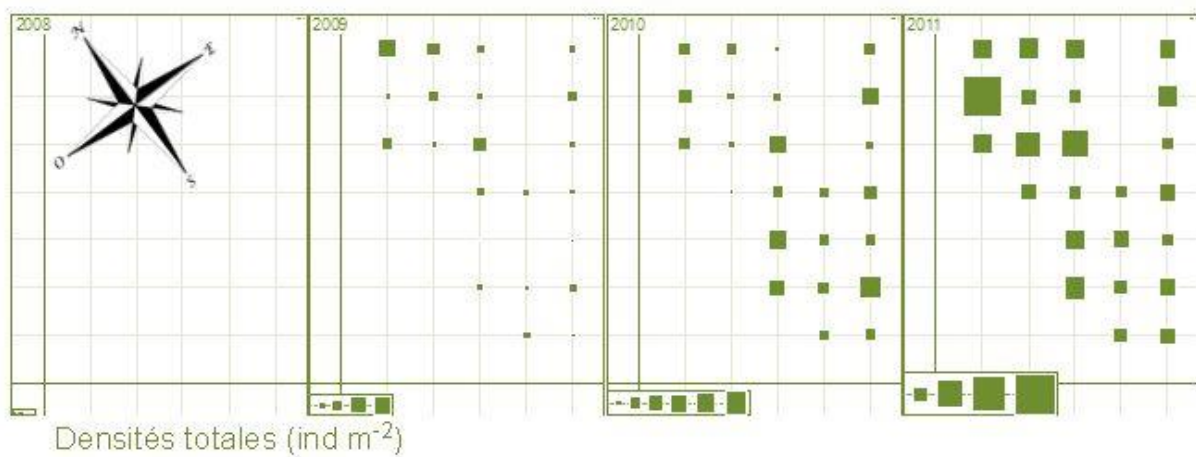


Figure 48. Evolution temporelle et spatiale de la densité en macrofaune du sol et de surface de Technosol 2 et Technosol 4 (Cortet et al., 2015)

4.5.3. Influence des facteurs abiotiques

Comme nous l'écrivons à la fois dans un article qui vient d'être soumis (Hedde *et al.*, soumis) et plus tard dans ce mémoire, les paramètres physico-chimiques que nous avons mesurés dans le cadre de Biotechnosol ont peu évolué au cours du temps. Ainsi, les évolutions de densité et de diversité biologique qui ont été décrites ne sont pas reliées aux variations de ces facteurs abiotiques. Par contre, comme nous l'avons évoqué précédemment, la bonne fertilité physique et chimique de Technosol 2 et Technosol 4 a contribué au succès de la colonisation. De plus, même si nous n'avons pas encore pu mettre en évidence cette relation, il semble que, aussi bien les caractéristiques de ces deux Technosols construits (à savoir pH basique, concentration élevée en matières organiques et concentrations modérées en azote et phosphore assimilable) que le mode de gestion (c'est-à-dire un entretien très limité) ont probablement conditionné la dynamique de colonisation biologique.

4.6. Conclusion intermédiaire

Nos travaux ont permis de mettre en évidence le fait que des sols artificiels, entièrement constitués de sous-produits issus des activités humaines, pouvaient assurer un certain nombre de fonctions de manière comparable à des sols naturels. Nous évoquerons dans cette conclusion intermédiaire les questions scientifiques qui ont émergé, en sachant qu'une partie significative d'entre elles reposent aussi sur la prise en compte de l'évolution temporelle des propriétés bio-physico-chimiques des Technosols construits qui fait l'objet du chapitre suivant.

4.6.1. Stockage de carbone

Les recherches, encore très récentes, que nous avons initiées sur cette thématique ont permis de mettre en avant une fonction particulièrement intéressante des sols construits qui est le stockage de quantités de carbone organique significativement supérieures à des analogues naturels. Ceci suggère que l'anthropisation des sols pourrait intégrer une contribution à la régulation des changements climatiques globaux. Les résultats acquis jusqu'à alors suggèrent de plus que ce stockage serait pérenne dans le temps (*a minima*, sans changement d'usage du sol). Par ailleurs, ces recherches, qui ont débutées en 2015, ont mis en évidence plusieurs aspects méthodologiques d'intérêt. En premier lieu, il n'est pas trivial de suivre le stock de carbone organique dans des Technosols construits, compte tenu des évolutions rapides et simultanées de la concentration en carbone organique et de la masse volumique apparente dans les différents horizons constitutifs. En second lieu, les premiers résultats de modélisation avec RothC, un modèle existant et développé pour les sols naturels, bien qu'imparfaits, sont particulièrement encourageants car ils permettent de faire des hypothèses crédibles sur l'évolution des stocks à moyen terme.

Sur ce sujet, la modélisation, si elle n'est certes pas une fin en soi, constitue néanmoins une approche qui me semble absolument centrale. En effet, la fonction de stockage de carbone des Technosols construits ne peut avoir de sens que si elle est durable ; pour cela, la modélisation est le meilleur moyen de gagner le recul de temps nécessaire que l'expérimentation ne nous permet pas encore d'avoir. Par ailleurs, face à la complexité des processus pédogénétiques qui affectent les sols construits, la modélisation est une manière de tester, de manière dissociée, l'effet des différents processus. Ainsi, il me semble, en un sens, prometteur que la modélisation diverge des données expérimentales parce que ceci nous permet de prendre conscience de processus insuffisamment décrits par le modèle et de nous y intéresser.

4.6.2. Filtre et échange

Les mécanismes et processus contrôlant le relargage des éléments traces métalliques sont complexes et nécessitent d'appréhender aussi bien leur spéciation dans les matériaux parents que l'influence des évolutions physico-chimiques au sein des sols construits sur leur mobilité. Ceci étant, nos résultats suggèrent qu'un choix raisonné de matériaux parents dont les propriétés sont bien connues, permet de limiter les flux de contaminants depuis les Technosols construits vers les eaux souterraines. Les conclusions sont plus mesurées pour ce qui concerne d'autres éléments comme les sulfates, les chlorures et les nitrates (Damas et Colon, 2006). Dans tous les cas, une des difficultés récurrentes de l'interprétation des données obtenues sur le suivi de la qualité des eaux de drainage de Technosol est l'absence de référentiel pour leur interprétation. Les limites de qualité des eaux brutes semblent les plus réalistes – même si les nappes souterraines susceptibles de recevoir les eaux de drainage ayant transité à travers les sols étudiés ne sont pas nécessairement exploitées -, mais l'arrêté ne propose pas de valeurs de référence pour tous les éléments d'intérêt (d'où le recours aux limites de qualité eau potable).

4.6.3. Production de biomasse

Nous avons pu démontrer non seulement qu'il était possible de faire se développer de la biomasse sur des sols construits uniquement avec des déchets et sous-produits, mais aussi que les rendements obtenus pouvaient être comparables à ceux de systèmes naturels analogues. La question (agronomique) de la durabilité de cette production, sous-tendue par le maintien d'une fertilité physico-chimique satisfaisante se pose évidemment. Les questions qui en ressortent ont trait à la fois à la pédogenèse des Technosols construits que nous évoquerons dans le chapitre suivant, mais aussi au mode de gestion et aux itinéraires techniques à mettre en œuvre sur ces sols (*e.g.* fertilisation, traitement phytosanitaire, travail du sol).

4.6.4. Habitat pour la biodiversité

Nos collègues ont observé que les Technosols construits montrent une dynamique de colonisation biologique variable en fonction des groupes. Une complexification progressive du système et notamment

des réseaux trophiques a été mise en évidence. L'étude des communautés montre aussi que les Technosols présentent de fortes similitudes avec les sols naturels. 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 d'assurer le recyclage des matières organiques, avec des dynamiques de décomposition de la matière organique conformes aux sols agricoles.

Publication(s)

Yilmaz D., Cannavo P., Séré G., Vidal-Beaudet L., Legret M., Damas O., Peyneau P-E., 2016, Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening, *Journal of Soils and Sediments*, 10.1007/s11368-016-1524-0

Huot H., Séré G., Charbonnier P., Simonnot M.O., Morel J.L., 2015, Lysimeter monitoring as assessment of the potential for revegetation to manage former iron industry settling ponds., *Sci Total Environ*, vol. 526, p 29-40

Bouzouidja, R., Séré, G., Claverie, R., Lacroix, D., 2013. Caractérisation du fonctionnement thermo-hydrigue in situ d'une toiture végétalisée extensive. *Houille Blanche* (5), 62-69. DOI : 10.1051/lhb/2013044

Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2008, Soil Construction: A Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands, *Journal of Soils & Sediments*, vol 8 (2), p 130-136

Hedde M., Nahmani J., Séré G., Auclerc A., Cortet J., soumis, How successful is early colonisation of a constructed Technosol by soil macroinvertebrates?, Journal of Soils and Sediments

Villenave C., Séré G., Schwartz C., Watteau F, Jimenez A., Cortet J., soumis, Rapid changes in soil nematofauna in the first years after Technosol construction for the reclamation of an industrial brownfield, Eurasian Journal of Soil Science

Rees F., Dagois R., Watteau F., Morel J.L., Schwartz C., Séré G., en cours, Carbon storage in constructed Technosols: in situ monitoring over a decade

Kanso A., Sirguey C., Watteau F., Séré G., Morel J.L., Kobaissi A., El-Samrani A., Echevarria G., en cours, Designing constructed Technosols for agromining: physicochemical fertility and metal speciation

Ouvrage(s) et Chapitre(s) d'ouvrage(s)

Séré G., Schwartz C., Cortet J., Guimont S., Watteau F., Simonnot M.O., Morel J.L., 2017, Pedological engineering for brownfield reclamation, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p

Damas et Coulon, 2016, Créer des sols fertiles, 335p, Editions Le Moniteur

Rapport(s) & Mémoire(s) de stage(s)

Buyse M., 2016, How to assess the efficiency of brownfields and mining soils reclamation? Master Thesis ENTPE, 82p

Bouzouidja R., 2014, Fonctionnement hydrique d'un Technosol superficiel - application à une toiture végétalisée, Mémoire de Thèse Université de Lorraine, 160p

Navelot V., Soraruff Q. 2013, Eco-conception de sols urbains fertiles - évaluation de la stabilité structurale de sols construits, Mémoire Projet laboratoire ENSG, 25p

Sauvage C., 2006, Optimisation de la fertilité d'un Anthroposol construit, Mémoire de fin d'étude ingénieur AgroCampus Ouest, 62p

Lefort C., 2005, Dynamique des métaux dans des sols industriels supports d'un sol reconstitué, Mémoire DEA Science du Sol, 31p

5. Quelle pédogenèse pour les Technosols construits et quelles conséquences sur leur fonctionnement ?

5.1. Matériel et Méthodes

5.1.1. Technosols étudiés

En plus des Technosols présentés dans la section précédente, une toiture végétalisée (en particulier son substrat) appelée ici Technosol 5 va être étudiée dans ce chapitre (Figure 49). Il a été mis en place dans le cadre de la thèse de Ryad Bouzouidja en 2011. Différentes variétés de sedums (*sedum album*, *sedum reflexum*, *sedum reflexum germanicum*, *sedum sexangulare*, *sedum floriferum*) ont été implantées sous forme de micro-mottes. La composition détaillée du substrat et des conditions de mise en place de la toiture sont détaillées dans Bouzouidja (2014)



Figure 49. Organisation et composition de Technosol 5

Il est important, pour la suite du propos, d'indiquer que les conditions de mise en place de différents Technosols sont différentes. En effet, Technosol 1 a été tassé grossièrement tous les 40 cm à l'aide du godet d'une pelle mécanique, alors que Technosol 3 a été tassé méthodiquement en lysimètre tous les 30 cm à l'aide d'un dispositif adapté. Technosol 2 et Technosol 4 ont été mis en place à l'aide d'engins de chantiers, notamment d'un rouleau compresseur pour l'horizon inférieur de Technosol 4. Technosol 5 a été mis en place par étalement au râteau du substrat puis simplement compacté au pied.

5.1.2. Echantillonnage et mesures

Les données analytiques utilisées reposent sur le prélèvement, et la caractérisation d'échantillons provenant d'échantillonnage à partir de fosses pédologiques ouvertes en : 2004, 2005, 2006 et 2014 pour Technosol 1 ; 2008, 2009, 2010, 2011 et 2012 pour Technosol 2 et Technosol 4 ; 2015 pour Technosol 3 ; 2011 et 2015 pour Technosol 5. Pour l'étude de Technosol 5, nous avons comparé le substrat fourni par le producteur avec des prélèvements réalisés sur la toiture en 2015, 4 ans après sa mise en place. A partir de l'observation des sols en place, une stratégie d'échantillonnage adaptée a été mise en œuvre. Des prélèvements ont été effectués en triplicat : sur des zones non végétalisées, sur des zones recouvertes de mousse et sur des zones végétalisées par des sedums. Les prélèvements étaient à chaque fois effectués à différentes profondeurs : 0 à 2 cm, 2 à 5 cm et 5 à 10 cm.

La masse volumique apparente a été mesurée par deux techniques différentes : soit par prélèvement de cylindre de 251 cm³, comme indiqué dans la norme NFX31-503, soit par pesée de l'intégralité du matériau excavé et mesure du volume lors de la réalisation des fosses pédologiques. La densité réelle ou masse volumique spécifique a été mesurée sur une aliquote représentative des cylindres à l'aide d'un pycnomètre à hélium (Quantachrome UltraPyc 1200) en suivant la norme NF P18-554. Ainsi la porosité totale (n_{tot}) a pu être déduite des deux valeurs précédentes. Enfin, les humidités caractéristiques volumiques (θ_{cc} - capacité au champ à 0,1 bar et θ_{PF} - point de flétrissement à 15 bars) ont été déterminées à l'aide d'un dispositif de presses à membrane selon un protocole adapté de la norme NF ISO 11 464.

La répartition des différentes classes de pores en macro (n_{MA}), méso (n_{ME}) et microporosité (n_{MI}) a été estimée par calcul (Peverill *et al.*, 1999) :

$$n_{MA} = n_{tot} - \theta_{CC}$$

$$n_{ME} = \theta_{CC} - \theta_{PF}$$

$$n_{MI} = \theta_{PF}$$

Afin d'étudier le statut du fer, la méthode proposée par Mehra et Jackson (également appelée méthode CBD) a été appliquée. L'extraction s'effectue à chaud en présence de citrate de sodium (C) comme complexant, hydrogénocarbonate (bicarbonate) de sodium (B) pour tamponner le pH et de dithionite de sodium (D) comme réducteur. D'après Jeanroy (1983), on dissout ainsi la totalité du fer présent sous forme d'oxydes et oxyhydroxydes.

5.1.3. Modélisation hydrique

Pour la partie modélisation, le logiciel Hydrus1D a été utilisé pour résoudre l'équation du flux d'eau dans le lysimètre. Les propriétés hydriques du sol étaient représentées par le modèle couplé de Van Genuchten-Mualem :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha h)^n]^{-m} & h < 0 \\ \theta(h) = \theta_s & h \geq 0 \\ K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & \end{array} \right.$$

θ_r et θ_s désignent la teneur en eau résiduelle et saturée ($L^3 L^{-3}$), respectivement.

S_e est la saturation effective :
$$S_e(h) = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m}$$

K_s est la conductivité hydraulique saturée ($L T^{-1}$)

l est un coefficient de connectivité des pores (tortuosité du sol)

α (L^{-1}), n , et $m = 1 - 1/n$ sont des coefficients empiriques.

Les conditions aux limites supérieures et inférieures ont été réglées sur « atmospheric boundary conditions with run-off » et « seepage face » ($h = 0$). Les précipitations ont été mesurées à partir de la station météo et l'évapotranspiration réelle a été calculée à partir du bilan hydrique.

Hydrus-1D comprend un module d'optimisation qui permet de calculer les paramètres hydriques souhaités en minimisant systématiquement les différences entre les variables observées et simulées. Le total des différences est exprimé par une fonction objective (Hopmans *et al.*, 2002), Φ , qui peut être défini comme suit :

$$\Phi(\beta, y) = \sum_{j=1}^{m_y} v_j \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} [y_j^*(z, t_i) - y_j(z, t_i, \beta)]^2 \quad (6)$$

Où le côté droit représente les résidus entre les variables spatiales et temporelles mesurées (y_j^*) et prédites par le modèle (y_j) β étant le vecteur des paramètres optimisés. La première sommation concerne tous les résidus de tous les types de mesures (m_y) tandis que les n_j dans la deuxième somme désigne le nombre de mesures pour un certain type de mesure j . Une solution du problème est alors obtenue en minimisant l'équation de $\Phi(\beta, y)$.

5.2. Dynamique de la structure par observation et mesure directes

5.2.1. Masse volumique apparente

Les mesures de masse volumique apparente qui ont été réalisées au cours du temps démontrent en premier lieu que la structure de ces Technosols construits est soumise à évolution (Figure 50). Les 3 sols étudiés présentent des masses volumiques apparentes dont la gamme de variation est très large depuis $0,34 t.m^{-3}$ (horizon de compost de Technosol 1) à $1,88 t.m^{-3}$ (horizon de mélange ballast / sous-produits papetiers de Technosol 3). Il apparaît également que la plupart des sols ou horizons ont des valeurs de masse volumique apparente qui sont faibles, voire très faibles, par rapport aux sols naturels ou agricoles. Une autre observation générale qui concerne en particulier Technosol 1 et Technosol 3 est la juxtaposition d'horizons de nature très différente dont les masses volumiques apparentes sont très fortement contrastées. Ceci apparaît comme une originalité et une caractéristique forte des Technosols construits.

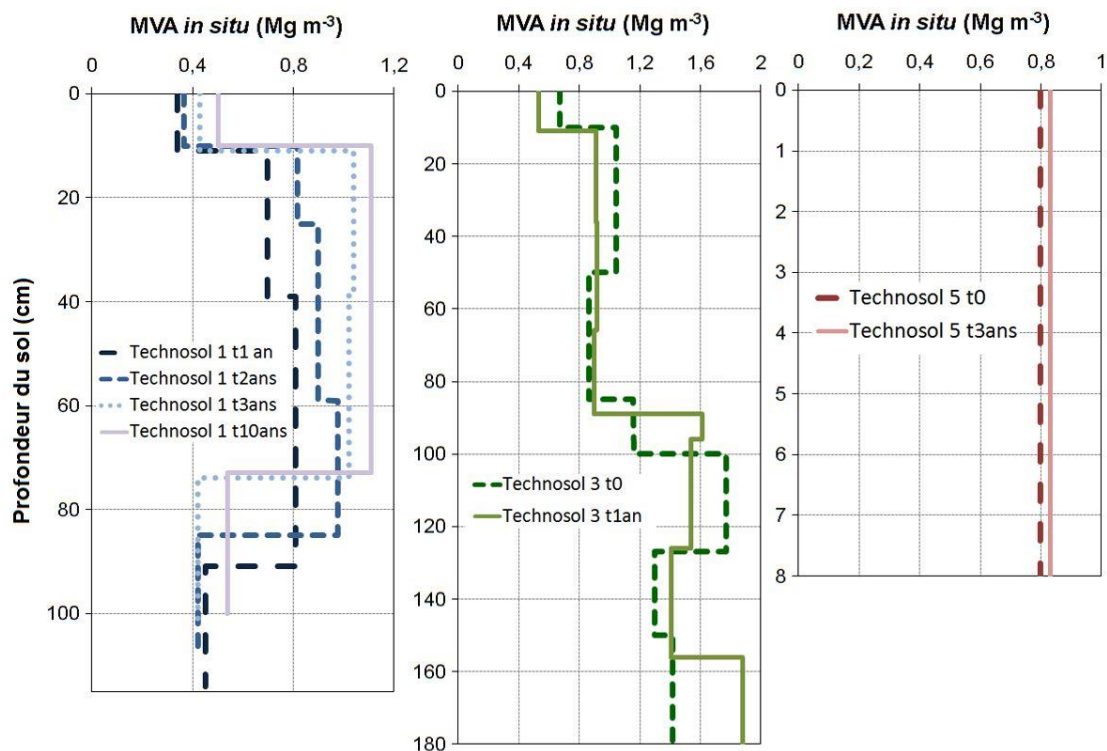


Figure 50. Evolution temporelle de la masse volumique apparente des profils de Technosol 1, Technosol 3 et Technosol 5

Même si cela n'apparaît pas de manière explicite sur les graphiques ci-dessous, l'épaisseur de tous les sols étudiés a diminué de 10 à 20 % sur les périodes de suivi. Dans le détail, Technosol 1 est le sol dont le tassement au cours du temps est le plus marqué, en particulier pour ce qui concerne l'horizon intermédiaire (mélange terre traitée / sous-produit papetier) (Figure 50). La masse volumique apparente passe de 0,7 à 1,1 t.m⁻³ en l'espace de 10 ans. Il est notamment intéressant de constater que cette augmentation est continue, même si elle n'est pas linéaire, étant plus rapide dans les premiers temps. Plus globalement, il est intéressant de noter des variations significatives (> 0,1 t.m⁻³) de masse volumique apparente au sein d'horizons de même nature. Ces variations sont observables à la fois en fonction de la profondeur, à un temps de prélèvement donné, mais aussi au cours du temps. Ces observations traduisent forcément en premier lieu l'hétérogénéité des Technosols construits qui sont notamment constitués de mélange d'éléments grossiers et fins. Néanmoins, au-delà de ce fait, les mesures qui ont été réalisées dans des conditions permettant d'intégrer cette complexité (prélèvement de plusieurs réplicats, mesure sur de gros volumes) révèlent tout de même une évolution de la structure des Technosols construits et suggèrent une horizonation.

Le premier facteur de cette évolution est très probablement le tassement des sols sous leur propre poids. Logiquement, ce phénomène est d'autant moins marqué que le sol a initialement été fortement compacté (cas de Technosol 3) et que la granulométrie de ces constituants le rend peu propice au compactage (cas de Technosol 5). Le second facteur de cette évolution est incontestablement l'activité biologique qui est fortement conditionnée par la profondeur de l'exploration racinaire. Ceci est très visible dans le cas de Technosol 1. La dynamique d'augmentation de la masse volumique apparente est observable au cours du temps, mais aussi en fonction de la profondeur. A titre d'exemple, il suffit de regarder les valeurs de densité de l'horizon de sous-produit papetier pur à la base du profil. La valeur reste constante au cours des 3 premières années (0,4 t.m⁻³) avant d'augmenter légèrement au bout de 10 ans (0,5 t.m⁻³), au moment où nos mesures attestent de la colonisation par les racines (Figure 46). Il est alors surprenant que la présence de racines induise une augmentation de la masse volumique apparente (voir aussi Technosol 1 et Technosol 4). En réalité, il est difficile de séparer l'effet de tassement de l'impact de la végétation. Il serait alors intéressant de s'intéresser plus en détail à

l'évolution de l'architecture porale au cours du temps. En complément, le développement de racines peut également s'accompagner de transfert/redistribution de particules au sein du profil. Ces deux aspects sont abordés ci-dessous

5.2.2. Architecture porale

Dans la suite logique de la section précédente, le premier résultat marquant est le fait que la porosité totale des horizons de Technosols construits étudiés est élevée (de 61 à 75 %) (Figure 51). Toujours en accord avec l'évolution de la masse volumique apparente, il apparaît que la porosité totale évolue au cours du temps. De manière plus précise la répartition des 3 classes de porosité identifiées varie également de manière très significative. Dans le cas de Technosol 1, il s'avère qu'une légère augmentation de la macroporosité et une augmentation plus significative de la microporosité ont été mesurées, au détriment de la mésoporosité (Figure 51). Cette dernière, qui correspond à l'eau utile du sol, joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau des plantes. Ceci suggère que cette pédogenèse précoce pourrait avoir une influence majeure sur le fonctionnement de la toiture végétalisée.

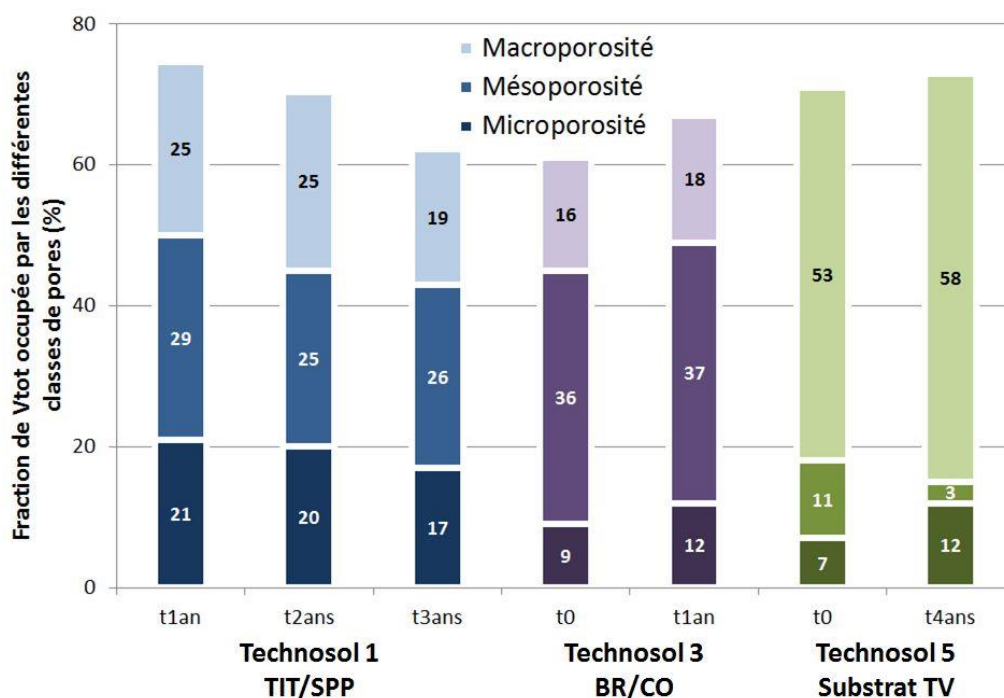


Figure 51. Evolution temporelle de la macroporosité (en haut), mésoporosité (intermédiaire) et microporosité (en bas) pour Technosol 1, Technosol 3 et Technosol 5

5.3. Suivi et modélisation indirecte de la dynamique de la structure

5.3.1. Monitoring du bilan hydrique en lysimètre

Dans le cadre du stage de Master 2 de Marwa Tifafi, nous avons eu l'occasion d'utiliser les données de suivi hydrodynamique de plusieurs sols végétalisés ou non (indiqué par p : planté et np : non planté) étudiés en lysimètres de la station expérimentale du GISFI sur plusieurs années. De plus, les sols étudiés présentent un gradient d'âge et d'anthropisation car cette gamme intègre un sol agricole (L), un sol de friche industrielle âgé de plusieurs dizaines d'années (T1) et des sols dépollués (T2) et construits (T3, correspond à Technosol 2) qui sont très récents (< 1 an). Leurs origines et leurs propriétés sont décrits dans Tifafi (2014) et Tifafi *et al.* (2017).

L'originalité de ce travail a été en premier lieu de suivre des paramètres très simples comme la quantité d'eau totale stockée dans chacun des profils de sol (donnée facile à calculer connaissant la masse sèche de sol mise en place initialement et les relevés horaires de masse des lysimètres) sur des périodes

longues (de 3 à 6 ans). La mise en forme de ces données fait logiquement apparaître des variations marquées entre périodes estivales chaudes et sèches et hivernales froides et humides (Figure 52). Il est à noter que l'intensité de la baisse de la quantité d'eau, en été, est amplifiée par la présence de la végétation. En dehors de ces observations faciles à expliquer, la comparaison du comportement hydrique de ces 4 sols permet de mettre en avant des différences marquées sur l'ensemble de la période de suivi. En l'occurrence, alors que les variations restent simplement sinusoïdales pour les deux sols les plus anciens, pour les deux sols les plus récents, une nette décroissance de la quantité d'eau stockée est également observable qui semble amplifiée par la végétation. En accord avec les résultats précédemment présentés, ceci traduit le tassement de ces sols et la modification de leurs architectures porales. Ces résultats indiquent aussi que la capacité totale de stockage d'eau est affectée par ces modifications physiques.

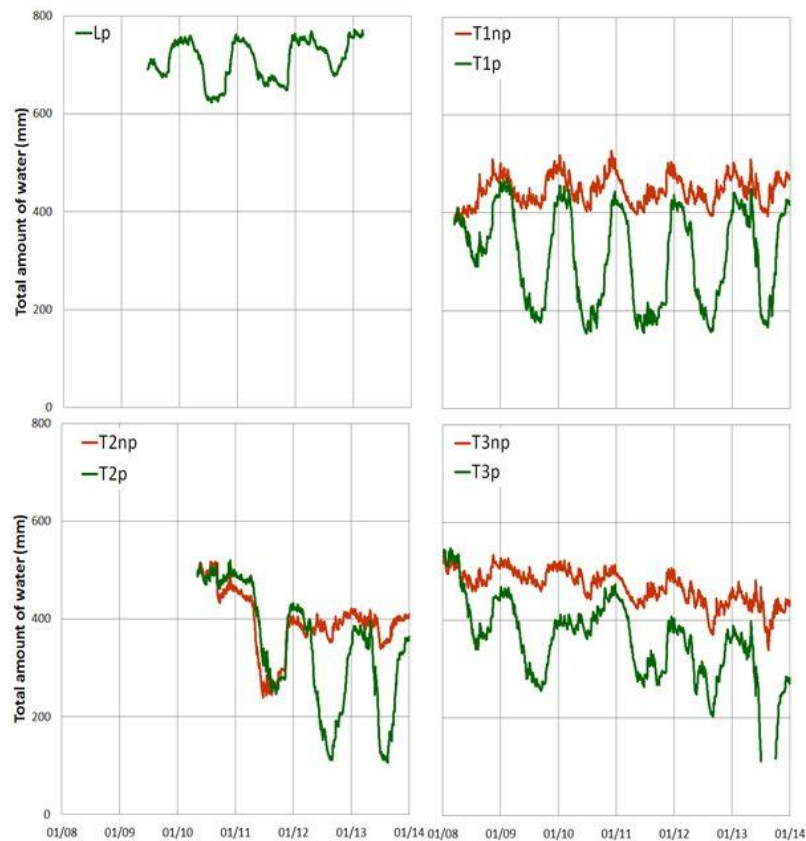


Figure 52. Evolution de la quantité d'eau totale stockée dans des sols au sein d'un gradient d'âge et d'anthropisation (Tifafi et al., 2017)

Pour aller plus loin, nous avons construit un indicateur de fonctionnement hydrique. Celui-ci, intitulé « critical water storage capacity » (CWST) correspond à la quantité d'eau présente dans le profil au début d'un épisode de drainage positif à la base du lysimètre. Nous faisons l'hypothèse que, dans le cas où la structure porale d'un sol reste inchangée, cet indicateur devrait être constant au cours du temps. En l'occurrence, les résultats indiquent en premier lieu des variations marquées en fonction de la saison dans le cas des modalités végétalisées (Figure 53). Ceci suggère que les racines des plantes modifient le régime d'écoulement au sein des sols, en facilitant le drainage (valeur de CSWT plus faible). En accord avec la littérature (Bruand *et al.*, 1996 ; Powis, 2001 ; Jangorzo *et al.*, 2017), l'hypothèse la plus vraisemblable est que la présence des racines, en plein développement pendant les saisons chaudes, réduise la porosité totale et favorise les écoulements préférentiels. La décroissance des deux courbes du sol T3 illustre à nouveau l'évolution de l'architecture porale de Technosol 2 dans les années qui suivent sa mise en place. En dehors de l'effet de tassement observable seul sur la modalité non

végétalisée, il semble que la végétation et l'activité biologique - au sens large - augmentent la connectivité des pores au cours de la pédogenèse précoce.

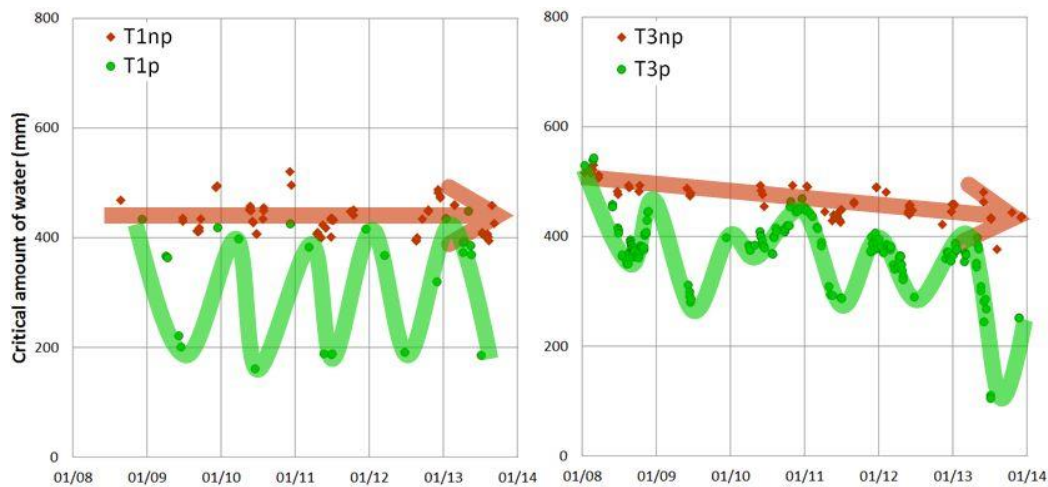


Figure 53. Evolution de l'indicateur "critical water storage capacity" pour un Technosol ancien (T1) et un Technosol récent (T3) (Tifafi et al., 2017)

5.3.2. Prise en compte de la dynamique de la structure dans la modélisation hydrique

Nos premières réflexions sur le sujet ont émergé lorsque nous avons cherché à utiliser les données expérimentales de teneurs en eau et de volumes d'eau drainé provenant des colonnes lysimétriques contenant Technosol 2 pour simuler le comportement hydrodynamique à l'aide du logiciel Hydrus-1D (Séré *et al.*, 2012). Nous avons tout d'abord effectué des mesures précises de propriétés hydriques des différents matériaux constitutifs du sol construit à l'aide d'échantillons prélevés au moment de leur mise en place. Ensuite, nous avons utilisé ceux-ci comme paramètres d'entrée du modèle afin de conduire la simulation. Or, comme l'atteste la Figure 54, une dérive très nette de la valeur simulée (ligne bleue) par rapport à la valeur mesurée (sphères vertes) apparaît quelques mois après le début du monitoring. Nous avons alors fait un nouvel essai de modélisation en faisant évoluer les propriétés hydriques de Technosol 2 au cours du temps (changement tous les 9 mois) (pointillés rouge). Même s'il est logique que le fait de découper le signal de la teneur en eau, en optimisant systématiquement les paramètres, améliore la qualité de la simulation, cette approche a démontré qu'il n'était pas pertinent de considérer Technosol 2 comme un système stable dans le temps d'un point de vue hydrodynamique.

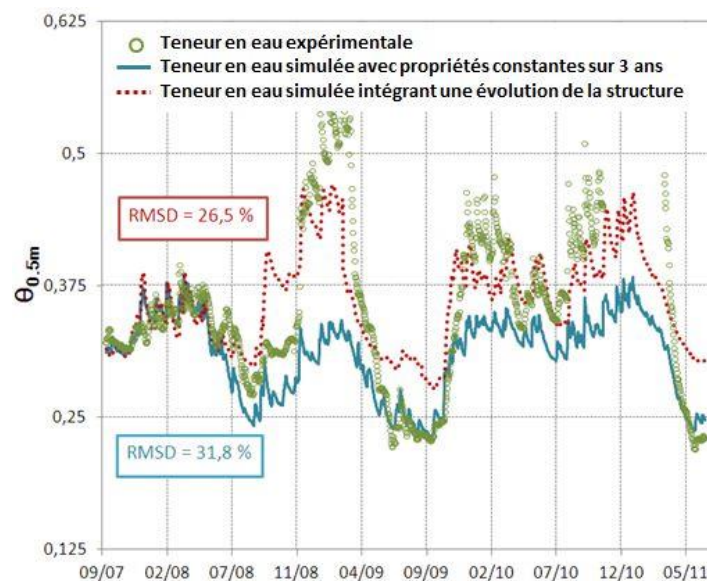


Figure 54. Comparaison entre la teneur en eau mesurée à 50 cm de profondeur dans Technosol 2 et simulations en considérant des propriétés constantes ou dynamiques

Ce résultat a pu être confirmé grâce à une collaboration avec des collègues du CRAN (UMR 7039 Université de Lorraine/CNRS) dans le cadre du projet MOLETTE (PEPS Mirabelle) que j'ai coordonné. Ces spécialistes du traitement du signal ont développé des modèles simples utilisant un certain nombre de variables explicatives et de paramètres estimés par optimisation en comparant les valeurs simulées aux valeurs expérimentales (MOLETTE, 2015). Il apparaît alors clairement que les paramètres estimés à partir des données de l'année 1 permettent de reproduire fidèlement les données expérimentales sur cette première année, mais que l'écart entre la simulation et les mesures est très significatif pour les années suivantes (Figure 55). Un travail similaire a été effectué en comparant les données issues d'un lysimètre contenant Technosol 2 en l'absence de végétation et un autre en présence de végétation. Il apparaissait également que si les paramètres estimés sur l'une des modalités permettaient de simuler correctement les écoulements dans les premiers temps du suivi, une dérive significative de la qualité de la simulation était ensuite observée.

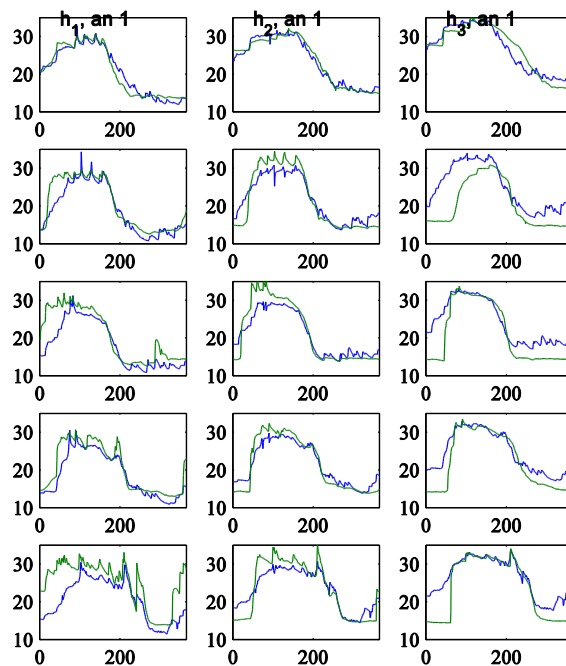


Figure 55. Comparaison entre données expérimentales (courbe bleue) et simulées (courbe verte) à partir du modèle établi sur les données Technosol 1 de la première année et testées sur les années suivantes (en ligne)

Une étape complémentaire a été menée dans le cadre du stage de Marwa Tifafi (Tifafi, 2014). Il s'agissait de conduire cette étape d'optimisation par partie sur des périodes d'une année de données obtenues par le suivi du lysimètre. Il était ainsi obtenu un jeu de paramètres hydriques par année sur toute la durée du monitoring. Ce premier essai s'est révélé intéressant. Comme en témoigne les résultats, cette démarche a permis de mettre en évidence une augmentation de l'humidité volumique à saturation au cours du temps (de 0,39 en 2009 jusqu'à 0,52) (Figure 56). La dérivation de ces paramètres permet d'estimer la répartition de la distribution de taille de pores (Figure 56) et suggère une nette augmentation des pores de diamètre compris entre 10 et 100 μm au cours du temps.

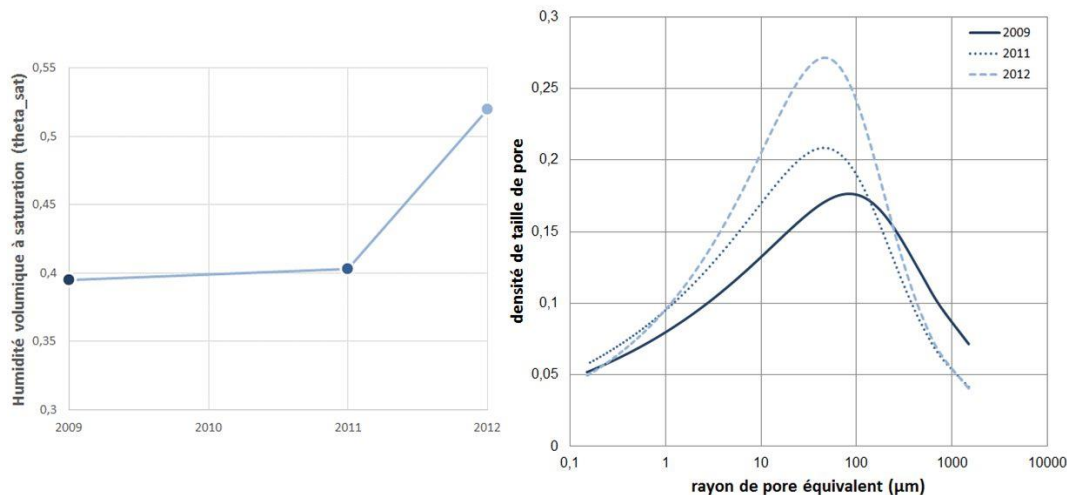


Figure 56. Evolution de l'humidité volumique à saturation estimée par modélisation entre 2009 et 2012, ainsi que distribution de taille de pores sur la même période pour Technosol 1

Néanmoins, l'analyse de l'intégralité des résultats ainsi obtenus (Tifafi, 2014) a démontré que, si la démarche était prometteuse, notre approche devait être améliorée. En effet, le procédé d'optimisation des paramètres par Hydrus-1D ne tient pas compte du réalisme physique de l'évolution de l'architecture porale des sols. Il faudrait alors développer une méthode qui puisse coupler mesures physiques au cours du temps avec une procédure d'optimisation mathématique.

5.4. Evolution des phases minérales

5.4.1. Suivi in situ

L'expérimentation en colonne lysimétrique conduite dans SITERRE a permis d'appréhender de manière fine les évolutions minéralogiques de Technosol 3.

En premier lieu, dans le cadre d'une collaboration avec Christian Ruby (LCPME, UMR 7564 CNRS-Université de Lorraine) et Philippe Bataillard et Samuel Coussy (BRGM, Unité Sites, Sols et Sédiments Pollués), nous nous sommes intéressés à l'évolution des formes de fer. Les résultats obtenus font apparaître une évolution très significative de la proportion de fer extractible sur le fer total au long du profil et au cours du temps (Figure 57). Dans le premier horizon constitué d'un mélange brique/compost, ce ratio passe de 55 % à plus de 90%. Des résultats analogues, bien que de moindre intensité, avaient été mis en évidence en conditions contrôlées (apport d'eau et végétalisation) par les collègues du BRGM (SITERRE, 2015). Ces résultats suggèrent une hydratation des oxydes fer, mais pourraient également s'expliquer par des processus de transfert de particules au sein du profil, ainsi qu'au mode de préparation des échantillons (SITERRE, 2015). Le phénomène est beaucoup moins marqué en profondeur, dans l'horizon ballast/sous-produits papetiers. Néanmoins, à l'interface entre les deux matériaux (zone la plus oxygénée, contrairement à la base de l'horizon qui est restée dans un état proche de la saturation en eau durant toute la période de suivi), il apparaît que la proportion de fer extractible est comparable au matériau d'origine, alors que celle-ci a clairement décliné au cours du temps plus en profondeur. Une tendance apparaît nettement : plus les matériaux sont proches de la surface, plus la proportion de fer extractible augmente, parfois de manière très significative. Ceci se confirme par une augmentation significative de l'abondance en goethite vs la concentration en hématite (SITERRE, 2015). Ainsi, la pédogenèse précoce qui affecte Technosol 3 - sous l'effet des conditions climatiques, mais aussi de la présence de végétation et d'autres organismes - conduit à une évolution des formes de fer, en particulier en augmentant l'abondance de fer libre et d'oxyhydroxydes. A l'inverse, des conditions réductrices à la base du profil ont pu conduire à une augmentation de la proportion de formes de fer ferreux. Il est à noter que nos estimations de flux sortants de fer (évalués par analyse des eaux de drainage) indiquent une lixiviation très limitée (de l'ordre de 6 g.m^{-2}) de cet élément.

Le suivi des concentrations en calcite (CaCO_3) aboutit à des observations très différentes. Au contraire des résultats que nous avons obtenus sur Technosol 1 dans le cadre de ma thèse (Séré, 2007 ; Séré *et al.*, 2010), il apparaît que les concentrations en calcite ont peu changé au cours des deux ans de suivi. Elles ont légèrement augmenté sur le premier horizon (de 9 g.kg^{-1} à t_0 , jusqu'à 13 g.kg^{-1} en moyenne à $t_{2\text{ans}}$). Ceci s'explique probablement plus par l'effet de tassement du sol que par une carbonatation du profil. Si, en moyenne, les concentrations dans l'horizon ballast/sous-produits papetiers sont similaires, nos résultats tendent à suggérer une redistribution sur la profondeur. A l'interface entre les deux couches, ceci peut s'expliquer par un mélange des matériaux qui conduit à une baisse de la concentration. Ensuite, un phénomène de décarbonatation/recarbonatation est suggéré par l'augmentation de concentration entre 96 et 156 cm. Ainsi, nous pouvons conclure que, si la pédogenèse précoce a conduit à des évolutions minéralogiques, elles sont ici de faible intensité pour Technosol 3. De manière logique et tout à fait analogue aux sols naturels, nous montrons ainsi que l'intensité des processus pédogénétiques dépend de la nature des matériaux parents.

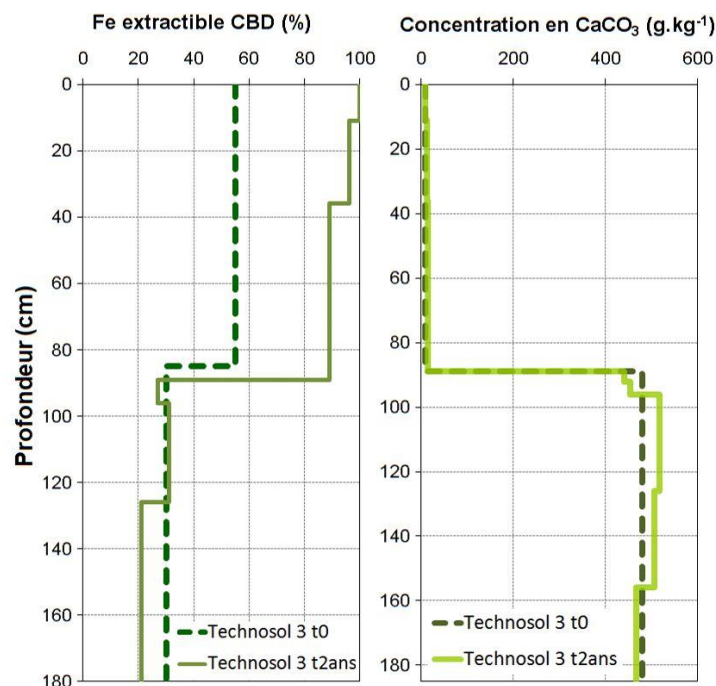


Figure 57. Evolution du fer extractible et de la concentration en calcite dans Technosol 3 à t_0 et après 2 ans en lysimètre

5.4.2. Changement d'échelles

En mettant en parallèle les résultats obtenus au cours de ma thèse sur des parcelles expérimentales *in situ*, des colonnes de laboratoire et des données ultérieures en colonne lysimétriques de la station du GISFI, il a été possible de comparer la dynamique des éléments à ces trois échelles pour Technosol 1 et Technosol 2. Il est important de noter ici que les conditions hydrodynamiques sont très différentes entre les différents dispositifs : écoulement en conditions saturées pour les colonnes de laboratoire, drainage lorsque la base du profil est saturée pour la colonne lysimétrique, drainage libre pour la parcelle expérimentale. Afin de normaliser la représentation de ces résultats, nous avons défini une méthode de calcul qui ne sera pas détaillé ici (Séré, 2007). Les courbes obtenues pour les sulfates et le calcium témoignent de la difficulté de cette comparaison (Figure 58). En effet, les ordres de grandeurs de concentrations sont très différents d'un dispositif à l'autre (parfois d'un facteur 100) et la cinétique des réactions semble différente. Pour ce qui est du dernier point, il apparaît néanmoins que le début de la lixiviation intense des sulfates apparaît au même moment pour les 3 échelles (entre 6 et 8 m^3 de volume de percolats). Néanmoins, les flux d'éléments restent très différents : entre 0 et 15 m^3 , l'équivalent de 56 g.m^{-2} a été lixivié sur la colonne lysimétrique, 111 g.m^{-2} pour la parcelle expérimentale et 2331 g.m^{-2} pour la colonne de laboratoire. Pour ce qui est du calcium, la cinétique des réactions est peu

reproductible d'un dispositif à l'autre et les flux lixiviés sont plus proches entre la colonne de laboratoire et la parcelle expérimentale, mais restent bien supérieurs à ceux mesurés sur la colonne lysimétrique.

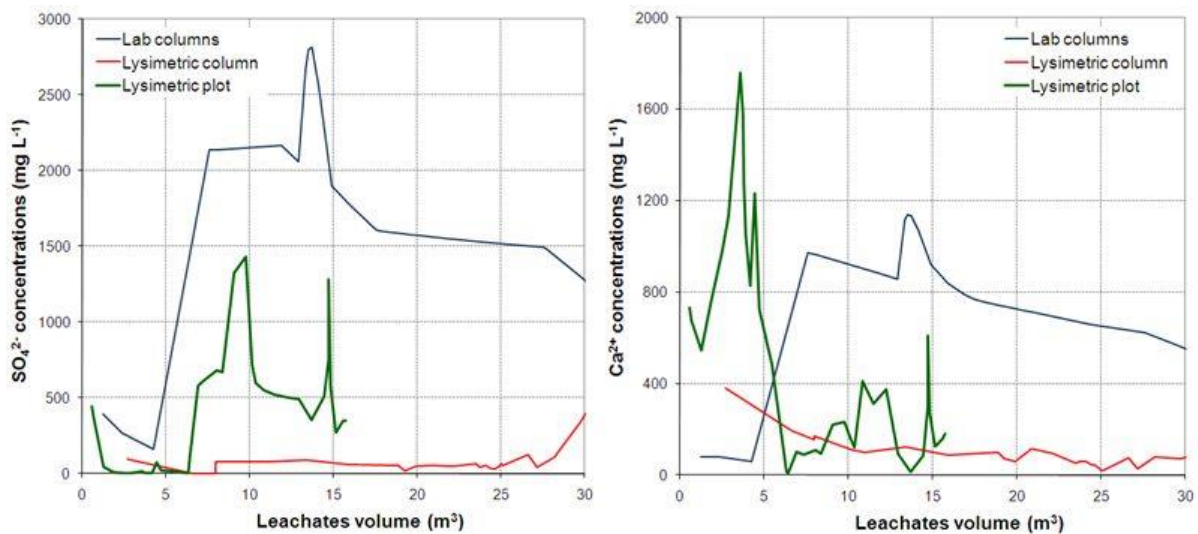


Figure 58. Evolution des concentrations en SO_4^{2-} et Ca^{2+} dans les percolats collectés sur Technosol 1 pour des colonnes de laboratoires, des colonnes de lysimétries et des parcelles expérimentales

Deux conclusions peuvent alors être formulées. La première est d'ordre méthodologique. L'utilisation de test de percolation en colonne de laboratoire permet certes d'évaluer un potentiel maximum de relargage d'éléments depuis un sol ou un matériau, mais reproduit mal la cinétique et l'intensité des processus. Ceci s'explique par un ensemble d'éléments au premier rang desquels le fait que le matériau testé doit être broyé et/ou tamisé, augmentant ainsi significativement sa réactivité. La seconde est d'ordre scientifique. Ces résultats peuvent être interprétés comme la réponse d'un même sol – Technosol 1 – à différentes conditions hydrodynamiques qui sont imposées par les modalités de fonctionnement des dispositifs expérimentaux. Il est alors démontré que l'hydrodynamique joue un rôle absolument crucial dans les phénomènes d'altération et d'évolution des phases minérales des sols construits.

5.5. Transfert de particules

Comme nous l'avons évoqué dans la synthèse bibliographique de ce Mémoire (section 2.7.3), le processus de lessivage est complexe à observer sur des laps de temps courts. Non seulement la cinétique de ces mécanismes sont lents, mais leur mise en évidence nécessite des conditions expérimentales et des moyens analytiques dédiés. Néanmoins, nous avons eu l'occasion de les observer dans des systèmes bien spécifiques que sont les toitures végétalisées.

Même si cela ne relève pas directement du propos de cette section, il apparaît en premier lieu que les concentrations en carbone organique ont fortement décliné au cours des 4 ans d'évolution (Figure 59). Une tendance à la décroissance de cette concentration avec la profondeur est observée. Ceci s'explique probablement par l'apport, dans la partie supérieure du substrat, de carbone organique par la végétation en place (*i.e.* litière et racines), mais également par des apports de surface (*e.g.* déjections animales). A l'inverse, les concentrations en azote ont très sensiblement augmenté pendant la même période (Figure 59). De même les concentrations sont plus élevée en surface ce qui peut s'expliquer également par des apports extérieurs.

Le point le plus intéressant est tout d'abord la perte de particules fines dans le substrat évolué (Figure 59). Cette perte est en particulier marquée à la surface du profil (0 à 2 cm). Le processus est particulièrement intense pour le sol nu. Dans le cas des emplacements de sol nu et de sol recouvert par des mousses, une nette accumulation dans la zone 2 à 5 cm est également visible. Ceci suggère par conséquent une migration des particules fines depuis la surface – probablement sous l'influence des précipitations – vers la profondeur. La perte totale de particules fines est à relativiser car il apparaissait que le géotextile situé en dessous du substrat était partiellement colmaté par de fins constituants

retenus en son sein (non quantifié dans l'étude). En tout état de cause, un phénomène de lessivage a pu être décrit qui, associé à d'autres phénomènes (croissance de la végétation, rhizodéposition, apports extérieurs), conduit à une évolution des propriétés physico-chimiques.

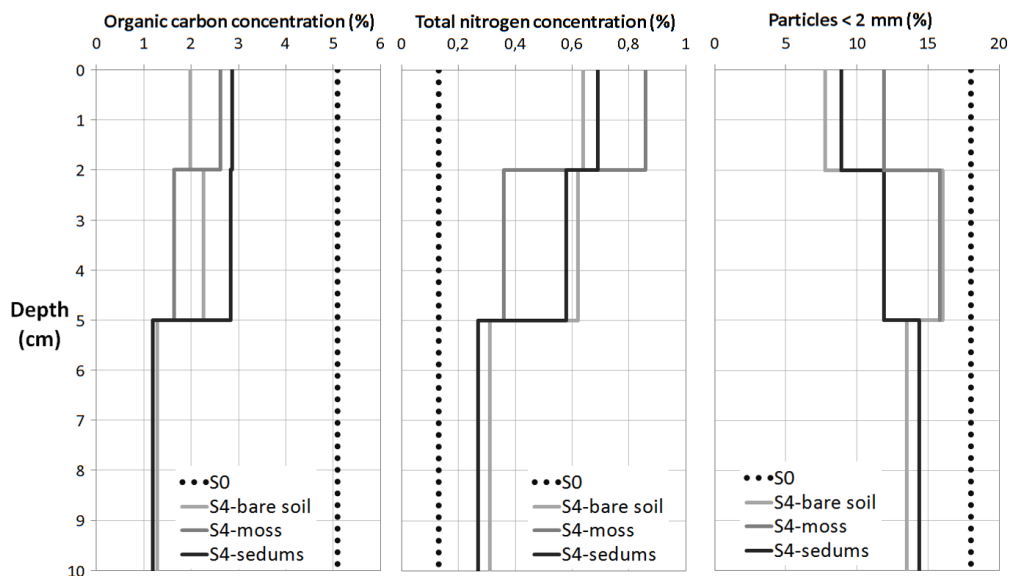


Figure 59. Evolution avec la profondeur de la concentration en carbone organique, en azote total et en particules inférieures à 2 mm du substrat initial et du substrat après 4 ans sous différentes couvertures de sol

Rappelons enfin que cette évolution de la composition texturale du substrat a pu être mise en regard d'une évolution de son architecture porale (Figure 51). Il apparaît ainsi que la dynamique de la structure dans ce type de milieu est particulièrement complexe.

5.6. Implications de la pédogenèse sur le fonctionnement des Technosols construits

5.6.1. Amélioration du fonctionnement

Il n'est pas aisé de déterminer, de manière systématique, les liens entre l'évolution des propriétés physico-chimiques des Technosols et l'évolution de leur fonctionnement. En effet, pour certaines fonctions comme la production de biomasse ou le réservoir de biodiversité, il est clair que la dynamique temporelle seule est un élément clé pour des systèmes initialement vierges (ou presque) de tout organisme vivant. Dans ce cas, comme nous l'avons indiqué dans les sections 4.4 et 4.5, nos travaux ont permis de montrer une augmentation globale du rendement de biomasse sèche produite au cours du temps et une augmentation de l'abondance et de la diversité en organismes du sol. Nos travaux n'ont pas permis, à ce jour, de corrélérer l'évolution de ces deux fonctions à l'évolution de paramètres mesurés au cours du temps (Biotechnosol, 2013). Néanmoins, il apparaît clairement que la mise en œuvre du génie pédologique a permis d'aboutir à des niveaux de fonctions supérieurs à ceux observés à l'état initial du site, en friche.

Pour d'autres fonctions comme l'infiltration de l'eau, les corrélations sont beaucoup plus nettes. Les problèmes d'accumulation d'eau en surface qui ont été soulignés dans la section 3.2.3 sont récurrents et sont également intervenus sur Technosol 1 dans les premiers temps. Les mesures de potentiel rédox que nous avons effectués, 1 an après leur mise en place, témoignent encore de ces phénomènes d'engorgement car la partie inférieure présentaient des valeurs de potentiel négatives à nulles (Figure 60). Au cours du temps ce phénomène s'est clairement résorbé jusqu'à atteindre des valeurs quasi-identiques sur toute la profondeur du profil, autour de 200 mV. Ceci traduit bien la meilleure circulation de l'eau qui a pu être drainé hors du profil. Ce phénomène positif est à la fois bien corrélé avec l'enracinement de plus en plus profond (Figure 46), mais aussi avec l'évolution de la structure pédologique. Comme nos observations en témoignent, la structure est passée de : i) particulière à

grumeleuse dans l'horizon de surface, ii) de polyédrique à grumeleuse dans l'horizon de mélange et iii) de prismatique à polyédrique dans l'horizon de sous-produits papetiers (Séré, 2007). Il apparaît ainsi que l'activité biologique, outre son action sur le prélèvement d'eau en profondeur, a conduit à la formation d'associations organo-minérales (Séré *et al.*, 2010) qui ont contribué à la structuration du sol et donc à un meilleur drainage de l'eau.

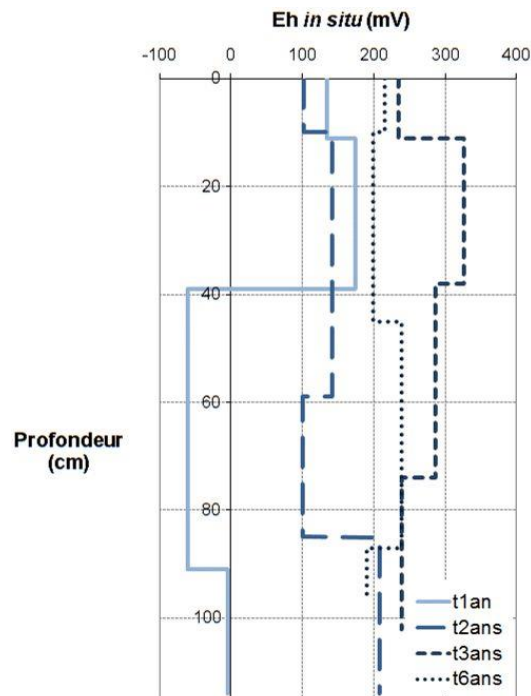


Figure 60. Evolution du potentiel redox dans Technosol 1 en fonction de la profondeur et du temps

5.6.2. Dégradation du fonctionnement

Au contraire, pour d'autres fonctions et d'autres Technosols, l'effet inverse est observé. Ainsi, nos mesures visant à évaluer la capacité de rétention en eau et l'effet retard sur le drainage de l'eau de Technosol 5 – réalisées en conditions contrôlées, sans prendre en compte l'évapotranspiration – ont démontré qu'un substrat évolué retenait moins d'eau et réduisait la durée l'effet retard par rapport à un substrat neuf (Figure 61a) (Bouzouidja, en préparation). Ainsi, le service de régulation des événements pluvieux extrêmes tendrait à décroître au cours du temps et durant l'évolution pédogénétique précoce du substrat. Il s'avère en réalité que ceci dépend de la composition du substrat de toiture végétalisée. En effet, des travaux récents ont démontré l'opposé pour des substrats composés de brique à la place de la pouzzolane (De Ville *et al.*, 2017) (Figure 61b).

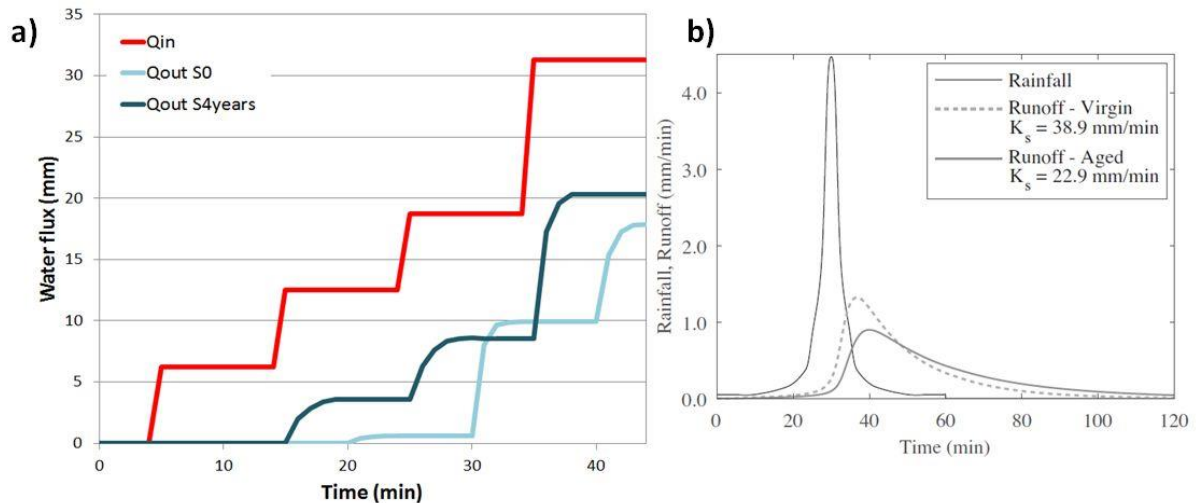


Figure 61. a) Courbes cumulées des précipitations (Q_{in}) et flux d'eau sortant d'un substrat neuf ($Q_{out S0}$) et d'un substrat évolué ($Q_{out S4years}$) ; b) Courbes instantanées des flux de précipitations (Rainfall), d'eau sortant d'un substrat neuf (Runoff - Virgin) et d'un substrat évolué (Runoff - Aged) (De Ville et al., 2017)

Par ailleurs, même si nos résultats tendent à montrer une augmentation de production de biomasse, l'évolution d'indicateurs de la fertilité chimique des sols sur Technosol 2 et Technosol 4 indique que cette tendance n'est pas forcément durable. En effet, les prélèvements et caractérisations effectués lors des 4 premières années suivant leur mise en place dans l'interface entre les deux horizons superficiels indiquent une décroissance sensible des concentrations en azote total et en phosphore disponible pour les plantes (Figure 62). Ceci suggère que, comme pour les sols agricoles, il serait pertinent d'entretenir cette fertilité chimique si des objectifs de rendement ambitieux sont attendus.

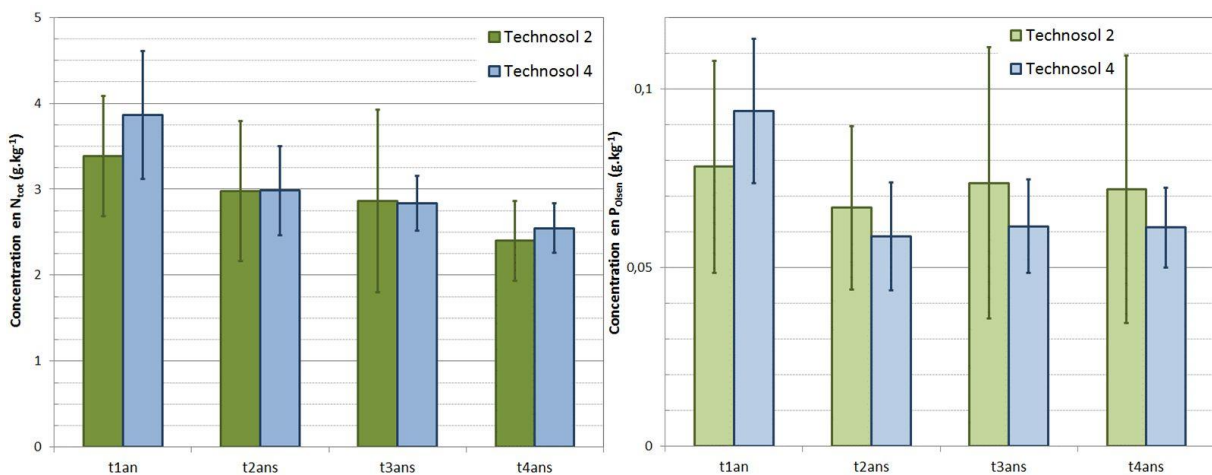


Figure 62. Evolution au cours du temps des concentrations en azote total et en phosphore disponible dans Technosol 2 et technosol 4

5.7. Conclusion intermédiaire

5.7.1. Justification de l'étude de la pédogenèse des Technosols

Ma perception est que, alors que les applications de la construction de sol se multiplient pour divers usages et dans des contextes variés (*e.g.* production potagère sur toitures, réhabilitation de sites miniers, valorisation de sous-produits, végétalisation urbaine) et dans des cadres plus ou moins encadrés, la communauté de science du sol se doit d'éclairer ces choix technologiques par des connaissances scientifiques. L'étude de la pédogenèse des Technosols construits se justifie alors pour au moins trois raisons.

La première est liée à notre capacité à appréhender l'évolution de ces systèmes artificiels en étant capable de mobiliser et d'adapter les connaissances acquises sur des sols naturels tout en s'adaptant à leurs spécificités. La seconde est intrinsèquement liée au développement du génie pédologique. Si nous construisons des sols, nous avons besoin de savoir comment vont évoluer leurs fonctionnalités au cours du temps. En d'autres mots, il s'agit ici de déterminer de quelle manière les services écosystémiques qui sont rendus par un sol construit après sa mise en place vont évoluer au cours du temps et durant sa pédogenèse. De tels résultats doivent, à mon sens, amener soit à reconsidérer la formulation initiale du Technosol - en modifiant éventuellement sa composition pour anticiper par exemple une dégradation de son fonctionnement -, soit à mettre en place un itinéraire technique, à l'échelle de la parcelle, pour corriger certains paramètres – de manière analogue à la gestion du sol d'une parcelle agricole -. Enfin, la troisième repose sur l'hypothèse que les connaissances acquises sur les Technosols construits peuvent éclairer la compréhension de certains processus pédogénétiques intervenant dans les sols naturels. Ce postulat est ambitieux et va probablement à l'encontre d'une intuition initiale qui pourrait considérer les Technosols comme des non-sols. Pourtant, les sols construits constituent une opportunité pour l'étude de la pédogenèse car il est possible de maîtriser totalement le début de leur évolution qui est, de plus rapide et intense. Sachant que les processus observés sur les Technosols sont similaires aux sols naturels, il serait alors possible de caractériser de manière plus fine et précise leur cinétique et leur intensité sous l'effet de différents facteurs.

5.7.2. Les recherches futures sur la pédogenèse des Technosols : une question de méthode et d'approche

Comme j'ai eu l'occasion de l'évoquer en creux, l'étude de la pédogenèse des Technosols construits est en premier lieu affaire de méthode. Il nous est en effet apparu crucial, compte-tenu de la rapidité des réactions, d'anticiper les processus étudiés afin de mettre en œuvre l'approche expérimentale adaptée aux questions posées.

Des travaux sur la pédogenèse des Technosols ont été menés au Laboratoire Sols et Environnement depuis bientôt 15 ans, après 10 premières années d'étude de leur diversité. Notre approche s'est déclinée en trois grandes phases. Dans un premier temps, nous avons découvert le sujet, en étudiant une gamme limitée de Technosols (Séré, 2007 ; Lefort, 2008 ; Huot, 2012 ; Bouzouidja, 2014). Nous avons alors tenté, sans anticiper nécessairement les modalités expérimentales, de mesurer une large palette de propriétés physico-chimiques au cours de l'évolution des sols. L'objectif principal pourrait alors être décrit comme l'identification et la description des processus pédogénétiques (notamment à la recherche d'une éventuelle originalité des Technosols). Dans un second temps, nous avons tenté de simplifier la complexité des systèmes étudiés en focalisant nos approches sur l'effet d'un nombre restreint de facteurs (*e.g.* végétation, faune du sol, climat) sur certains processus ciblés (*e.g.* agrégation, altération des minéraux, disponibilité de polluants organiques) (Pey, 2010 ; Rokia, 2013 ; Salifou, 2012 ; Dagois, 2015). Forts de ces allers-retours entre la complexité de systèmes réels et la précision de données obtenues en conditions contrôlées, nous pouvons désormais envisager une troisième étape. Il me semble que, pour pouvoir appréhender de manière fine la diversité des processus et des interactions générées par les différents facteurs, la clé est en premier lieu l'anticipation des protocoles expérimentaux. En second lieu, c'est l'utilisation de modèles existants ou à adapter afin de faire émerger clairement des hypothèses qui devront être testées expérimentalement.

Le cadre conceptuel évoqué ici s'appuie dans une large mesure sur les hypothèses que nous avons formalisées au niveau de l'équipe Technosol (Pédogenèse des sols fortement anthropisés) par l'intermédiaire de ce schéma représentant l'évolutions des propriétés, des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols fortement anthropisés au cours du temps (Figure 63).

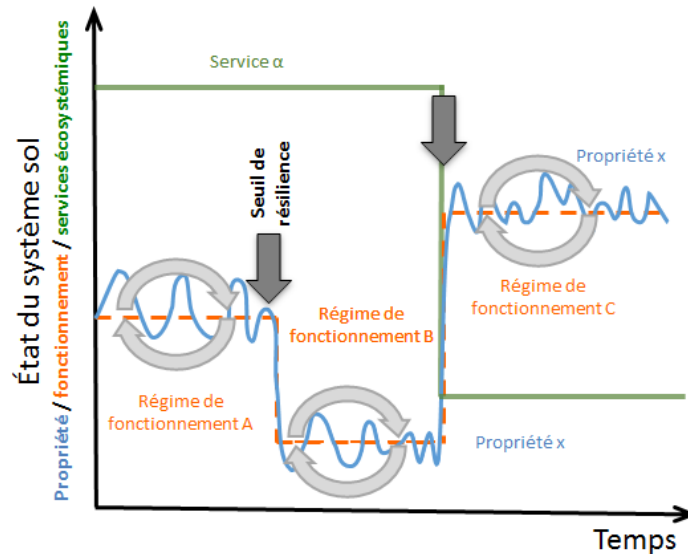


Figure 63. Schéma conceptuel représentant l'évolution des propriétés, des fonctions et des services écosystémiques rendus par un Technosol au cours du temps (LSE, 2013)

Publication(s)

Tifafi M., Bouzouidja R., Leguédois S., Ouvrard S., Séré G., 2017, How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the temporal dynamics of the soil porosity, *Geoderma* <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.027>

Bouzouidja R., Rousseau G., Galzin V., Claverie R., Lacroix D., Séré G., 2016 Green roof ageing or Isolatic Technosol's pedogenesis?, *Journal of Soils and Sediments*, 10.1007/s11368-016-1513-3

Leguédois, S., Séré, G., Auclerc, A., Cortet, J., Huot, H., Ouvrard, S., Watteau, F., Schwartz, C., Morel, J.-L., 2016, Modelling pedogenesis of technosols. *Geoderma*, 262, 199-212. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.008

Séré G., Ouvrard S., Magnenet V., Pey B., Morel J.L., Schwartz C., 2012, Predictability of the evolution of the soil structure using water flow modeling for a constructed Technosol, *Vadose Zone Journal*, vol. 11 (1) - 10.2136/vzj2011.0069

Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.C., Watteau F., Morel J.L., 2010, Early pedogenic evolution of constructed Technosol, *Journal of Soils & Sediments*, vol 10, p 1246-1254

Bouzouidja R., Séré G., Claverie R., Bouyer J., Lacroix D., en cours, Impact of middle-term meteorological conditions on hydrothermal behaviour of green roofs

Ouvrage(s) et Chapitre(s) d'ouvrage(s)

Watteau F., Séré G., Huot H., Begin J.C., Schwartz C., Qiu R., Morel J.L., 2017, Micropedology of SUITMAs, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p

Huot H., Séré G., Leguédois S., Schwartz C., Vidal-Beaudet L., Morel J.L., 2017, Pedogenetic processes in soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p

Rapport(s) & Mémoire(s) de stage(s)

Galzin V. & Rousseau G., 2015, Etude de l'hydrodynamique d'une toiture végétalisée, Mémoire Projet laboratoire ENSG, 12p

Tifafi M., 2014, Hydropédologie d'une gamme de sols au sein d'un gradient d'anthropisation, Mémoire de Master 2 "Environnements Continentaux et Hydrosociétés", 42p

6. Comment évaluer les services écosystémiques rendus par les Technosols ?

6.1. Liste des services écosystémiques assurés par les Technosols

6.1.1. Cadre conceptuel

Cette section vise à proposer une liste de services écosystémiques rendus par les Technosols – par essence des sols profondément marqués par l'action de l'Homme - qui soit adaptée aux milieux fortement anthropisés que sont les espaces urbains et industriels. Il s'agit en premier lieu de s'appuyer sur les propositions et les recommandations de nombreux auteurs qui conseillent l'adaptation des listes aux contextes et aux enjeux spécifiques de chaque milieu (Costanza *et al.*, 1997 ; de Groot *et al.*, 2002 ; MEA, 2003 ; Escobedo *et al.*, 2011 ; Adhikari et Hartemink, 2016). En second lieu, pour faire écho aux écrits déjà cités de Blum *et al.* (2005), nous proposons d'intégrer dans cette liste des services « non écologiques » qui sont rendus par les Technosols tels qu'ils peuvent être modifiés ou aménagés par l'Homme. En effet, même si l'implantation de bâtiments implique dans la majorité des cas la mise en place de fondations, c'est bel et bien le sol qui constitue le support initial. De plus, il est juste de considérer qu'en fonction des propriétés intrinsèques du sol, la construction sera plus ou moins propice et donc que le sol joue un rôle actif dans la manière dont ce service est rendu. Pour illustrer encore plus avant jusqu'où il serait possible d'aller, rappelons que Morel *et al.* (2014) ont même inclus le service d'approvisionnement en eau dans les services rendus par les SUTMA, considérant que ceux-ci accueilleraient des canalisations d'adduction d'eau potable.

Toujours en préambule à la présentation de cette liste, il a été décidé, comme le soutiennent les travaux les plus récents sur le sujet (Haynes-Young & Potschin, 2011), de ne pas considérer les services de support, mais de privilégier la notion de Capital Naturel ou de « Soil's Capital » tel que présenté par Fischer *et al.* (2009). Néanmoins, comme nous le proposons dans l'article Blanchart *et al.* (accepté), il semble pertinent, dans le cas des Technosols, de parler de « Capital Naturel et Artificiel ». En effet, les sols très anthropisés se caractérisent par l'association inédite de constituants d'origine naturelle et artificielle ; ces derniers (*e.g.* canalisations, structures enterrées, bitume) visant fréquemment à améliorer les fonctions non écologiques (Robinson *et al.*, 2014).

6.1.2. Les services écosystémiques rendus par les Technosols

Cette liste présentée pour la première fois dans l'article Blanchart *et al.* (accepté) se compose classiquement des trois grandes catégories de services écosystémiques habituellement présentées dans la littérature (régulation, approvisionnement et culture) (Tableau 6). L'adaptation de la liste aux contextes urbain et industriel conduit à ouvrir la catégorie des services d'approvisionnement à des services tels que le support d'activités humaines, le support d'infrastructures humaines ou bien encore les ressources ornementales qui sont des questions essentielles en matière d'urbanisme. Il est à noter que cette liste est le fruit d'un travail croisé entre différentes disciplines puisqu'elle a été établie avec l'aide de collègues urbanistes du CEREMA, des pédologues et assistant à Maître d'Ouvrage de la société SCE et de notre collègue urbaniste et géographe Jean-Noël Consalès (UMR TELEMME 7303 TELEMME Aix-Marseille-Université / CNRS) qui ont pu y exprimer spécifiquement les attentes des aménageurs. Chacun de ces services écosystémiques est ainsi fourni directement par le sol, par le couple sol-végétation, voire par la réalisation d'aménagements spécifiques.

Tableau 6. Proposition de liste étendue des services écosystémiques rendus par les Technosols

Classes	Services	Catégories de services	
Régulation	Régulation de la qualité de l'air	O ₃ , CO ₂	
		Particules fines (poussières)	
		Pluies acides	
	Régulation du climat	Climat local	
		Climat global	
		Climat d'intérieur	
	Traitement des déchets	Stockage	
		Recyclage	
	Purification de l'eau	Dégradation des polluants	
	Régulation des aléas naturels		Tempêtes
			Inondations
			Séismes, mouvements de terrains
			Erosion
Parasites et maladies			
Approvisionnement	Aliments	Céréales et légumes	
		Fruits	
		Viande	
		Champignons	
	Energie	Solaire	
		Eolien	
		Biomasse	
	Support d'habitat pour la faune	Géothermie (puits provençaux/canadiens)	
		Habitat pour la biodiversité	
	Support physique d'infra / superstructures	Réservoir de ressources génétiques	
		Voirie lourde	
		Voirie légère	
		Voie ferrée	
		Réseaux VRD	
		Espaces publics (places, parcs...)	
		Bâtiments sans fondation	
		Bâtiments « légers » avec fondations	
		Bâtiments « lourds » avec fondations	
		Support d'activités humaines	Activités très sensibles (e.g. école, centre de soins)
	Activités sensibles (e.g. résidentiel, agriculture)		
	Activités peu sensibles (e.g. commerce, industrie)		
	Ressources ornementales	Pelouses	
		Arbustes	
		Arbres	
		Fleurs	
	Culturel	Conservation patrimoine / histoire	Patrimoine / histoire / archéologie / pédagogie / symbolique/ mémoire
			Activités sportives et de loisirs en extérieur
Attrait de l'environnement		Paysage / Contemplation / esthétique / aménités liées à la présence de la nature	
		Tourisme	
		Spirituel / cultuel	

Cette liste vise bien à mettre en avant les contributions des Technosols en réponse aux grands enjeux environnementaux globaux et locaux, précédemment évoqués, auxquels sont confrontés les écosystèmes fortement anthropisés. Au-delà, l'énumération de ces services, faciles à appréhender au-delà de la communauté des pédologues, a également pour ambition de faciliter la prise en compte des sols anthropisés par les aménageurs et les urbanistes dans leur conception de projets d'aménagement. Au-delà de cette première liste et à l'issue du travail mené dans le projet Destisol, nous avons progressivement réduit la liste précédente pour nous focaliser sur des services écosystémiques qui

soient à la fois centraux et susceptibles d'être évalués sur la base d'indicateurs du sol mesurables en routine (Tableau 7) (Destisol, 2017).

Tableau 7. Proposition de liste réduite des services écosystémiques rendus par les Technosols

Catégorie	Service écosystémique		Code
Régulation	Régulation de la qualité de l'air		S1
	Régulation du climat	Climat local	S2
		Climat global	S3
	Régulation des aléas naturels	Inondations	S4
		Erosion	S5
	Stockage des déchets		S6
	Purification de l'eau		S7
Approvisionnement	Habitat pour la biodiversité		S8
	Aliments		S9
	Ressources ornementales	Herbacées / Fleurs	S10
		Arbustes	S11
		Arbres	S12
	Energie	Production de biomasse	S13
	Support physique d'infra / superstructures	Voirie légère / stationnement	S14
		Voirie lourde	S15
		Bâtiment	S16
		Réseaux VRD	S17
	Support d'activités humaines	Activités sensibles et très sensibles (e.g. école, centre de soins, résidentiel)	S18

6.1.3. Définition des services écosystémiques considérés

Une définition de chacun des services écosystémiques considérés ici, rendus par les Technosols (éventuellement par les couples sol-végétation ou sol-aménagement) est alors proposée :

- **Régulation de la qualité de l'air** : les sols et les végétaux, du fait de leurs surfaces d'échange élevées, contribuent à la fixation des polluants (métaux lourds, HAP, NOx et SOx) émis par les activités humaines ;
- **Régulation du climat local** : les sols et les végétaux contribuent à des mécanismes d'évaporation ou de transpiration de l'eau ainsi qu'à la réflexion des rayons du soleil, participant ainsi à la diminution du phénomène d'îlot de chaleur urbain (températures plus élevées en milieu urbain) ;
- **Régulation du climat global** : les sols et les végétaux constituent les principaux réservoirs continentaux de carbone. A ce titre ils permettent de piéger des gaz à effets de serre, limitant ainsi le réchauffement climatique ;
- **Régulation des inondations** : les sols constituent la principale interface entre l'eau atmosphérique et les masses d'eaux superficielles et souterraines. Ce sont eux – en fonction de leurs propriétés intrinsèques, mais également de leur couverture (en particulier la présence d'un scellement, fréquent en milieu urbain en surface ou en profondeur) – qui permettent l'infiltration de l'eau. Leur rôle, de même que celui des végétaux dans une moindre mesure, est ainsi primordial dans l'atténuation des inondations lors de précipitations de forte intensité ;
- **Régulation de l'érosion** : l'érosion, c'est-à-dire l'ablation des couches superficielles du sol et du déplacement de ces éléments sous l'action de l'eau, du vent, des rivières, des glaciers ou de l'Homme est un processus qui peut conduire à la dégradation d'écosystèmes et d'infrastructures en aval. Au même titre que les conditions climatiques, la topographie, l'usage du sol et sa couverture (e.g. végétation, infrastructures) et les propriétés intrinsèques des sols conditionnent l'intensité du phénomène d'érosion ;
- **Stockage des déchets** : les sols peuvent jouer le rôle de réceptacle de déchets issus des activités humaines. Ce stockage peut être intentionnel ou non, il peut également être aménagé (mise en place d'équipements pour limiter les risques de transferts de contaminants provenant des déchets) ou non. Dans tous les cas, certaines propriétés intrinsèques du sol (e.g. présence de couches imperméables en profondeur) lui permettent de rendre ce service de manière plus ou moins satisfaisante ;

- **Purification de l'eau** : comme évoqué précédemment les sols - et la végétation - constituent une interface incontournable dans le cycle de l'eau, jouant un rôle de filtre et de surface d'échange. En fonction de leurs propriétés intrinsèques, ils sont susceptibles de dégrader ou d'améliorer la qualité de l'eau qui percolent en leur sein. Le service de purification est défini comme la capacité d'un sol à améliorer cette qualité ;
- **Habitat pour la biodiversité** : considérer la fourniture d'un habitat pour la biodiversité en tant que service écosystémique et non comme fonction a été âprement discutée dans la littérature scientifique. Dans le cas des sols urbains, il a semblé pertinent de considérer comme tel la capacité d'un sol à héberger et à offrir un habitat pour les organismes vivants (*i.e.* végétaux, champignons, faune) du fait de ses propriétés intrinsèques ;
- **Approvisionnement en aliments** : les sols constituent le support sur lequel est cultivée la végétation destinée à la consommation humaine et animale. En milieu urbain, il s'agit essentiellement de pratique de maraîchage et de jardinage. La fertilité des sols, c'est-à-dire leur capacité à fournir un ancrage et des nutriments aux plantes dépend d'un ensemble de propriétés intrinsèques du sol en sus des pratiques d'entretien et d'amendement mises en œuvre par l'Homme ;
- **Approvisionnement en ressources ornementales** : une des spécificités des sols urbains est d'être fréquemment utilisés comme support de production végétale à vocation esthétique et paysagère. Ce service dépend de la fertilité du sol tel qu'évoquée précédemment. Il a également été décidé de distinguer les différentes strates de végétation (herbacée, arbustive, arborée) du fait des différents niveaux d'exigence en termes d'enracinement ;
- **Approvisionnement en énergie** : dans le contexte de l'étude, seule la production de biomasse à vocation énergétique a été considérée. Cette dernière repose à nouveau sur la fertilité du sol ;
- **Approvisionnement en support physique d'infra/super structures** : ce service apparaît comme une spécificité des sols urbains qui sont largement utilisés par l'Homme comme support d'infrastructures diverses. Ce service dépend également de certaines propriétés intrinsèques du sol. Il a de nouveau été décidé de distinguer différentes catégories d'infrastructures en fonction de leur niveau de contraintes spécifiques ;
- **Approvisionnement en support d'activités sensibles** : il est apparu pertinent aux auteurs de considérer ici ce service, au regard des attentes des aménageurs vis à vis des sols urbains. En effet, certaines propriétés du sol, en particulier son niveau de contamination, peuvent rendre impossible certains usages et donc certains services attendus, comme l'accueil de population sensibles (*e.g.* établissement scolaire, centre de soins).

6.2. Développement d'un cadre méthodologique adapté pour l'évaluation des services écosystémiques rendus par les Technosols

L'exercice qui consiste à lier l'état d'un Technosol aux services écosystémiques qu'il peut potentiellement rendre requiert un certain sens de l'équilibre... En effet, le formalisme présenté précédemment et issu des travaux d'Adhikari et Hartemink (2015) est valide quel que soit le type de sol considéré. Cependant, outre l'addition de services écosystémiques présentés dans la section précédente, il est nécessaire de prendre en compte les spécificités des milieux anthropisés. Dans la proposition détaillée ci-dessous, ceci se traduit en particulier par la prise en compte de la variété de couvertures des sols observés sur ces espaces. L'ensemble de cette section reflète le travail collectif initié dans le cadre du projet Destisol (pilotage SCE). Elle va prochainement faire l'objet d'un guide méthodologique (Destisol, 2018). Dans ce cadre, cette démarche de diagnostic semi-quantitatif a été pour l'instant conçue pour s'appliquer à l'échelle d'un site de friche urbaine ou industrielle dont la superficie est de l'ordre de 1 à 10 ha.

6.2.1. Présentation du formalisme

Comme le souligne l'état de l'art, peu de publications scientifiques évoquent les services écosystémiques rendus par les sols urbains. Ces dernières s'attachent en grande majorité à caractériser les fonctions d'un milieu donné qu'elles traduisent en services écosystémiques rendus sans proposer de formalisme logique pour son évaluation.

S'inspirant des méthodes de notation présentées précédemment, nous avons cherché à expliciter des liens semi-quantitatifs entre propriétés/état – fonctions – services pour les Technosols. Ce travail, réalisé sur la base de la littérature scientifique et d'échanges entre experts et professionnels de l'aménagement

urbain, s'est d'abord attaché à inventorier les indicateurs du sol, les fonctions pertinentes dont découlent ensuite les services écosystémiques préalablement identifiés, puis à caractériser leurs liens de causalité (Figure 64). Un premier challenge a été celui de la définition du périmètre du système à considérer et en particulier la distinction de ce que nous avons initialement appelé les fonctions du sol et les fonctions de l'écosystème (*e.g.* circulation et infiltration de l'eau = fonction du sol ; pollinisation = fonction de l'écosystème). Nous avons considéré les fonctions du sol comme un sous-ensemble des fonctions de l'écosystème. Nous avons aussi pris en compte initialement certaines fonctions de l'écosystème qui ne dépendaient pas directement du sol (*e.g.* stockage de carbone dans la végétation, réflexion des rayons solaires et ombre portée) mais qui pouvaient être appréhendées par la connaissance de la nature de la couverture du sol. Pourtant, nous avons progressivement abandonné les fonctions non liées directement au sol car leur évaluation – reposant uniquement sur l'usage futur du sol – était trop arbitraire (Figure 64).

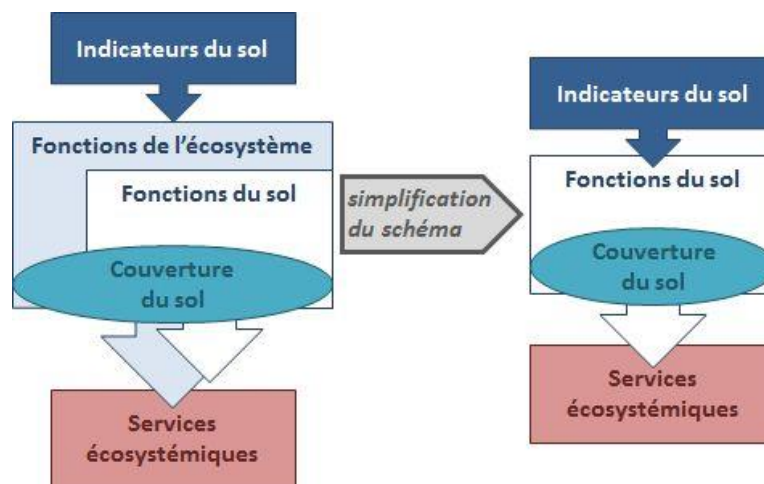


Figure 64. Evolution du schéma relationnel faisant le lien entre indicateurs du sol - fonctions du sol - couverture du sol - services écosystémiques

6.2.2. Présentation des indicateurs

Les indicateurs qui sont retenus doivent idéalement découler de la réalisation de fosses pédologiques creusées à l'aide d'une pelle mécanique afin de dégager des profils de sols suffisamment larges (2,5 m) et profonds (1,2 m) pour être interprétables. Les fosses pédologiques sont implantées sur le périmètre d'étude en cohérence avec une étude documentaire préalable dont les modalités ne sont pas détaillées ici mais qui sont précisées dans le guide (Destisol, 2018). Le profil est décrit globalement, puis les différents horizons (aussi bien diagnostiques qu'issus d'apport/remblais de matériaux exogènes) font ensuite l'objet d'une description complète à partir d'indicateurs d'état du sol issus d'observations morphologiques réalisées *in situ*, complétée, le cas échéant, d'analyses (physico-chimiques, géotechniques, contaminants) réalisées en laboratoire à partir d'échantillons de sols prélevés sur le terrain.

Si la prise en compte d'un nombre important d'indicateurs permet d'améliorer la fiabilité de l'évaluation des fonctions du sol, elle augmente également le coût et la complexité de la mise en œuvre de l'outil. Ainsi, seuls ont été sélectionnés les indicateurs répondant aux critères suivants :

- **Pertinence** vis-à-vis des fonctions du sol et des services écosystémiques considérés ;
- **Facilité d'acquisition** de la donnée (disponibilité de l'information, du matériel adéquat, d'un prestataire d'analyse) ;
- **Faisabilité** de la mesure, basée sur l'existence d'un protocole normalisé ;
- **Représentativité** de la valeur de l'indicateur. Ce dernier doit, dans la mesure du possible, refléter la nature et le fonctionnement du sol, c'est-à-dire ses propriétés intrinsèques plutôt qu'un état temporaire ;

- **Coût** d'acquisition raisonnable.

20 indicateurs répondant à cette règle de décision ont été sélectionnés (Tableau 8). Ces derniers ont été classés au sein des catégories décrites ci-après et sont mobilisés dans le diagnostic en fonction de la nature des matériaux en présence et des objectifs de valorisation.

- **Morphologique** (systématique) : il s'agit des indicateurs directement observables au sein du profil de sol et utiles à la description morphologique des différents horizons ;
- **Physico-chimique** (facultatif) : ces indicateurs sont analysés en présence d'un horizon organo-minéral dont on souhaite caractériser le potentiel agronomique en vue de l'implantation de zones végétalisées (pelouse, potager, arbustes, arbres) ;
- **Géotechnique** (facultatif) : une identification GTR est réalisée afin de caractériser un matériau présentant un potentiel géotechnique intéressant, en vue de l'implantation de réseaux ou de zones imperméabilisées (voirie, bâti) ;
- **Contamination** (facultatif) : ces indicateurs sont analysés en cas de suspicion de contamination du sol. A noter toutefois que la mesure de ces indicateurs dans le cadre de la démarche Destisol n'entend pas se substituer à un diagnostic de pollution en bonne et due forme.

Les indicateurs du sol caractérisés au niveau de chaque horizon constituent les données d'entrée de l'évaluation. Ils permettront d'évaluer les fonctions du sol traduisant ainsi les potentialités des différents sols.

Tableau 8. Liste d'indicateurs du sol à considérer dans la démarche d'évaluation de la qualité du sol

Catégorie	Indicateurs du sol	Code
Morphologique	pente	I1
	profondeur de sol	I2
	couleur	I3
	densité racinaire	I4
	activité biologique	I5
	structure	I6
	texture	I7
	compacité	I8
	% éléments grossiers	I9
	% artefacts	I10
	hydromorphie	I11
	traces de contaminations	I12
Physico-chimique	pH	I13
	P ₂ O ₅ olsen	I14
	matière organique	I15
	Azote total	I16
	C:N	I17
	CaCO ₃	I18
Géotechnique	Classification GTR	I19
Contamination	ETM totaux	I20
	CTO totaux (HCT, HAP, PCB, BTEX)	I21

6.2.3. Présentation des fonctions

Les **fonctions du sol** désignent des **fonctions de l'écosystème** spécifiquement liées au sol. Ces dernières sont définies comme « les interactions biologiques, chimiques et physiques entre les composants de l'écosystème. Les fonctions et processus ne sont pas des produits finis ; ce sont des intermédiaires à la production finale de services écosystémiques. » (Boyd, 2007). Le Tableau 9 présente les 16 fonctions du sol prises en compte dans l'outil Destisol en précisant pour chacune d'entre elles la nature de sa relation avec la couverture du sol.

Tableau 9. Liste de fonctions du sol à considérer dans la démarche d'évaluation de la qualité du sol

Catégorie	Fonction du sol	Influence la couverture du sol	Dépend de la couverture du sol	Code
Fonctionnement interne	Recyclage de la M.O. et des nutriments	Oui	Oui	F1
	Protection contre l'érosion	Oui	Oui	F2
Carbone	Stockage de carbone	Non	Oui	F3
Fertilité	Fertilité physico-chimique (végétation herbacée)	Oui	Oui	F4
	Fertilité physico-chimique (végétation potagère)	Oui	Oui	F5
	Fertilité physico-chimique (végétation arbustive)	Oui	Oui	F6
	Fertilité physico-chimique (végétation arborée)	Oui	Oui	F7
Eau	Circulation et infiltration de l'eau	Oui	Oui	F8
	Rétention de l'eau	Oui	Oui	F9
Contaminations	Niveau de contamination par des polluants	Oui	Non	F10
	Rétention physique des polluants	Non	Non	F11
	Dégradation des CTO	Non	Oui	F12
Activités humaines	Support de voirie légère	Oui	Oui	F13
	Support de voirie lourde	Oui	Oui	F14
	Support de bâtiment en fondations superficielles	Oui	Oui	F15
	Support de réseau divers	Non	Oui	F16










Pour formaliser l'influence que la couverture du sol aura sur la fonction du sol et inversement, c'est-à-dire la dépendance de la couverture du sol à certaines fonctions, nous avons noté les différentes fonctions de la manière suivante :

- FsolC_C : fonction du sol influençant le choix de la couverture du sol, dont elle est également dépendante (*i.e.* oui & oui dans le Tableau 9, *e.g.* recyclage de la M.O. et des nutriments)
- FsolC : fonction du sol influençant le choix de la couverture du sol dont elle est par ailleurs indépendantes (*i.e.* oui & non dans le Tableau 9, *e.g.* niveau de contamination par des polluants)
- FsolC₀ : fonction du sol n'influant pas le choix de la couverture du sol mais dépendant de cette dernière (*i.e.* non & oui dans le Tableau 9, *e.g.* stockage de carbone)
- Fsol : fonction du sol n'influant pas le choix de la couverture du sol, dont elle est également indépendantes (*i.e.* non & non dans le Tableau 9, *e.g.* rétention physique des polluants)

6.2.4. Présentation des couvertures du sol

La composition et le fonctionnement de l'écosystème dépendant fortement de la couverture du sol (arbre, pelouse, bâtiment, revêtement imperméable...), cette dernière doit également être intégrée à la réflexion afin de jouer un rôle de filtre sur certaines fonctions de l'écosystème. Une liste de couvertures de sol a ainsi été établie sur la base de classifications existantes, en concertation avec l'ensemble des partenaires du projet et de manière à répondre aux attentes des aménageurs. Cette dernière s'appuie essentiellement sur le rapport provisoire de « Préconisations pour le référentiel d'observation des sols à grande échelle » élaboré par le CEREMA, mais également Corine Land Cover, IAU et d'autres articles issus de la littérature. La nomenclature retenue pour les occupations du sol est présentée dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Nomenclature des couvertures de sol

Sol scellé (imperméabilisé > 90 %)		Sol semi-scellé (50 % < imperméabilisé < 90 %)		Sol non scellé (imperméabilisé < 50 %)				
Bâti	Voies de circulation	Voies de circulation	Voies de circulation	Non bâti	Non bâti	Non bâti	Non bâti	Non bâti
Sans végétation	Sans végétation	Sans végétation	Pelouse et prairie	Sans végétation	Pelouse et prairie	potager et ornemental	Arbustes	Arbres
								
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9

6.2.5. Présentation de la structure du modèle d'évaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par un Technosol

L'ensemble des paramètres présentés précédemment sont ensuite liés entre eux selon le schéma présenté à la Figure 65. Pour illustrer le fonctionnement de ce modèle, un exemple simple est maintenant présenté. La fonction F9 « Rétention de l'eau » dépend des indicateurs suivants : I2, I6, I7, I9 = « profondeur du sol », « structure », « texture » et « % d'éléments grossiers » qui sont tous issus d'observations au terrain. Un système de notation attribue à chaque valeur d'indicateur (aussi bien quantitatif que qualitatif) une note. La note de la fonction est alors calculée par pondération des notes de chaque indicateur. La fonction « rétention de l'eau » est de type FsolC_i ce qui signifie qu'elle conditionne le fait qu'une couverture de sol soit ou non envisageable sur le sol considéré. En l'occurrence, elle conditionne les couvertures « semi-scellé / voies de circulation / pelouse et prairie », « non scellé / non bâti / pelouse et prairie », « non scellé / non bâti / jardin potager et ornemental », « non scellé / non bâti / arbuste » et « non scellé / non bâti / arbre » (C4, C6, C7, C8 et C9). Ceci exprime le fait que, si le sol n'est pas capable de retenir un minimum d'eau, la végétation ne pourra pas se développer et que les couvertures évoquées précédemment ne seront pas adaptées au sol. Dans l'outil, une note moyenne est calculée par agrégation de différentes fonctions, qui indique pour le sol étudié, si ces couvertures sont envisageables ou non, compte-tenu des caractéristiques du sol. Pour ce qui est de l'exemple retenu, il s'avère que la couverture du sol va modifier le fonctionnement du sol pour ce qui concerne la « rétention de l'eau ». Ainsi, la note obtenue de la fonction va être recalculée pour toutes les couvertures possibles afin d'avoir une note du couple « couverture/fonction ». Dans ce cas précis, les couvertures de type « sol scellé / bâti / sans végétation », « sol scellé / voie de circulation / sans végétation » (C1 et C2) annuleront la note de la fonction. Au contraire, toutes les autres couvertures ne modifieront pas la note de cette fonction (il est à noter que, pour d'autres fonctions, certaines couvertures peuvent diviser ou multiplier la note par 2). Enfin, la fonction « rétention de l'eau » participe, avec d'autres fonctions, à la notation des services : « régulation du climat local », « approvisionnement en aliments », « approvisionnement en ressources ornementales » (S2, S9 et S10/S11/S12).

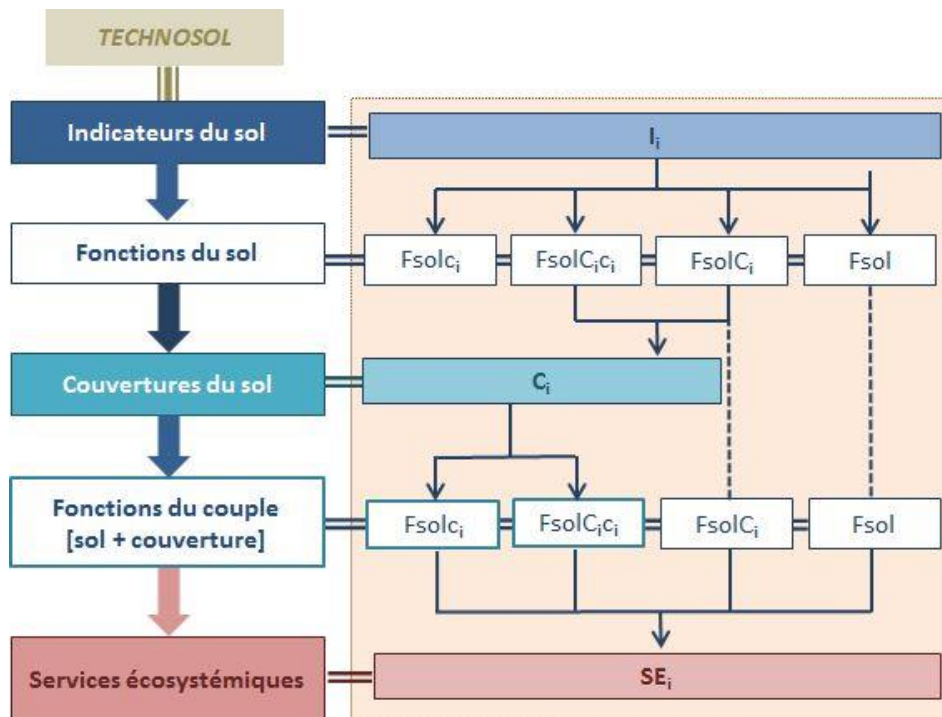


Figure 65. Schéma du modèle d'évaluation semi-quantitative des services écosystémiques rendus par un Technosol

6.3. Evaluation des services écosystémiques rendus par les Technosols

6.3.1. Principe de fonctionnement de l'outil

Considérons un site en milieu urbain qui soit actuellement à l'état de friche et qui fasse l'objet d'un projet d'aménagement (Figure 66). Un projet d'aménagement y est envisagé (projet A).

La première étape de la démarche Destisol est une étude documentaire du site afin de regrouper toutes les ressources existantes (*e.g.* topographie, hydrologie, hydrogéologie, géologie, pédologie, diagnostic pollution) afin de décrire le site et son environnement. Ceci se poursuit par une visite du site qui permettra notamment de décrire l'état et la densité de végétation et de décrire des éléments d'intérêts (*e.g.* présence d'une dalle béton, traces de contamination). A l'issue de cette première étape, un zonage du site est proposé ("Zone 1", "Zone 2", "Zone 3"), chaque zone étant supposée homogène pour ce qui concerne la couverture pédologique.

La seconde étape est la réalisation du diagnostic sur site. Comme évoqué, il se base sur la réalisation d'un nombre suffisant de fosses pédologiques au regard de la superficie de chaque zone, qui pourront être complétées par la réalisation de sondages ponctuels à la tarière. L'ensemble des indicateurs morphologiques doit alors faire l'objet d'une description. En complément, des prélèvements de sols au niveau de chaque horizon/couche identifiée peuvent être réalisées pour mettre en œuvre les indicateurs physico-chimiques, géotechniques et contamination qui sont pertinents au regard de l'aspect des matériaux rencontrés. Il est à noter que cette phase d'investigation de terrain peut conduire à une révision du zonage du site pour refléter la réalité de la diversité des sols rencontrés (comme illustré dans la Figure 66).

La troisième étape se base sur le fonctionnement de l'outil Destisol. Dans un premier temps, l'outil convertit les valeurs d'indicateurs (aussi bien qualitatives que quantitatives) en une note de 0 à 3 pour la couverture pédologique de chacune des zones. Ces notes d'indicateurs sont elles-mêmes agrégées pour déterminer des notes de fonctions du sol potentiellement rendues. Une première sortie de l'outil est alors de déterminer quelles sont les couvertures qui sont compatibles avec l'état actuel des sols de chacune des zones (*e.g.* sur la "Zone 1", en considérant l'état du sol au moment du diagnostic, seules

les couvertures « voie de circulation » et « pelouse » ; au contraire, toutes les couvertures sont possibles sur la "Zone 3"). Ensuite, deux options sont possibles :

- L'outil compare les couvertures du sol du « projet A » avec les couvertures envisageables en l'état. En cas d'incompatibilité, il peut alors présenter à l'utilisateur les propriétés optimales à atteindre pour rétablir les compatibilités. Il resterait à l'aménageur à améliorer le sol de la zone par des travaux de terrassement (*e.g.* apport de terre végétale, chaulage du sol) ou de génie pédologique (*e.g.* construction de sol) afin de rendre possible le « projet A ». Bien entendu, toutes ces opérations imposeraient des travaux supplémentaires et auraient un coût économique, voire environnemental, significatif.
- L'alternative est la proposition par l'outil d'un « projet B » qui serait une révision spatiale du « projet A » (à superficie de couvertures de sol constantes pour conserver les fonctionnalités du projet initial). Le « projet B » modifierait l'emplacement des aménagements pour tirer bénéfice des potentialités actuelles des sols du site. Par exemple, il s'agirait de positionner une zone de jardins potagers sur les terres les plus fertiles, de localiser les bâtiments sur les sols les plus pauvres et de construire un lot de parkings sur des zones présentant une contamination résiduelle.

La dernière étape est la semi-quantification des services écosystémiques rendus : par l'état actuel du site, le « projet A » et le « projet B ». Il est attendu que, de par le processus d'optimisation de l'allocation des usages aux sols qui sont adaptés, le niveau de services écosystémiques soit plus élevé pour le « projet B ». Il est à noter que cette dernière étape peut également être l'occasion de modifier les principes du projet initial pour répondre à des enjeux locaux forts comme la régulation d'inondations, l'habitat pour la biodiversité ou la régulation du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

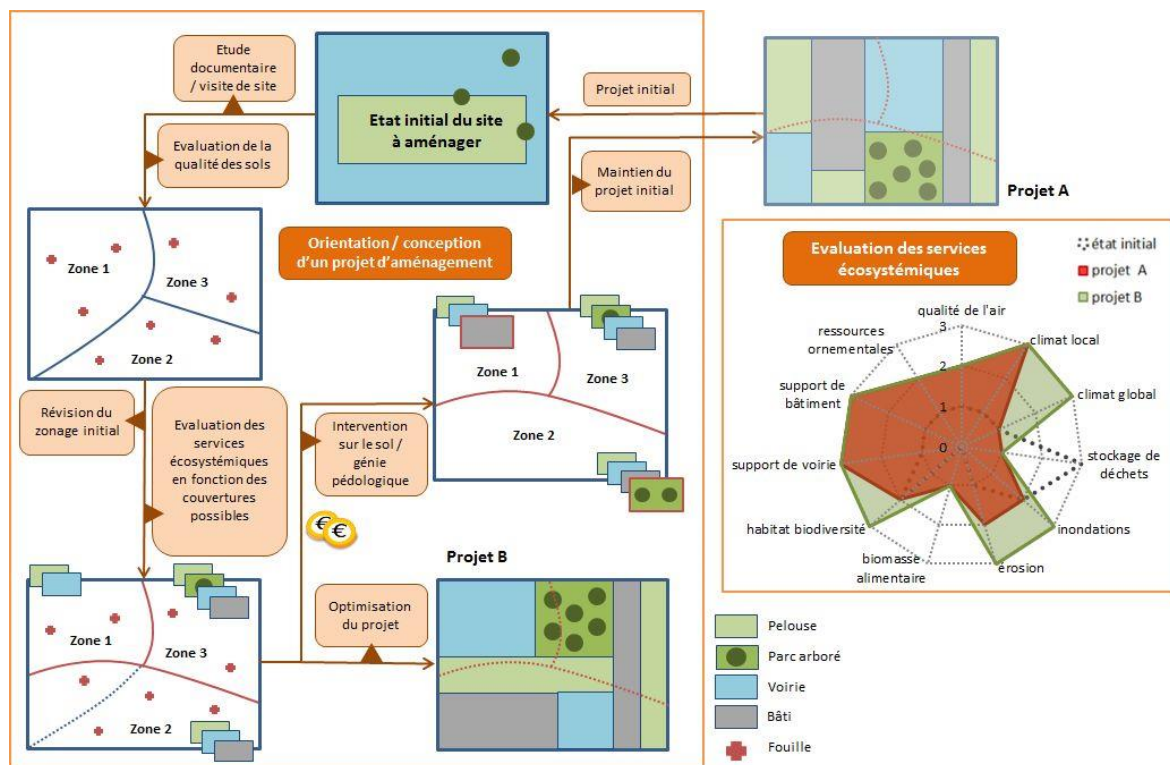


Figure 66. Exemple de fonctionnement de l'outil Destisol appliqué à un projet d'aménagement d'une friche urbaine

6.3.2. Limites et pistes d'amélioration de l'outil

Le retour d'expériences sur les sites d'étude du projet Destisol permet d'envisager différentes pistes de développement futur de la démarche. Certaines de ces pistes d'amélioration de l'outil restent complexes.

Néanmoins, la plupart relève de simples développements de l'ordre de quelques mois avant de pouvoir proposer une version opérationnelle de l'outil d'aide à la décision.

Le premier aspect est essentiel, puisqu'il traite de la représentativité des valeurs d'indicateurs évalués et mesurés à partir des investigations de terrain. Un équilibre complexe est à trouver entre le temps nécessaire à consacrer à ce diagnostic sur site pour décrire son hétérogénéité, tout en passant un temps raisonnable sur le terrain afin que cette prestation soit économiquement supportable par un Maître d'Ouvrage. Sur cette question, les réponses sont variables : dans le cas du site des Mureaux, les investigations réalisées ont très probablement permis de décrire l'essentiel de la variabilité des sols du site, alors que ceux du site de Lannion, beaucoup plus hétérogènes et partiellement inaccessibles du fait de la présence de bâtiments, n'ont pas forcément été décrits de manière exhaustive. La similitude avec un diagnostic de pollution apparaît ainsi clairement ce qui découle de la complexité inhérente aux sites étudiés. Un développement complémentaire facilement envisageable serait la prise en compte des variations, mineures mais significatives, entre profils de sol d'une même zone au sein de l'outil, en lieu et place de la sélection d'un profil « modèle » comme effectué actuellement.

Le second aspect est lié au fonctionnement de l'outil à proprement parler. En effet, si le travail réalisé a permis de mettre au point une structure de saisie d'indicateurs et de calcul des différentes valeurs de fonctions, de couvertures et de services écosystémiques, un développement complémentaire serait d'améliorer sa paramétrisation. Un choix optimisé des paramètres des systèmes de notation des indicateurs est indispensable. Cette tâche nécessiterait de tester l'outil sur un plus grand nombre de sites présentant des situations contrastées (*i.e.* couvertures, types de sols) pour pouvoir caler les résultats des différents modules par rapport à des mesures et observations *in situ* (*e.g.* capacité d'infiltration en eau, développement d'une végétation).

Des éléments surprenants ressortent aussi de cette première phase de test, puisque dans certains cas l'outil juge que certaines couvertures de sol sont incompatibles avec la qualité d'un sol en place (*e.g.* pelouse), alors que le sol est actuellement végétalisé. Après avoir dépassé notre propre phase d'étonnement, nous en avons déduit deux choses : 1) comme évoqué précédemment, la paramétrisation de l'outil peut être améliorée, 2) compte-tenu du fort niveau d'attente des aménageurs par rapport au succès de l'implantation d'une couverture de sol, l'outil a probablement en partie raison. En effet, lorsqu'un aménageur prévoit dans son projet l'implantation d'un espace végétalisé en pelouse sur une zone d'un site, il s'agit bien d'un couvert d'herbacées homogène et dans un bon état de végétation. Or l'état de la végétation en place est bien loin de tels objectifs. Il s'avèrerait donc nécessaire, a minima, de créer un nouveau type de couverture de sol correspondant à celui de « végétation en friche » par exemple.

Par ailleurs, les niveaux de contamination n'ont pas pu être pris en compte dans cette première version comme en témoigne le fait que certains usages sensibles aient été jugés possibles sur des zones multi-contaminées. Ceci s'explique par la complexité d'intégrer une information aussi complexe à interpréter que les concentrations en polluants. En effet, à l'heure actuelle l'outil compare les concentrations mesurées au fond géochimique et prend en compte les facteurs susceptibles de contrôler le transfert de ces pollutions (*e.g.* pH, texture, couverture du sol). Dans une certaine mesure, ceci peut permettre d'évaluer la fonction de filtre du sol. Par contre, selon la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, la détermination des concentrations compatibles avec un usage donné est complexe et nécessite de prendre en compte la spécificité de chaque scénario. Ceci est actuellement impossible dans la version de l'outil. La piste d'amélioration est bien entendu de trouver une manière de faire communiquer entre eux les résultats du diagnostic pollution et celui, plus général, du diagnostic de qualité des sols.

Enfin, le dernier aspect repose sur une compatibilité imparfaite entre les typologies de l'outil, notamment de couvertures de sol, et la conception du projet d'aménagement. Il s'avère en effet, dans le cas du projet actuellement envisagé aux Mureaux, qu'il est difficile de faire correspondre, en l'état actuel, la typologie d'aménagement du plan masse du projet avec la typologie de couverture de Destisol.

6.4. Conclusion intermédiaire

L'approche présentée ici est celle d'un diagnostic de qualité et de potentialités des sols d'un site à réhabiliter. Elle propose également d'aller jusqu'à l'évaluation semi-quantitative des services écosystémiques potentiellement rendus par un site réaménager. Elle se fait en quatre temps : i) étude documentaire ii) diagnostic de terrain, iii) interprétation des résultats, iv) utilisation de l'outil. Ceci est, dans une large mesure, tout à fait similaire aux diagnostics de contamination et évaluation des propriétés géomécaniques qui sont usuellement conduits sur des sites de friche. Plus en détail, pour chacun des deux sites, nous avons passé en moyenne 2 à 3 jours de recherche documentaire en bureau pour un ingénieur projet et 2 jours de terrain pour un ingénieur projet et un technicien. Les moyens matériels étaient assez simples : pelle mécanique et matériel de prélèvement manuel. En complément des analyses bio-physico-chimiques sur des échantillons prélevés ont été effectuées. Tous ces éléments sont comparables, voire légèrement inférieur aux moyens nécessaires pour conduire un diagnostic de pollution. Notre approche est donc non seulement réaliste d'un point de vue logistique, mais aussi équivalente, d'un point de vue financier, à des démarches déjà mises en œuvre aujourd'hui sur ces sites. Néanmoins, il reste à optimiser le dimensionnement de cette opération pour définir le niveau d'approfondissement approprié aux objectifs.

Plus généralement, il nous semble que le type d'informations apportées par l'outil Destisol est extrêmement intéressant et prometteur. Ces données sont non seulement complémentaires de celles habituellement mesurées (pollution, propriétés géomécaniques) sur ces sites, mais surtout une telle démarche peut permettre d'intégrer celles-ci pour proposer une vision globale du site en termes de potentialités. L'une des fonctionnalités attendues de l'outil est bien d'optimiser l'aménagement d'un site en fonction de son état actuel, en minimisant les interventions (*e.g.* excavation, dépollution, apport de terre végétale). Cette vision pragmatique est tout à fait dans l'esprit des documents d'orientation du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire sur la gestion des sites et sols pollués (MEEM, 2017). Il s'agit bien en effet de maîtriser les enjeux sanitaires et d'améliorer la qualité des milieux sans mettre en œuvre des moyens démesurés au service d'objectifs irréalistes aussi bien techniquement que financièrement. De manière plus concrète et toujours en parlant de gestion de pollution, le Ministère écrit « .../... l'implantation des bâtiments et des équipements peut ainsi tenir compte de l'état des sols et de la nature des pollutions, de sorte que les secteurs peu ou pas pollués peuvent être réservés aux aménagements les plus sensibles ». Il est même indiqué « En effet, l'objectif est bien d'atteindre le meilleur niveau de protection de l'Homme et de la Nature, de garantir la validité sanitaire des processus de gestion, en évitant de mobiliser des ressources disproportionnées au regard des enjeux à protéger ». Le parallèle avec la question des sols, en tant que ressources fonctionnelles, semble alors tout à fait pertinent. Pour aller plus loin, je suggère que la démarche de bilan coût-avantage qui est aujourd'hui encadrée par la réglementation pour la gestion de la pollution soit, à terme, transposée à la question de la gestion des sols et à leur aménagement ! En effet, il semble clair que le Ministère souhaite encourager la prise en compte du bilan environnemental de l'ensemble des opérations conduisant à l'aménagement de sites (pollués).

Le premier retour que nous avons eu en présentant notre travail aux élus de Lannion fait ressortir d'autres éléments prometteurs. En effet, cette approche peut dépasser la simple optimisation des usages programmés sur un site à aménager. En mettant en avant le concept de services écosystémiques qui consiste bien à tirer des bénéfices du fonctionnement des écosystèmes plutôt que de « se reposer » uniquement sur des infrastructures mises en place par l'Homme, un tel diagnostic peut contribuer à un mode d'aménagement plus durable et tirant mieux profit de chaque surface de territoire. Au-delà, en mettant en lumière certains services mal connus (*e.g.* régulation du climat local, habitat pour la biodiversité ordinaire), cette démarche peut alors permettre d'amender le programme d'aménagement en réservant certaines zones à des espaces végétalisés.

Publication(s)

Blanchart A., Séré G., Stas M., Consales J.N., Morel J.L., Schwartz C., 2018, Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils, Landscape and Urban Planning, 176, p 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>

Blanchart A., Séré G., Cherel J., Stas M., Consalès J.N., Warot G., Schwartz C., 2017, Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain – une revue, Environnement Urbain / Urban Environment, 11, <http://eue.revues.org/1809>

Ding K., Wu Q.; Wei H., Yang W., Séré G., Wang S., Echevarria G., Tang Y., Tao J., Morel J.L., Qiu R., 2016, Ecosystem services provided by heavy metals contaminated soils in China, Journal of Soils and Sediments, doi:10.1007/s11368-016-1547-6

Ouvrage(s) et Chapitre(s) d'ouvrage(s)

Morel J.L., Lorenz K., Chenu C., Séré G., 2017, Urban soils are primary providers of ecosystem services, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p

DESTISOL, 2018, Les sols, une opportunité pour un aménagement durable - Guide méthodologique, CEREMA Editions, 51p (en cours d'édition)

Rapport(s) & Mémoire(s) de stage(s)

Fourvel G., 2013, Etude des propriétés des sols urbains d'espaces verts : l'exemple de la Communauté Urbaine de Strasbourg, Mémoire de fin d'étude ingénieur ENSAIA, 67p

7. Comment optimiser les services écosystémiques rendus par les Technosols ?

7.1. En développant l'ingénierie pédologique

Nos travaux ont contribué à faire émerger un cadre méthodologique solide sur des pratiques, déjà anciennes et largement empiriques, d'utilisation de déchets et sous-produits pour requalifier des sites dégradés. Ainsi, notre principale contribution ne réside pas dans le fait d'avoir eu l'idée d'utiliser des artéfacts pour réhabiliter des sols marqués par les activités anthropiques car de nombreuses expériences de ce type avaient déjà été menées. Nos recherches ont permis de formaliser un certain nombre d'outils permettant de mieux encadrer ces approches. Au-delà, elles visent à faire émerger tout le potentiel qui existe dans le génie pédologique. Il me semble que la construction de sol ne vise pas seulement à valoriser des déchets et sous-produits dont les filières de recyclage sont saturées ou insuffisantes. Au contraire, l'ambition première est bien de créer des sols multifonctionnels qui soient particulièrement adaptés à l'usage qui est attendu. C'est, selon moi, l'intérêt de ces recherches parce que ces questions concernent tous les sols des milieux anthropisés et font écho à ce que j'évoquais en introduction : il y a une certaine logique à intensifier les interventions sur les sols déjà dégradés par l'anthropisation.

7.1.1. *Quels apports de la physique des sols dans le développement de l'ingénierie pédologique*

La fertilité physique apparaît comme un paramètre critique à tous les niveaux : formulation, fonctionnement et évolution des sols construits, en particulier dans les premiers temps suivants leur mise en place.

Pour l'étape de formulation, comme j'ai eu l'occasion de l'évoquer précédemment et en complément de travaux déjà réalisés (Rokia, 2014 ; Rokia *et al.*, 2014), il apparaît important de poursuivre la compréhension de l'influence des processus anthropiques (choix et mode de mélanges des matériaux) sur la structure de mélanges de matériaux en construction de sol. Il a ainsi pu être démontré que la nature des matériaux parents jouait un rôle essentiel sur la stabilité des agrégats (Rokia, 2014). Cependant, les processus d'agrégation induits par l'action et le mode de mélange de plusieurs matériaux et les conséquences sur des propriétés comme la capacité de rétention en eau, la masse volumique apparente et plus globalement l'architecture porale restent encore largement méconnues. **Je crois alors que de nouvelles expérimentations en laboratoire doivent être mises en œuvre afin d'appréhender l'impact du mélange sur les propriétés physiques, ce qui peut également permettre de mieux simuler ces paramètres.** C'est notre intention dans le cadre de deux projets : l'un avec la société Valterra Dépollution Réhabilitation et l'autre dans le cadre d'une collaboration avec Christina Siebe du Département d'Edaphologie de l'Université Nationale Autonome de Mexico. A titre d'exemple, nous débutons actuellement des phases de test pour faire mûrir les mélanges avant leur utilisation. Nous testons ainsi l'effet d'une pré-végétalisation en andain ou encore l'impact de l'inoculation de lombricides sur la stabilité structurale des associations organo-minérales.

Au terrain, afin d'acquérir des données complémentaires, nous avons notamment initié un suivi de l'état de surface des sols dans le cadre du projet Lorver. Celui-ci se base sur des approches développées sur sols agricoles (notamment Tongway & Hindley, 2004). Toujours sur ce dispositif expérimental, nous avons initié un suivi à une fréquence mensuelle (puis trimestrielle) de la masse volumique apparente de l'horizon de surface, dont il était apparu qu'elle évoluait significativement. De manière systématique, nous réalisons annuellement des fosses pédologiques pour mesurer la masse volumique apparente, la capacité de rétention en eau, le potentiel redox et décrire la structure des différents horizons. **Il me semble nécessaire, pour acquérir un certain recul sur les différentes déclinaisons de sols construits, de passer par une phase systématique de suivi et de mesure de plusieurs dispositifs afin d'acquérir des données, dans différentes situations, pour dégager les principaux types évolutifs.** C'est un travail collaboratif que j'entends mener avec mes collègues du LSE Françoise Watteau et Frédéric Darboux. J'aimerais également poursuivre et amplifier les

collaborations avec les chercheurs de l'Institut d'Ecologie de L'Université Technique de Berlin (Dr. Thomas Nehls, Pr. Martin Kaupenjohann).

7.1.2. Vers un outil d'aide à la décision pour la construction de sol

Dans la section 3 de ce Mémoire, j'ai eu l'occasion de présenter les phases conduisant à la conception d'un sol construit. Nous avons récemment formalisé cette démarche dans le cadre d'un projet de R&D (Gisfitech pour ArcelorMittal) et dans le dossier de dépôt d'une Action COST sur la construction de sol impliquant 50 chercheurs et 41 structures de différents pays (OC-2017-1-22397) (Figure 67).

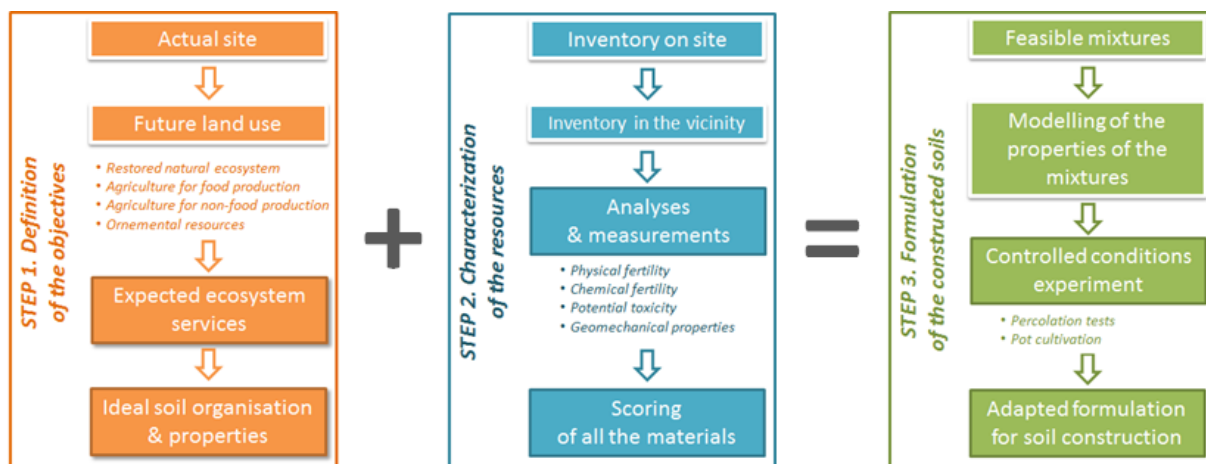


Figure 67. Principales étapes de la démarche de construction de sol en vue de réhabiliter ou d'aménager un site dégradé

Néanmoins, il y a un besoin réel d'aller plus loin en développant des outils et des modèles permettant : i) de gérer la complexité de certaines opérations (*e.g.* disponibilité et éloignement des gisements, coûts de mise en œuvre et d'approvisionnement) ; ii) de simuler de manière réaliste les propriétés des mélanges de matériaux ; iii) de prendre en compte l'évolution des mélanges au cours de la pédogenèse et l'influence qu'elle a sur les fonctionnalités des sols. Dans le cadre du projet SITERRE, une version bêta d'un tel OAD a été développé qui remplit très correctement la première fonctionnalité et présente une structure performante pour la seconde, même si les modèles de prédiction sont perfectibles. Pour ces deux aspects, il s'agirait essentiellement : i) d'un travail expérimental en laboratoire complémentaire afin d'appréhender les propriétés de mélange de matériaux technogéniques ; ii) d'une étape de programmation d'un outil informatique. **Je souhaite donc contribuer au montage d'un projet complémentaire à SITERRE afin de finaliser ce développement en vue d'aboutir à un OAD fonctionnel.** Le troisième objectif est beaucoup plus ambitieux. Il est néanmoins crucial car nos travaux ont démontré que les Technosols construits étaient soumis à une pédogenèse précoce qui peut être intense dans les premiers temps suivant leur mise en œuvre. Ainsi, un mélange fonctionnel au moment de la construction du sol pourrait, en fonction de sa composition, de son mode de mise en œuvre et de son usage, voir ses fonctionnalités décroître de manière significative dans les mois suivants. Pour répondre à cette question, **il apparaît nécessaire de mettre en place un réseau d'expérimentations et de suivi de sols construits en conditions réelles. Il s'agirait alors d'associer monitoring des paramètres du sol et suivi des fonctionnalités, voire des services écosystémiques rendus.** Une partie du groupement SITERRE, dont nous faisons partie, aimerait également contribuer à l'émergence d'un tel réseau de suivi et j'y contribuerai dans un avenir proche.

7.1.3. Pistes de développement du génie pédologique

Comme ceci a été illustré dans les résultats présentés ici, le procédé de construction de sol pour la réhabilitation de sites dégradés et pour la végétalisation urbaine a démontré son intérêt dans différentes situations (tout en n'omettant pas les challenges technologiques qui restent à relever). D'autres contextes sont en émergence qui génèrent, à leur tour, de nouveaux questionnements scientifiques car

ils présentent d'autres types de contraintes. J'évoque ici certaines de ces pistes dont il apparaît clairement qu'elles nécessitent un large panel de compétences et devront bien sûr faire l'objet de collaborations auxquelles j'entends seulement contribuer en apportant une expertise ponctuelle.

La question de la pertinence de l'utilisation du génie pédologique pour réhabiliter des sites miniers se pose ainsi de manière aiguë. Dans ces cas, outre les problèmes de fertilité physico-chimique très faible, les risques de transferts de polluants résiduels dans l'environnement et dans la chaîne alimentaire s'avèrent prégnants. Nous avons commencé à y travailler en cherchant en premier lieu à **limiter la mobilité des éléments traces métalliques**. C'est le cas du projet de post-doc de Celestino Quintelas sur une mine de nickel en Malaisie auquel j'ai été associé. C'est aussi la question qui se pose dans le doctorat de Meina Guo dont je vais co-diriger la thèse (co-tutelle LIA Ecoland) à partir de 2018. La thèse porte sur la requalification de zones de dépôts de stériles miniers de Terres Rares et les solutions à mettre en œuvre pour favoriser leur revégétalisation afin de limiter les transferts par érosion. Dans un second temps, il peut être envisagé de mettre en œuvre des solutions de phytoextraction. La construction de sol peut alors constituer un moyen, non seulement d'améliorer le développement des plantes hyperaccumulatrices, mais aussi de **contrôler la phytodisponibilité des éléments d'intérêts lors de la mise en œuvre de l'agromine**. Une dernière caractéristique de ces projets est qu'ils se déroulent dans des secteurs faiblement urbanisés et qui sont, par conséquent, très faiblement pourvus en déchets et sous-produits – ressource indispensable à la construction de sol -. Il s'agit alors d'intégrer aux recettes des sous-produits miniers et agricoles locaux dont les propriétés diffèrent des matériaux que nous avons eu l'occasion d'étudier. Ces aspects sont traités de manière prioritaire au LSE par mes collègues Guillaume Echevarria, Thibault Sterckeman et Catherine Sirguy.

Un autre axe de développement du génie pédologique est son utilisation pour la **production agricole**. Répondant au double enjeu de la raréfaction des superficies agricoles et de la nécessité de valoriser les sous-produits de l'activité humaine, la construction de sol apparaît comme l'une des solutions pertinentes pour l'agriculture urbaine. Nous avons entamé cette approche dans le cadre du projet Agrotechnosol qui a permis de démontrer la capacité de sols construits et de substrats de toitures végétalisées à assurer le développement de plantes potagères, en garantissant l'absence de risque sanitaire. Cette démarche est actuellement en train de diffuser, comme en témoigne par exemple la thèse de Baptiste Grard réalisée à Ecosys (UMR 1402 AgroParisTech/INRA) pour laquelle je participais au comité de pilotage : « Des Technosols construits à partir de produits résiduels urbains : services écosystémiques fournis et évolution ». Au-delà du recyclage de sous-produits des activités humaines, la pertinence (ainsi que la curiosité et l'attrait qu'ils peuvent générer dans notre communauté scientifique) du génie pédologique repose, selon moi, à la fois sur la détermination des propriétés idéales d'un sol et sur la maîtrise des procédés pour s'en approcher le plus possible. **La construction d'un sol artificiel ouvre ainsi des perspectives nouvelles qui imposent néanmoins d'adapter les connaissances, en particulier agronomiques. Comme cela a été décrit ici, la réflexion sur la formulation de matériaux nécessite l'acquisition de nouveaux savoirs sur le fonctionnement des sols pour pouvoir appréhender ces systèmes fortement réactifs que sont les Technosols construits**. Ceci constitue une partie des objectifs scientifiques de l'un des 3 nouveaux axes scientifiques du LSE pour le prochain projet quinquennal débutant en 2018 auquel je participerai. Ces travaux seront menés en interaction avec mes collègues du LSE Christophe Schwartz, Pierre Légilize et Catherine Sirguy.

7.2. En poursuivant les recherches sur le fonctionnement et la pédogenèse des Technosols

7.2.1. Dynamique et séquestration du carbone

Comme nous l'avons initié dans le cadre du post-doc de Robin Dagois, il serait prometteur d'**adapter des approches analytiques permettant de suivre l'évolution des différents pools de matières organiques des Technosols au cours du temps**. Le fractionnement physico-chimique basé sur la

méthode Zimmermann *et al.* (2007) ou les mesures en spectroscopie proche infra-rouge constituent alors des approches pertinentes pour suivre la cinétique d'évolution de la fraction organique au cours de la pédogenèse précoce.

Il y a par conséquent un travail très significatif et nécessaire de re-paramétrisation du modèle. De notre point de vue ceci passe tout d'abord par un développement méthodologique afin de pouvoir quantifier de manière fiable (et le plus simple possible) les différents pools de carbone organique. Ceci impose en particulier d'adapter les protocoles existants (développés sur sols naturels) aux spécificités des matériaux parents constitutifs des Technosols. Au vu des résultats déjà obtenus, il semble également pertinent de concentrer une partie de notre énergie sur la cinétique d'évolution des stocks dans les tous premiers temps suivants la mise en place du sol construit. Ceci a été engagé dans le cadre des projets Lorver (2012-2018) et PSDR Astral (2016-2020). Une autre question qui est, dans une large mesure, propre aux Technosols est celui de la dynamique des matières organiques présentes dans les horizons profonds des sols construits, dans des conditions bio-physico-chimiques très spécifiques. Enfin, une autre perspective de travail est d'**intégrer les modules RothC dans une plate-forme de modélisation plus large permettant de faire varier les autres paramètres du sol**, comme la masse volumique apparente ou le stock d'azote. Ceci pourrait être fait **dans le cadre de Sol Virtuel** (plateforme de modélisation développée par l'INRA). Ces dernières questions constituent les différents volets d'une thèse intitulée « Contribution des Technosols à l'atténuation du changement climatique : évaluation et optimisation de la séquestration du carbone » qui serait encadrée par ma collègue du LSE Stéphanie Ouvrard et moi-même et pour laquelle nous avons bonne chance d'obtenir des financements. Plusieurs collaborations sont déjà envisagées dans le cadre de cette thèse avec le LIEC (UMR 7360 Université de Lorraine / CNRS), l'Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers (UR 1138 INRA) et l'équipe de développement de SolVirtuel de l'INRA.

7.2.2. Modélisation du transport réactif

La modélisation du transport réactif dans ces milieux complexes que sont les Technosols me semble un volet absolument essentiel, considérant l'impact qu'ils peuvent avoir, du fait de leur composition, sur les autres compartiments, en particulier les nappes souterraines. C'est ce que nous avons débuté sur la question de l'impact environnemental de stériles miniers issus de l'exploitation de Terres Rares. Ce projet, mené dans le cadre du LabEx Ressources 21 et du Laboratoire International Associé (LIA) Ecoland se traduit actuellement par le post-doc de Noémie Janot. Il est coordonné par ma collègue Sophie Leguédois et moi-même au LSE et se fait en collaboration avec Bert-Jan Groenenberg du LIEC (UMR 7360 Université de Lorraine/CNRS) et de l'Université de Wageningen, ainsi qu'Hermine Huot et Yetao Tang du LEPCRT (Université Sun Yat-Sen de Canton). Il croise la **mise en œuvre d'expérimentations en conditions contrôlées et au terrain, avec la modélisation géochimique des transferts de Terres Rares et d'éléments modèles** (Al, Fe).

7.2.3. Diversification de la biomasse produite

A ce sujet, il nous apparaît désormais que nos efforts doivent se porter sur la **production de biomasse valorisable sur Technosols construits**. Dans le cadre du projet AgroTechnosol, nous avons eu l'occasion de tester avec succès la production de légumes sur Technosol 2 (Figure 68). Ces résultats sont encore en cours d'interprétation, car il reste encore à évaluer les risques sanitaires qui pourraient ou non être associés à leur consommation. Ceci sera fait en mettant en œuvre une démarche d'Évaluation Quantitative de Risques Sanitaires.



Figure 68. Mise en œuvre et résultat d'une expérimentation in situ de cultures de légumes sur Technosol 2 (projet AgroTechnosol)

Pour le projet LORVER, nous avons implanté en 2017 des cultures de chanvre et d'ortie destinées à des filières textiles industriels et d'espèces ligneuses pour la production d'énergie. Les résultats de la première récolte indiquent des rendements très variables spatialement qui sont, en moyenne, inférieurs à ceux obtenus sur parcelle agricole, mais peuvent, en certains points de la parcelle les atteindre. En complément, de premiers essais en conditions contrôlées (chambre de culture + fertilisation minérale) auxquels nous avons contribué dans le cadre de la thèse de Thibaud Sauvageon (LERMAB, EA 4370 INRA/Université de Lorraine) sont prometteurs. En effet, aucune différence significative n'a été noté entre le Technosol construit LORVER et un sol agricole témoin : ni sur le rendement (biomasse sèche), ni sur les paramètres physiologiques (*i.e.* surface foliaire, répartition massique des différents organiques) ou sur les propriétés de la fibre de chanvre. Enfin, dans le cadre du projet Astral PSDR, nous avons semé sur 0,5 ha de la parcelle Biotechnosol un mélange prairial analogue à celui implanté sur les prairies extensives lorraines. Nous ambitionnons ainsi de **comparer les résultats obtenus avec ceux de systèmes analogues et de caractériser le potentiel de valorisation de cette biomasse en fourrage**. Ces travaux seront conduits notamment avec mes collègues Christophe Schwartz et Sonia Heny.

7.2.4. Colonisation biologique

De nombreuses questions demeurent sur les facteurs, la cinétique et les mécanismes de colonisation des Technosols. Ainsi les influences respectives de l'environnement du site et de la dynamique temporelle par rapport aux propriétés intrinsèques du Technosol construit restent à élucider (thèse de Quentin Vincent soutenue en mars 2018). Le rôle de la faune du sol sur les propriétés bio-physico-chimiques de ces systèmes fortement anthropisés est évidemment crucial. Enfin, les influences de l'usage et de la gestion des Technosols construits sont très probablement primordiales. C'est en bonne partie l'objet du projet Astral PSDR qui visent à tester **l'influence de pratiques agricoles sur les cortèges biologiques de Technosols**, aussi bien pour la méso et la macrofaune du sol (contribution de ma collègue Apolline Auclerc du LSE) que pour les microorganismes et la végétation (collaboration A. Michelot-Antalik, S. Piutti et S. Slezack du LAE, UMR 1121 Université de Lorraine/INRA).

7.2.5. Pédogenèse

Je vais être associé dans l'année à venir à trois thèses en lien avec l'étude des processus pédogénétiques des Technosols : la première sur l'impact du vieillissement de toitures végétalisées sur les performances hydriques et thermiques (collaboration avec R. Clavier, J. Bouyer et R. Suaire du Laboratoire régional de Nancy, CEREMA), la seconde qui a déjà été évoquée sur la réhabilitation de stériles miniers issus de l'exploitation de Terres rares (collaboration, dans le cadre du LIA Ecoland, avec le LEPCRT de Canton en Chine) et celle traitant de l'étude de la dynamique des matières organiques dans des Technosols (collaboration avec Stéphanie Ouvrard du LSE). J'entends alors développer l'approche intégrée évoquée

dans la section 5.7.2. Elle se base, à mon sens, par des études à plusieurs échelles, l'expérimentation en conditions réelles se trouvant au centre du dispositif, en formalisant de manière très claire les objectifs visés. Ainsi, afin de **reconstituer la chronique de l'évolution pédogénétique**, il apparaît que les tout premiers stades restent mal connus. Des expérimentations en laboratoire, en conditions contrôlées sont alors indispensables qui doivent être confrontées à une stratégie de prélèvements *in situ* très fréquents (mensuels, voire hebdomadaires). En parallèle, une démarche de caractérisation avancée (pour l'acquisition des paramètres d'entrée) couplée à **la modélisation doit permettre** de simuler le comportement des Technosols sur des pas de temps de l'ordre de plusieurs mois afin **d'identifier les phases critiques de changement et de pouvoir y focaliser notre attention par un monitoring de plus grande intensité sur le terrain.**

7.2.6. Mise en place d'observatoires à long terme

Afin de contribuer à éclairer la connaissance de la pédogenèse des Technosols, il est indispensable d'acquérir des données sur le long terme. Pour cela, l'étude des systèmes Techosol – plantes – organismes, en intégrant l'Homme et ses actions positives ou négatives, intentionnelles ou non (y compris l'impact des superpositions d'usages) me semble devoir constituer une priorité des prochaines années. **Il y a ainsi un besoin de développer des observatoires sur le long terme des sols très anthropisés, dans leur contexte urbain ou industriel, afin d'étudier leur fonctionnement et l'évolution de leurs propriétés, en réponse aux variations de leur environnement.** L'évolution des capacités de calcul et de traitement d'un grand nombre de données, ainsi que les développements de l'intelligence artificielle, permettent d'imaginer que les capacités de gestion et d'analyse de très grands nombres de données sera envisageable dans les années à venir. C'est l'une des directions principales que prend actuellement le GISFI qui met en avant ses missions d'observatoire de long terme des sites fortement anthropisés. J'y contribue par ma participation au Comité de Pilotage de la station d'Homécourt. A travers nos nombreux échanges avec nos collègues du LIA Ecoland, nous initions également ces démarches.

7.3. En faisant émerger l'agro-urbanisme

Les projets auxquels nous sommes associés et qui ont été évoqués dans ce manuscrit ne constituent qu'une partie des recherches en cours dans ce domaine qui apparaît en pleine expansion avec la multiplication des initiatives sur ce thème. C'est heureux car les challenges auxquels il faudra faire face sont nombreux ! Je tente ici de formaliser les sujets d'importance auxquels je pourrai contribuer, au sein de consortiums nationaux voire internationaux.

7.3.1. Une exigence pour la construction de villes durables et résilientes

L'évaluation et **la prise en compte des services écosystémiques rendus par les Technosols peut permettre de mieux valoriser cette ressource « sol-matériau »**. Le développement des connaissances sur leur fonctionnement et sur leurs potentialités s'impose pour conduire l'optimisation de leur gestion et les usages qui sont fait de ces sols urbains, non seulement dans l'espace du territoire urbain en cherchant à tirer profit de toutes les surfaces disponibles, mais aussi dans la durée.

A l'échelle du site et donc au moment de la conception du projet d'aménagement, il a déjà été décrit ici comment une approche d'**optimisation de l'allocation des usages aux sols** qui ont le potentiel d'assurer ces fonctions permettrait d'**augmenter les services écosystémiques rendus**. Sur la question de la temporalité, à titre d'exemple, il est bien connu que le temps du projet d'aménagement est long, en particulier avant de débiter les travaux à proprement parler (de 5 à 10 ans). Il semblerait alors pertinent de réfléchir à une manière de tirer parti des surfaces disponibles pendant le temps où elles sont « vacantes ». **Je crois alors que l'on pourrait envisager des interventions de gestion / amélioration des sols ponctuelles et limitées d'un point de vue technique et financier pour augmenter, de manière temporaire, pour quelques années, les services écosystémiques rendus par ces sites en cours d'aménagement.** A titre d'exemple, dans le cadre de la thèse d'Anne Blanchart, nous avons eu l'occasion de diagnostiquer, en novembre 2017, les sols d'une zone destinée

à accueillir des jardins partagés. A l'heure actuelle, un bois est présent sur le site. Il semblerait pertinent, alors que les jardins ne seront ouverts au public que dans un an, de mettre en œuvre des pratiques culturelles simples : broyer la ressource en bois non valorisable pour réaliser un mulch à incorporer au sol afin d'augmenter sa teneur en matières organiques ; cultiver des légumineuses pour augmenter la concentration en azote et améliorer ainsi sa fertilité. Il s'agit ici d'intégrer le savoir-faire agronomique dans l'aménagement des villes.

Plus globalement, il semble aujourd'hui indispensable de prendre en compte la qualité des sols au sens large, en dépassant les pratiques actuelles qui ne s'intéressent qu'aux niveaux de contamination et aux propriétés géomécaniques. Les sols naturels étant une ressource non renouvelable, nous devons désormais apprendre à valoriser et à optimiser les usages de la couverture pédologique y compris celle qui a été dégradée par les activités humaines pour pouvoir, malgré tout, construire des villes durables et résilientes.

C'est le sens des travaux que nous avons initiés avec mes collègues Christophe Schwartz et Jean-Noël Consalès.

7.3.2. Des avancées sur la classification des sols très anthropisés

Une des questions essentielles à aborder est celle de la prise en compte de l'hétérogénéité et de la diversité des Technosols. Dans Destisol et actuellement dans la thèse d'Anne Blanchart, nous avons fait le choix – assez radical - de décrire, de manière systématique, l'état des sols rencontrés (tout en essayant de définir des zones homogènes au sein des sites étudiés). Ce choix va à l'encontre de l'esprit du pédologue qui, fréquemment, cherche à rattacher le sol en face de lui à une typologie ou une classification existante (voire établie pour l'occasion) afin de l'appréhender plus facilement. Nous avons déjà évoqué dans l'état de l'art l'incapacité actuelle des classifications à décrire de manière satisfaisante le fonctionnement et l'évolution des Technosols et Anthrosols. A titre d'exemple, lorsqu'un pédologue ou un agronome doit raisonner l'itinéraire technique à mettre en œuvre sur une parcelle dont il sait que le sol est un Luvisol, il sait immédiatement quelles sont les forces et les faiblesses dont il va pouvoir bénéficier ou qu'il lui faudra corriger. **C'est, à mon sens, dans cette direction qu'il faudrait envisager des améliorations de la classification des sols très anthropisés : fournir aux utilisateurs des clés sur leurs potentialités et leurs modes de gestion.** Cette question nécessite bien évidemment la mobilisation de toute la communauté SUITMA.

7.3.3. Etablir une métrique transdisciplinaire d'évaluation des services écosystémiques

L'évaluation des services écosystémiques rendus par les sols très anthropisés (ceci concerne d'ailleurs tous les sols !) est un nœud gordien du développement de l'agro-urbanisme. En l'occurrence, l'une des difficultés principales me semble être l'établissement d'une métrique des services écosystémiques. Je perçois une réelle hétérogénéité d'avancée sur cette question de la part de la communauté scientifique en fonction de l'objet d'étude. Il me semble ainsi que la communauté scientifique qui travaille sur les toitures végétalisées fait très facilement la connexion entre fonctionnement et évaluation des services écosystémiques (même si ceux-ci sont fréquemment intitulés performances). Ceci s'explique probablement par les attentes fortes (*e.g.* limitation de l'îlot de chaleur urbain, régulation des crues, isolation thermique des bâtiments) liées à ces constituants architecturaux qui se développent au cœur des villes pour répondre aux problématiques de l'aménagement urbain. Autour de ces questions, je perçois que des scientifiques de disciplines différentes (*i.e.* thermique, hydrologie, écologie, agronomie) échangent leurs connaissances et conduisent des études réunissant plusieurs questions. J'ai également l'impression que des efforts très significatifs se sont portés, autour de ces thématiques, pour développer la modélisation à différentes échelles (depuis la particule de substrat, jusqu'au quartier urbain). Ainsi, je pense qu'il faut prendre exemple sur ces approches pour aborder le sujet de l'évaluation des services écosystémiques. **Il faudrait alors, d'une part, s'ouvrir aux autres disciplines en favorisant par exemple des collaborations avec des géographes, des économistes et des sociologues, mais aussi, d'autre part, conforter nos connaissances en science du sol, notamment par**

l'acquisition systématique de mesures de fonctions ou de services écosystémiques sur un grand nombre de dispositifs expérimentaux, en conditions réelles. Mes expériences avec des collègues d'autres disciplines m'ont permis de mesurer à la fois tout le bénéfice intellectuel et la complexité de cet exercice. Je conserve ainsi la certitude que cette démarche est enrichissante mais qu'elle nécessite un cadre approprié pour pouvoir permettre son épanouissement.

7.3.4. Former à l'agro-urbanisme

Pour pouvoir répondre aux nombreuses questions, certaines très techniques et d'autres plus conceptuelles, il semble indispensable de faire émerger de nouvelles compétences ou des compétences transverses pour appréhender cette approche innovante de l'aménagement urbain. En effet, les expériences de diagnostic de la qualité des sols et l'évaluation de leurs potentialités ont montré que plusieurs savoir-faire sont nécessaires pour conduire cette démarche. Les compétences disciplinaires attendues pour travailler en collaboration avec les acteurs de l'aménagement du territoire sont à la fois la pédologie pour la capacité à décrire un sol et son fonctionnement, l'agronomie pour pouvoir évaluer sa fertilité et le génie civil pour estimer ses potentialités géomécaniques. Cependant, ces compétences ne suffisent pas car elles doivent s'adapter à la nature des objets d'étude, les sols urbains, et en particulier leur hétérogénéité et l'originalité de leur composition, héritée des activités anthropiques passées. Un tel savoir-faire est peu répandu et on le trouve essentiellement dans le domaine du diagnostic des sites et sols pollués. Ce panel de connaissances appliquées semble indispensable à la construction des villes du futur ; il se retrouve bien sous l'appellation d'agro-urbanisme.

Il est alors nécessaire de développer la formation autour de ce métier en construction d'agronome urbain. Ceci passe aussi bien par la formation initiale que par la formation continue. Déjà, certains établissements universitaires forment leurs étudiants à cette nouvelle manière d'appréhender les villes sous l'angle de leur fonctionnement écologique (Ensaia, AgroParisTech, Ensan, ENSP Versailles Marseille).

C'est le sens actuel que nous donnons à la refondation progressive de nos interventions pédagogiques à la fois au sein du service d'enseignement de science du sol de l'ENSAIA animé par Pierre Légize et pour la spécialisation Science et Génie de l'Environnement que j'ai la chance de co-piloter avec Christophe Schwartz et Apolline Auclerc.

7.3.5. Aménagement des territoires urbains

Le pendant logique de l'approche proposée ci-dessus est de s'intéresser aux territoires urbains. C'est l'objet du projet SUPRA (Sols Urbains et Projets d'Aménagement - de l'échantillonnage des sols à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols) (ADEME – GRAINE, 2018-2020). Il vise à mieux valoriser les surfaces des villes, en fonction de leurs potentialités et de leur aptitude à être support de végétation à vocation alimentaire ou non. Il part du constat d'une large méconnaissance de la nature des sols en ville et se propose de développer des bases de données géoréférencées inter-opérables de qualité des sols urbains et d'établir des réseaux de mesures de la qualité de ces sols, dans une logique d'observatoire.

D'une certaine manière, ces objectifs consistent en une extension des approches conduites à l'échelle du site dans le projet Destisol. Ils font également écho aux questions sur la manière d'appréhender la couverture pédologique des milieux anthropisés en développant une typologie adaptée à l'hétérogénéité de ces sols. Le projet SUPRA a prévu de se reposer sur les récents développements technologiques (*e.g.* fluorescence X portable, spectrométrie proche infrarouge) afin de pouvoir caractériser rapidement ces propriétés. **Il nous semble que ces nouveaux outils constituent une opportunité exceptionnelle d'acquérir un grand nombre de données sur les propriétés bio-physico-chimiques des sols urbains, ce qui permettrait d'aborder la question de la typologie des sols urbains avec le recul nécessaire.**

Un travail sur la notion de référentiel sera également mené dans une perspective d'exploitation des données de qualité bio-physico-chimique de qualité des sols urbains. La traduction de celles-ci en termes

de services écosystémiques est un des grands enjeux scientifiques du projet. Est-ce que les méthodes de notation développées dans différents projets de recherche, dont Destisol, peuvent être transposées à ces échelles plus larges ? **L'un des objectifs est alors de pouvoir produire, à l'échelle de plusieurs agglomérations françaises, des cartographies interprétatives des sols.**

Le consortium SUPRA piloté par Christophe Schwartz associe le BRGM, l'unité EPHOR d'AgroCampus Ouest, Armines et INFOSOL (US 1106 INRA).

7.3.6. *Vers le développement d'Outils d'Aide à la Décision prenant en compte les bouquets de services écosystémiques rendus par les sols des milieux anthropisés*

La concrétisation de ces travaux doit permettre de fournir des informations aux aménageurs et aux gestionnaires. C'est dans cette optique que nous intégrons de plus en plus le développement d'outils d'aide à la décision dans nos projets de recherche (Figure 69).

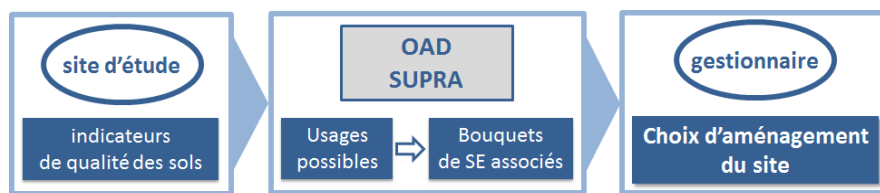


Figure 69. Logigramme de l'Outil d'Aide à la Décision SUPRA

Outre le fait de **favoriser le transfert de connaissances vers les acteurs de la gestion des territoires**, la construction de tels modèles décisionnels permet de **générer de réels questionnements scientifiques** que nous avons déjà eu l'occasion d'illustrer dans ce document (*e.g.* prise en compte des interactions entre propriétés des sols, définition de règles de décision, analyse multicritères). Surtout, ce type de démarches qui vise à rendre compréhensible l'analyse et l'interprétation de systèmes complexes comme les Technosols semble essentiel pour **créer du dialogue avec les parties prenantes autour de la prise en compte de la couverture pédologique.**

8. Conclusion

Les Technosols sont des objets d'étude fascinants pour un(e) pédologue. Par leur complexité de constitution, qui résulte d'une genèse fortement influencée par l'Homme au cours de séquences multiples d'apport/terrassement/remblaiement au cours du temps, ils imposent de revisiter l'équation « matériaux parents / climat / végétation / temps ». Je pense ainsi pouvoir dire qu'aucun pédologue - même chevronné - travaillant sur les sols fortement anthropisés ne sait ce qu'il va trouver au moment de descendre dans la fosse. Par un travail d'enquête sur l'historique du site auquel s'ajoute l'expertise qui permet de décrire un sol puis d'interpréter les résultats d'une analyse, il est cependant possible d'évaluer les potentialités d'un Technosol. Tout ceci s'appuie, dans une très large mesure, sur les savoirs et les savoir-faire issus de la science du sol. Néanmoins, devant l'incapacité actuelle de rattacher un sol fortement anthropisé à une classe ou à un type définis, il est nécessaire de mobiliser des savoirs complémentaires. Il nous a semblé pertinent d'aller plus loin en développant une méthode de notation des fonctions qu'ils peuvent assurer et en allant jusqu'à l'évaluation des services écosystémiques qui peuvent être rendus en fonction de la couverture du sol, c'est-à-dire de son aménagement par l'Homme. Cette initiative vise notamment à préserver la ressource sol, même lorsque celle-ci a été fortement marquée par l'anthropisation. Par ailleurs, les développements du génie pédologique ont ici été largement évoqués. Répétons qu'il ne s'agit en aucune manière de minimiser l'importance de préserver notre capital sol en suggérant que la construction de sols fonctionnels à partir de matériaux recyclés puissent se substituer au résultat d'une évolution millénaire qui aboutit à la couverture pédologique naturelle. Bien au contraire, c'est en se fondant sur les connaissances acquises que l'Homme doit apprendre à mieux gérer les espaces fortement artificialisés. En intégrant la logique d'économie circulaire à la composante pédologique des écosystèmes urbains, il s'agit d'améliorer leur gestion en se fondant sur des résultats scientifiques plutôt que sur l'intuition ou sur une vision partielle des sols urbains qui a trop longtemps prévalu (*i.e.* dépollution, amélioration des propriétés géomécaniques, remplacement/recouvrement des Technosols en place par de la terre végétale). Pour évoquer à nouveau ce qui a motivé la rédaction de ce Mémoire, il apparaît indispensable de mobiliser les recherches scientifiques pour chercher à optimiser les services écosystémiques en milieux fortement anthropisés pour espérer répondre aux enjeux environnementaux, mais également économiques, sociaux et culturels auxquels ils doivent faire face.

9. Bibliographie

- Abel S., T. Nehls, B. Mekiffer, M. Mathes, J. Thieme, and G. Wessolek, 2014, Pools of sulfur in urban rubble soils. *J. Soils Sediments*. 15(3):532–540
- Adhikari, K., & Hartemink, A.E., 2015, Linking Soils to Ecosystem Services - A Global Review. *Geoderma*, 262: 101-111.
- Agreste, 2015, Agreste Primeur, Utilisation du territoire ; L'artificialisation des terres de 2006 à 2014 : pour deux tiers sur des espaces agricoles, 326
- Alexandrovskiy, A.L., Dolgikh, A.V., Alexandrovskaya, E., 2012, Pedogenetic Features of Habitation Deposits in Ancient Towns of European Russia and their Alteration under Different Natural Conditions. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 64, 71–77.
- Andrews S.S., Karlen D.L., and Cambardella C.A., 2004, "The soil management assessment framework", *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, p. 1945-1962.
- Arocena, J.M., van Mourik, J.M., Schilder, M.L.M., Faz Cano, A., 2010, Initial Soil Development Under Pioneer Plant Species in Metal Mine Waste Deposits. *Restoration Ecology* 18, 244–252.
- Arshad M.A. and Coen G.M., 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *AM. J. Altern. Agric.*, 7, 25-3
- Artmann M., 2014, "Assessment of Soil Sealing Management Responses, Strategies, and Targets Toward Ecologically Sustainable Urban Land Use Management", *Ambio*, v. 43, p. 530-541.
- Badin, A.-L., Méderel, G., Béchet, B., Borschneck, D., Delolme, C. (2009): Study of the aggregation of the surface layer of Technosols from stormwater infiltration basins using grain size analyses with laser diffractometry. *Geoderma* 153, 163–171.
- Ball B.C., Batey T., Munkholm L.J., 2007, Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerkamp test. *Soil Use and Management* 23, 329–337.
- Baumgartl, T., 1998, Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils, *Soil and Tillage Research*, 47, 1-2, 51-59
- Beaudet L., 2015, Propriétés agronomiques des sols urbains construits : structuration et évolution, Mémoire HDR, Université d'Angers, AgroCampus Ouest, 152p
- Bechet B., Carré F., Florentin L., Leyval C., Montanarella L., Morel J.L., Raimbault G., Rodriguez F., Rossignol J.P. et Schwartz C., 2009, "Caractéristiques et fonctionnement des sols urbains". In *Sous les pavés la terre*, Cheverry et Gascuel éd., Omniscience, Montreuil, 45-74. ISBN 978-2-916097-03-9
- Blanchart A., Séré G., Chérel J., Stas M., Consales J.N., Warot G., Schwartz C., 2017, Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain – une revue, *Environnement Urbain / Urban Environment*, 11, <http://eue.revues.org/1809>
- Blanchart A., Séré G., Stas M., Consales J.N., Morel J.L., Schwartz C., 2018, Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils, *Landscape and Urban Planning*, 176, p 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>
- Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., 2000, The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base, *Geoderma* 95, 53-72
- Bolund P., Hunhammar S., 1999, "Ecosystem services in urban areas", *Ecological Economics* 29, 293-301.
- Bouzouidja R., Rousseau G., Galzin V., Claverie R., Lacroix D., Séré G., 2016 Green roof ageing or Isolatic Technosol's pedogenesis?, *Journal of Soils and Sediments*, 10.1007/s11368-016-1513-3
- Bragina, P.S., Gerasimova, M.I. (2014): Pedogenic processes on mining dumps (a case study of southern Kemerovo oblast). *Geogr. Nat. Resour.* 35, 35–40.
- Brauman K.A., Daily G.C., Duarte T.K., and Mooney H.A., 2007, "The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services", *Annual Review of Environment and Resources*, v. 32, p. 67-98.
- Brown S., Chaney R.L., Hallfrisch J.G., and Xue Q., 2003, "Effect of biosolids processing on lead bioavailability in an urban soil", *Journal of environmental quality*, v. 32, p. 100-108.
- Busch M., La Notte A., Laporte V., and Erhard M., 2012, "Potentials of quantitative and qualitative approaches to assessing ecosystem services", *Ecological Indicators*, v. 21, p. 89-103.
- Byrne L., 2007, "Habitat structure: A fundamental concept and framework for urban soil ecology", *Urban Ecosystems*, v. 10, p. 255-274.
- Cameron R.W.F., Blanusa T., Taylor J.E., Salisbury A., Halstead A.J., Henricot B., and Thompson K., 2012, "The domestic garden - Its contribution to urban green infrastructure", *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 11, p. 129-137.
- CGDD, 2015, Le point sur l'occupation des sols ; progression plus modérée de l'artificialisation entre 2006 et 2012, 219
- Charzyński, P., Hulisz, P., 2013. Soils forming on buildings in Toruń. In: Charzyński, P., Hulisz, P., Bednarek, R. (Eds.), *Technogenic Soils of Poland*. Polish Society of Soil Science, Toruń, pp. 81–93.
- Chiesura A., 2004, "The role of urban parks for the sustainable city", *Landscape and Urban Planning*, v. 68, p. 129- 138.
- Ciarkowska, K., Gargiulo, L., Mele, G. (2016): Natural restoration of soils on mine heaps with similar technogenic parent material: A case study of long-term soil evolution in Silesian-Krakow Upland Poland. *Geoderma* 261, 141–150.

Colding J., 2007, "Ecological land-use complementation for building resilience in urban ecosystems", *Landscape and Urban Planning*, v. 81, p. 46-55.

Connor E.F., Hafernik J., Levy J., Moore V.L., and Rickman J.K., 2002, "Insect conservation in an urban biodiversity hotspot: the San Francisco Bay Area", *Journal of Insect Conservation*, v. 6, p. 247-259.

Cornu S., 2005, *Pédogenèses d'hier et d'aujourd'hui*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 100p

Cornu S., Quénard L., Cousin I., Samouëlian A., 2014, Experimental approach of lessivage: Quantification and mechanisms, *Geoderma*, 213, p. 357-370

Costanza R., 2008, "Ecosystem services: Multiple classification systems are needed", *Biological Conservation*, v. 141, p. 350-352.

Costanza R., d'Arge R., deGroot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., Van den Belt M., 1997, "The value of the world's ecosystem services and natural capital", *Nature*, p. 253-260.

Craul P.J., 1992, "Urban soil in landscape design", John Wiley & Sons.

Daily G.C., Polasky S., Goldstein J., Kareiva P.M., Mooney H.A., Pejchar L., Ricketts T.H., Salzman J., and Shallenberger R., 2009, "Ecosystem services in decision making: time to deliver", *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 7, p. 21-28.

Davies Z.G., Edmondson J.L., Heinemeyer A., Leake J.R., and Gaston K.J., 2011, "Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale", *Journal of Applied Ecology*, v. 48, p. 1125-1134.

De Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.J., 2002, "A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services", *Ecological Economics* 41, 393-408.

Debosz K., Petersen S.O., Kure L.K., Ambus P., 2002, Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties, *Applied Soil Ecology*, 19(3), 237-248

Deeb M, Grimaldi M, Lerch T Z, Pando A, Podwojewski P, Blouin M., 2016, Influence of organic matter content on hydro-structural properties of constructed Technosols, *Pedosphere*, 26(4), 486-498.

Delgado R., Martin-Garcia J.M., Calero J., Casares-Porcel M., Tito-Rojo J., Delgado G., 2007, "The historic man-made soils of the Generalife garden (La Alhambra, Granada, Spain)", *European Journal of Soil Science*, 58, 215-228.

Ding K., Wu Q.; Wei H., Yang W., Séré G., Wang S., Echevarria G., Tang Y., Tao J., Morel J.L., Qiu R., 2016, Ecosystem services provided by heavy metals contaminated soils in China, *Journal of Soils and Sediments*, doi:10.1007/s11368-016-1547-6

Dobbs C., Escobedo F.J., Zipperer W., 2011, "A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators", *Landscape and Urban Planning*, 99, 196-206.

Dominati E., Patterson M., and Mackay A., 2010, "A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils", *Ecological Economics*, v. 69, p. 1858-1868.

Douglas I., 2012, "Urban ecology and urban ecosystems: understanding the links to human health and well-being", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 4, p. 385-392.

Duchaufour, P., 1983, *Pédologie 1. Pédogénèse et classification 2ème édition*, Masson, 491 p

Edmondson J.L., Davies Z.G., McCormack S.A., Gaston K.J., and Leake J.R., 2014, "Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European city", *Science of the Total Environment*, v. 472, p. 444-453.

El Khalil H., Schwartz C., El Hamiani O., Kubiniok J., Morel J.L., Boularbah A., 2008, "Contribution of technic materials to the mobile fraction of metals in urban soils in Marrakech (Morocco)", *Journal of Soils and Sediments* 8 (1), 17-22.

ENVASSO, 2006, "Environmental Assessment of Soil for mOnitoring. Scientific support to policy", European Commission 6th Framework Programm.

Escobedo F.J., Kroeger T., and Wagner J.E., 2011, "Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices", *Environmental Pollution*, v. 159, p. 2078-2087.

Ellis F., Sumberg J., 1998, Food Production, Urban Areas and Policy Responses, *World Development*, 26 (2), 213-225

Fang C.-F., and Ling D.-L., 2003, "Investigation of the noise reduction provided by tree belts", *Landscape and Urban Planning*, v. 63, p. 187-195.

FAO, 1997, "AFRICOVER spécifications géométriques et cartographiques", Service de l'environnement et des ressources naturelles, Division de la recherche, de la vulgarisation et de la formation, Département du développement durable.

FAO, 1998, "Elaboration d'une base de données sur l'occupation du sol grâce à la télédétection et à un système d'informations géographiques", *Série Télédétection pour décideurs* N° 21

Farfel, M. R., Orlova, A. O., Chaney, R. L., Lees, P. S. J., Rohde, C., and Ashley, P. J., 2005, "Biosolids compost amendment for reducing soil lead hazards: a pilot study of Orgro® amendment and grass seeding in urban yards", *Science of the total environment*, v. 340, p. 81-95

Farkas C, Gyuricza C et Birkas M. 2006. Seasonal changes of hydraulic properties of a chromic luvisol under different soil management. *Biologia*, 61(19), 344-348

Farouki O.T., 1986, "Thermal properties of soils", *Trans Tech Publications* 11, 136 p.

Fisher, B., & Kerry Turner, R., 2008, Ecosystem services: classification for valuation. *Biological Conservation*, v. 141, p. 1167-1169.

Folke C., Carpenter S.R., Walker B., Scheffer M., Chapin T., and Rockström J., 2010, "Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability", *Ecology and Society*, v. 15, p. 20.

Fondrillon M., 2007, "La formation du sol urbain : étude archéologique des terres noires à Tours (4e-12e siècle) ", Thèse de doctorat, 539p

Gerassimov I.P., 1974, L'utilisation du processus élémentaire des sols en matière de génétique des sols, Trans. 10th Int. Cong. Soil Science Moscou, VI (II, 482-489)

Gomez-Baggethun E., Barton D.N., 2013, "Classifying and valuing ecosystem services for urban planning", *Ecological Economics* 86, 235-245.

Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Abrosimov K.N., Skvortsova, E. B., Tagiverdiev, S. S., Morozov, I. V., 2016, Physical Properties of Soils in Rostov Agglomeration, *Eurasian Soil Science*, v. 49 – 8, p. 898-907

Grimm N.B., Foster D., Groffman P., Grove J.M., Hopkinson C.S., Nadelhoffer K.J., Pataki D.E., and Peters D.P.C., 2008, "The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients", *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 6, p. 264-272.

Grosbellet, C., Vidal-Beaudet, L., Caubel, V., Charpentier, S. (2011): Improvement of soil structure formation by degradation of coarse organic matter. *Geoderma* 162, 27–38.

Grünewald, G., Kaiser, K., Jahn, R. (2007): Alteration of secondary minerals along a time series in young alkaline soils derived from carbonatic wastes of soda production. *CATENA* 71, 487–496.

Gupta SD, Mohanty BP et Kohne JM. 2006. Soil Hydraulic Conductivities and their Spatial and Temporal Variations in a Vertisol. *Soil science society of America*, 20, 1872-1881

Haase D., Larondelle N., Andersson E., Artmann M., Borgstrom S., Breuste J., Gomez-Baggethun E., Gren A., Hamstead Z., Hansen R., Kabisch N., Kremer P., Langemeyer J., Rall E.L., McPhearson T., Pauleit S., Qureshi S., Schwarz N., Voigt A., Wurster D., and Elmqvist T., 2014, "A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation", *Ambio*, v. 43, p. 413-433.

Haase D., Schwarz N., Strohbach M., Kroll F., and Seppelt R., 2012, "Synergies, Trade-offs, and Losses of Ecosystem Services in Urban Regions: an Integrated Multiscale Framework Applied to the Leipzig-Halle Region, Germany", *Ecology and Society*, v. 17.

Haines-Young R., Potschin M., 2011, Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) : 2011 Update, European Environmental Agency

Hayes, S.M., Root, R.A., Perdrial, N., Maier, R.M., Chorover, J. (2014): Surficial weathering of iron sulfide mine tailings under semi-arid climate. *Geochimica et cosmochimica acta* 141, 240–257.

Haygarth P.M., and Ritz, K., 2009, "The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services", *Land Use Policy*, v. 26, p. S187-S197.

Hewitt, A., Dominati, E., Webb, T., Cuthill, T., 2015. Soil natural capital quantification by the stock adequacy method. *Geoderma* 241–242, 107–114.

Howard J. L., K. Ryzewski, B. R. Dubay, and T.W. Killion. 2015. Artifact preservation and post-depositional site-formation processes in an urban setting: A geoarchaeological study of a 19th century neighborhood in Detroit, Michigan, USA. *J. Archaeol. Sci.* 53:178–189

Huot H., M. O. Simonnot, P. Marion, J. Yvon, P. De Donato, and J. L. Morel, 2013, Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. *J. Soils Sediments*. 13(3):555–568.

Huot H., M. O. Simonnot, F. Watteau, P. Marion, J. Yvon, P. De Donato, and J. L. Morel, 2014a, Early transformation and transfer processes in a Technosol developing on iron industry deposits. *Eur. J. Soil Sci.* 65:470–484

INSEE, 2011, "Le nouveau zonage en aires urbaines de 2010", INSEE Première, n°1374. [En ligne] octobre 2011. [Citation : 23 février 2016.] <http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1374/ip1374.pdf>.

Jangorzo N.S., Watteau F., Schwartz C., 2013, Evolution of the pore structure of constructed Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis, *Geoderma*, 207-208, 180-192

Jeanneaux P., Aznar O., de Mareschal S., 2012, "Une analyse bibliométrique pour éclairer la mise à l'agenda scientifique des services environnementaux", *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*.

Jim C.Y., 1998, "Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth", *Urban Ecosystems*, v. 2, p. 171-181.

Johnson M.S., and Lehmann, J., 2006, "Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow", *Ecoscience*, v. 13, p. 324-333.

Joimel S., Cortet J., Jolivet C.C., Saby N.P.A., Chenot E.D., Branchu P., Consalès J.N., Lefort C., Morel J.L., et Schwartz C., 2016, "Physico-Chemical Characteristics of Topsoil for Contrasted Forest, Agricultural, Urban and Industrial Land Uses in France", *Science of The Total Environment* 545-46 (mars 2016): 40-47. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.035.

Kida, K., Kawahigashi, M., 2015, Influence of asphalt pavement construction processes on urban soil formation in Tokyo. *Soil Science and Plant Nutrition* 61, 135–146.

Kohler-Milleret R., Le Bayon R.-C., Chenu C., Gobat J.-M., Boivin P., 2013, Impact of two root systems, earthworms and mycorrhizae on the physical properties of an unstable silt loam Luvisol and plant production, *Plant and Soil*, 370, 1-2, pp 261-265

Kost D.A., Boutelle D.A., Larson M.M., Smith W.D., Vimmersted J.P., 1997, Papermill sludge amendments, tree protection, and tree establishment on an abandoned coal minesoil, *Journal of Environmental Quality*, vol. 26, p1409-1416

Kroll F., Muller F., Haase D., and Fohrer N., 2012, "Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics", *Land Use Policy*, v. 29, p. 521-535.

Lauf S., Haase D., Kleinschmit B., 2014, "Linkages between ecosystem services provisioning, urban growth and shrinkage - A modelling approach assessing ecosystem service trade-offs", *Ecological indicators* 42, 73-94.

Leguedois, S., Séré, G., Auclerc, A., Cortet, J., Huot, H., Ouvrard, S., Watteau, F., Schwartz, C., Morel, J.-L., 2016, Modelling pedogenesis of technosols. *Geoderma*, 262, 199-212. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.008

Li T.H., Li W.K., and Qian, Z. H., 2010, "Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen", *Ecological Economics*, v. 69, p. 1427-1435.

Loveland P.J., Thompson T.R.E., 2002, "Identification and development of a set of national indicators for soil quality, in C. U", National Soil Resources Institute, ed., Angletterre, Environment Agency.

Lovell S.T., Nathan C.A., Olson M.B., Ernesto Méndez V., Kominami H.C., Erickson D.L., Morris K.S., and Morris W.B., 2010, "Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems", *Agricultural Systems*, v. 103, p. 327-341

Lovell S.T., and Taylor J.R., 2013, "Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States", *Landscape Ecology*, v. 28, p. 1447-1463.

Martín, F., Díez, M., García, I., Simón, M., Dorronsoro, C., Iriarte, Á., Aguilar, J. (2007): Weathering of primary minerals and mobility of major elements in soils affected by an accidental spill of pyrite tailing. *Science of The Total Environment* 378, 49–52.

McBratney, A.B., Field, D.J., Koch, A., 2014, The dimensions of soil security. *Geoderma* 213, 203–213.

MEEM, 2017, Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, 27p

Micand A., 2011, Référentiel de gestion écologique des espaces verts. *Plante & Cité*

Millennium Ecosystem Assessment, 2003, "Ecosystem and Human Well-Being. A framework for assessment", Washington DC, Island press.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005, "Ecosystems and human well-being: Biodiversity Synthesis", World Resources Institute, Washington, D.C

Mondini C., Cayuela M.L., Sanchez-Monedero M.A., Roig A., Brookes P.C., 2006, Soil microbial biomass activation by trace amounts of readily available substrate, *Biology and Fertility of Soils*, vol. 42(6), pp 542-549

Mora J.L., Lazaro R., 2014, Seasonal changes in bulk density under semiarid patchy vegetation: the soil beats, *Geoderma*, 235-236, 30-38

Morel J.L., Schwartz C., Florentin L., 2005, "Urban soils", *Encyclopedia of Soils in the Environment*. p. 202-208.

Morel J. L., Chenu C., and Lorenz K., 2014, "Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs)", *Journal of Soils and Sediments*, p. 1-8.

Müller N., and Werner P., 2010, "Urban biodiversity and the case for implementing the convention on biological diversity in towns and cities", John Wiley and Sons: Oxford, UK.

Mueller L., Sheperd G., Schindler U., Ball B.C., Munkholm L.J., Hennings V., Smolentseva E., Rukhovic O., Lukin S., Hu C., 2013, Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating, *Soil & Tillage Research*, 127, pp 74-84

Néel C., H. Bril, A. Courtin-Nomade, and J. P. Dutreuil. 2003. Factors affecting natural development of soil on 35-year-old sulfide-rich mine tailings. *Geoderma*. 111(1):1–20

Neel C., Delcour P., Dumont E., 2012, "Les indicateurs de qualités des sols existants sont-ils adaptés aux sols urbains ? ", PSUR (Préservation des sols en milieu Urbain et Routier), Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Nehls T., and R. K. Shaw. 2010. Black carbon in soils: Relevance, analysis, distribution. *Soil Survey Horizons*. 51:79–84.

Nehls T., S. Rokia, B. Mekiffer, C. Schwartz, and G. Wessolek. 2013. Contribution of bricks to urban soil properties. *J. Soils Sediments*. 13(3):575–584.

Niemelä J., Saarela S.-R., Söderman T., Kopperoinen L., Yli-Pelkonen V., Väre S., and Kotze D.J., 2010, "Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study", *Biodiversity and Conservation*, v. 19, p. 3225-3243.

Norman L. M., Villarreal M. L., Lara-Valencia F., Yuan Y.P., Nie W.M., Wilson S., Amaya G., and Sleeter R., 2012, "Mapping socio-environmentally vulnerable populations access and exposure to ecosystem services at the U.S.-Mexico borderlands", *Applied Geography*, v. 34, p. 413-424.

Nowak D.J., Civerolo, K. L., Trivikrama Rao, S., Sistla, G., Luley, C. J., and Crane, D. E, 2000, "A modeling study of the impact of urban trees on ozone", *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 1601-1613.

Nowak D.J., and Crane D.E., 2000, "The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions".

Obear, G.R., Hartemink, A.E., Soldat, D.J. (2014): Soils with iron-cemented layers on golf courses in the USA. *Geoderma* 232–234, 198–207.

Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R.R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Kohler M., Liu K.K.Y., and Rowe B., 2007, "Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services", *Bioscience*, v. 57, p. 823-833.

Oldfield E.E., Felson A.J., Wood S. A., Hallett, R. A., Strickland, M. S., and Bradford, M. A., 2014, "Positive effects of afforestation efforts on the health of urban soil", *Forest Ecology and Management*, v. 313, p. 266-273.

Pataki D.E., Carreiro M.M., Cherrier J., Grulke N.E., Jennings V., Pincetl S., Pouyat R.V., Whitlow T.H., and Zipperer W.C., 2011, "Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions", *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 9, p. 27-36.

Payet C., 2001, *Les végétaux comme facteur d'évolution des boues urbaines en stockage prolongé*, Thèse INPL

Pellegrini S., Garcia G., Peñas-Castejon J.M., Vignozzi N. Costantini E.A.C., 2016, Pedogenesis in mine tails affects macroporosity, hydrological properties, and pollutant flow, *Catena*, vol. 136, 3-16

Pearce T.G., Boone G.C., 1998, Responses of invertebrates to paper sludge application to soil, *Applied Soil Ecology*, vol. 9, p 393-397

Pini, R., Pedron, F., Petruzzelli, G., Scatena, M., Guidi, G.V. (2009): Modifications of the structural characteristics of new soil forming on industrial waste colonized by woody plants. *Geoderma* 149, 373–378.

Pouyat R.V., Groffman P., Yesilonis I., and Hernandez L., 2002, "Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems", *Environ Pollut*, v. 116 Suppl 1, p. S107-18.

Pouyat R.V., Pataki D., Belt K., Groffman P., Hom J., and Band L., 2007, "Effects of Urban Land-Use Change on Biogeochemical Cycles, in J. Canadell, D. Pataki, and L. Pitelka, eds., *Terrestrial Ecosystems in a Changing World: Global Change*" — The IGBP Series, Springer Berlin Heidelberg, p. 45-58.

Pouyat R.V., Szlavecz K., Yesilonis I. D., Groffman P.M., and Schwarz K., 2010, "Chemical, physical and biological characteristics of urban soils", Chapter 7, in J. Aitkenhead-Peterson, and A. Volder, eds, eds., *Urban Ecosystem Ecology*. Agronomy Monograph 55, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, p. 119-152.

Pouyat R.V., Yesilonis I.D., and Nowak, D. J., 2006, "Carbon Storage by Urban Soils in the United States", *Journal of Environmental Quality*, p. 1566-1575.

Pouyat, R. V., Yesilonis, I. D., Russell-Anelli, J., Neerchal, N. K., 2007, Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 71 – 3, p. 1010-1019

Ritz K., Black H.I.J., Campbell C.D., Harris J.A., and Wood C., 2009, "Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development", *Ecological Indicators*, v. 9, p. 1212-1221.

Robinson. (2014). On the Value of Soil Resources in the Context of Natural Capital and Ecosystem Service Deliver. *Soil Science Society, J.* 78:685–700.

Rokia S., Séré G., Schwartz, Deeb M., Fournier F., Nehls T., Damas O., Vidal-Beaud L., 2014, Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes, *Waste Management*, vol.34, 11, p 2155-2162

Santini, T.C., Fey, M.V. (2015): Fly ash as a permeable cap for tailings management: pedogenesis in bauxite residue tailings. *Journal of Soils and Sediments* 15, 552–564.

Sauer, D., Burghardt, W. (2006): The occurrence and distribution of various forms of silica and zeolites in soils developed from wastes of iron production. *Catena* 65, 247–257.

Scharenbroch, B.C. , Lloyd, J.E., Johnson-Maynard, J.L., 2005, Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties, *Pedobiologia*, vol. 49 – 4, p. 283-296

Schindelbeck R.R., van Es H.M., Abawi G.S., Wolfe D.W., Whitlow T.L., Gugino B.K., Idowu O.J., and Moebius-Clune B.N., 2008, "Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management", *Landscape and Urban Planning*, v. 88, p. 73-80.

Schneider A., Friedl M.A., Potere D., 2009, A new map of global urban extent from MODIS satellite data, *Environmental Research Letters*, 4 – 4

Scholtus, N., Echevarria, G., Florentin, L., Bonis, M.-L., De Donato, P., Simonnot, M.-O., Morel, J.-L. (2014): Expected evolution of a Technosol derived from excavated Callovo-Oxfordian clay material. *Journal of Soils and Sediments* 1–15.

Schwartz C., 2001, "Measurement of in situ phytoextraction of zinc by spontaneous metallophytes growing on a former smelter site", *Science of the Total Environment* 279 (1-3), p. 215-221.

Schwartz, C., 2006. Réponse des plantes aux polluants des sols très anthropisés. Habilitation à Diriger des Recherches, INPL, Ecole Doctorale RP2E, 70 p.

Schwen A., Bodner G., Loiskandl W., 2011, Time-variable soil hydraulic properties in near-surface soil water simulations for different tillage methods, *Agricultural Water Management*, 99, 42-50

Selmi W., Weber C., Mehdi L., 2013, "Multifonctionnalité des espaces végétalisés urbains", *Vertigo* 13, 2, DOI : 10.4000/vertigo.14133

Seppelt R., Dormann C. F., Eppink F. V., Lautenbach S., and Schmidt, S., 2011, "A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead", *Journal of Applied Ecology*, v. 48, p. 630-636.

Séré G., 2007, "Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol", *Mémoire de Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques*, 227p

Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2008, Soil Construction: A Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands, *Journal of Soils & Sediments*, vol 8 (2), p 130-136

Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.C., Watteau F., Morel J.L., 2010, Early pedogenic evolution of constructed Technosol, *Journal of Soils & Sediments*, vol 10, p 1246-1254

Séré G., Ouvrard S., Magnenet V., Pey B., Morel J.L., Schwartz C., 2012, Predictability of the evolution of the soil structure using water flow modeling for a constructed Technosol, *Vadose Zone Journal*, vol. 11 (1) - 10.2136/vzj2011.0069

Simonson R.W., 1959, Outline of a Generalized Theory of Soil Genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23:152-156

Tancoigne E., Barbier M., Cointet J-P., Richard G., 2013b, "Les services écosystémiques dans la littérature scientifique : démarche d'exploration et résultats d'analyse", INRA.

TEEB, 2011, "The Economics of Ecosystems and Biodiversity in National and International Policy Making", Edited by Patrick ten Brink. Earthscan, London and Washington

Tifafi M., Bouzouidja R., Leguédois S., Ouvrard S., Séré G., 2017, How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the temporal dynamics of the soil porosity, *Geoderma* <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.027>

Tongway D.J. & N.L. Hindley, 2004, Landscape function analysis: Procedures for monitoring and assessing landscapes.

Tratalos J., Fuller R.A., Warren P.H., Davies R.G., and Gaston K.J., 2007, "Urban form, biodiversity potential and ecosystem services", *Landscape and Urban Planning*, v. 83, p. 308-317.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014, *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*, CD-ROM Edition

UQUALISOL-ZU, 2012, "Préconisation d'utilisation des sols et qualité des sols en zone urbaine et péri-urbaine – Application du Bassin Minier de Provence", Programme ADEME – GESSOL.

Urban SMS, 2008, "Bodenmanagement-Strategie für städtische Räume", INTERREG IV B der Europäischen Union Programm. Zentraleuropäischer Kooperationsraum (Central Europe).

Uzarowicz L., Zagórski Z., Mendak E., Bartmiński P., Szara E., Kondras M., Oktaba L., Turek A., Rogoziński R., 2017, "Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis", *Catena*, 157, 75-89

Vandecasteele, B., Quataert, P., Genouw, G., Lettens, S., Tack, F.M.G. (2009): Effects of willow stands on heavy metal concentrations and top soil properties of infrastructure spoil landfills and dredged sediment-derived sites. *Science of The Total Environment* 407, 5289–5297.

Vauramo S., 2011, "Urban ecosystem services at the plant-soil interface", Departement of Environmental Science. Faculty of biological and environmental science. University of Helsinki. Finland.

Velasquez E., Lavelle P., and Andrade M., 2007, "GISQ, a multifunctional indicator of soil quality", *Soil Biology & Biochemistry*, v. 39, p. 3066-3080.

Vidal-Beaudet, L., Rokia, S., Nehls, T., Schwartz, C. (2016): Aggregation and availability of phosphorus in a Technosol constructed from urban wastes. *Journal of Soils and Sediments*. doi: 10.1007/s11368-016-1469-3

Volchko Y., 2013, "SF Box-A tool for evaluating effects on ecological soil functions in remediation projects", Chalmers University of Technology.

Volchko Y., Rosen L., Norrman J., Berknut M., Doberl G., Anderson R., Tysklind M., Muller-Grabherr D., 2014, "SNOWMAN – MCA: Multi-criteria analysis of remediation alternatives to assess their overall impact and cost/benefit, with focus on soil function (ecosystem services and goods) and sustainability", Engineering Geology Research Group, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Vrščaj B., Poggio L., and Marsan F.A., 2008, "A method for soil environmental quality evaluation for management and planning in urban areas", *Landscape and Urban Planning*, v. 88, p. 81-94.

Wang X., Sato T., Xing B., Tao S., 2005, Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish, *Science of the Total Environment*, 350, 28-37

Wang Y.F., Bakker F., de Groot R., and Wortche H., 2014, "Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review", *Building and Environment*, v. 77, p. 88-100.

Williams A., and Hedlund K., 2014, "Indicators and trade-offs of ecosystem services in agricultural soils along a landscape heterogeneity gradient", *Applied Soil Ecology*, v. 77, p. 1-8.

Yilmaz D., Cannavo P., Séré G., Vidal-Beaudet L., Legret M., Damas O., Peyneau P-E., 2016, Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening, *Journal of Soils and Sediments*, 10.1007/s11368-016-1524-0

Young R.F., 2010, "Managing municipal green space for ecosystem services", *Urban forestry & urban greening*, v. 9, p. 313-321.

Zanuzzi, A., Arocena, J.M., Van Mourik, J.M., Cano, A.F. (2009): Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma* 154, 69–75.

Zevenbergen, C., Bradley, J.P., Van Reeuwijk, L.P., Shyam, A.K., Hjelm, O., Comans, R.N.J. (1999): Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash. *Environmental Science and Technology* 33, 3405–3409.

Zeza A., Tasciotti L., 2010, Urban agriculture, poverty, and food security: Empirical evidence from a sample of developing countries, *Food Policy*, 35, 265-273

Zhang J.J., Fu M.C., Zeng H., Geng Y.H., and Hassani F.P., 2013b, "Variations in ecosystem service values and local economy in response to land use: a case study of Wuhan, China", *Land Degradation & Development*, v. 24, p. 236-249.

Zhang Y., Yang Z.F., and Li W., 2006a, "Analyses of urban ecosystem based on information entropy", *Ecological Modelling*, v. 197, p. 1-12.

Zikeli, S., Jahn, R., Kastler, M. (2002): Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 530–536.

10. Annexes

10.1. Liste complète et classée des publications

10.1.1. Articles publiés

1. Blanchart A., Séré G., Stas M., Consales J.N., Morel J.L., Schwartz C., 2018, Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils, *Landscape and Urban Planning*, 176, p 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>
2. Blanchart A., Séré G., Cherel J., Stas M., Consalès J.N., Warot G., Schwartz C., 2017, Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain – une revue, *Environnement Urbain / Urban Environment*, 11, <http://eue.revues.org/1809>
3. Brimo K., Garnier P., Lafolie F., Séré G., Ouvrard S., 2018, In situ long-term modeling of phenanthrene dynamics in an aged contaminated soil using the VSOIL platform, *Science of the Total Environment*, en cours de publication
4. Tifafi M., Bouzouidja R., Leguédou S., Ouvrard S., Séré G., 2017, How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the temporal dynamics of the soil porosity, *Geoderma* <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.027>
5. Leguedois, S., Séré, G., Auclerc, A., Cortet, J., Huot, H., Ouvrard, S., Watteau, F., Schwartz, C., Morel, J.-L., 2016, Modelling pedogenesis of technosols. *Geoderma*, 262, 199-212. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.008
6. Ding K., Wu Q.; Wei H., Yang W., Séré G., Wang S., Echevarria G., Tang Y., Tao J., Morel J.L., Qiu R., 2016, Ecosystem services provided by heavy metals contaminated soils in China, *Journal of Soils and Sediments*, doi:10.1007/s11368-016-1547-6
7. Yilmaz D., Cannavo P., Séré G., Vidal-Beaudet L., Legret M., Damas O., Peyneau P-E., 2016, Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening, *Journal of Soils and Sediments*, 10.1007/s11368-016-1524-0
8. Bouzouidja R., Rousseau G., Galzin V., Claverie R., Lacroix D., Séré G., 2016 Green roof ageing or Isolatic Technosol's pedogenesis?, *Journal of Soils and Sediments*, 10.1007/s11368-016-1513-3
9. Huot H., Séré G., Charbonnier P., Simonnot M.O., Morel J.L., 2015, Lysimeter monitoring as assessment of the potential for revegetation to manage former iron industry settling ponds., *Sci Total Environ*, vol. 526, p 29-40
10. Rokia S., Séré G., Schwartz, Deeb M., Fournier F., Nehls T., Damas O., Vidal-Beaudet L., 2014, Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes, *Waste Management*, vol.34, 11, p 2155-2162
11. Séré G., Ouvrard S., Magnenet V., Pey B., Morel J.L., Schwartz C., 2012, Predictability of the evolution of the soil structure using water flow modeling for a constructed Technosol, *Vadose Zone Journal*, vol. 11 (1) - 10.2136/vzj2011.0069
12. Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.C., Watteau F., Morel J.L., 2010, Early pedogenic evolution of constructed Technosol, *Journal of Soils & Sediments*, vol 10, p 1246-1254
13. Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2008, Soil Construction: A Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands, *Journal of Soils & Sediments*, vol 8 (2), p 130-136

10.1.2. Article soumis et en cours

1. Rees F., Dagois R., Watteau F., Morel J.L., Schwartz C., Séré G., 2018, Carbon storage in constructed Technosols: in situ monitoring over a decade, to be submitted
2. Kanso A., Sirgucy C., Watteau F., Séré G., Morel J.L., Kobaissi A., El-Samrani A., Echevarria G., 2018, Technosol construction from toxic wastes for agromining and non food production Part 1. Physicochemical properties, metal speciation and fertility, to be submitted
3. Bouzouidja R., Séré G., Claverie R., Bouyer J., Lacroix D., 2018, Impact of middle-term meteorological conditions on hydrothermal behaviour of green roofs, to be submitted

4. Bouzouidja R., Séré G., Claverie R., Ouvrard S., Nuttens L., Lacroix D., 2018, Green roof aging: quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances at the lab-scale, *Journal of Hydrology* (submitted)
5. Hedde M., Nahmani J., Séré G., Auclerc A., Cortet J., 2018, How successful is early colonisation of a constructed Technosol by soil macroinvertebrates?, *Journal of Soils and Sediments* (submitted)
6. Villenave C., Séré G., Schwartz C., Watteau F., Jimenez A., Cortet J., 2018, Rapid changes in soil nematofauna in the first years after Technosol construction for the reclamation of an industrial brownfield, *Eurasian Journal of Soil Science* (submitted)

10.1.3. Chapitres d'ouvrages

1. Séré G., Schwartz C., Cortet J., Guimont S., Watteau F., Simonnot M.O., Morel J.L., 2017, Pedological engineering for brownfield reclamation, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p
2. Watteau F., Séré G., Huot H., Begin J.C., Schwartz C., Qiu R., Morel J.L., 2017, Micropedology of SUITMAs, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p
3. Huot H., Séré G., Leguédois S., Schwartz C., Vidal-Beaudet L., Morel J.L., 2017, Pedogenetic processes in soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p
4. Vidal-Beaudet L., Cannavo P., Schwartz C., Séré G., Legret M., Béchet B., Peyneau P.E., Bataillard P., Coussy S., Damas O., 2016, Using wastes for fertile urban soil construction – The French research project SITERRE, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p
5. Morel J.L., Lorenz K., Chenu C., Séré G., 2016, Urban soils are primary providers of ecosystem services, in "Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management - composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Schweizerbart, 253p

10.1.4. Brevet

1. Séré G., Renat J.C., Schwartz C., 2007, Procédé de traitement d'un sol dégradé et de construction d'un sol artificiel, n° d'enregistrement national 07 57036

10.1.5. Journaux nationaux avec comité de lecture

1. Morel, J.L., Séré, G., Auclerc, A., Schwartz, C., Leguédois, S., Watteau, F., 2014. Les sols de l'environnement urbain. Caractéristiques, services et problèmes liés à leur étude. *Bulletin BGS* (35), 49-54.
2. Colombano S., Bataillard P., Séré G., Morel J.L., Rouvreau L., 2014. Le sol en contexte de sites pollués : 1. Connaissance et remédiation. *Géosciences* (18), 56-61
3. Bataillard P., Séré G., Morel J.L., Colombano S., Rouvreau L., 2014. Le sol en contexte de sites pollués : 2. Préserver et restaurer les fonctions du sol. *Géosciences* (18), 62-69
4. Bouzouidja, R., Séré, G., Claverie, R., Lacroix, D., 2013. Caractérisation du fonctionnement thermo-hydrrique in situ d'une toiture végétalisée extensive. *Houille Blanche* (5), 62-69. DOI : 10.1051/lhb/2013044
5. Séré G., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2008. Procédé de valorisation de déchets et sous-produits en construction de sol pour la réhabilitation de sites dégradés, *Déchets Science & Technique*, vol 50

10.1.6. Rapports / Mémoires

1. Séré G., 2007, Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol, Mémoire de Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, 227p
2. Séré G., Schwartz C., Florentin L., Morel J.L., Charissou A.M., Jourdain M.J., 2003a, Evaluation des risques écotoxicologiques liés à la valorisation agricole de déchets et produits dérivés, Synthèse finale du programme VADETOX, ADEME
3. Séré G., Echevarria G., Schwartz C., Maillant S., Leclerc-Cessac E., 2003b, Evaluation de l'influence des pratiques humaines sur le devenir des sols forestiers, agricoles, urbains et industriels des environs du site Meuse/Haute-Marne, Rapport final, ANDRA
4. Séré G., 2002, Caractérisation des interactions argiles-acides organiques - les sources naturelles du potassium pour les plantes, Mémoire de DEA Sciences Agronomiques, 31p
5. Séré G., 2002, Utilisation de sous-produits papetiers pour la réhabilitation d'anciens sites industriels, Mémoire de fin d'étude Ingénieur ENSG, 35p

10.1.7. Présentations orales avec actes de congrès

1. Rees F., Dagois R., Derrien D., Schwartz C., Simonnot M.O., Morel J.L., Séré G. (2017) Storage of carbon in constructed Technosols: in situ monitoring and modelling. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 9
2. Cherel J., Warot G., Blanchart A., Schwartz C., Stas M., Séré G. (2017) Development of a tool for the diagnostic of urban soils quality and evaluation of the potential ecosystem services. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 9
3. Huot H., Guo M., Liu C., Liu W., Yuan M., Séré G., Watteau F., Morel J.L., Tang Y., Qiu R. (2017) Studying soil development in ion-adsorbed REE mine tailings as tool to assess the sustainability of revegetation. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 9
4. Blanchart A., Séré G., Consales J.N., Schwartz C. (2017). Consideration of the soil in regional and local planning documents. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 9
5. Blanchart A., Séré G., Consales J.N., Schwartz C. (2017). How to enhance multidisciplinary work between urban planners and soil scientists?. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 9
6. Blanchart A., Stas M., Consales J.N., Séré G., Schwartz C. (2016). Prise en compte des services écosystémiques rendus par les sols dans les projets d'aménagement urbain. Présentation orale, Actes du Congrès, International symposium on Ecosystem services: their contributions and relevance in urban environments
7. Morel J.L., Séré G., Chenu C. (2016). Services écosystémiques rendus par les SUITMAS (Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas). Présentation orale, Actes du Congrès, International symposium on Ecosystem services: their contributions and relevance in urban environments
8. Séré G., Vidal-Beaudet L., Cannavo P., Damas O., Schwartz C. (2015). Aptitude de Technosols construits à l'aide de déchets à remplir des fonctions de filtre et d'échange. Présentation orale, Actes du Congrès, Journées Scientifiques du GFHN 2015
9. Stas M., Séré G., Fayolle G., Rodriguez D., Morel J.L., Schwartz C. (2015). How to integrate SUITMA potentials into urban planning to optimize ecosystem services – A Review. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 8
10. Tifafi M., Bouzouidja R., Ouvrard S., Séré G. (2015). How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the dynamics of the porosity of soils. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 8
11. Vidal-Beaudet L., Cannavo P., Rokia S., Séré G., Bataillard P., Joussein E., Schwartz C. (2015). Effect of wetting-drying cycles on the aggregation of Technosols constructed with urban wastes. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 8

12. Ylmaz D., Cannavo P., Séré G., Vidal-Beaudet L., Legret M., Damas O., Peyneau P.E. (2015). Physical fertility of structural soils constructed with waste materials for urban greening. Présentation orale, Actes du Congrès, SUITMA 8
13. Leguédois, S., Séré, G., Auclerc, A., Ouvrard, S., Watteau, F., Schwartz, C., Morel, J.-L. (2014). . Modélisation de la pédogenèse : application aux Technosols. Présentation orale, Actes du Congrès, 12e Journées d'Etude des Sols. Le sol en héritage
14. Séré G., Morel J.L., Cortet J., Gossiaux L., Guimont S., Schwartz C., 2014, Bilan et perspectives de l'encadrement réglementaire des pratiques de construction de sol pour réhabiliter des sites dégradés, Présentation orale, Actes du Congrès, 3ème Rencontre Nationale de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués ADEME
15. Huot H., Charbonnier P., Simonnot M.O., Séré G., Morel J.L., 2014, Gestion d'anciens bassins à boues par végétalisation, Présentation orale, Actes du Congrès, 3ème Rencontre Nationale de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués ADEME
16. Cortet J., Auclerc A., Béguiristain T., Charissou A.M., Chenot E.D., Corbel S., Cluzeau D., Hafeez F., Hedde M., Leyval C., Martin-Laurent F., Masfarau J.F., Nahmani J., Piron D., Schwartz C., Séré G., Villenave C., Watteau F., 2014, Biodiversité et fonctionnement d'un Technosol construit utilisé dans la restauration de friches industrielles : principaux résultats issus du projet Biotechnosol, Poster, Actes du Congrès, 3ème Rencontre Nationale de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués ADEME, 18-19 novembre
17. Leguédois, S., Séré, G., Cortet, J., Ouvrard, S., Watteau, F., Schwartz, C., Morel, J.-L., 2014. . Modelling Pedogenesis in the Anthropocene. Présentation orale, Actes du Congrès, 20th World congress of soil science. In Commemoration of the 90th Anniversary of the IUSS. Soils Embrace Life and Universe.
18. Rokia S., Vidal-Beaudet L., Séré G., Nehls T., Wessolek G., Damas O., Schwartz C. (2013). Soil construction with technogenic materials to recycle phosphorus for plant growth in cities. Présentation orale, Actes du Congrès, Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas. SUITMA 7
19. Cortet, J., Béguiristain, T., Charissou, A.-M., Chenot, E.-D., Corbel, S., Cluzeau, D., Hafeez, F., Hedde, M., Leyval, C., Martin-Laurent, F., Masfarau, J.-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 reclamation. Présentation orale, Actes du Congrès, Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas. SUITMA 7
20. Bouzouidja R., Séré G., Claverie R., Nuttens L., Lacroix D., Filippi R. (2013). Use of a high capacity retention structure to improve extensive green roof rainwater discharge. Présentation orale, Actes du Congrès, World Green Infrastructure
21. Watteau, F., Villemin, G., Bégin, J.-C., 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 fraction. Présentation orale, Actes du Congrès, Presented at 4th International Congress of the European Soil Science Societies. Eurosoil 2012: soil science for the benefit of mankind and environment
22. Séré, G., Watteau, F., Ouvrard, S., Schwartz, C., Morel, J.-L. (2012). . Multi-scale approach of the structure evolution of constructed technosols during early pedogenesis. Studying pedogenic processes in the Anthropocene. Présentation orale, Actes du Congrès, 4th International Congress. Eurosoil 2012. Soil Science for the Benefit of Mankind and Environment
23. Schwartz, C., Cortet, J., Laurent, F., Morel, J.-L., Séré, G., Guimont, S., Renat, J.-C., Bataillard, P., Guérin, V., Leyval, C., Damas, O., Simonnot, A.-O. (2012). La refunctionalisation écologique des sols par la revégétalisation : une autre manière d'utiliser le végétal. Présentation orale, Actes du Congrès, Phytotechnologies appliquées aux sols pollués. Journée technique nationale.
24. Schwartz, C., Séré, G., Cortet, J., Watteau, F., Ouvrard, S., Leguédois, S., Morel, J.-L. (2011). . Le génie pédologique au service d'une refunctionalisation écologique d'espaces urbains dégradés. Présentation orale, Actes du Congrès, Communications des 6es Rencontres du Végétal

25. Séré G., Ouvrard S., Pey B., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2010, Confrontation of experimental & in situ pedogenesis of a constructed Technosol: Minerals weathering and leaching, Présentation orale, Actes du Congrès, Ecotrons & Lysimeters
26. Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Guimont S., Renat J.C., Morel J.L., 2009, Développement du génie pédologique : requalification de sites dégradés par construction de sol, Présentation orale, Actes du Congrès, 2èmes Rencontres Nationales de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués – ADEME
27. Schwartz C., Séré G., Sirguy C., Ouvrard C., Renat J.C., Simonnot M.O., Morel J.L., 2008, Gestion intégrée du traitement et valorisation des sols industriels traités, Présentation orale, Actes du Congrès, Colloque « Remèdes ciblés pour une décontamination maîtrisée des sols »
28. Sauvage C., Séré G., Renat J.C., Schwartz C., 2007, Evaluation de la fertilité d'un Anthropeol construit, Présentation orale, Actes du Congrès, Journée Nationale d'Etude du Sol
29. Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2007, Confrontation of Experimental modelling of constructed soils pedogenesis with in situ data, Présentation orale, Actes du Congrès, Conférence SUITMA 2007
30. Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2006, Ecological assessment of a constructed soil on degraded sites, Présentation orale, Actes du Congrès, Congrès Mondial de Science du Sol 2006
31. Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.C., Morel J.L., 2006, Early stages of the pedogenesis of constructed soils, Présentation orale, Actes du Congrès, Workshop on modelling of pedogenesis
32. Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Payet C., Renat J.C., Morel J.L., 2005a, Soil reconstitution on industrial wasteland using urban wastes and industrial by-products, Présentation orale, Actes du Congrès, Conférence WasteEng 05
33. Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2005b, Effectiveness and environmental impact of a soil reconstitution process on degraded site, Présentation orale, Actes du Congrès, Conférence SUITMA 2005
34. Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Payet C., Renat J.C., Morel J.L., 2005, Evolution d'un technosol issu d'un procédé de réhabilitation de friche industrielle – Impacts sur la dynamique des polluants et la qualité des eaux, Présentation orale, Actes du Séminaire, Séminaire Ecole Doctorale RP2E

10.1.8. Posters avec actes de congrès

1. Mourot G., Séré G., Marx B., Leguédou S., Ragot J. (2015). Mise en évidence de l'effet de la végétation sur l'hydrodynamique d'une gamme de Technosols. Poster, Actes du Congrès, Journées Scientifiques du GFHN 2015
2. Bouzouidja R., Galzin V., Rousseau G., Claverie R., Lacroix D., Séré G. (2015). Green roof aging or Isolatic Technosol's pedogenesis? Impact on hydrologic performances. Poster, Actes du Congrès, SUITMA 8
3. Watteau F., Bégin J.C., Huot H., Séré G., Morel J.L. (2015). Micropedology to understand Technosol functioning: technogenic substrates on thin sections. Poster, Actes du Congrès, SUITMA 8
4. Leguedois, S., Watteau, F., Auclerc, A., Morel, J.-L., Schwartz, C., Séré, G., Echevarria, G. (2015). Technosols of Mining and Quarrying Areas: Toward Multifunctionality. In: Mineral resources in a sustainable world. Poster, Actes du Congrès, 13th Biennial SGA Meeting, Nancy, FRA
5. Tifafi M., Bouzouidja R., Ouvrard S., Séré G., 2014, Hydropédologie d'une gamme de sols au sein d'un gradient d'anthropisation, Poster, Actes du Congrès, Journées Scientifiques du GFHN
6. Leguédou S., Séré G., Cortet, J., Ouvrard, S., Morel, J.-L., Watteau, F., Schwartz, C. (2013). . Modelling pedogenesis in the anthropocene. Poster, Actes du Congrès, Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas
7. Rokia S., Séré G., Deeb M., Béchet B., Legret M., Chenon P., Grandmougin B., Guimont S., Nehls T., Damas O., Schwartz C., Vidal-Beaudet L. (2013). Indicators for the optimization of soil construction processes for green landscaping. Poster, Actes du Congrès, Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas SUITMA 7

8. Bouzouidja R., Séré G., Claverie R., Lacroix D., (2013). 1-D modelling of hydrodynamic and water retention performance of a green roof. Poster, Actes du Congrès, World Green Infrastructure
9. Cortet, J., Béguiristain, T., Charissou, A.-M., Chenot, E.-D., Corbel, S., Cluzeau, D., Hedde, M., Leyval, C., Masfarau, J.-F., Martin, F., Nahmani, J., Piron, D., Schwartz, C., Séré, G., Villenave, C., Watteau, F. (2012). Early colonization of a constructed Technosol by soil organisms after industrial site rehabilitation. Poster, Actes du Congrès, Presented at XVI ICSZ - International Colloquium on Soil Zoology
10. Leguédois, S., Morel, J.-L., Cortet, J., Ouvrard, S., Séré, G., Watteau, F., Schwartz, C. (2012). . A guideline for the development of an integrated and dynamic model of soil-plant system evolution. Poster, Actes du Congrès, 4th International Congress. Eurosoil 2012. Soil Science for the Benefit of Mankind and Environment
11. Watteau F., Villemin G., Bouchard A., Monsérié M.F., Séré G., Schwartz C., Morel J.C., 2010, Biological activity in Technosols as a key factor of their structure, Poster, Actes du Congrès, European Geosciences Union
12. Renat J.C., Séré G., Guimont S., 2007, Expérimentation lorraine d'épandage sylvicole de sous-produits papetiers, Poster, Actes du Congrès, Colloque Epandage de produits résiduels sur parcelles boisées
13. Séré G., Schwartz C., Ouvrard S., Renat J.C., Morel J.L., 2006, Early pedogenic evolution of a constructed soil, Poster, Actes du Congrès, Congrès Mondial de Science du Sol
14. Séré G., Schwartz C., Florentin L., Renat J.C., Morel J.L., 2005, Description and evolution of technosols, Poster, Actes du Congrès, Conférence SUITMA 2005
15. Lefort C., Séré G., Schwartz C., Morel J.L., 2005, Stabilisation of residual metallic pollution of industrial polluted soils by soil reconstitution, Poster, Actes du Congrès, Conférence SUITMA 2005

10.2. Activités d'enseignement

10.2.1. ENSAIA

La majorité de mes activités d'enseignement se déroule à l'ENSAIA (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires).

J'y intervins tout d'abord dans le cadre du service d'enseignement « Sciences du Sol » en première et deuxième année. Je suis en particulier responsable du module de la filière agronomie de 2A « Eau dans les agrosystèmes ». J'y assure aussi bien des cours magistraux que des travaux dirigés. J'interviens également dans les modules de la filière agronomie de 1A « Diversité et évolution des sols » et « Fertilité des sols » où j'assure des travaux pratiques et des sorties sur le terrain ; j'assure un cours magistral dans le module de la filière agronomie de 2A « Services Ecosystémiques Rendus par l'Agriculture ». J'ai tutoré pendant cinq années des projets pro de 1A sur les thématiques suivantes : « Arbre en ville : quelles innovations pour la plantation », « Diversification végétale des espèces utilisées en toitures végétalisées extensives », « Textile et remédiation des sols », « Obtention du label Ecole Equitable pour l'ENSAIA » et « Création d'un réseau d'acteurs du Commerce Equitable ». Je participe depuis 2011, en tant que représentant de l'ENSAIA, à l'encadrement de l'évènement « 48 Heures pour faire émerger des idées® » dont l'initiative revient à l'ENSGSI. Cette opération est dédiée à la formation aux méthodes de pilotage de l'innovation des entreprises les plus innovantes. Elle regroupe plus de 200 étudiants sur le site de Nancy, dont 10 à 15 étudiants de l'ENSAIA.

J'ai été sollicité par la direction de l'ENSAIA pour créer un nouveau module en 2012. Il s'intitule « Développement Durable et responsabilité Sociétale des Entreprises » et s'adresse aux étudiants de 1A de tronc commun. Outre la conception de la maquette et la définition des intervenants, la création de ce module a été pour moi l'occasion de développer un fonctionnement en atelier pour les étudiants. Ceux-ci se sont concrétisés par l'organisation de Journées du Développement Durable à l'ENSAIA en 2013 et 2014 sur les thèmes suivants : « Imaginer la ville sans déchet » et « Alimentation et Développement Durable ». Ces premières éditions ont été l'occasion pour les étudiants de présenter le

résultat de leurs travaux en ateliers sous la forme de stand ouverts au grand public. J'ai ensuite contribué à faire évoluer cette formule pour proposer une Semaine du Développement Durable à l'ENSAIA. La production des étudiants se traduit désormais par la création de contenus web mis en ligne sur les réseaux sociaux de l'ENSAIA. L'édition 2015 traitait de « Agriculture et Développement Durable » et l'édition 2016 des « Ressources de Demain ».

Je suis, depuis 2014, co-responsable avec Christophe Schwartz de la spécialisation de 3A « Sciences et Génie de l'Environnement ». Outre des responsabilités de modules d'enseignement « Requalification des sites dégradés : outils de diagnostic », « Requalification des sites dégradés : procédés de traitement », « Territoires urbains et aménagement » et « Gestion de l'environnement dans l'industrie », j'assure également des enseignements sous la forme de cours magistraux, de travaux dirigés et de sorties dans les modules « Ressources Agronomie et Environnement », « Paysage Couverture Pédologique et Biodiversité », « Biotechnologies Environnementales, Concepts et Applications » et « Fonctionnement et Qualité des Cours d'Eau ». Christophe Schwartz et moi avons initié en 2014 la tenue de l'atelier « Regards croisés agronome – paysagiste sur un cas d'étude ». Il se déroule pendant une semaine et se fonde sur la rencontre de nos étudiants de 3A SGE avec des étudiants de dernière année de l'Ecole Nationale Supérieure du Paysage Versailles – Marseille.

10.2.2. Autres formations

J'interviens depuis 2009 à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie en 2A dans le cadre du module « Formations Superficielles et Pédologie », sous la forme de travaux dirigés et d'une sortie terrain.

J'interviens depuis 2014 au CPP - La Prépa Nancy - Collegium L-INP auprès des étudiants de 2A du Thème Biologie où je suis responsable de deux modules d'enseignement « Eau et Environnement » et « Introduction à la Science du Sol ». J'y effectue des cours magistraux, des travaux dirigés, des travaux pratiques et des sorties terrain. Depuis 2015, je participe également au jury d'évaluation des stages de fin de cursus.

Par ailleurs, je donne des cours magistraux dans les formations suivantes : Mastère déchets (GEDE) de l'École des Mines (19h), Domaine d'Approfondissement Gestion des Milieux Naturels d'AgroParisTech (2h). Je suis intervenu par le passé auprès du Master « Sciences et politiques de l'environnement » de l'Université Pierre et Marie Curie et Institut d'Etudes Politiques de Paris (3h) et du Master « Environnement et Aménagement » de Metz (Université de Lorraine) (7h).

10.3. Activités administratives et animation du collectif

- | | |
|-------------|---|
| 2012 - 2017 | Membre de l'équipe de direction de l'ENSAIA au titre de Responsable Développement Durable |
| 2015 | Membre du jury de recrutement d'un Maître de Conférences AgroCampus Ouest (Centre d'Angers) |
| depuis 2015 | Membre du Comité de Pilotage de la Station d'Homécourt (GISFI) |
| depuis 2017 | Membre du Comité Directeur de l'ENSAIA au titre de Chargé de Mission Développement Durable et Relations partenariales avec les entreprises dans le domaine de l'environnement |
| depuis 2018 | Co-animateur de l'axe « Optimisation des Services Ecosystémiques Rendus par les SUITMAs » du LSE ; membre du Comité de Direction et du Comité Scientifique du LSE ; Animateur « Partenariats, valorisation et innovation » auprès du Directeur du LSE |