



HAL
open science

Réduire le coefficient de ruissellement du sol à l'échelle des projets urbains en construisant des technosols

David Eono

► **To cite this version:**

David Eono. Réduire le coefficient de ruissellement du sol à l'échelle des projets urbains en construisant des technosols. Géotechnique. 2021. dumas-03455310

HAL Id: dumas-03455310

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03455310v1>

Submitted on 29 Nov 2021

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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

MÉMOIRE D'INGÉNIEUR

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPECIALITÉ : Bâtiment et travaux publics

OPTION : Aménagement et environnement

Par

David EONO

*Réduire le coefficient de ruissellement du sol à l'échelle des projets
urbains en construisant des technosols*

Soutenu le 03 mai 2021

JURY

PRÉSIDENT : Olivier FOUCHÉ-GROBLA Enseignant responsable du parcours A&E en spécialité BTP

MEMBRES :

Mme Sarah BENAKLI Enseignant-chercheur en Génie civil

M. Jérôme BRUN Chef de projet en SIG et Open data, ingénieur Cnam

M. Alain PHILIPPE Entrepreneur en BTP et VRD, ingénieur Cnam

M. Dominique RICHARD Gérant de société, négoce de matériaux et mélanges terreux

Ce document doit être cité comme suit :

EONO David (2021). *Réduire le coefficient de ruissellement du sol à l'échelle des projets urbains en construisant des technosols*. Mémoire d'ingénieur – BTP, Aménagement & Environnement. Le Cnam, 185 p. + annexes.

Remerciements

À l'heure où je rédige ces remerciements, je suis confiné chez moi depuis 4 semaines, j'ai une pensée particulière pour toutes les familles qui ont été touchées par la maladie et tiens à remercier toutes les personnes qui œuvrent pour que chacun puisse à nouveau retrouver une vie normale.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à M. Olivier Fouché, responsable du diplôme, pour son soutien et ses encouragements, les longues discussions et les échanges très riches dans le cadre de mon projet qui m'ont permis de préciser progressivement le sujet de mon mémoire.

Je tiens à remercier Dominique Richard de la Société RICHARD et Fils pour m'avoir accueilli et pour m'avoir fait confiance en me proposant de travailler sur les limons d'excavation de Saclay. Grâce à lui, ce mémoire a pu s'appuyer sur une expérimentation de terrain.

Je remercie aussi Ghada Snoussi qui participe à mon projet avec qui j'ai pu échanger sur le sujet du devenir des terres d'excavation et qui a réalisé les essais géotechniques sur le limon de Saclay.

J'en profite pour remercier Hanane Aroui de l'IRD qui a pris de son précieux temps pour m'accueillir à Bondy.

Enfin, je remercie de tout mon cœur ma famille, Maud, Eva et Ethan qui au cours des 5 dernières années, malgré les week-ends sacrifiés et les nombreuses heures enfermées dans mon bureau, m'a toujours soutenu tout au long de cette formation d'ingénieur.

Liste des abréviations

AA : agglutination anticyclonique
AFES : association française d'étude des sols
AEP : alimentation en eau potable
AMP : anticyclone mobile polaire
BAL : ballast
Br : brique
BRGM : Bureau des recherches géologiques et minières
BSR : bassin de stockage restitution
BV : bassin versant
BVH : bassin versant hydrologique
CAUE : conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement
CAH : complexe argilo-humique
CEC : capacité d'échange cationique
CIL : cité internationale (de Lyon)
CITE : crédit d'impôt transition énergétique
CO : compost de déchets verts
COS : coefficient d'occupation des sols
COT : carbone organique total
DRIEE : direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie
Eco-PTZ : éco-prêt à taux zéro
EH : équivalent habitant
ENAF : espaces naturels, agricoles ou forestiers
EPA : établissement public d'aménagement
ETP : évapotranspiration potentielle
ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement
ICU : îlot de chaleur urbain
IGN : institut national de l'information géographique et forestière
INHP : institut national d'horticulture et de paysage
INRA : institut national de recherche agronomique
IOTA : installations, ouvrages, travaux et activités
Li : limon
MES : matières en suspension
MO : matière organique
MOF : matière organique fraîche
MTP : mélange terre pierre
OCS GE : occupation des sols à grande échelle
PLU : plan local d'urbanisme
RU : réserve utile
SCoT : schéma de cohérence territoriale
SDAGE : schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SAGE : schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SH : scories de houille
SRCE : schéma régional de cohérence écologique
TV : terre végétale
TVB : trame verte et bleue
USDA : *United States Department of Agriculture*
VNF : Voies navigables de France
WRB : *World reference base for soil resources*

Table des matières

I Contexte : le Grand Paris, un chantier d'envergure inédite aux multiples facettes	5
.....	
I.1 LE GRAND PARIS, SES PRINCIPAUX VOILETS ET SON AVANCEMENT	6
I.2 LES CONSEQUENCES DE LA CRISE ACTUELLE SUR LE PROJET	10
I.3 LES TUNNELS DU GRAND PARIS ET LA PROBLEMATIQUE DES TERRES EXCAVEES.....	13
II Note documentaire : les technosols, le ruissellement, l'urbanisation et quelques autres aspects du problème	21
.....	
II.1 SERVICES RENDUS PAR DES TECHNOSOLS : CAS DE LA REDUCTION DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN ...	22
II.2 L'ARTIFICIALISATION : CAUSES, ENJEUX, LEVIERS DU CHANGEMENT	28
II.3 UN PARADOXE : LA PRESSION A L'URBANISATION, SOURCE D'ETALEMENT URBAIN ET DE PERIURBANISATION	31
II.4 LES REPONSES TECHNIQUES APPORTEES AU RUISSellement	32
II.5 DES EXIGENCES ENVIRONNEMENTALES RENFORCEES, REGLEMENTATION	34
II.6 « IMPERMEABILISATION » : SA MESURE ET SA CARTOGRAPHIE	40
II.7 LE RUISSellement : DEFINITION ET LIEN AVEC L'IMPERMEABILISATION	47
II.8. LES FACTEURS PHYSIQUES ENTRANT EN COMPTE DANS LE RUISSellement	51
II.9 LES EQUATIONS HYDRAULIQUES APPLICABLES A MON PROJET	56
II.10 L'APPORT DES VEGETAUX, DES HAIES ET FASCINES A LA REDUCTION DU RUISSellement	60
II.11 PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL, ESSAIS D'IDENTIFICATION	66
II.12 CLASSIFICATION DES SOLS SELON LE WRB : WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES	68
II.13 LA PEDOGENESE	71
II.14 L'UTILITE DES FONCTIONS DE PEDOTRANSFERT POUR DETERMINER DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	72
III Un projet de valorisation des terres excavées : travaux réalisés avec le limon de Saclay	83
.....	
III.1 LES LIMONS DE SACLAY : GESTION, PROPRIETES, FOSSE PEDOLOGIQUE	83
III.2 LES RESULTATS D'ANALYSES DES LIMONS DE SACLAY.....	93
IV Les technosols, un outil prometteur pour améliorer l'aménagement des espaces publics	126
.....	
IV.1 LES DIFFERENTS TYPES DE TECHNOSOLS	126
IV.2 DONNEES, METHODES ET CONTRAINTES DE CREATION D'UN TECHNOSOL	130
IV.3 DETERMINATION DES HORIZONS DE TECHNOSOLS	133
V Les résultats	141
.....	
V.1 NOMBRE DE COMPOSANTES D'UN MELANGE PAR HORIZON	141
V.2 COMPOSITION DES HORIZONS	141
V.3 PREDICTION DES PROPRIETES DES MELANGES A PARTIR DE MODELES DE LA LITTERATURE POUR CONFIRMER LES ASSOCIATIONS AVANT LES ESSAIS.....	145
CONCLUSION.....	168
Perspectives	169
Bibliographie	172
Annexes	187

Liste des figures

Figure 1. Réseau Grand Paris Express en configuration « Nouveau Grand Paris » - Arbitrage du Gouvernement du 6 mars 2013 (Société du Grand Paris, 2015).....	7
Figure 2. Capacités de stockage identifiées par les partenaires de la Société du Grand Paris (Société du Grand Paris, 2017)	15
Figure 3. Température moyenne en Ile-de-France sur la période 1995-2001	23
Figure 4. Températures relevées du 18 au 20 août 2012, sur les stations du Bd Sébastopol (75001), du parc Montsouris (75014) et de Melun (77) (Alba et al., 2012)	23
Figure 5. Température de l'air à 2 m du sol à Paris le 10 août 2003 à 6h du matin.....	24
Figure 6. Densité bâtie de Paris et petite couronne (Alba et al., 2015).....	25
Figure 7. Clichés de thermographie infra-rouge : tramway T3 (Alba et al., 2012).....	25
Figure 8. Clichés de thermographie infra-rouge : bassin de l'arsenal (Alba et al., 2012)	26
Figure 9. Bilan des flux thermiques à la surface d'un sol (Thiers & Peuportier, 2007)	26
Figure 10. Domaine d'emploi des terres excavées au niveau 1 (Coussy et al., 2017).....	38
Figure 11. Carte de couverture du territoire par l'OCS GE au 1 ^{er} trim. 2019 (Cerema, 2019).....	45
Figure 12. Typologie des écoulements dans un bassin-versant (Plumelle et al., 2017).....	51
Figure 13. Évolution des proportions entre composantes de l'écoulement au cours d'une averse. D'après Réméniéras (1972) dans (Plumelle et al., 2017)	53
Figure 14. Profil hydrique du sol, a. Zonation du profil hydrique, b. Évolution du profil hydrique au cours de la progression du front d'humidification	53
Figure 15. Schéma d'un volume de sol.....	54
Figure 16. Schéma de principe du modèle de Bader (1994).	57
Figure 17. Représentation bidimensionnelle d'un élément hydrologique urbain (EHU) (Rodriguez et al., 2010).....	58
Figure 18. Schéma de circulation de l'écoulement de l'eau à travers des haies	65
Figure 19. Schéma de l'effet de frein des fascines sur le ruissellement.....	66
Figure 20. Estimation du débit spécifique par mètre de fascine ou de haie (l/s/m) en fonction de la probabilité de retour du débit de ruissellement de la surface du bassin versant de Bourville, en sol de limon (Ouvry et al., 2012).....	63
Figure 21. Typologie des technosols avec l'influence croissante de l'homme sur les sols	70
Figure 22. Schéma des cinq types d'évolution du limon éolien en climat tempéré (Duchaufour et al., 2018).....	72
Figure 23. Triangle de corrélation entre texture du sol et perméabilité (Xanthoulis, s. d.)	73
Figure 24. Triangle de détermination de la valeur de la RU en mm/cm (Vauthier, 2010)	76
Figure 25. Schéma de suivi des stocks des Limons à Saclay	86
Figure 26. Position de la fouille pédologique – Ecole Polytechnique, Saclay.....	87
Figure 27. Schéma de la géologie de Saclay (Cojean et al., 1982)	88
Figure 28. Corrélation entre la limite de liquidité W_L et l'indice de plasticité I_p	89
Figure 29. Fosse pédologique, Ecole Polytechnique, Saclay	91
Figure 30. Fosse pédologique, Ecole Polytechnique, Saclay : horizons des prélèvements	92
Figure 31. Morphologie de la coupe pédologique « zone humide »	93
Figure 32. Provenance des analyses de sols de la BD sols IDF	94
Figure 33. Sites de provenance des analyses de terres constituant la BD sols IDF	94
Figure 34. Triangle des textures USDA pour les données GIS Sol et BD sols IDF	96
Figure 35. Photo de stock de terre végétale à Saclay	97
Figure 36. Evolution des teneurs en MO, Ca^{2+} et argile au cours de l'incubation (d'après Gaiffe et al. 1984).....	80
Figure 37. Evolution de l'activité microbienne en fonction du pH (Capinov, 2020b)	101
Figure 38. Schéma du bilan humique en fonction du rapport C/N (Capinov, 2020b)	102

Figure 39. Triangle des textures USDA pour des individus rejetés des matrices de corrélation et pour l'ACP.	104
Figure 40. Matrice de corrélation des variables de la BD sols IDF	105
Figure 41. Analyse en composantes principales des variables issues de la BD sols IDF	106
Figure 42. Courbes granulométriques des limons de Saclay	111
Figure 43. Triangle de texture des 9 analyses issues de la BD sols IDF pour Saclay.....	111
Figure 44. Emplacement des piézomètres installés par le CEREMA (Berthier, 2018)	112
Figure 45. Boîte à moustache des analyses de terre de Saclay issues de la BD sols IDF	113
Figure 46. Boîte à moustache des analyses de terre de Saclay issues de la BD sols IDF	113
Figure 47. Boîte à moustache des analyses de terre de Saclay issues de la BD sols IDF	114
Figure 48. Graphique de comparaison des valeurs entre la médiane et la moyenne des terres de Saclay issues de la BD sols IDF	114
Figure 49. Courbe de régression linéaire appliquée sur les résultats des essais de perméabilité Guelph et Porchet (cf. tableau 20).....	121
Figure 50. Triangle de corrélation entre texture du sol et perméabilité (Xanthoulis, s. d.) ...	122
Figure 51. Mise en place de mélange terre-pierre	127
Figure 52. Mélange allégé (compost et laine de roche) en toiture du monoprix de Boulogne-Billancourt (Photos EONO David 2010)	128
Figure 53. Schéma entre les terme de pédologie et de génie civil (D. Baize et al., 2018).....	129
Figure 54. Réalisation d'une chaussée perméable en pavés de béton posés sur une structure en grave drainante et mélange micro-terre pierre (rue du Château-du-Loir, à Courbevoie (Photos EONO David, 2009)	129
Figure 55. Schéma de synthèse de sélection des matériaux (Rokia, 2014).....	132
Figure 56. Fosse pédologique creusée par Sol Paysage dans le cadre de la synthèse thématique des Sols de la CIL pour des fosses de plantation (Sol Paysage, 2013)	134
Figure 57. Plan de la Cité internationale de Lyon, zone amont (Sol Paysage 2013)	135
Figure 58. Fosse pédologique creusée par Sol Paysage dans le cadre de la synthèse thématique des Sols de la CIL pour les horizons profonds (Sol Paysage, 2013).....	135
Figure 59. Fosse pédologique creusée par Sol Paysage dans le cadre de la synthèse thématique des Sols de la CIL pour les horizons de surface (Sol Paysage 2013).....	136
Figure 60. Horizons envisagés dans (Cortet, 2013)	137
Figure 61. Technosols créés à partir de produits résiduaire urbains.....	138
Figure 62. Horizons proposés dans le cadre de mon projet	139
Figure 63. Courbe granulométrique des matériaux entrant dans la composition des technosols (cf. Annexe 21 : Données des courbes granulométriques).....	147
Figure 64. Triangle des textures - Association limon et brique	148
Figure 65. Triangle des textures Association limon et scories de houille.....	149
Figure 66. Triangle des textures association limon et compost	150
Figure 67. Triangle des textures association limon et ballast	151
Figure 68. Triangle des textures association du limon, compost et brique	152
Figure 69. Triangle des textures association du limon, compost et ballast.....	153
Figure 70. Triangle des textures association du limon, compost et scories de houille	154
Figure 71. Diagramme des phases du sol (Plumelle et al., 2017)	156
Figure 72. Valeurs de la CEC (Wiki Auréa, 2016)	162
Figure 73. Planche d'essais de la société RICHARD	170
Figure 74. Schéma de la disposition des planches d'essais.....	170
Figure 75. Schéma de principe d'une planche d'essais.....	171

Liste des tableaux

Tableau 1. Coefficient d'imperméabilisation (Bourrier et al., 2010).....	50
Tableau 2. Comparaison des résultats de hauteur d'eau en fonction des coefficients de Manning (Ouvry et al., 2012).....	59
Tableau 3. Valeurs des paramètres de l'équation.....	65
Tableau 4. Efficacité des ouvrages de type haie ou fascine. Ici, dans la colonne 2, c'est l'inverse du coefficient de Manning qui est utilisé : $n = 1/M_s$ (d'après Ouvry et al. 2012)	66
Tableau 5. Capacité d'infiltration moyenne (en mm/h) pour quatre catégories de sol définies par leur texture et selon le couvert végétal (Gray 1972).....	61
Tableau 6. Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents types de sols (Musy & Soutter, 1991)	73
Tableau 7. Fonction de pédotransfert pour prédire BDm0 avec CO, MO, A et L en fraction massique (Daudin, 2019).....	75
Tableau 8. Fonction de pédotransfert pour prédire Ksat (Daudin, 2019).....	75
Tableau 9. Relation entre surface spécifique Ss et la CEC pour les classes texturales principales (Nasri, 2013)	78
Tableau 10. Catégories des classes texturales (Nasri, 2013).....	79
Tableau 11. Valeurs du coefficient K2 (Collaud, 2014)	81
Tableau 12. Erreurs relatives et absolues observées par « méthode pipette » et tamisage pour la détermination des textures (Denis Baize, 2018).....	98
Tableau 13. Résultats des essais d'identification sur le limon de Saclay	109
Tableau 14. Épaisseurs des formations géologiques rencontrées dans les piézomètres réalisés par le CEREMA (Berthier, 2018)	112
Tableau 15. Moyenne et médiane des analyses de sols des limons de Saclay	115
Tableau 16. Moyenne et médiane des analyses de sols des limons de Saclay	115
Tableau 17. Comparaison des valeurs en éléments traces de SACLAY BD sols IDF	115
Tableau 18. Détermination du type d'argile en fonction de la CEC – Miller et Wolf (1975).....	116
Tableau 19. Synthèse des essais de perméabilité réalisés sur la ZAC du Moulon, Saclay (Berthier et al., 2018)	118
Tableau 20. Synthèse des essais de perméabilité par les méthodes de Guelph et Porchet (Nasri, 2013).....	120
Tableau 21. Tableau des valeurs caractéristiques de conductivité hydraulique usuelles en milieu saturé (Wikhydro, 2014)	123
Tableau 22. Tableau de synthèse des matériaux et du potentiel de réutilisation dans le BTP à l'échelle du projet (Société du Grand Paris, 2015)	124
Tableau 23. Tableau de perception des matériaux suivant la liste ADEME SITERRE (notation David EONO).....	133
Tableau 24. Tableau de positionnement des matériaux parents au sein des horizons	142
Tableau 25. Mélanges préconisés pour le projet	143
Tableau 26. Mélanges témoins utilisés en aménagement paysager	144
Tableau 27. Combinaisons des mélanges du projet	145
Tableau 28. Combinaisons des mélanges témoins	145
Tableau 29. Association limon et brique.....	148
Tableau 30. Association limon et scories de houille.....	149
Tableau 31. Association limon et compost	150
Tableau 32. Association limon et ballast	151
Tableau 33. Association limon, compost et brique	152
Tableau 34. Association du limon, compost et ballast.....	153
Tableau 35. Association du limon, compost et scories de houille	154

Tableau 36. Classification géotechnique des matériaux parents.....	155
Tableau 37. Classification géotechnique des mélanges	157
Tableau 38. Tableau d'évaluation des indicateurs de pédotransfert	161
Tableau 39. Détermination de la perte annuelle d'humus sur les mélanges	164

Table des annexes

Annexe 1. Principales procédures du code de l'environnement pour lesquelles la séquence ERC s'applique (Alligand et al., 2018).....	186
Annexe 2. Plan biodiversité	188
Annexe 3. Principe de réduction des écoulements superficiels par infiltration	190
Annexe 4. Code de l'environnement Installations classées pour la protection de l'environnement	191
Annexe 5. Liste des valeurs seuils de niveau 1 pour les éléments traces et composés organiques persistants	193
Annexe 6. Liste des valeurs seuils de niveau 1 pour les substances organiques.....	193
Annexe 7. Liste des valeurs de niveau 2 et 3 pour les composés organiques en (mg/kg)	194
Annexe 8. Artificialisation des sols par région administrative (avant 2017)	194
Annexe 9. Carte de la France « Progression de l'imperméabilisation »	195
Annexe 10. Carte d'infiltrabilité du Conseil Général 92	196
Annexe 11. Localisation des 27 Cartes d'infiltrabilité réalisées en France	197
Annexe 12. Relation entre l'accroissement des débits annuels et le taux de déboisement	198
Annexe 13. La nomenclature des technosols suivant le WRB.....	199
Annexe 14. Nomenclature des horizons pédologiques	201
Annexe 15. Liste des horizons de référence du Référentiel pédologique Français 2008 (D. Baize & Girard, 2009).....	203
Annexe 16. Commande R pour la création de la carte de provenance des terres la BD sols IDF (Library SoilTexture).	207
Annexe 17. Commande R pour la création des Triangles de Textures (Library SoilTexture).	208
Annexe 18. Triangle de textures BD sols IDF	212
Annexe 19. Commande R pour la création des Matrices de corrélations	213
Annexe 20. Commande R pour la réalisation de l'analyse en composantes principales.	213
Annexe 21. Tableau des matériaux	214
Annexe 22. Données des courbes granulométriques.....	215
Annexe 23. Poster présentation SimHydro 2019 (Eono & Fouché, 2019)	216
Annexe 24. Fiche Scories 5/25 RICHARD.....	217
Annexe 25. Fiche Ballast 20/40 RICHARD	218
Annexe 26. Données d'entrées pour le calcul des FPT.....	219
Annexe 27. Données d'entrées pour le calcul des FPT.....	220

Introduction

Le sol, qu'il soit artificialisé ou non, est un élément constitutif de notre environnement présent dans tout aménagement : routier, immobilier, urbain, infrastructures vertes. Une des difficultés pour se comprendre mutuellement réside dans la nomenclature, chaque filière économique ayant son propre langage pour définir un sol ou un technosol. Les sols rencontrés au sein des infrastructures paysagères découlent de la pratique des entreprises de génie du paysage et des concepteurs paysagers ayant une vision du sol issue de l'agriculture. Dans ce mémoire, je travaillerai à partir des définitions des pédologues, notamment celles de la nomenclature internationale, World Reference Base for Soil Resources, ou celles du référentiel pédologique français. Il conviendra de définir les usages des sols ainsi que leurs fonctions écosystémiques. L'artificialisation des sols est un processus perçu comme une problématique contemporaine née dans les méandres de l'urbanisation. Pour l'appréhender dans son ensemble, il faut pourtant remonter aux éléments de contexte qui l'ont influencé ainsi que son évolution dans le temps. La recherche de solutions contre ce phénomène appelé de nos jours de façon très discutable « imperméabilisation », en vue de limiter les risques associés dans les aménagements locaux, nécessite de l'appréhender sous plusieurs angles. Les outils qui sont à la disposition des pouvoirs locaux pour le maîtriser sont parfois très anciens. En réalité, l'artificialisation des sols est un phénomène anthropique apparu avec la sédentarisation des humains au Néolithique quand les populations commencèrent à se regrouper en noyaux familiaux et tribaux pour esquisser les villages qui deviendront plus tard nos villes et centres urbains. Historiquement, avec la naissance de l'État, la menace du ruissellement devint très tôt un enjeu de sécurité collective géré par les pouvoirs publics avec des solutions impulsées par l'outil législatif. Dès la découverte de l'agriculture au Néolithique, l'homme se fixa sur des terres qu'il ne faisait jusqu'alors que traverser et il ne cessera de rechercher les meilleurs sites de production qui lui permettront à la fois de s'alimenter en eau et d'irriguer ses cultures. Les cours d'eau furent une réponse à ses besoins en même temps que la première source de risque. Pendant l'Antiquité, les bâtisseurs à différentes époques se penchèrent sur les principes de dimensionnement des ouvrages de collecte ou d'évacuation d'eaux pluviales. L'apparition de l'irrigation chez les Sumériens (Pays de Sumer, Noyau Levantin) s'accompagna d'innovations transformant l'habitat, jusqu'alors composé de huttes, en maisons rectangulaires, ce qui aboutit à la création des premières villes (Viollet, 2004). La présence de l'eau, pour la vie et pour les transports, était nécessaire à la création des villes afin d'assurer leur prospérité. Cette proximité est à l'origine des premières mesures de prévention contre le risque d'inondation.

Les techniques d'ouvrages hydrauliques vont alors s'améliorer au fil des siècles pour lutter contre les inondations, tandis que les risques vont aller en croissant avec la densification de l'habitat dans les vallées et la mécanisation de l'agriculture sur les coteaux. Cette spirale vicieuse va se resserrer jusqu'à la prise de conscience récente que l'aménagement des cours d'eau ne permet pas à l'infini de gérer la croissance du ruissellement sous l'effet des surfaces scellées ou drainées.

Quel effet sur le ruissellement peuvent avoir les ouvrages hydrauliques urbains ? Quel apport en termes de techniques alternatives doit-on attendre dans la gestion des projets aujourd'hui ? Peut-on reproduire à une échelle suffisante des technosols ayant des fonctions écosystémiques comparables aux anciens sols disparus ? Ce sont des questions auxquelles il n'y a pas de réponse simple. Outre la nécessité dans chaque cas de réfléchir aux objectifs particuliers que l'on se fixe, il peut sembler que, dans l'ensemble, la gestion du ruissellement reste une affaire de dimensionnement de bassin et d'aménagement paysager. Aujourd'hui, les aménageurs prennent en compte la gestion du ruissellement dans la définition de leurs projets, en intégrant les recommandations en matière d'urbanisme liées au Plan Local d'urbanisme et le cadre imposé par la Police de l'Eau et le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Dès lors, il s'agit de réfléchir à la vocation des aménagements et de peser, avant toute intervention, les différents enjeux auxquels ils doivent répondre et les risques qu'ils encourent ou aggravent.

Si les collectivités locales sont devenues des acteurs majeurs de la gestion du ruissellement, elles ne sont pas les seules responsables de sa mise en œuvre. Il faut une implication de tous les groupes socio-économiques et une approche intégrée du phénomène. La réalisation effective des objectifs de réduction du ruissellement pour une protection de la population ne peut aboutir que si l'ensemble des acteurs de la société agissent en commun : les entreprises privées, publiques, les associations, les ONG, les syndicats, les citoyens, ainsi que les scientifiques. Conscients que l'aménagement est partout un élément indispensable de la qualité de vie des populations, dans les milieux urbains et dans les campagnes, les acteurs de l'aménagement, publics comme privés, s'accordent d'ailleurs à reconnaître l'insuffisance des solutions existantes pour gérer les risques environnementaux.

L'idée de ce mémoire vient, en premier lieu, de mon intérêt professionnel pour la problématique du ruissellement et de mon approche paysagère de l'artificialisation des sols, qui jusqu'à mon intégration au Cnam n'était qu'empirique. À la lumière de mes nouvelles compétences, je prends aujourd'hui la mesure de la complexité du sujet qui ne se limite pas à positionner tel ou tel végétal ou ouvrage dans le sol. Il s'agit maintenant pour moi de mettre à profit mon

expérience de terrain et de la coupler avec une approche scientifique pour affiner ma méthodologie d'aménagement. J'étais en besoin d'un projet qui me soit utile dans mes fonctions, ayant moi-même un bureau d'études traitant de l'aménagement urbain. J'ai souhaité participer au développement de nouvelles techniques de gestion du ruissellement associant la création de technosols à partir de terres issues de terrassement et des végétaux. Souhaitant que le fruit de ma réflexion puisse aussi être utile j'ai intégré un projet de recherche intitulé « Matériaux minéraux mis en œuvre – des tunnels aux infrastructures végétalisées – et valorisation de l'énergie et des sols » (MMOTIVVÉS). Dans ce cadre, je propose une nouvelle vision du sol, le promouvant comme un des outils de gestion des eaux de ruissellement pour les collectivités et les praticiens ainsi qu'un outil pour la maîtrise hydraulique et thermique du microclimat urbain.

Cette approche prend en compte les enjeux du développement durable. Elle permettra de réutiliser les matériaux issus des déblais pour en faire du remblai mais aussi de réfléchir à leur utilisation dans le cadre de filières courtes pour reconstituer des sols permettant l'implantation de cultures tout en y associant une gestion du ruissellement. Il s'agira d'adapter ce « technosol » en fonction des contraintes d'environnement. Celui-ci aura aussi une fonction écologique forte puisqu'il participera à la réduction de l'îlot de chaleur et à la conservation du biotope local. Le projet MMOTIVVÉS réfléchit à la réutilisation partielle des matériaux excavés provenant des chantiers du Grand Paris qui constitue un projet d'envergure aux multiples facettes.

Dans ce mémoire, on cherche donc à définir une méthodologie pour la création de technosol destiné aux infrastructures végétalisées urbaines. Les critères sont des propriétés hydrauliques, physiques et chimiques du sol en fonction de sa destination.

Le premier chapitre présente le contexte du mémoire. La première partie rappelle l'origine et l'avancement des travaux d'aménagement du Grand Paris et fait un point prospectif sur les conséquences de la crise actuelle, dite du Covid-19. La seconde partie présente la problématique des terres excavées liée aux projets de creusement au tunnelier du Grand Paris et rend compte d'une réflexion récente fondée sur des scénarios concernant l'artificialisation des sols.

Le deuxième chapitre est consacré à la recherche bibliographique qui permet d'identifier le contexte réglementaire de la gestion des déblais, de mieux comprendre le phénomène « d'imperméabilisation » des sols à travers ses causes sociétales et environnementales pour le démystifier et en saisir les vrais enjeux, et enfin de maîtriser les moyens juridiques à disposition des acteurs de l'aménagement pour aborder ce phénomène.

Le chapitre trois constitue le cœur du mémoire portant sur l'aménagement du plateau de Saclay et la problématique des terres décapées et des terres excavées. La première partie présente l'avancée de l'opération d'aménagement. La deuxième partie présente la base de données Sols IDF créée sur les terres de l'agglomération parisienne et l'extraction de données applicables aux limons de Saclay renforcées d'analyses complémentaires.

Le chapitre quatre est consacré à la question de la réutilisation des terres à travers plusieurs approches dont celle des technosols qu'il serait possible de créer à partir des limons de Saclay. Enfin, le chapitre cinq présente les résultats obtenus sur les scénarii d'assemblage de matériaux constitués à partir des limons de Saclay, afin de déterminer les meilleures caractéristiques pour créer les futurs technosols. L'étude est complétée par une approche prédictive de constitution de technosols qui participeraient à la réduction du ruissellement par l'augmentation du temps de concentration de l'eau des bassins versants urbains.

I Contexte : le Grand Paris, un chantier d'envergure inédite aux multiples facettes

En 2007, le projet du Grand Paris voit le jour avec pour ambition de transformer Paris et sa région afin de confirmer son statut de grande métropole internationale.

L'élaboration du projet, initiée en 2008 par Christian Blanc, nommé secrétaire d'État au développement de la région capitale, demandera alors plusieurs années de concertation entre l'État, la région Île-de-France, les collectivités locales et les citoyens, avant de donner naissance à une nouvelle intercommunalité, la Métropole du Grand Paris, le 1^{er} janvier 2016. Son objectif est de mettre en commun toutes ses ressources pour répondre à trois enjeux majeurs : la modernisation et le développement du réseau de transport, la construction de nouveaux logements et le développement de l'activité économique. Une véritable politique d'aménagement du territoire à l'échelle régionale constituera alors un des volets importants du projet, à travers la création des Contrats de Développement Territorial (CDT), élaborés conjointement par les collectivités territoriales et l'État. Principal levier du projet, le Grand Paris Express va révolutionner le réseau de transports en Île-de-France et permettre de relier les territoires franciliens beaucoup plus facilement grâce à la création de 200 km de métro automatique (dont 90% en souterrain) et de 68 nouvelles gares. Cela passe par un investissement de plus de 35 milliards d'euros. Toutefois, si la politique volontariste de la métropole en matière de transport constitue une opportunité sociale et économique avec la naissance de nouveaux quartiers associant des logements, commerces, bureaux et équipements divers pour répondre aux besoins croissants de la région Île-de-France, elle doit être au service du développement durable et maîtriser l'impact sur l'environnement. Ainsi, la Société du Grand Paris estime que le Grand Paris Express devrait produire 45 millions de tonnes de matériaux excavés ayant a priori le statut de déchets, posant alors la question du devenir de ces déblais (Société du Grand Paris, 2017).

Fortement engagée dans les enjeux environnementaux, l'équipe du projet MMOTIVVÉS dont je fais partie a réfléchi à la réutilisation partielle des matériaux excavés provenant des chantiers du Grand Paris. Si le recyclage de ce type de matériaux a pour traditionnels débouchés la construction de routes, les granulats pour le béton et les chaussées, les remblais, les couches de base et de fondation, les matières premières pour la production industrielle, une autre approche plus écologique, fondée sur le développement d'infrastructures vertes me semble à privilégier. Le Grand Paris Express devrait générer environ 100 m³ de déblais

au mètre linéaire de tunnel terrassé. Les matériaux rencontrés sont caractéristiques des formations géologiques du Bassin Parisien tels que : Alluvions modernes et anciennes ; Marnes du Gypse ; Marnes infra-gypseuses ; Sables Verts ; Calcaire de Saint-Ouen ; Sables de Beauchamp ; Marnes et Caillasses ; Calcaire Grossier ; Argiles Plastiques ; Calcaires et Marnes de Meudon ; et enfin pour les terrassements de surfaces qui concernent les ouvrages d'infrastructures tels que les gares ou les ZAC et pôles scientifiques nous trouvons des matériaux anthropiques et des limons.

Un nombre important de matériaux pourraient être valorisés dans des filières courtes, aussi bien en réemploi sur les sites même d'extraction calcaires durs que sur d'autres projets comme l'argile afin d'assurer l'étanchéité de sites de stockage. Les Sables de Beauchamp ainsi que les Marnes et Caillasses sont des matériaux difficiles à valoriser en raison de leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les M&C représentent une proportion significative du tonnage qui est en jeu avec 14% du total, soit 5,606 millions de tonnes. Le matériau Marnes et Caillasses est constitué de marne et calcaire et/ou de dolomie comprenant parfois de l'argile et du gypse. Ce matériau étant perçu comme de mauvaise qualité, il n'a reçu que peu d'attention sauf pour le risque géotechnique qu'il engendre (Snoussi et al., 2019).

Le présent mémoire d'ingénieur s'est focalisé sur les Limons du plateau de Saclay dans le cadre des aménagements effectués pour développer le nouveau pôle scientifique, l'autre volet essentiel du projet du Grand-Paris. Ce mémoire constitue ainsi une deuxième étape du projet de recherche MMOTIVVÉS.

I.1 Le Grand Paris, ses principaux volets et son avancement

Le projet du Grand Paris visant à modifier profondément la géographie de l'Ile-de-France se compose de différents volets dont celui du développement du réseau de transport, le « Grand Paris Express », qui constitue l'axe principal du projet et mobilise la plus grande part des investissements qui lui sont affectés.

I.1.1 L'axe principal du projet : le Grand Paris Express

Le 6 mars 2013, le Gouvernement présente ses orientations en matière de transport en commun en Ile-de-France, sont présentées dans le projet « Nouveau Grand Paris des transports ». Le volet relatif au réseau de métro automatique du Grand Paris Express (GPE) qui prône une adaptation de la capacité de transport aux besoins de mobilité et aux prévisions de trafics, selon les tronçons, relie les grands pôles stratégiques de la région Ile-de-France et les connectes avec le centre de l'agglomération parisienne. À travers 205 km de tracé dont

180 km en souterrain et 20 km en aérien, il redimensionne l'offre de transports à destination des franciliens autour de 3 ensembles de projets :

- une liaison de rocade, la Ligne 15, regroupant les tronçons les plus chargés des lignes rouge et orange et assurant tout particulièrement la désaturation des réseaux de transport en commun en cœur d'agglomération ;
- des lignes de métro automatique à capacité adaptée pour la desserte des territoires en développement, concernant les tronçons nord-est et est de la ligne rouge (les Lignes 16 et 17 entre Saint-Denis Pleyel, Noisy-Champs et Le Mesnil-Amelot) ainsi que la ligne verte (ligne 18) entre Orly et Versailles ;
- des prolongements de lignes de métro existantes apparaissant comme pertinents fonctionnellement ou du point de vue de la rapidité de mise en œuvre : sont concernés le prolongement de la Ligne 14 au nord jusqu'à Saint-Denis Pleyel et au sud jusqu'à Orly (soit la ligne bleue du schéma d'ensemble), ainsi que le prolongement de la ligne 11 jusqu'à Noisy-Champs via Rosny Bois-Perrier (qui reprend l'un des tronçons constitutifs de la ligne orange, la prise en compte de cette option ayant été confirmée à l'occasion de l'approbation par le Conseil du STIF en décembre 2013 du bilan de la concertation réalisée sur la ligne orange) (Société du Grand Paris, 2015).

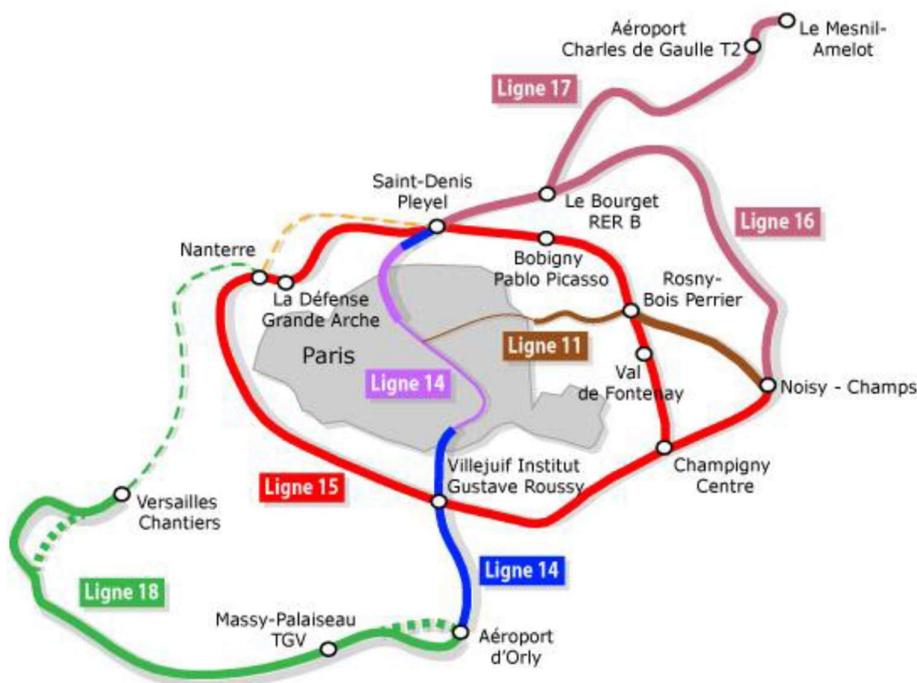


Figure 1. Réseau Grand Paris Express en configuration « Nouveau Grand Paris » - Arbitrage du Gouvernement du 6 mars 2013 (Société du Grand Paris, 2015)

Le Nouveau Grand Paris des transports a fixé le début des travaux des différents tronçons des lignes du Grand Paris Express en 2014 et un échelonnement de la mise en service des lignes entre 2020 et 2030. Lors du conseil des ministres du 9 juillet 2014, une accélération du calendrier est annoncée concernant la desserte de l'aéroport d'Orly, l'accessibilité du plateau de Saclay par les lignes 14 et 18 et l'accessibilité, grâce à la ligne 17, des zones d'activité situées entre Pleyel et Roissy dont la mise en service est souhaitée en 2024 au lieu de 2025 et 2027, comme initialement prévu dans le schéma (Société du Grand Paris, 2015).

I.1.2 Un état d'avancement des travaux inégal selon les volets du projet Grand Paris

L'idée d'un métro en rocade autour de Paris a été lancée il y a dix ans et nécessite aujourd'hui encore au moins dix ans de travaux. Il est donc opportun de faire un point d'étape sur le chantier et sur les autres volets pour comprendre les contraintes et la complexité du projet.

Dans son discours du 29 avril 2009, le Président Nicolas Sarkozy annonçait officiellement les grands axes de ce projet gigantesque et le lancement des étapes préparatoires aux travaux.

La Société du Grand Paris a alors réalisé des études d'impact du projet sur l'environnement et proposé des solutions concrètes pour les limiter et obtenir les autorisations environnementales auxquelles le projet est soumis. Elles ont été complétées par de nombreuses études de terrain visant à connaître précisément la nature des sols et roches sur lesquels seraient édifiés les ouvrages du nouveau métro (sondages des sols, diagnostics du bâti et des fondations, construction de puits d'essai). Les travaux préalables au démarrage du chantier de construction ont ensuite commencé : déplacement de réseaux enterrés existants, démolition de bâtiments, défrichage et diagnostics archéologiques.

Concernant l'objectif ambitieux de la construction de 70 000 logements par an inscrit dans la loi de 2010 relative au Grand Paris, il a été réellement atteint pour la première fois en 2016 et a continué de progresser les années suivantes. Enfin, le projet de « poumon vert » à travers la plantation d'une forêt d'un million d'arbres sur une plaine de 2500 hectares proche de l'aéroport de Roissy (95) a finalement été refusé en 2016 par le Syndicat mixte pour l'aménagement de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt (SMAPP). Des élus ont ensuite repris le flambeau et une concertation publique a été ouverte en 2019 à propos de la création de cette forêt (Biosca, 2019).

Le projet de création d'un grand métro automatique d'une longueur de 200 km dont les travaux préparatoires ont débuté en 2015, avec une fin du chantier annoncée pour 2020, a vu son calendrier repoussé à plusieurs reprises. Il a fallu attendre juin 2018 pour voir les

premiers tunneliers creuser sur la ligne 15, ce qui décalerait la mise en circulation des lignes du Grand Paris Express à 2025, jusqu'en 2030. Sur le volet financier, l'enveloppe dédiée aux transports en Ile-de-France fixée à 35 milliards d'euros dont 21 milliards affectés au super-métro a été largement dépassée. Ainsi, en 2018, un rapport de la Cour des Comptes reprochait un dérapage des dépenses ayant porté le montant réel du budget à plus de 38 milliards d'euros, faisant alors craindre à la région un ralentissement du chantier pouvant remettre en cause la promesse d'être prêt pour les JO de 2024. En 2019, le Grand Paris Express est alors entré dans une puissante phase d'industrialisation avec 150 chantiers actifs, parmi lesquels 34 gares.

Mais la crise imprévue du coronavirus est ensuite venue casser l'élan que la réalisation de ce grand réseau de transports en commun était péniblement parvenue à prendre. Avant la crise, dix ans après le lancement du chantier, le président de la Société du Grand Paris, annonçait que certaines lignes prioritaires dont celles attendues pour la bonne organisation des JO 2024, seront terminées dans les délais, contrairement à d'autres jugées moins urgentes. La crise sanitaire a également différé le lancement des travaux d'un autre volet du projet du Grand Paris, la réalisation d'un Canal Seine-Nord de 106 km pour désenclaver le bassin de la Seine, déjà retardé plusieurs fois en raison de problèmes financiers.

Projet phare du Grand Paris, la création d'un grand pôle scientifique et technologique sur le plateau de Saclay est présentée comme un moteur pour le renouveau de l'industrie française et même européenne. Pourtant, il n'a avancé jusqu'ici qu'avec beaucoup d'hésitation.

En effet, élément central de ce pôle, le campus Paris-Saclay réparti sur la frange sud-est du plateau de Saclay, a été bâti (seulement deux bâtiments nouveaux) sur l'idée de privilégier un aménagement compact permettant d'une part une vie urbaine avec toutes ses composantes, et d'autre part de préserver un espace naturel et agricole de grande qualité. Inspiré par le succès de la Silicon Valley, l'ambitieux projet de cluster scientifique et technologique en cours de constitution a vu la création de l'Université Paris-Saclay en 2014 avec le statut de communauté d'universités et d'établissements (ComUE) sur la base de l'université Paris-Sud-XI et d'établissements fondateurs tels l'Ecole nationale supérieure de Cachan, HEC (à Jouy-en-Josas), et l'Ecole Polytechnique (à Palaiseau). Cette dernière s'est finalement séparée le 25 octobre 2017 lors de la création de l'Institut polytechnique de Paris avec d'autres écoles dépendant du ministère de la Défense. L'université Paris-Saclay est dorénavant une université française créée le 6 novembre 2019 par décret paru au Journal officiel en tant qu'établissement expérimental public à caractère scientifique, culturel et

professionnel, remplaçant la ComUE. L'université Paris-Sud-XI a été supprimée le 1^{er} janvier 2020. Ce lent processus qui a vu l'installation d'autres Grandes Écoles comme l'Ecole Centrale de Paris qui a déménagé suite à sa fusion (1^{er} janvier 2015) avec Supélec, puis l'Ecole nationale supérieure de Cachan qui s'est vraiment installée sur son nouveau site (Gif-sur-Yvette) en mars 2020 sous le nom ENS Paris-Saclay, va se poursuivre dans les années qui viennent : notamment, les quatre sites Agro ParisTech de l'Île-de-France (Grignon, Paris 5^e, Paris 14^e, Massy) devraient intégrer en 2021 le cluster Paris-Saclay. La concentration de grands groupes et de PME innovantes associés à un pôle universitaire d'envergure mondiale, ferait du cluster Paris-Saclay l'un des 8 pôles d'innovation les plus importants au monde qui regroupe déjà 15% de la recherche publique et privée française.

I.2 Les conséquences de la crise actuelle sur le projet

I.2.1 Une crise sanitaire qui a aggravé les facteurs de fragilité du projet

Si la crise sanitaire due au coronavirus Covid-19 a permis une diminution provisoire de la pollution (-30% d'émissions de dioxyde d'azote et de gaz carbonique selon Airparif) et du bruit (-60% à -90% de nuisances sonores routières d'après Bruitparif) ainsi qu'un désengorgement lié au développement du télétravail, elle a cependant accentué les facteurs de fragilité du Grand Paris.

L'agglomération parisienne (qui regroupe toutes les communes des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, ainsi qu'une partie des Yvelines, de l'Essonne et du Val-d'Oise) compte désormais plus de 10 millions d'habitants sur les 12 millions de la région Ile-de-France et connaît la prospérité économique (elle produit 75% du PIB régional et 30% du PIB national). Elle connaît cependant une crise aux multiples visages : crise de la gouvernance, crise des transports, du logement, de l'emploi. Les inégalités ne cessent de s'y accroître, le mal-logement lié à la suroccupation de nombreux logements ou simplement à leur petite surface et le manque de nature accessible à proximité se sont fait particulièrement ressentir durant la crise sanitaire et avec la croissance du chômage.

Il devient alors nécessaire de trouver les solutions permettant de concilier les attentes des habitants souhaitant plus d'espaces extérieurs dans leur logement et les impératifs de densification liés à la transition écologique. Dans son rapport du 21 juin 2020, la Convention citoyenne pour le climat a par ailleurs souligné la possibilité de lutter contre l'artificialisation des sols « en rendant attractive la vie dans les villes et les villages » et propose de

« sensibiliser à l'importance et l'intérêt de la ville plus compacte, et construire une nouvelle culture de l'habitat collectif » (Guidi, 2020).

La loi ALUR du 24 mars 2014 dont le but premier était de lutter contre l'exclusion sociale et de favoriser la transition énergétique servira de cadre à ces enjeux. Parmi ses objectifs, figurent le rééquilibrage des coûts du logement, la favorisation de la transition écologique, l'amélioration de la qualité des logements existants et le développement des habitats alternatifs. Elle apporte alors des améliorations à deux niveaux :

- les capacités de densification résiduelles dans les zones urbanisées de la commune feront l'objet désormais d'une analyse obligatoire qui sera fournie dans le rapport de présentation du PLU ;
- l'ouverture à l'urbanisation des zones AU, celles dites « à urbaniser », doit être mieux justifiée par rapport à la densité potentielle.

Ces deux dispositions vont permettre de susciter un débat sur la densification en amont de la définition des projets. La suppression du coefficient d'occupation des sols (COS) et de la surface minimale pour construire sont les deux modifications majeures apportées par la loi ALUR dans son volet urbanisme pour faciliter la densification du tissu urbain des communes françaises. Concernant les zones de lotissement, elle a modernisé la réglementation en facilitant leur changement de destination. La densité urbaine a pourtant été critiquée dans le cadre du confinement, donnant lieu à des raisonnements rapides colportés dans la presse et les médias. Mais la réalité est plus nuancée car la densification résidentielle n'égale pas obligatoirement entassement et surpeuplement des logements. RICHARD Sennett, sociologue et professeur à la London School of Economics et à la New York University, prône le développement, à l'image des villes japonaises comme Tokyo, de « formes urbaines qui permettent à la fois de s'isoler et de rester en contact avec ses collègues et les membres de sa famille ». Il montre alors l'intérêt de réfléchir à la question des espaces intermédiaires extérieurs, collectifs mais privés, qui est assez peu traitée en France (Bertucci, 2020).

Afin de pouvoir répondre aux attentes d'espaces extérieurs en matière de logement tout en préservant l'environnement, on avance en général trois solutions non contradictoires : la priorité au collectif au détriment de la maison individuelle, le renforcement de la densité et la mise en œuvre de l'objectif de « zéro artificialisation nette » (ZAN). Comme vu précédemment, la nécessité de trouver une voie vers la transition écologique semble faire consensus mais les moyens pour y parvenir ne relèvent pas de l'évidence.

En conclusion, ces éclairages montrent bien que la crise liée au logement, intensifiée par la crise sanitaire nécessite un réel engagement politique afin de pouvoir mettre en œuvre les évolutions nécessaires permises par la loi ALUR. On attend donc la loi dite « 3D » pour « décentralisation, différenciation et déconcentration », en cours d'élaboration, censée redéfinir les relations entre l'État et les collectivités locales en matière de logement, suite à la circulaire du 15 janvier 2020 adressée par le Premier Ministre aux préfets de région pour organiser la concertation relative à cette loi.

1.2.2 Un projet métropolitain plus économe à redessiner

Face aux problèmes de périurbanisation et d'empreinte écologique croissante, le modèle urbain classique semble avoir atteint ses limites. Une profonde réflexion sur la durabilité de la métropole, c'est-à-dire la soutenabilité de son impact sur le futur, son identité et sa capacité à se maintenir dans le temps, est indispensable et doit encourager un projet politique de gouvernance territoriale participatif, interculturel, qui ne se cantonne pas aux grands projets mais se fera aussi à travers de multiples petits projets menés par différents acteurs publics, privés et associatifs du territoire.

Dans sa mutation, la métropole devra privilégier une nouvelle logique de recyclage de territoires existants qui questionne l'ensemble de « la chaîne de production du bâti depuis le foncier jusqu'aux filières constructives en passant par l'économie des ressources naturelles, la réduction des déchets, le réemploi du bâti ». En effet, la densification et le « recyclage » de territoires s'est largement développé par la destruction de services publics comme les hôpitaux, pourtant essentiels en période de crise sanitaire. Plutôt que d'investir massivement dans leur modernisation et dans l'accroissement de leur capacité d'accueil, l'État a favorisé la vente de nombreux terrains aux promoteurs immobiliers, plus rentable économiquement. Le développement du fret ferroviaire comme solution plus écologique a également été sacrifié à la logique de rentabilité par la libération de plusieurs emprises SNCF en faveur de la promotion immobilière. La création de normes devenant impossibles à respecter dans le cadre d'une rénovation a permis de justifier la décision de s'orienter vers de nouvelles constructions. On peut citer en exemple les normes relatives à l'accessibilité des personnes handicapées ou celles sur la protection anti-incendie imposant la présence massive d'escaliers d'évacuation. Or, on revient aujourd'hui en arrière concernant les dispositifs d'accessibilité aux logements pour les personnes à mobilité réduite...

Le recyclage sera alors possible à la seule condition de maintenir la rareté du foncier constructible : limiter drastiquement les nouvelles zones à urbaniser, pour inciter les

opérateurs commerciaux à investir sur l'existant. Une limitation qui ne peut être mise en œuvre que par les acteurs politiques et les collectivités territoriales.

Les nouveaux programmes devront également proposer d'intégrer des dispositifs de récupération, de stockage et de distribution de l'énergie et organiser les systèmes hydrauliques (Castro et al., 2010). La question sociale et environnementale doit donc demeurer centrale dans la réflexion menée sur l'avenir du projet du Grand Paris et sur son mode de gouvernance qui doit permettre de réduire les fractures territoriales. Car si les écarts se creusent encore davantage, la métropole parisienne devra faire face à des crises inédites (Fashahi, 2018).

I.2.3 Un Grand Paris vert et durable

La nature doit également trouver une place majeure dans le projet du Grand Paris par la préservation des espaces naturels, l'articulation entre des espaces de production agricole et énergétique et des zones de forêts, des zones humides, des jardins, des liaisons vertes... Les ressources forestières doivent être plus exploitées en tant que source énergétique de proximité et des filières de collecte et d'approvisionnement doivent être organisées.

La gestion de l'eau instaurée par la loi sur l'eau Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 a été abondée par plusieurs textes de loi jusqu'en 2015, avec la directive européenne du 23 octobre permettant de prendre en compte ses différentes fonctions (ressource naturelle, support de mobilité pour les hommes et les marchandises, source de biodiversité et créatrice de paysages naturels et urbains). L'agriculture doit orienter sa politique de production et de distribution vers des types de cultures moins consommateurs de terre, intégrer les principes de la permaculture et faciliter la mise en place de fermes urbaines sur des surfaces non exploitées aujourd'hui tels que les toitures d'immeubles et d'usines. Enfin, la stratégie énergétique métropolitaine doit se diversifier par le développement des énergies renouvelables et la production locale d'énergie solaire, à la fois au niveau de l'habitat collectif et individuel (Castro et al., 2010).

I.3 Les tunnels du Grand Paris et la problématique des terres excavées

Les projets du Grand Paris dédiés à la construction d'infrastructures de transport ont privilégié, dans un souci d'économie d'espace à la surface, le passage en souterrain des futures lignes de métro. En effet, au vu des choix politiques des dernières décennies de densifier la population dans la métropole Parisienne, il était nécessaire de développer les lignes de métro en conséquence en colonisant aussi des espaces non urbains dans les

départements autour de la petite couronne. Des lignes de métro concentriques ont donc été favorisées. Chaque jour, 2000 tonnes de déblais rocheux provenant du creusement des tunnels sont extraites, auxquelles s'ajoutent les terres issues de la construction des gares et ouvrages divers. Leur évacuation nécessite l'utilisation de modes de transports divers et tente de privilégier les modes écologiques plutôt que le transport routier, limité aux grands axes. Avec la pénurie de matériaux de construction qui s'annonce et le manque de capacité des centres de stockage acceptant les déchets du BTP, il devient urgent de proposer des solutions permettant la réutilisation et la transformation des déchets en produits issus des grands chantiers en cours et à venir en Île-de-France et dans les départements limitrophes.

I.3.1 La question du réemploi des terres excavées inertes avant le Grand Paris

Avec la montée en puissance des travaux du Grand Paris, la production de matériaux excavés ou MATEX s'accroît. Dans sa note de diagnostic de décembre 2012 sur la soutenabilité du Grand Paris en matériaux, la DRIEE estimait que « les objectifs de réalisation du Grand Paris de 70 000 logements/an de manière durable, mais aussi les bureaux, gares, équipements et infrastructures associés, vont entraîner à l'horizon 2030 une consommation annuelle accrue en matériaux de construction estimée globalement à 15 % ». Or, depuis une trentaine d'années, les besoins en matériaux de construction pour la construction et le génie civil n'ont cessé d'augmenter, alors que l'on observe en parallèle une importante réduction de l'accessibilité des gisements. Cette situation implique la nécessité d'une gestion raisonnée des ressources en matériaux donnant une place réelle au réemploi des terres excavées.

Jusqu'à présent, la loi considérait les produits issus des terrassements comme des déchets. La réglementation s'est renforcée et impose de nouvelles contraintes visant à une gestion durable des granulats et des matériaux issus des carrières. Ainsi, la directive Européenne 2012/27/UE impose aux états membres d'atteindre une meilleure efficacité énergétique notamment à travers la valorisation des déchets de construction. Au niveau national, elle a donné lieu à la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) 2015-992 du 17 août 2015, contraignant les collectivités à réemployer ou recycler 70 % des matières et déchets produits sur les chantiers, à l'horizon 2020.

En 2012, l'utilisation de matériaux issus des chantiers de déconstruction (matériaux inertes : bois, béton, briques, tuiles, céramiques, ardoises, enrobés et produits à base de bitume ne contenant pas de goudron, terres et cailloux non pollués, autres matériaux de démolition de chaussée, ballast de voie non pollué) pour le réemploi représentait déjà plus de 15 % de la consommation régionale en granulats, contre 2 % en moyenne nationale (Dress & Rafa,

2012). Toutefois, en 2013, seules 47 % des ressources précitées utilisées en France dans la construction étaient issues du recyclage, la consommation pour l’Ile-de-France ne représentant alors que 16 % de ces ressources, chiffre resté stable jusqu’en 2015.

1.3.2 Le Grand Paris et le réemploi des terres excavées inertes

Les terres excavées inertes sont des matériaux extraits d’origine naturelle autochtone (sables, sables fins, limons, argiles, graviers, enrochement...) ou exogène (remblais hétérogènes apportés au fil des ans), devant être qualifiés de déchet par le code de l’environnement lorsqu’ils quittent leur site d’extraction. Leur réutilisation est conditionnée par les caractéristiques techniques des matériaux extraits et l’usage auquel ils sont destinés. Elle dépend, en particulier dans le cadre de travaux au tunnelier, de la volonté des responsables du projet (Maître d’ouvrage) de promouvoir une démarche de valorisation des matériaux extraits parfois coûteuse et du foncier disponible pour installer un stockage tampon et d’éventuelles filières de traitement sur site (Région Île de France, 2015). Les enjeux de la production de matériaux réutilisables en Ile-de-France pendant les travaux du Grand Paris Express sont doubles. La valorisation des déblais permettra de préserver des ressources naturelles non renouvelables tout en limitant les importations. Elle apporte aussi une réponse à la saturation des installations de stockage autorisées.

En 2011, la Société du Grand Paris a estimé les possibilités de valorisation par les acteurs du BTP et celles pour le comblement de carrières et les projets d’aménagement ; elle a également recensé et identifié les installations pouvant accueillir les déblais du Grand Paris Express et défini les conditions de cet accueil selon les contraintes des sites. Elle a ainsi pu évaluer la capacité globale d’accueil en carrières et dans les installations de stockage de déchets pour la période 2017-2021 (figure 2).

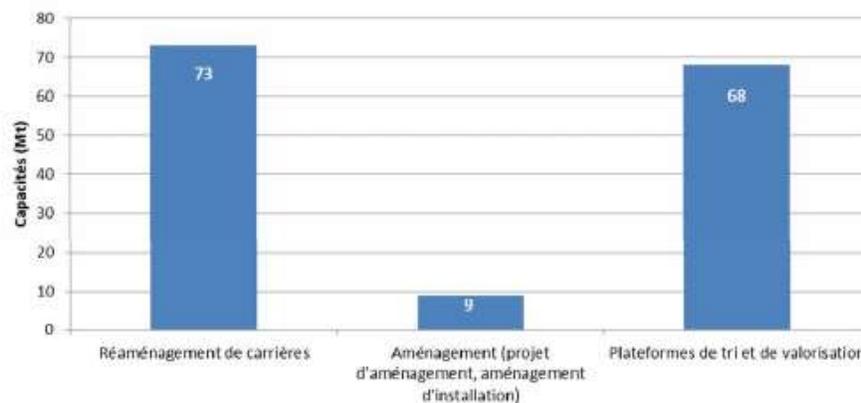


Figure 2. Capacités de stockage identifiées par les partenaires de la Société du Grand Paris (Société du Grand Paris, 2017)

En 2012, le Schéma directeur d'évacuation des déblais (SDED) a défini la stratégie générale pour la conduite opérationnelle des chantiers qui se décline ligne par ligne du GPE et est inscrite dans le Schéma de gestion et de valorisation des déblais des chantiers de terrassement pour la période de 2017 à 2030. La Société du Grand Paris a affiché un objectif de valorisation de 70 % des terres excavées lors de la construction du Grand Paris Express. Sa stratégie passe essentiellement par le remblaiement de carrières et en partie par le réemploi de MATEX par les chantiers de tunnels eux-mêmes. Le projet du Grand Paris a déjà produit à lui seul environ 3 millions de tonnes de déblais provenant essentiellement des chantiers des futures lignes 15 Sud et 16, dont seulement 35 % ont bénéficié d'une valorisation (dont remblayage de carrières), contre 52 % stockés en tant que déchets inertes. Un guide a donc été élaboré en novembre 2017 sous la direction du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (bureau du sol et du sous-sol), du BRGM et de l'INERIS pour clarifier les conditions d'acceptabilité des déblais et terres excavées en installations de stockage de déchets inertes (ISDI), en aménagements et en carrières, et pour diffuser les bonnes pratiques en matière de mise en place et de gestion des ISDI (Guide de valorisation hors-site des terres excavées, Coussy et al., 2017). L'utilisation des déblais inertes dans les projets d'aménagement doit respecter les trois critères définis par le « *Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement* » du Bureau des Recherches Géologiques et Minières (Blanc et al., 2012) : les terres doivent ainsi être réutilisées dans des projets bénéficiant d'un permis de construire, ou d'aménager ou d'une étude d'impact ; leurs teneurs mesurées en polluants doivent être strictement inférieures aux teneurs mesurées dans le terrain receveur ; enfin, leur impact sur les ressources en eau doit être acceptable. Il reste maintenant à introduire de façon plus massive et durable dans la production du BTP l'utilisation des MATEX ainsi que les matériaux issus de la déconstruction dans les opérations d'aménagement, plus précisément pour la requalification des sols urbains.

1.3.3 Réflexion sur l'artificialisation des sols et sa place dans le débat public et la réglementation

Mon action de conception de technosols incluant le réemploi de terres excavées pour limiter le ruissellement urbain s'inscrit dans le cadre de la réglementation GEMAPI définie par l'article L.211-7 du code de l'Environnement pour la prévention des inondations à l'échelle de bassin versant (Code de l'environnement - Article L211-7, 2019). Les SAGE qui en ont

la compétence en général doivent permettre la mise en place de procédures notamment dans le cadre des PPRI.

Les SAGE préconisent généralement une gestion des eaux pluviales par infiltration permettant un délestage des stations de traitement des eaux usées (STEU) lorsque les communes sont équipées de réseaux unitaires. Nous assistons depuis 20 ans à une surenchère dans la réduction du débit de rejet autorisé des EP dans les réseaux d'assainissement des villes, poussant un certain nombre de collectivités à une forme de jusqu'aboutisme imposant aux opérations de construction la gestion de l'infiltration des eaux pluviales alors même que les résultats d'infiltration sont non concluants. Dans la loi, l'exigence d'une gestion des pluies journalières revient localement au SAGE qui l'exprime dans les attendus des permis de construire d'opérations immobilières. Une gestion différenciée est imposée entre les « petites pluies » jusqu'à 8 mm et les pluies d'occurrence décennale ou vicennale. Cette approche entraîne une complexité de la gestion des EP à la parcelle qui n'est pas maîtrisée par les SAGE et l'est encore moins par les bureaux d'études. On arrive parfois à des contradictions entre les demandes du SAGE et les attentes de la police de l'eau sur ce que doit être un bassin en fonction de la possibilité d'infiltration de celui-ci.

À titre d'exemple, l'opération immobilière à Maule décrite dans l'Annexe 16, soumise à déclaration au titre de la loi sur l'eau, m'a plongé dans le flou entre mon appréciation du bassin d'infiltration, que j'ai mis en œuvre et l'interprétation par la DDT dans sa mission de police de l'eau. Pour aller à l'essentiel, la police de l'eau considère qu'un bassin d'infiltration ayant une durée de vidange supérieure à 48h ne constitue plus un bassin d'infiltration mais un bassin de rétention. Pour qu'il garde le statut de bassin d'infiltration est prescrite la mise en place d'une vidange en fond de bassin, afin de ne pas le laisser en eau. À contrario, sur un projet de gestion des eaux pluviales dans un département de la petite couronne sud de Paris, non soumis à déclaration, ni à autorisation, le SAGE n'accepte pas que les bassins d'infiltration soient équipés de vidange en fond de bassin alors que les coefficients d'infiltration sont bien plus mauvais que ceux de l'opération de Maule (Yvelines, 78).

Cette difficulté est accentuée avec la nouvelle nécessité de gérer l'infiltration des pluies faibles journalières ne dépassant pas la limite estimée à 8 mm de niveau I (Chocat & Savary, 2014). J'en viens donc à proposer une gestion de ces pluies journalières complètement dissociée des bassins qui, eux, subsisteront uniquement pour des occurrences de type décennale ou vicennale, par la mise en place de technosols qui peuvent assez facilement contenir ces précipitations et peut-être même plus.

Depuis plusieurs années, les problèmes liés à l'artificialisation sont pris en compte par les pouvoirs publics. Pour limiter l'artificialisation des sols, les quelques dispositifs existants, comme la taxation des friches et bâtiments vacants, sont peu utilisés car souvent contraires aux intérêts des collectivités favorables à l'urbanisation. Par ailleurs, les outils incitatifs restent rares, la fiscalité sur le foncier et le bâti n'encourageant pas l'économie d'espace. L'artificialisation des terres étant toutefois une des causes majeures de l'érosion de la biodiversité, le gouvernement a présenté le 04 juillet 2018, un Plan biodiversité fixant l'objectif de zéro artificialisation nette (ZAN) (Colsaet, 2019) des sols, imposant que toute nouvelle artificialisation devra être compensée par une « renaturation » d'espaces artificialisés non utilisés. Cet objectif est préconisé par l'Union européenne pour l'horizon 2050. Les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires [SRADDET], institués en remplacement des SRADDT par la loi NOTRE n° 2015-991 du 7 août 2015 (loi Gouv. 2015b) dans le contexte de la mise en place des nouvelles Régions en 2016 pourraient alors jouer un rôle intéressant en tant que document stratégique et prospectif. « L'évidente relation avec la séquence Éviter, réduire, compenser, amène alors à devoir déterminer les efforts de compensation écologique à engager. En effet, renaturer des terres artificialisées est un processus complexe et coûteux supposant de déconstruire, de dépolluer, de désimperméabiliser puis de reconstruire par des « technosols » (Béchet et al., 2017). Atteindre l'objectif du ZAN dès 2030 impliquerait alors d'engager des mesures ambitieuses. Rien ne semble impossible mais cela nécessitera une densification de l'habitat et la limitation de l'étalement urbain qui induisent, à minima, de modifier nos règles d'urbanisme (Fosse et al., 2019). Le scénario « densification forte » propose de durcir davantage les conditions de construction avec un taux de renouvellement de 0,6 et une densité de 0,4. Cet effort permettrait de freiner le rythme d'artificialisation et de le limiter à 75 % du scénario tendanciel en 2030 (Fosse et al., 2019). Ce résultat met en lumière la part non négligeable qu'une politique d'urbanisme favorisant la densification de l'habitat et limitant l'étalement urbain pourrait jouer dans la lutte contre l'artificialisation. Ces différents éléments de modélisation ne permettent pas d'évaluer l'artificialisation des parcelles non cadastrées, notamment liée aux infrastructures de transport. Ce chiffrage constitue donc une sous-estimation de la consommation totale d'espaces naturels, agricoles ou forestiers (ENAF) et devra être affiné. De tels objectifs sont accessibles avec un renforcement strict des règles d'élaboration des PLU, par exemple l'imposition d'un coefficient d'occupation des sols (COS) minimal aux nouvelles constructions et l'obligation d'avoir atteint un niveau

minimal de renouvellement urbain avant de délivrer des permis de construire sur des zones non artificialisées. Des hypothèses complémentaires ont été testées dans cet exercice de modélisation (Fosse et al., 2019). Un renchérissement du prix des terres libres pour aligner le prix des terres agricoles françaises sur celui de pays comme le Royaume-Uni ou l'Allemagne induit des réductions de consommation d'ENAF supplémentaires d'environ 1 400 hectares en 2030 par rapport au scénario de densification de la construction. Une diminution du taux de vacance des logements de 2 % conduit pour sa part à une réduction de consommation d'ENAF de 1 200 hectares par rapport au scénario tendanciel. La mise en œuvre concrète de ces deux hypothèses paraît cependant difficile, pour un effet limité en termes de réduction de la consommation d'ENAF. Il serait préférable de privilégier les mesures de densification des constructions.

- Imposer une obligation de densification par l'instauration dans les PLU d'un plancher de densité, c'est-à-dire d'un coefficient d'occupation des sols minimal ; d'un taux plancher de renouvellement urbain dans chaque commune pour les constructions nouvelles. Ce plancher serait vérifié annuellement, via le suivi des permis de construire, et des sanctions administratives pourraient être envisagées *a posteriori* ;
- Exclure de l'éligibilité au dispositif Pinel et au prêt à taux zéro les constructions sur des terres non artificialisées ;
- Exonérer totalement de taxe d'aménagement les projets qui ne changent pas l'emprise au sol du bâti (surélévation, rénovation, reconstruction) (Fosse et al., 2019).

II Note documentaire : les technosols, le ruissellement, l'urbanisation et quelques autres aspects du problème

Les travaux effectués dans le cadre de ce mémoire ont pour objectif de trouver un devenir aux limons issus du décapage des ZAC de Saclay, ce qui constitue une réponse technique de mise en valeur de matériaux autrefois sans intérêt employés en remblais ou envoyés directement en centre de stockage.

Le sol est le compartiment de l'environnement le plus affecté par les activités humaines, avec un taux de remplacement inférieur au taux consommé faisant de lui une ressource non renouvelable (Séré, 2018). Dès lors, la valorisation des matériaux issus des terrassements devient un objectif essentiel et une clé de réussite des opérations de réhabilitation.

La construction de technosol est alors une réponse durable qui offre un ensemble de services rendus :

- Support de la végétation,
- Gestion des flux hydrauliques, spécialement du partage ruissellement / infiltration
- Rétention, stockage pour les végétaux,
- Filtration des polluants et protection de la nappe,
- Stockage de carbone.
- Circulation des flux, rétention, stockage dans les pores, filtration, dégradation chimique des polluants, piégeage du carbone.

Les sols anthropiques ont une incidence majeure sur le cycle de l'eau en milieu urbain, notamment sur le phénomène de ruissellement urbain dû à l'imperméabilisation des sols.

Dans sa thèse, Sarah ROKIA (2014) a ainsi déterminé la conductivité hydraulique à saturation d'un grand nombre de matériaux utilisés pour la création de technosols. Je m'appuierai sur ses données pour établir des mélanges techniques qui donneront des technosols permettant la maîtrise des eaux pluviales pour des phénomènes pluviaux de faible intensité (< 8 mm).

Plusieurs autres aspects de la problématique seront abordés dans cette partie documentaire, depuis la section II.3 sur l'urbanisation jusqu'à la section II.13 qui porte sur la pédogenèse. Les conditions hydrodynamiques, le degré de compaction influençant l'écoulement de l'eau interstitielle et conditionnant les mécanismes d'oxydo-réduction, sont déterminantes dans l'évolution pédogénétique d'un profil de technosol (Séré, 2007). Enfin, la section II.14 va présenter quelques éléments de modélisation avec les fonctions de pédotransfert.

II.1 Services rendus par des technosols : cas de la réduction de l'îlot de chaleur urbain

Dans leur livre « Créer des sols fertiles » qui reprend mot pour mot la thèse de Sarah ROKIA (2014), Damas & Coulon (2016) rappelaient l'importance d'exposer au préalable quels sont les « services rendus » attendus des mélanges de matériaux et de sols.

Baptiste GRARD mettait comme moi en exergue la gestion des eaux pluviales par l'infiltration dans le sol comme service rendu par le sol : selon lui (Grard, 2017), la régulation dépend de : la conductivité hydraulique, la capacité de rétention du substrat et le flux d'évapotranspiration. On note par ailleurs la convergence des auteurs français sur l'importance des paramètres densité apparente, porosité et perméabilité du sol, le rôle de la réserve utile ainsi que des flux d'infiltration et d'évapotranspiration du sol.

Concernant le partage du carbone entre le sol et l'atmosphère, j'ai consulté l'étude suivante. Frédéric REES et l'équipe de Christophe SCHWARTZ ont étudié le devenir du stock de carbone organique dans deux technosols construits et plantés, au moyen de prélèvements réalisés à intervalle annuel sur une période de 12 ans. Les résultats ont été comparés à des sols naturels de prairies de la même région (Lorraine) et à d'autres technosols. Le dopage en initial en compost ne permet pas d'éviter la minéralisation et sur les trois premières années, la plus grande partie de ce stock de carbone organique immature (+50% comparé aux sols de référence) initialement mélangé à d'autres matériaux-déchets sur l'épaisseur de 50 cm au moins, s'échappe du sol (gaz, eau). En revanche, après trois ans, du carbone supplémentaire s'accumule bien sûr dans la litière grâce à la couverture végétale (Rees et al., 2019). Sur cette base, la contribution d'un technosol à la séquestration de carbone n'est pas plus forte que d'autres sols et la libération du carbone du compost dans l'environnement lors de la minéralisation risque d'être aussi problématique que dans un scénario d'épandage sur un sol agricole ou même d'incinération. Quant à parler d'une réduction du dégagement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce serait pure conjecture à ce stade.

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène physique climatique méconnu qui est propre aux microclimats urbains. Le phénomène est alimenté par le squelette de la structure urbaine, la morphologie, les matériaux, les conditions climatiques et météorologiques ainsi que le taux d'artificialisation des sols du site étudié. L'îlot de chaleur est défini par la différence de température entre le milieu urbain et les campagnes environnantes (Région Ile de France & ADEME, 2012).

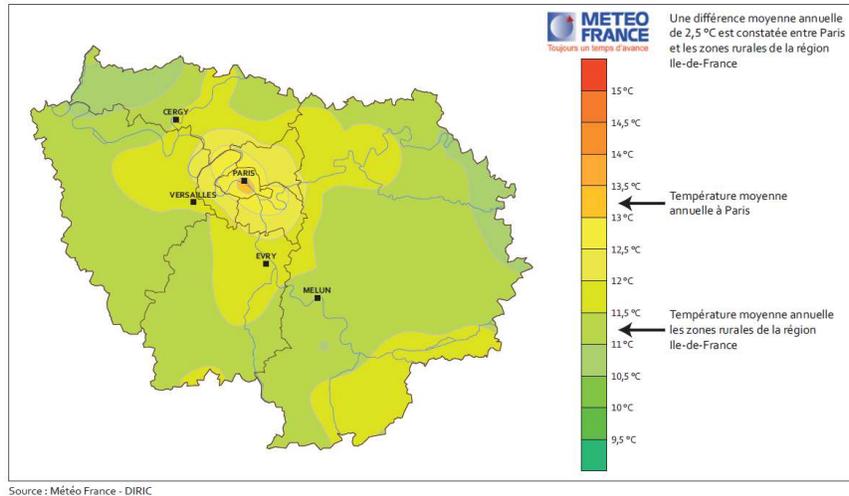


Figure 3. Température moyenne en Ile-de-France sur la période 1995-2001

L'îlot de chaleur urbain (ICU) comme le rappellent Alba et al. (2012) est un phénomène épisodique sous climat tempéré. Présent entre juillet et août, il est lié à la présence d'un anticyclone caractérisé par des vents faibles (2 à 3 m/s maximum). Des épisodes intenses sont devenus réguliers en France, en été et au printemps. L'extension saisonnière du phénomène a tendance à augmenter, comme constaté lors des épisodes de canicule de 2019 et 2020, avec des épisodes d'ICU débutant dès le mois de juin. La figure 3 représente l'impact de l'ICU sur la région Ile-de-France avec une différence de température annuelle de l'air de 2,5°C entre les zones rurales de la région (ex : Seine-et-Marne) et la ville de Paris.

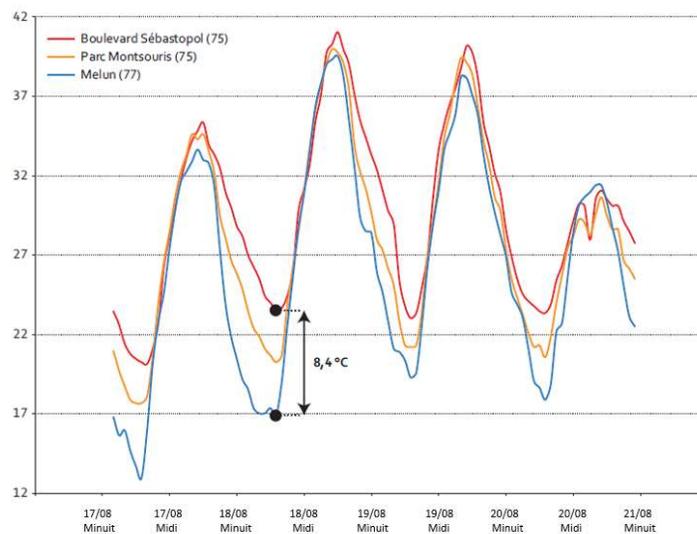


Figure 4. Température de l'air relevée du 18 au 20 août 2012, sur les stations du Bd Sébastopol (75001), du parc Montsouris (75014) et de Melun (77000) (Alba et al., 2012)

L'exemple de l'épisode caniculaire du 18 au 20 août 2012 illustre parfaitement leur propos. Comme le montre la figure 4 relative aux températures de l'air mesurées sur le boulevard de Sébastopol, au parc Montsouris et dans la ville de Melun, l'amplitude de température relevée dans la nuit du 18 août entre Melun et Paris boulevard Sébastopol était de 8,4°C ; on note la récurrence de ce phénomène avec une variabilité de température pour les 3 jours (Alba et al., 2012). L'îlot de chaleur urbain est donc quantifiable à l'aide de levés de la température.

Le modèle de carte proposé à la figure 5 illustre la distribution spatiale de la température de l'air à 2 m du sol sur Paris et sa petite couronne en période de sécheresse. Sur la figure 6 qui représente la densité bâtie, j'observe que les grands ensembles qui ont échappé aux températures nocturnes de plus de 25°C correspondent aux grands parcs et bois parisiens mais aussi, concernant la périphérie Sud et Est de la capitale, aux aménagements du tramway lignes T3A (terminé) et T3B (encours de livraison en 2012) des boulevards des maréchaux. On constate que la proportion de surface bâtie influence la variabilité des îlots de chaleur, avec une corrélation entre densité du bâti et température nocturne.

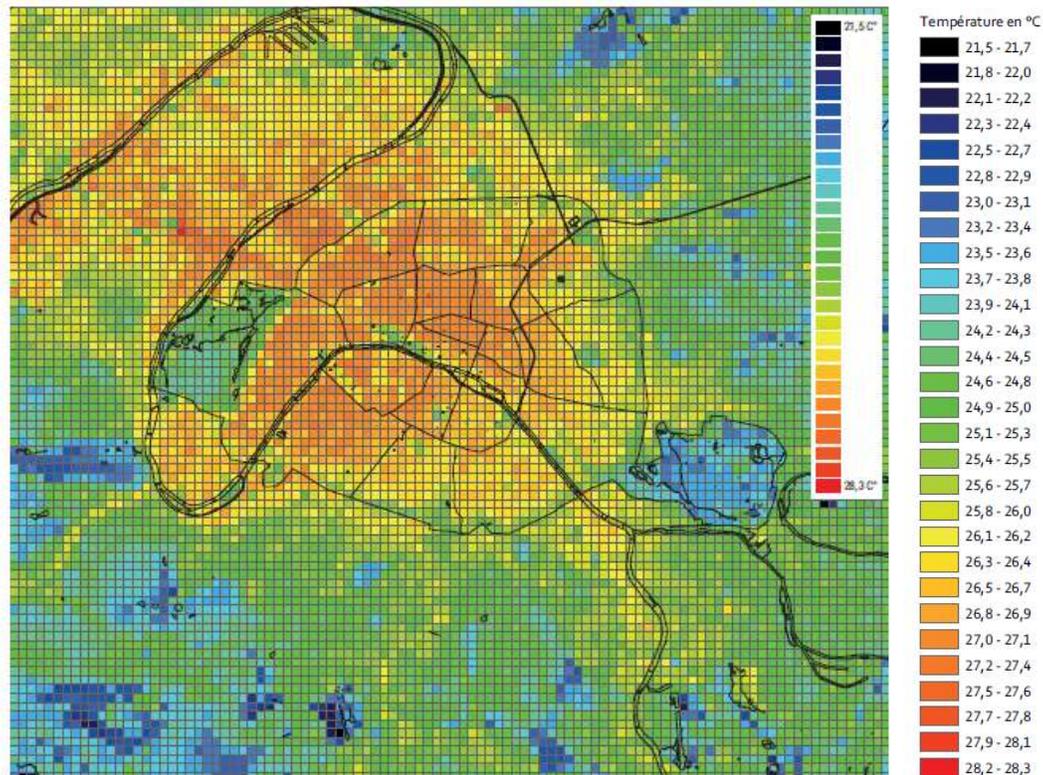


Figure 5. Température de l'air à 2 m du sol à Paris le 10 août 2003 à 6h du matin (Alba et al., 2012)

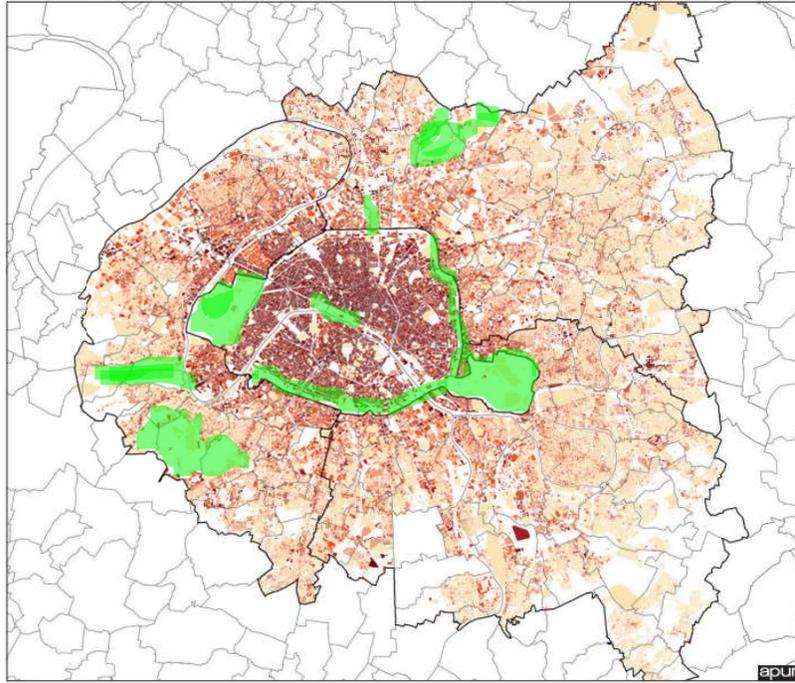


Figure 6. Densité bâtie de Paris et petite couronne (Alba et al., 2015)

Les clichés thermographiques des figures 7 et 8 mettent en évidence le contraste de température entre les espaces artificialisés (teinte verte : pavés en grès, poreux et dotés d'une certaine capacité de rétention puis d'évaporation, et teinte orange à rouge : enrobé ou joint imperméable) et les surfaces perméables (banquettes de jardin ou revêtement gazon).

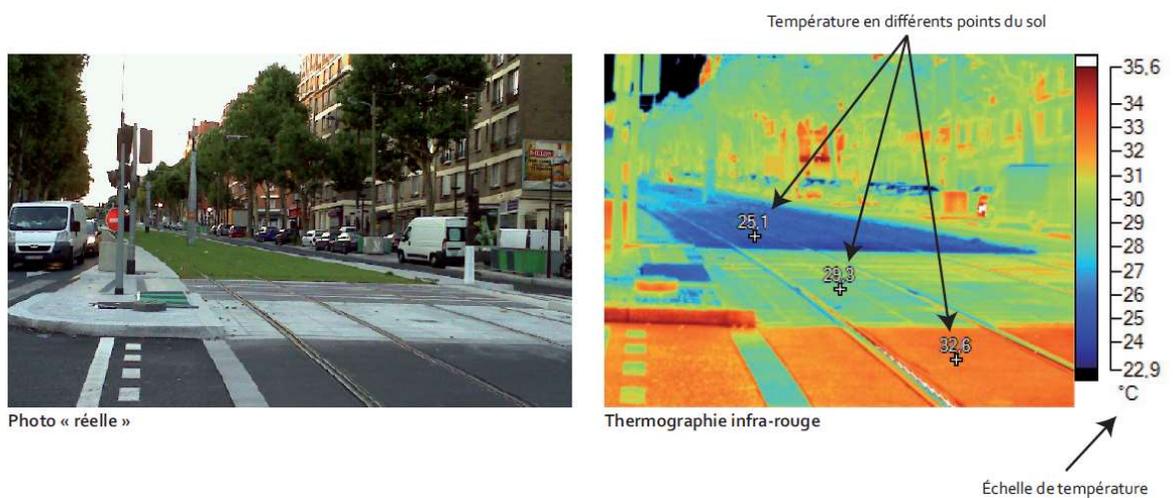


Figure 7. Cliché de thermographie infra-rouge : tramway T3 (Alba et al., 2012)



Figure 8. Cliché de thermographie infra-rouge : bassin de l'arsenal (Alba et al., 2012)

Les températures des matériaux levées sur le T3 montrent que les revêtements en gazon (construits sur un technosol) permettent de conserver des températures inférieures de 7,5°C par rapport à un sol traité traditionnellement par un revêtement imperméable.

Ainsi, pour réduire l'effet d'augmentation de température en surface, les structures végétales ont un rôle à jouer dans les aménagements urbains. Elles agissent grâce à plusieurs leviers :

- Elles créent de l'ombre sur les surfaces de bâtiments,
- Elles augmentent l'albédo,
- Elles offrent une protection aux échanges conductifs des surfaces.

Pour étudier l'atténuation de chaleur, il faut réaliser un bilan d'énergie. Le bilan radiatif fait le rapport des flux émis par le soleil et l'atmosphère à ceux émis et réfléchis par la surface.

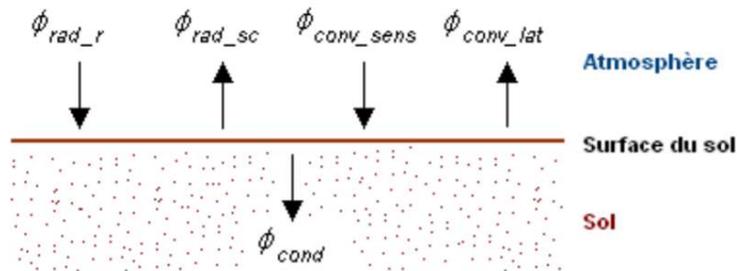


Figure 9. Bilan des flux thermiques à la surface d'un sol (Thiers & Peuportier, 2007)

Le bilan d'énergie s'exprime par l'équation :

$$\Phi_{cond} = (\Phi_{rad_r} - \Phi_{rad_{sc}}) + (\Phi_{rad_{sens}} - \Phi_{rad_{lat}}) \quad \text{Équation 1.}$$

Avec :

Φ_{cond} (W.m^{-2}) flux conductif vers le sol,

Φ_{rad_r} (W.m^{-2}) flux radiatif solaire reçu,

$\Phi_{rad_{sc}}$ (W.m^{-2}) le flux radiatif émis vers le ciel,

$\Phi_{conv_{sens}}$ (W.m^{-2}) flux convectif,

$\Phi_{conv_{lat}}$ (W.m^{-2}) flux latent échangés avec l'air.

Le bilan radiatif est donc la résultante de la différence entre les flux entrants et les flux sortants.

Une meilleure infiltration de l'eau dans le sol urbain grâce à l'utilisation de revêtements poreux peut contribuer indirectement à atténuer un îlot de chaleur urbain en acheminant l'eau plus facilement au niveau des racines des végétaux accompagnant généralement les voiries. La végétation étant mieux pourvue en eau augmente l'évapotranspiration, ce qui rafraîchit l'air et participe aussi à la séquestration du CO_2 lors du processus de photosynthèse.

Les chaussées poreuses, malgré leur coût élevé, montrent donc de réels avantages en atténuant l'effet d'îlot de chaleur urbain, en aidant au maintien de l'activité biologique du sol des épaulements ou en favorisant la bonne santé des espèces d'arbres en milieu urbain. Toutefois, il reste à développer la recherche sur la durabilité, les besoins de maintenance et les effets à long terme de ces chaussées poreuses sur les caractéristiques du sol et des plantes (Adindu et al., 2014).

Un réseau de trottoirs végétalisés et poreux, permettant la circulation à vélo dans des environnements densément construits, constituerait ainsi un nouvel écosystème artificiel contribuant à améliorer les conditions de vie.

II.2 L'artificialisation : causes, enjeux, leviers du changement

Les risques anthropiques liés à l'utilisation des sols par l'agriculture sont bien connus : le drainage mécanisé aggrave l'érosion des sols qui accroît le transfert de sédiments dont le changement de destination a un impact négatif immédiat sur le ruissellement des eaux de précipitation et d'irrigation mais aussi un effet durable d'appauvrissement qui deviendra irréversible (Chéry et al., 2014). La notion d'artificialisation des sols, appliquée aux usages non agricoles, non forestiers et non « naturels » des sols, considérée comme l'une des principales causes de l'érosion de la biodiversité, est très présente dans le débat public. L'importance de ses enjeux m'invite à la définir clairement et à préciser ce que peut recouvrir cette notion. Selon Chéry et al. (2014), l'artificialisation traduit un changement d'occupation du sol, qu'il soit bâti (constructions...), revêtu (circulations...) ou encore lieu de stockage de matériaux ou d'extraction (carrières). Il s'agit donc de surfaces qui ont subi une modification anthropique de leur état initial, incluant aussi les espaces verts (jardins, parcs), les surfaces agricoles, ou encore les zones naturelles. Pour Béchet et al. (2017), « l'imperméabilisation » des sols est un état perturbant qui interfère dans le processus de transformation des surfaces. Le taux d'imperméabilisation d'une surface artificialisée est la proportion de matériau hermétique ou étanche, tel que le béton ou l'asphalte, qui la recouvre (Valérian et al., 2018). Depuis plus de trente ans, l'artificialisation des terres se poursuit en France à travers la multiplication des seuls espaces imperméabilisés, bâtis ou revêtus comme les routes et les parkings, leur superficie a crû de 1,5 % par an entre 1981 et 2012, soit trois fois plus vite que la population de ces mêmes territoires. Ces équipements et leurs annexes logistiques provoquent une perte pure et simple des terres et une fragmentation des écosystèmes qui favorisent le déclin de la biodiversité, comme en témoigne la perte de 30 % des espèces d'oiseaux communs en 15 ans dans les campagnes françaises (communiqué du MNHN, 2018). Cette tendance se traduit aussi en Europe, par exemple en Allemagne par la chute de plus de 75 % de la biomasse d'insectes en seulement 27 ans (Hallmann et al. 2017). Selon une étude du Commissariat général au développement durable, 40 % de l'artificialisation en France se produit dans des zones à fort taux de vacance de logements et même 20 % dans des communes dont la population décroît. En l'absence de besoin apparent, le phénomène s'explique pourtant très bien par l'abandon des centres-bourgs par les habitants, migrant vers les zones périphériques sous les coups conjugués de la grande distribution (mort du commerce au détail, chute des prix de revient agricoles et offre foncière consécutive), de la promotion de l'automobile et de la circulation sur les réseaux précités, et

des incitations fiscales et bancaires à la construction pavillonnaire. En ajoutant le « laissez faire » voire l'encouragement à la construction en zones inondables, on peut dire que tout a été fait pour l'artificialisation des terres et l'accroissement du risque d'inondation !

Pour compenser l'artificialisation, chaque année en France métropolitaine, la création de sols fertiles nécessiterait l'introduction de plus de 3 millions de mètres cubes de ressource primaire « terre » dans la ville. En parallèle, les matériaux issus de l'activité de construction ou de déconstruction (en 2012 : 380 millions de tonnes dont 240 issus des déchets de construction) ne sont valorisés qu'à 50 %. L'acheminement vers l'installation de stockage des déchets des classes de matériaux issues du décapage (ressources en terre) et des travaux de terrassement et autres atteignent 60 % des volumes soit environ 45 millions de mètres cubes. On retrouve la matière organique représentée par les déchets verts, les boues issues de stations d'épuration, ainsi que les terres excavées, les gravats, rejets issus des villes et faiblement valorisés (Vidal-Beaudet, 2018). La filière de valorisation doit prendre en compte ces volumes et proposer des solutions durables notamment pour les terres excavées inertes et les matériaux organiques qui respectent la réglementation relative à l'innocuité pour les cultures et l'homme et les seuils de concentration en polluants. La création de technosol est une solution permettant de valoriser divers matériaux formant des sols anthropiques artificialisés ainsi que les matériaux de déconstruction et de terrassement du BTP, et de créer des sols fertiles qui supportent les cultures urbaines, favorisent la diminution des îlots de chaleur, et réduisent les concentrations de polluants atmosphériques. La loi de protection de la nature dans son article 2 (Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, 1976) instaurait le principe de la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC) au sein des études d'impacts des projets d'aménagement du territoire. Elle imposait à tout projet de mettre en œuvre une hiérarchie d'atténuation des impacts en les évitant, en s'efforçant de les réduire par une prévention adaptée et enfin en compensant, par une action bénéfique indépendante, ceux de leurs effets que l'on ne pourra pas atténuer. Récemment, le code de l'environnement, au travers de 2 articles se trouvant dans le livre 1 aux titres 1 et 2, fixent les principes généraux de la séquence Éviter-Réduire-Compenser, la rendant applicable à l'ensemble des composantes de l'environnement (Code de l'environnement - Article L122-3, 2018). Les plans et programmes tels que les Schémas de cohérence territoriale (SCoT), principalement les articles, L. 141-1 à L. 143-50 et R. 141-1 à R. 143-16 du code de l'urbanisme (Cerema, 2020) et les plans locaux d'urbanisme intercommunaux (PLUi) principalement les articles L. 151-1 à L. 154-4 et R. 151-1 à R. 153-22 du code de

l'urbanisme (Code de l'urbanisme | Legifrance Plan Local d'Urbanisme, 2015) qui orientent et arbitrent entre les zones naturelles et urbaines, devraient donner une vision globale des zones à préserver en amont des projets pour que soit mise en application de façon plus contrainte la partie "évitement" de la séquence ERC. Les besoins d'artificialisation et la manière dont on pense l'aménagement devraient être ainsi mieux encadrés. Les projets concernés par la séquence ERC sont les Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) que l'on retrouve dans l'annexe 2 à l'article R122-2 du code de l'environnement (Code de l'environnement - Article Annexe à l'article R122-2, 2019), les projets entrants dans le cadre des autorisations au titre de la loi sur l'eau, les dérogations « espèces protégées » aux incidences Natura 2000 et aux défrichements à partir des seuils rencontrés pour chaque catégorie. Toutefois, les acteurs peinent souvent à comprendre ce qu'est concrètement une mesure d'évitement, de réduction ou de compensation, ce qui entrave l'efficacité de cette loi (Bigard, 2019). Une faille dans le périmètre d'action de la séquence ERC persiste car les projets situés en dessous d'une certaine taille (cf. Annexe 1) ne sont toujours pas soumis à l'évaluation alors qu'ils représentent 40 % de l'artificialisation du territoire français. Le bilan des séquences ERC sur les grands projets franciliens issus des travaux du Grand Paris, effectué par le Museum nationale d'histoire naturelle et l'agence de la biodiversité, montre que 80 % d'entre eux ne répondent pas aux objectifs d'absence d'atteinte à la, ou de gain de, biodiversité (Berté, 2020). Les projets évalués font ressortir un problème de gouvernance tant de la part des institutions qui sont trop complaisantes lors de l'instruction des dossiers, que des entreprises et des bureaux d'études qui sont mal formés et pas accompagnés par des écologues ; enfin, le suivi et le contrôle des mesures reste insuffisant (Zucca, 2020). Il faudra donc pouvoir « s'appuyer sur des plans et programmes qui prennent vraiment en compte la biodiversité et l'état des milieux naturels » pour approcher l'objectif de zéro artificialisation nette ou « ZAN » issu du Plan Biodiversité initié par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire du 4 juillet 2018 (Plan Biodiversité, 2018). Au travers du plan Biodiversité, l'État souhaite la mise en œuvre d'une résilience nationale afin de : « Reconquérir la biodiversité, une question de survie de nos sociétés ». Ce plan s'articule autour de 6 axes stratégiques composés en 24 objectifs et 90 actions en faveur de la biodiversité, l'objectif ZAN étant développé dans l'action 10 (cf. Annexe 2 : plan Biodiversité). Je peux ainsi citer les deux axes mettant en cause l'artificialisation des sols qui permettent d'inscrire mon projet de création de technosols dans le plan Biodiversité et d'en faire une des réponses pouvant être apportée dans le cadre de ce plan (Comité

interministériel Biodiversité, 2018). Le mémoire s'inscrit dans les deux axes suivants du Plan Biodiversité :

- Axe 1 : Reconquérir la biodiversité dans les territoires, l'objectif : « Limiter la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers pour atteindre l'objectif de zéro artificialisation nette ».
- Axe 3 : Protéger et restaurer la nature dans toutes ses composantes, l'objectif : « Agir pour la préservation de la biodiversité des sols ».

II.3 Un paradoxe : la pression à l'urbanisation, source d'étalement urbain et de périurbanisation

L'Encyclopedia Universalis en ligne définit l'urbanisation comme étant une discipline nouvelle, née de notre société industrielle : c'est le processus d'organisation spatiale des villes (Universalis, George).

Marc ANTROP souligne l'influence du développement des infrastructures de transport sur l'urbanisation, ce processus étant contrôlé par des facteurs sociaux et économiques. Il défend l'idée que la réduction des temps de transport entre les villes et les pays influe sur la morphologie urbaine, qui sera alors de deux types (Antrop, 2004) :

- Construction dite « en grappe » ou les villes restent à une distance relativement proche : avec l'engorgement des centres historiques, le prolongement de l'urbanisation s'est effectué le long des voies d'accès.
- Construction périurbaine autour d'une ville principale qui étend son influence sur un vaste arrière-pays : la mobilité des personnes liée aux modes de transports rapides a contribué à l'étalement urbain.

L'urbanisation favorise l'accroissement des surfaces imperméables et a de nombreuses conséquences qui affectent particulièrement le cycle urbain de l'eau, et de ce fait l'environnement en général. L'urbanisation du XIXe siècle avec un taux de 4 à 7% était conditionnée par l'accessibilité aussi bien pour les villes que les zones rurales, notamment par l'arrivée de nouveaux modes de transport comme le chemin de fer qui a permis le déplacement de masse, puis de l'automobile qui a influencé la transformation du paysage.

Le rapport de l'agence européenne pour l'environnement AEE de 2010 confirme que la pression urbaine est bien la principale source d'artificialisation des sols : selon l'estimation (AEE, 2010) les zones urbaines qui regroupaient 75 % de la population européenne allaient en accueillir 80 % en 2020. Aujourd'hui, les zones européennes qualifiées de périurbaines

contiennent autant de surface de terrains bâtis que les zones urbaines, alors que la densité démographique y est deux fois moins élevée.

II.4 Les réponses techniques apportées au ruissellement

La gestion des eaux pluviales doit dorénavant contribuer à la réduction des pressions sur les milieux aquatiques au même titre que la mitigation des risques d'inondation.

À Rome à la fin du VIII^e siècle av. J.C. les ingénieurs Romains entreprirent la construction du Cloaca Maxima, grand collecteur qui, à l'origine, canalisait un petit affluent du Tibre et petit à petit, collectait les eaux de ruissellement des bassins versants voisins, répondant au besoin d'assainissement de la vallée du Vélabre. Avec le temps, il fut progressivement recouvert. Il en fut de même dans toutes les grandes cités de l'époque gallo-romaine, comme à Bordeaux sur le site de Saint-Christoly où l'on constate qu'en raison de la pression urbaine des III^e et IV^e siècles, le collecteur fut recouvert pour favoriser la densification du bâti. Sur le territoire d'Orange, les Gallo-Romains détournèrent même la rivière et réalisèrent des travaux d'aménagement fluvial par des remblais édifiés sur le lit pour écarter du centre-ville le danger des crues. À Riez au nord-est du lac de Sainte-Croix l'Empereur Auguste fonda la Civitas Julia Augusta Reiorum Appoliaris, cette agglomération protégeant la population des crues, et aménagea très tôt des chenaux sur les cours d'eau le Colostre et son affluent l'Auvestre pour en limiter les effets (Allinne, 2007).

Dans sa thèse, Christophe CHAMOUX (2013) rappelle les dangers liés au réseau d'eau pluviale : « *Le sous-dimensionnement des réseaux d'eaux pluviales engendre deux dangers : la mise en charge fréquente des réseaux, accompagnée d'inondations ; la pollution du milieu naturel par des rejets inopinés d'effluents* ». L'instruction technique 77-284 a donné un cadre officiel aux ouvrages de stockage et de régulation des eaux pluviales. Les fonctions des ouvrages de rétention se sont élargies au traitement qualitatif des eaux (décantation, dégrillage, orientation des boues vers les stations d'épuration, etc.) (Chamoux, 2013).

La résolution du problème d'insuffisance des réseaux et de pollution des milieux récepteurs passe depuis 1977 par l'obligation d'installer des ouvrages de rétention avec une maîtrise des débits de rejet qui est devenue de plus en plus restrictive avec les années, les épisodes d'inondation et les contentieux juridiques impliquant les maires. Les contraintes imposées par le législateur décrites dans le chapitre II.5 « *Des exigences environnementales renforcées, les leviers réglementaires* » sont à l'origine de solutions techniques et économiques avec pour objectifs la lutte contre les inondations en écrêtant l'onde de débit

dans le réseau, le piégeage des polluants à la source, la restitution d'une eau de qualité dans le milieu récepteur pour maintenir la vie aquatique, et l'insertion paysagère des ouvrages.

Il existe deux grands principes de réduction du débit de pointe :

- L'amortissement en amont par la conservation diffuse des débits.
- L'écrêtement de l'hydrogramme par rétention à l'amont et effet de retard de l'écoulement sur le réseau.

On retrouve ainsi des grands principes d'aménagement répondant aux attentes de gestion des eaux pluviales :

- Les bassins d'infiltration : ils captent les eaux de ruissellement qui sont acheminées dans des bassins aménagés permettant l'infiltration des eaux captées.
- Les bassins de retenue : ils sont utilisés lorsque les conditions d'infiltration ne sont pas réunies (présence de gypse, pente trop importante, taux d'infiltration supérieur à 10^{-6} m/s) ; généralement les contraintes (en L/s ou L/s/ha) de rejet au réseau ou dans le milieu sont imposées par les SAGE et relayées par le PLU et le syndicat de gestion des eaux.
- Le bassin de stockage restitution (BSR) est utilisé sur un réseau unitaire pour éviter la surcharge du réseau et de la station d'épuration lors d'épisodes pluvieux.
- La régulation continue est une technique ayant pour principe une rétention la plus en aval possible des eaux d'orages avec une continuité de rétention assurée par une série d'exutoires en cascade. Ces aménagements sont intégrés généralement aux espaces verts et espaces de loisirs disposés dans une dépression.
- Les structures réservoirs : c'est une solution technique compensatoire consistant à stocker les eaux pluviales dans le corps de chaussée en utilisant des matériaux à forte porosité ou des structures alvéolaires ou enfin un réseau de drainage.

Le dimensionnement des structures de chaussées réservoirs doit prendre en compte la perméabilité du revêtement, les conditions de résistance au gel, la pente générale du terrain, la présence de nappe, le trafic routier attendu, ainsi que l'entretien (Bourrier et al., 2012). Le choix de systèmes permettant l'infiltration et la filtration induit des options concernant les dimensions (superficie, volume de stockage et périmètre) et nécessite de contrôler le débit de sortie, comme tout aménagement en gestion des eaux pluviales depuis la loi sur l'Eau du 3/01/1992 (cf. Annexe 3 : Principe de réduction des écoulements superficiels par filtration). Les techniques d'infiltration à la parcelle peuvent modifier le bilan hydrique et les débits, selon trois processus : la diminution des écoulements de surface, l'amélioration des

écoulements souterrains et l'augmentation de l'évapotranspiration en présence de végétation. L'utilisation d'un système de filtration avec végétation entraîne un apport de 10 % aux eaux souterraines et dans certaines zones jusqu'à 25 % en fonction du sol local (Hamel et al., 2013). Le recours au massif drainant est de plus en plus répandu notamment pour répondre aux critères demandés par la DRIEE des Yvelines (78) pour le traitement des eaux de ruissellement des parkings d'habitations pour lesquels le traditionnel séparateur à hydrocarbures est dorénavant proscrit. Lors de la conception, une modélisation des bassins versants devra être faite pour intégrer des systèmes d'infiltration à la parcelle.

Les noues sont des fossés peu profonds avec des talus ayant une pente faible (inférieure à 30 %) pouvant être plantés. Elles permettent la collecte des eaux pluviales, leur régulation et infiltration. Elles sont de plus en plus utilisées en association avec des végétaux phytoremédiant ainsi que du substrat sableux pour le traitement des eaux issues du ruissellement des parkings. Elles sont une alternative aux séparateurs d'hydrocarbures. À une échelle plus importante du quartier, on trouve l'aménagement de jardins d'orage, ainsi que les bassins de stockage installés en dépression, permettant l'écêtement des pluies.

Pour démontrer les effets des chaussées perméables sur l'état hydrique du sol, le cycle du carbone et la physiologie des arbres urbains, l'équipe de A. FINI a réalisé une expérience pendant 4 ans avec trois chaussées différentes par leur perméabilité à l'eau et aux gaz, qui a donné d'intéressants résultats. Le cycle de l'eau a bien été modifié par les 3 types de chaussées mais moins intensément par la chaussée poreuse qui a favorisé une meilleure infiltration et évaporation de l'eau que les sols pavés et l'asphalte (Fini et al., 2017).

II.5 Des exigences environnementales renforcées, réglementation

Les pouvoirs publics maîtres d'ouvrages, les acteurs privés maîtres d'œuvre et les entreprises doivent travailler, dans le cadre des projets d'aménagement urbain, sur des process permettant une classification des matériaux en fonction de leur innocuité. Ils doivent aussi évaluer la faisabilité de leur utilisation comme matériaux parents, en fonction des services rendus souhaités, tout en s'inscrivant dans le cadre de la réglementation.

II.5.1 Règlementation sur l'eau

Le droit actuel régissant l'eau est fondé sur 3 grandes lois.

Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution ; elle constitue la première étape définissant l'eau comme un patrimoine

commun (Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution | Legifrance, 1964).

Jusqu'en 1992, la maîtrise des écoulements d'eaux pluviales reposait surtout sur le Code civil, à travers la servitude d'écoulement naturel entre propriétaires. La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 instaure l'objectif de garantie d'une gestion équilibrée de l'eau qui s'applique à l'échelle des grands bassins hydrographiques au sein desquels sont définis les grands axes de la politique de gestion de l'eau en eau et de protection des milieux naturels aquatiques (Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, 1992).

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, modifiée par la loi Grenelle II du 12 juillet 2010, visant la réalisation de conditions permettant « un bon état écologique des masses d'eaux" en 2015, conformément à la directive européenne du 23 octobre, donne des outils nouveaux aux maires et aux communautés d'agglomération pour gérer les services publics de l'eau et de l'assainissement dans la transparence. Elle reprend les principes de la loi de 1992 et précise que son usage est prioritaire pour la consommation humaine (Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques, 2006).

Elle instaure deux nouveaux systèmes de planification globale de la ressource en eau : les SDAGE pour chacun des grands bassins hydrographiques français, et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) élaborés à une échelle plus locale. Elle pose aussi le principe des installations, ouvrages, travaux et activités (IOTA) susceptibles d'avoir des incidences sur l'eau et les milieux aquatiques sont soumis à autorisation ou déclaration par le biais d'un document présentant les mesures correctrices et compensatoires envisagées, les moyens de surveillance et d'entretien et démontrant la compatibilité du projet avec le SDAGE et le SAGE.

Depuis l'ordonnance du 18 septembre 2000 qui dote notre code de l'environnement d'une partie législative, les projets d'aménagement dont le rejet des eaux pluviales est prévu dans le milieu naturel sont soumis au dépôt d'un dossier auprès des services de la Police de l'eau et des milieux aquatiques, au titre de la rubrique 2.1.5.0. de l'article R 214-1 du code de l'Environnement qui définit les seuils d'autorisation (A) ou de déclaration (D) (Code de l'environnement - Article R214-1, 2017) (cf. Annexe 4 : code de l'environnement, installation classée pour la protection de l'environnement) :

« Rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin versant naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant » :

- ≥ 20 ha AUTORISATION (A)
- ≥ 1 ha mais < 20 ha DECLARATION (D)

Les communes (et leur groupement) sont désormais chargées de délimiter un zonage inscrit dans l'art. L. 2224-10 du code général des collectivités territoriales du 12 juillet 2010, alinéas 3° et 4° (Code général des collectivités territoriales - Article L2224-10, 2010), elle est aussi appelée loi Grenelle II ou loi ENE soumis à enquête publique, leur permettant d'instaurer des mesures de maîtrise de l'imperméabilisation des sols et des écoulements d'eaux pluviales, au travers des outils PLU qui introduisent les enjeux environnementaux dans l'instruction des sols. Aujourd'hui le PLU ou PLUi définit ce qui est autorisé à la construction et dans quelles conditions, la façon de gérer l'eau à la parcelle et impose le coefficient maximum d'imperméabilisation. Les communes et communautés de communes qui instruisent les permis de construire et d'aménagement sont donc dotées d'un outil puissant qui leur permet de contrôler et d'agir sur l'urbanisation ainsi que sur l'imperméabilisation des sols de leur territoire.

Le PLU permet de détailler des zones constructibles ou non dans une commune, de lister les règles et droits à construire sur chaque zone, avec des schémas et explications (art. L123-1-5 du code de l'urbanisme) et dans le respect du règlement d'assainissement en cas de raccordement encore permis aux réseaux unitaires (art. L 1331-1 du code de la santé publique). Les nouveaux raccordements de réseaux de collecte d'eaux pluviales aux réseaux de collecte unitaires doivent rester exceptionnels et être justifiés par la commune, conformément à l'arrêté du 22 juin 2007.

II.5.2 Règlementation sur les sols

Dès les années 1970, la protection de l'environnement devient un enjeu international qui va crescendo et aboutit au sommet de Rio et à la publication de la Convention sur la diversité biologique (CDB) en 1992. En France, en 2000, la loi SRU relative à la solidarité et au renouvellement urbain préconise de renouveler le bâti existant plutôt que de s'étendre sur les zones naturelles. Le Parlement Européen votait en première lecture le 14 novembre 2007 en faveur du projet de directive-cadre sur la protection des sols (non adoptée finalement), qui fixait les objectifs à atteindre pour les États membres pour :

- L'inventaire des sites pollués,
- Lister des zones prioritaires de protection,
- La mise en place d'une stratégie d'assainissement ou restauration des sols,
- Le devoir de mémoire et d'information.

De ces quatre objectifs je retiens celui concernant les zones prioritaires qui insiste sur la protection des sols contre l'érosion, le tassement, la salinisation ainsi que la perte de matière organique. L'objectif s'inscrit dans la lutte contre le réchauffement climatique et dans une lutte contre l'appauvrissement des sols et leur acidification, et plus généralement contre la désertification (EUR-Lex - 52006PC0232 - FR, 2006).

Mais la réglementation devient pertinente à partir des conférences gouvernementales dites « Grenelle de l'environnement » en 2009 et 2010 qui donnent naissance à l'outil de trame verte et bleue et prônent la reconnaissance du besoin des espèces à pouvoir circuler sur le territoire, notamment dans le contexte du changement climatique. C'est l'avènement du concept de la continuité écologique.

La loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (ALUR) en 2014 incite ensuite à maîtriser l'étalement urbain en réformant, entre autres, les documents d'urbanisme.

Toutefois, si les améliorations réglementaires sont notables, le taux d'artificialisation continue à progresser indépendamment de la lente augmentation de la population française. Par ailleurs les besoins d'espace des citoyens sont croissants et avec la crise du Covid-19, beaucoup ont fui les centres villes pour s'installer dans des lieux moins urbanisés, ce qui risque de redonner de l'élan à la périurbanisation.

II.5.3 Règlementation sur les déchets

Le code de l'environnement dans son article L541-2 énonce que tout producteur de déchets est responsable de la gestion de ses déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale.

L'article L. 541-1-1 définit comme valorisation « toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets ». La jurisprudence précise par ailleurs que l'opération de valorisation doit impliquer une économie des ressources naturelles compte tenu de la substitution d'autres matières par des déchets, et que cette économie de ressources naturelles doit primer sur l'obligation de traiter les déchets en question. La note nomenclature sur les déchets du 25 avril 2017 (DGPR, 2017) impose que la gestion des terres excavées, polluées ou non, hors de leur site d'origine, soit conforme aux référentiels en vigueur, en respectant les modalités de traçabilité et de responsabilité. Concernant les projets d'aménagement, toute personne valorisant des déchets pour la réalisation de travaux d'aménagement, de réhabilitation ou de construction doit pouvoir justifier auprès des autorités compétentes de la nature des déchets utilisés et de l'utilisation

de ces déchets dans un but de valorisation et non pas d'élimination. Ainsi, si un maître d'ouvrage ne souhaite pas utiliser les principes du guide de valorisation des terres excavées, il doit examiner les différentes voies de valorisation avant d'envisager l'envoi en installation autorisée de traitement ou d'élimination de déchets (Coussy et al., 2017). Les terres excavées peuvent être valorisées si les conditions listées ci-dessous sont simultanément respectées :

- Condition A : la qualité des sols du site receveur est maintenue et la valorisation de terres excavées sur un site receveur est possible si les substances caractérisées au sein des terres présentent des teneurs inférieures ou égales à celles caractérisant le fond pédo-géochimique du site receveur.
- Condition B : la qualité des ressources en eau est maintenue et les écosystèmes sont préservés.
- Condition C : les caractéristiques chimiques des terres excavées sont compatibles sur le plan sanitaire avec l'usage futur du site receveur.

Pour respecter ces conditions, une démarche à trois niveaux est proposée dans le guide de valorisation hors-site des terres excavées (Coussy et al., 2017).

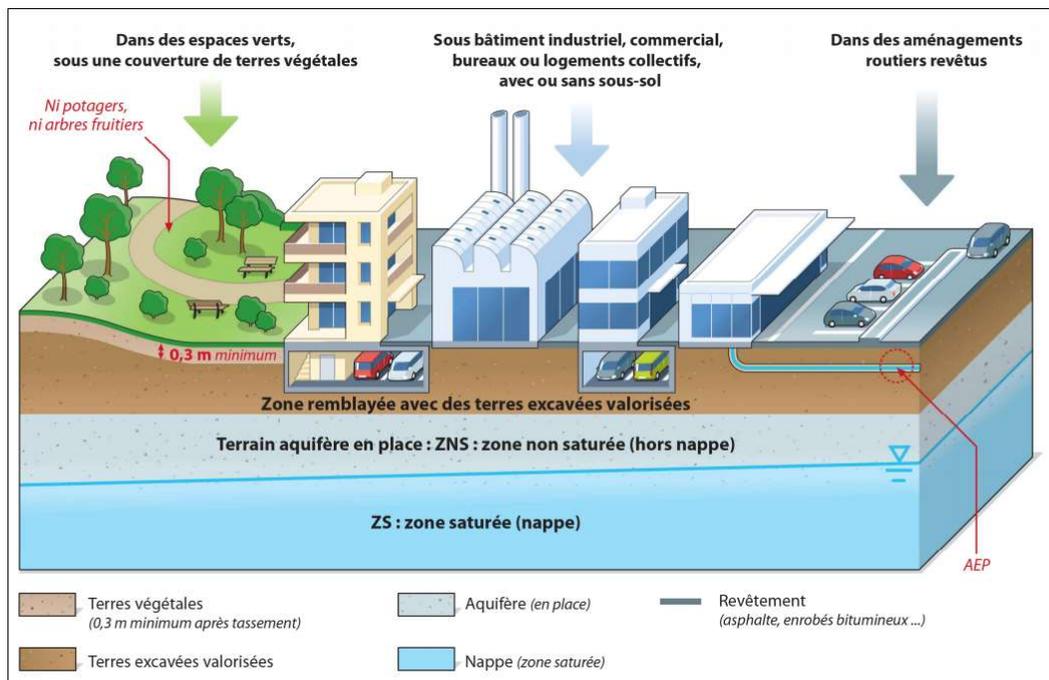


Figure 10. Domaine d'emploi des terres excavées au niveau 1 (Coussy et al., 2017)

Les maîtres d'ouvrage devront prendre en compte dans leurs études préliminaires la gestion des terres excavées. Les conditions d'emploi seront soumises à la recherche de polluants qui

permettra de définir si la terre excavée est inerte ou polluée pour en déterminer les conditions de valorisation. Le guide de valorisation des terres excavées travaille sur une hiérarchisation à 3 niveaux : le premier niveau qui est aussi le plus fréquent avec des terres non polluées pour lesquelles les éléments traces et composés organiques sont en dessous des seuils recommandés, valorisables selon les modalités synthétisées dans la figure 10 ; au-delà de ces seuils, le guide propose deux autres niveaux pour les matériaux susceptibles d'être valorisés et indique les zones possibles d'utilisation. Pour les besoins de mon projet je m'intéresse uniquement aux terres excavées non polluées permettant une utilisation sans restriction (niveau 1, figure 10).

Ainsi l'arrêté du 12/12/2014 définit comme inerte un matériau respectant les valeurs limites citées (cf. Annexe 5 / 6 / 7 listes des valeurs seuils : Coussy et al., 2017), le site receveur devant faire l'objet d'une caractérisation de son fond géochimique ; les matériaux entrant ne devront pas modifier négativement l'existant en augmentant les concentrations mesurées des éléments traces et composés organiques (Arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et dans les installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées, 2014). Une analyse des risques devra être effectuée sur la masse d'eau présente du site receveur ou sur la masse d'eau utilisée pour l'usage le plus sensible parmi l'ensemble des masses d'eau présentes sur la zone d'étude. Un état zéro devra être réalisé pour en déterminer le fond géochimique.

II.5.4 La trame verte et bleue (TVB)

Depuis la LOI n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (2014), de nouveaux outils sont disponibles modifiant le code de l'environnement, renforcés par le Décret n° 2019-1400 du 17 décembre 2019 adaptant les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques.

Parmi eux, la mise en place d'une trame verte et bleue (TVB) représente un outil intéressant de planification pour les projets d'aménagement, visant à préserver la biodiversité et à assurer une continuité écologique favorisant le maintien du cycle de vie des espèces animales et végétales. La TVB est donc un outil complémentaire venant également renforcer la législation environnementale. Les collectivités doivent prendre en compte les Schémas Régionaux de Cohérence Écologique dans l'élaboration et la révision de leurs documents d'aménagement et d'urbanisme, article L371-3 du code de l'environnement (Code de l'environnement - Article L371-3, 2016). La TVB permet de délimiter ou de localiser les

zones de continuité écologique comprenant les réservoirs de biodiversité et les corridors écologiques (articles R. 371-16 du code de l'environnement) (Code de l'environnement - Article R371-16, 2016) ayant une orientation de protection des espèces et de leur espace, en prenant en considération leur fonctionnement écologique. La TVB s'articulera donc sur le plan local autour des Schémas Régionaux de Cohérence Écologique, des SCoT et du PLU. On peut citer à titre d'exemple le SRCE du Pays de Rennes qui est intégré dans le SCoT identifiant la Trame Verte et Bleue de son territoire. Il fait l'inventaire des parcelles protégées de toute urbanisation future, on y retrouve les zones à enjeux agricoles, paysagers, forestiers mais aussi la localisation des corridors écologiques (Philippe et al., 2012). La TVB ne se cantonne pas à sa fonction écologique mais intervient aussi sur d'autres leviers qui me concernent directement. Les objectifs majeurs et sous-objectifs de la TVB sont (Paquier et al., 2019) :

- La régulation des eaux et des crues (service rendu par la création de technosol, objectif principal),
- Le maintien et renforcement de la biodiversité (développement d'une faune et d'une flore au sein du technosol, objectif principal),
- La mise en valeur paysagère des espaces et l'amélioration du cadre de vie (objectif principal),
- L'amélioration de la qualité des eaux (objectif secondaire),
- La réduction des îlots de chaleur (objectif secondaire).

Les TVB trouvent ainsi un écho à travers mon travail en partageant des objectifs communs, notamment la réduction de la régulation des eaux et des crues.

II.6 « Imperméabilisation » : sa mesure et sa cartographie

Pour BELLEC et al. (2015) du conseil général de l'Écologie et du Développement durable, « l'imperméabilisation » n'est pas clairement définie, le mot exprimant plutôt la perception d'une menace sur les sols européens due à l'extension urbaine et aux infrastructures de communication ayant pour conséquence une perte de leurs fonctions. Les modèles qui permettent l'évaluation de l'artificialisation du sol français sont issus d'échantillonnage de terrain pour en extrapoler les surfaces ;

- l'enquête basée sur le foncier, qui est un traitement des données issus du cadastre ;

- l'enquête Teruti-Lucas qui est une approche croisée entre des données d'enquêtes de terrain et des données permettant d'extrapoler le type d'occupation des sols. Les données de terrain sont estimées à partir de carrés compris entre 40 et 178 ha.

Les informations de terrain sont par la suite traitées à l'échelle départementale et nationale. La photo-interprétation, l'exploitation d'images aériennes et satellitaires à très haute résolution, intervient pour produire des cartes d'occupation des sols (Béchet et al., 2017). Ces images sont aussi exploitées dans la BD Occupation du sol et la BD Ortho®, composante du référentiel à grande échelle RGE® qui gère des données géographiques pour les acteurs publics et privés. Elle permet l'identification des milieux tels que les milieux naturels, forestiers, aquatiques, agricoles, et permet l'identification des infrastructures urbaines et de transports (loi Gouv., 2020).

II.6.1 Les résultats issus des bases de données

En France, deux dispositifs d'observation coexistent.

Le premier dispositif d'observation est l'enquête Teruti-Lucas réalisée par le service statistique du ministère de l'agriculture français qui permet de suivre annuellement l'usage des sols à partir d'environ 300 000 points d'observation, de quantifier les catégories d'occupation et d'usage des sols de l'ensemble du territoire Français. Une nomenclature permet de faire la distinction des sols rencontrés : les sols bâtis, les sols revêtus ou stabilisés, les sols cultivés, les surfaces en herbe, les sols boisés, les landes, friches et maquis, les glaciers et neiges, les zones humides et sous les eaux, et enfin les zones interdites (Béchet et al., 2017).

Le second dispositif d'observation est la base de données géographiques CORINE Land Cover produite par le service de l'observation et des statistiques du ministère de l'Écologie. Issue de l'observation satellitaire d'une résolution de 1 hectare, elle informe sur l'évolution de l'usage des sols et coordonne les systèmes d'information sur l'environnement à l'échelle communautaire dans l'Union Européenne.

Cependant, ces deux sources fournissent des informations quantitatives différentes, qu'il conviendrait de réconcilier. Par exemple, en 2014, les données fournies sur les surfaces bâties dépendent fortement des sources d'information : CORINE LC indique ainsi que 5,8 % des surfaces sont artificialisées par l'urbanisation et ses dessertes de voirie, alors que l'enquête Teruti-Lucas (Sédillot & Poullette, 2014) donne un taux de 9,3 % de la superficie totale du territoire en France (cf. Annexe 8 : Artificialisation des sols par région administrative). Les surfaces « imperméabilisées » seraient moindres : 2,8 % selon la source

CORINE HRL (couches à haute résolution) et 4,6 % selon Teruti-Lucas. Les différences proviennent d'une part de la résolution choisie qui diffère entre CORINE Land Cover (carré de 25 ha) et Teruti-Lucas (carrés compris entre 40 et 178 ha), d'autre part de leur méthode puisque CORINE LC fait de l'interprétation d'imagerie satellitaire, alors que Teruti-Lucas fait de l'extrapolation à partir d'échantillons d'enquêtes de terrain ; avec des échelles de résolution et des protocoles différents, les résultats ne peuvent être analogues.

L'évolution des surfaces artificialisées, pour la période 2000-2006, observée à partir de la base des changements enregistrés entre les versions successives de CORINE Land Cover (résolution de 5 ha) montre qu'en Europe, les surfaces artificialisées ont globalement augmenté de 2,7 %, soit l'équivalent de 1 078 km² de terres supplémentaires conquises chaque année. La France est le deuxième plus gros contributeur en valeur absolue (132 km²/an), derrière l'Espagne (254 km²/an). Toutefois, en valeur relative, la croissance des surfaces artificialisées en France se situe dans la moyenne européenne, autour de 0,5 %/an comme en Italie (AEE, 2010) (cf. Annexe 9 : Carte de la France, Progression de l'imperméabilisation). On peut prendre le cas de la ville de Madrid (Espagne) qui s'est dotée d'un système de mesure et de quantification des sols artificialisés ou dit scellés (mot à utiliser lorsqu'il y a une notion de construction : surfaces bâties, voiries, trottoirs, parkings, infrastructures industrielles, logistiques, militaires, aéroports et portuaires), alliant des outils de télédétection et des images satellitaires, dont l'objectif est l'évaluation des sols ayant encore des fonctions d'infiltration, de production agricole et de préservation de la biodiversité. D'après les données, la part des sols scellés de la commune est passée de 15 % à 24 % soit une augmentation globale de 9 % sur une période allant de 1984 à 2013 (29 ans). Cette évaluation a été faite avec une fiabilité de 86 %. Les résultats montrent que les sols fertiles existant le long de la rivière Manzanares ont été entièrement scellés, alors que les surfaces ayant des qualités agricoles inférieures ont été maintenues en l'état et restent non cultivées (García & Pérez, 2016). Les surfaces agricoles de Madrid sont destinées à des cultures non irriguées sauf pour le tronçon au sud de la rivière Manzanares. La commune de Madrid comprend un taux d'urbanisation de 50%, auquel il faut ajouter 15% d'urbanisation en devenir liée aux quartiers en cours de construction ; elle a également dédié 35% de sa surface à des espaces protégés interdisant toute construction, situés au nord-ouest de la ville. Le potentiel agricole des terres a été classé de I à VI par ordre décroissant de fertilité. La commune de Madrid recèle des sols de classe IV, pour la plupart de qualité médiocre. Les terres situées à l'est de la ville et bénéficiant d'une fertilité plus importante (avec classe

de terrain II ou III), ont été malheureusement perdues en raison de l'expansion de la ville. Il reste encore des terrains très fertiles au nord-ouest, avec des sols de classe IV et V.

Entre 1990 et 2012, l'Agence européenne pour l'environnement a publié les données complémentaires de CORINE Land Cover 3. Jusqu'en 2000, l'artificialisation des terres européennes a progressé d'environ 1 000 km² par an dans l'UE (une superficie supérieure à celle de la ville de Berlin) soit 275 ha par jour. Puis de 2000 à 2006, les zones urbanisées ont augmenté de près de 6 % ce qui correspond à 920 km² par an soit 252 ha par jour. Ce ralentissement du phénomène peut être attribué à la prise de conscience progressive des acteurs politiques. En France, celle-ci a été favorisée par la loi SRU relative à la solidarité et au renouvellement urbain qui préconise le renouvellement du bâti existant plutôt que son extension sur les zones naturelles ou agricoles.

Seules les données apportées par CORINE Land Cover permettent d'établir des comparaisons avec les autres États européens. Ainsi, en 2012, 4 % de la surface totale des 39 États européens étudiés étaient artificialisés. La France se situait au-dessus de cette moyenne avec 5,5 % de la surface du territoire métropolitain artificialisée, soit 3,1 millions d'hectares, essentiellement dans les grands pôles urbains. Quand on rapporte les surfaces artificialisées aux populations des principaux États membres de l'Union européenne, la France apparaît proportionnellement plus artificialisée que ses voisins. En 2006, la superficie totale des sols « imperméabilisés » était estimée à environ 2,3 % du territoire de l'UE, avec une moyenne de 200 m² par citoyen. Les États membres connaissant les plus forts taux d'artificialisation (plus de 5 % du territoire national) étaient Malte, les Pays-Bas, la Belgique, l'Allemagne et le Luxembourg. Les taux élevés d'artificialisation sont principalement observés dans les grandes agglomérations urbaines.

À l'échelle métropolitaine, selon l'enquête Teruti-Lucas, 5,1 millions d'hectares étaient artificialisés en 2014, soit 9,2 % de la surface du territoire. Parmi ces surfaces artificialisées, 1 million d'hectares correspondaient à des sols bâtis (soit 20 % du total artificialisé), 2,5 millions à des sols revêtus ou stabilisés (49 %) et 1,7 million à des sols artificialisés non imperméabilisés (31 %) (Fosse et al., 2019).

L'observatoire des milieux aquatiques recense un taux d'artificialisation de 61 % du littoral méditerranéen Français avec un triste record de 91 % pour les Alpes Maritimes. L'urbanisation est directement liée au tourisme de la fin XIX^e siècle et du XX^e siècle (Observatoire Régional Eau et Milieux Aquatiques, 2014) pour assouvir les besoins débordant de l'industrie touristique en nouvelles infrastructures et lieux d'accueil.

Il est remarquable que la superficie totale des zones urbanisées en France a augmenté de 3 %, soit une augmentation de près de 9 % entre 1990 et 2006. Or, sur la même période, la population n'a augmenté que de 5 % en moyenne. Eric CHARMES (2013) note, dans son travail sur l'artificialisation des sols en France, que la gravité du phénomène ne fait plus débat aujourd'hui et que les surfaces artificialisées croissent quatre fois plus vite que la population. Il souligne que les chiffres montrent une perte d'espaces naturels et agricoles en faveur de l'urbanisation. Il revient cependant sur l'utilisation des chiffres issus de la base Teruti-Lucas qui intègrent dans le calcul des surfaces artificialisées l'ensemble des constructions (voirie et habitat) mais aussi des espaces non bâtis comme les espaces verts, les terrains vagues ou équipements sportifs... Enfin, il conclut que le territoire français est menacé par l'extension des villes (Charmes, 2013).

En complément de ces données d'enquêtes spécifiques, les données administratives contiennent également des informations spatialisées. Le cadastre recense ainsi l'ensemble des propriétés foncières sur 98 % du territoire français à un instant donné. Le Système d'Information et de Traitement Automatisé des Données Élémentaires sur les Logements et les locaux (base de données SITADEL) enregistre également le flux des nouvelles constructions et recense l'ensemble des opérations de construction à usage d'habitation et à usage non résidentiel (locaux) soumises à la procédure d'instruction du permis de construire. Depuis 2012, les services de l'État et des collectivités, avec le concours de l'IGN, du Cerema ou encore du CNIG, ont collaboré à la construction d'une base de données nationale à grande échelle de l'occupation des sols qui permettrait un suivi régulier et exhaustif. Ce référentiel national d'Occupation des Sols à Grande Échelle (OCS GE) constitue à terme une base de données de référence pour la description de l'occupation des sols dans l'ensemble du territoire métropolitain et des départements et régions d'outre-mer. L'OCS GE est élaboré à partir des bases de données BD TOPO®, BD Forêt®, BD ORTHO® et du RPG (Registre Parcellaire Graphique). Sa couverture continue et homogène du territoire lui permettra de mesurer précisément la dynamique d'artificialisation des sols au niveau national. La première convention est signée en 2013 avec la Région Midi-Pyrénées, puis la Région Pays de la Loire rejoint le programme en 2014. Cet outil de prise de décision est très utile pour les collectivités sur le plan environnemental et urbanistique puisqu'il permet le suivi de l'artificialisation. Il a ainsi été utile au Pays Vallée Loire dans l'élaboration de son SCoT par son analyse fine des espaces naturels, agricoles et forestiers détruits. On note aussi son utilisation dans l'élaboration de la trame verte et bleue du département du Morbihan.

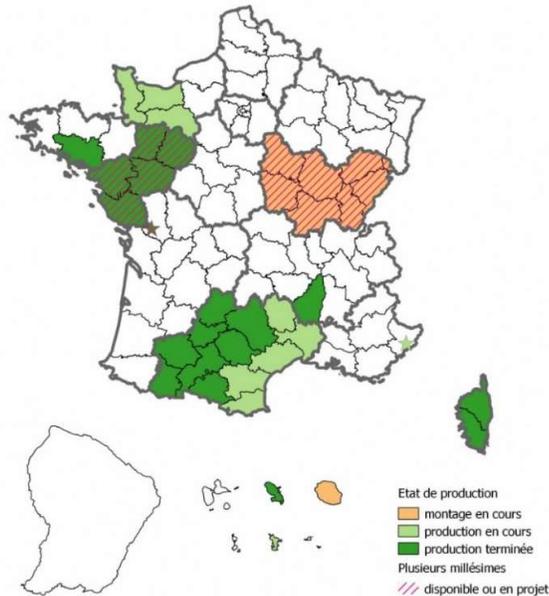


Figure 11. Carte de couverture du territoire par l'OCS GE au 1^{er} trimestre 2019
(Cerema, 2019)

La carte (figure 11) éditée par le Cerema (2019) montre que seulement 1/3 du territoire est couvert par le projet : peut-être le besoin n'est-il pas assez fort du côté des collectivités ou simplement, ce projet n'est pas suffisamment relayé. Cet outil d'aide à la décision devrait pourtant faire consensus au sein de l'ensemble des collectivités, l'enjeu étant d'avoir un outil uniforme sur le territoire qui faciliterait les travaux, notamment pour la trame verte et bleue de chaque territoire.

II.6.2 Cartes d'infiltration

L'infiltration des eaux pluviales dans les sols est une approche fertile pour la prévention des inondations. La connaissance de l'aptitude des sols à l'infiltration constitue un élément essentiel d'aide à la décision pour le choix des techniques par les collectivités, les aménageurs et les services instructeurs.

Cette approche s'inscrit dans un contexte en évolution, l'exigence accrue de préservation des ressources en eau : DCE, Directive Eaux souterraines (Directive n° 2006/118/CE du 12/12/06 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration | AIDA, 2006), primauté de la gestion des eaux pluviales à la source et inflexion vers la déconnexion de celles-ci des réseaux existants lorsqu'elle est économiquement viable selon l'article 5 de l'arrêté du 21 juillet 2015 (relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'ANC recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5, 2015), perméabilisation

voire verdissement des sols urbains, questionnement des règlements locaux de limitation des débits d'eaux pluviales rejetés sur le domaine public, renforcement de la gestion des eaux pluviales conduisant à mieux intégrer un référentiel « petites pluies ». La gestion des eaux de pluies doit intégrer le niveau de service de 0 à 5. On note là un changement de doctrine concernant la gestion des eaux pluviales. Les niveaux 0 à 2 doivent contenir les eaux à la parcelle et privilégier l'infiltration, puis, à partir du niveau 3, l'espace public devient un lieu de stockage et d'infiltration ce qui implique une politique d'aménagement urbain comprenant des espaces dédiés pouvant être inondés (Arnaud et al., 2017).

Une démarche qui mérite qu'on s'y arrête est l'évaluation de l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales, sur des critères géomorphologiques, pédogéologiques et hydrogéologiques : perméabilité, pente, nature des sols, profondeur de la nappe, vulnérabilité de captage, *etc.* Bien que plusieurs collectivités se soient dotées de cartes d'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales, aussi appelées cartes d'infiltrabilité, peu de retours d'expérience existent sur leur utilisation ainsi que sur la coordination des acteurs et sur les échelles mobilisées dans les processus de planification et d'urbanisation (cf. Annexe 10 : Carte d'infiltrabilité du Conseil Général des Hauts-de-Seine, 92). Le premier état des lieux des cartes d'infiltrabilité en France a été réalisé par A. Gérolin en 2016 : elle a repéré 27 cartes en France qui ont toutes la même finalité de cartographier l'aptitude des sols à l'infiltration (cf. Annexe 11 : Localisation des 27 cartes d'infiltrabilité réalisées en France). L'élaboration des cartes d'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales dépend largement du porteur du projet qui doit réfléchir sur l'échelle pertinente. Le plus souvent, les projets, notamment de construction se raisonnent à la parcelle, ce qui correspond au cadastre pour les collectivités. La réalisation de cartes d'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales en France, initiée dans les années 1970, répond aujourd'hui principalement au même besoin de gestion des eaux pluviales par les collectivités dans divers contextes : zones fortement urbanisées, zones soumises à des risques d'inondation ou zones présentant des enjeux vis-à-vis des ressources en eau (Vallin et al., 2016). Cependant, le petit nombre de cartes recensées et les conclusions parfois défavorables conduisent VALLIN et ses coauteurs à s'interroger sur la pertinence de ces outils.

Rennes Métropole, dans le cadre de l'élaboration de son PLUi, a mis en place un projet « PHOEBUS » intégrant l'élaboration d'une carte des zones favorables à l'infiltration des eaux pluviales où sont répertoriées les contraintes et les « degrés d'aptitude à l'infiltration » basés uniquement sur des critères hydrogéologiques. Si la carte permet une visualisation

intégrale de « l'aptitude à l'infiltration » à l'échelle de la métropole, le BRGM précise dans ses conclusions que l'échelle du 1/25 000 ne permet pas d'utiliser la carte en substitution à des essais à la parcelle (Pinson & Bault, 2019). Le conseil général des Hauts-de-Seine (92) qui s'est doté d'une cartographie d'infiltration à l'échelle du département en 2010, a réalisé une étude aboutissant au même regret, que l'échelle proposée ne permet pas d'utiliser la carte pour une parcelle. Toutefois, la carte représente un outil de diagnostic à destination des Maîtres d'ouvrage et aménageurs permettant d'évaluer les possibilités techniques de gestion des eaux pluviales sur les territoires et de les anticiper en aménagement (Guillon et al., 2010). Les exemples précités mettent en évidence les lacunes de ce type de carte qui ne peut refléter l'état d'infiltration d'une parcelle. L'absence de référentiel national pour l'élaboration des cartes reste un handicap pour les prescripteurs, qui naviguent à vue. Ce cadre faciliterait pourtant le travail des collectivités souhaitant se doter de référentiels d'infiltration à intégrer, selon moi, aux PLUi, avec une identification des grandes zones d'aptitude à l'infiltration accompagnées de prescriptions de gestion. Les essais in situ pour les parcelles viendraient ensuite affiner les projets.

II.7 Le ruissellement : définition et lien avec l'imperméabilisation

II.7.1 Définition du ruissellement

Le phénomène de ruissellement apparaît lorsqu'une averse est suffisamment importante en intensité ou en durée. Après la saturation de la porosité du sol sur une épaisseur de quelques cm par l'eau de pluie, des flaques apparaissent dans les dépressions de la surface puis, par accumulation, une lame d'eau continue se forme. Le ruissellement est l'écoulement de cette lame d'eau sous l'effet de la pente de la surface. Le ruissellement se définit comme l'eau s'écoulant sur la surface du sol par suite d'une averse après qu'une partie de la pluie n'a pas atteint le sol du fait de l'interception par la végétation et qu'une autre partie s'est infiltrée à son entrée en contact avec le sol. On distingue deux types de ruissellement résultant dans les deux cas du refus d'infiltration après saturation de l'horizon superficiel : ruissellement Hortonien et ruissellement Hewlettien. Le ruissellement est contrôlé, tant dans le processus que dans son ampleur, par la structure physique du sol (densité des agrégats, porosité totale, porosité cinématique, macropores favorisant une progression horizontale ou verticale, etc.). Il dépend de la nature et de la profondeur (épaisseur) des sols.

II.7.2 Le ruissellement Hortonien

Le ruissellement Hortonien (Horton, 1933) provient de l'inaptitude du sol à transférer vers la profondeur toute l'eau qu'il absorbe dans son horizon de surface ; il se produit lorsque l'intensité de pluie instantanée (qui suit une courbe au cours du temps appelée hyétoграмme) dépasse la capacité d'absorption du sol (déterminée par la porosité de l'horizon de surface) puis sa capacité d'infiltration instantanée (qui suit une courbe au cours du temps déterminée par la conductivité de l'horizon sous-jacent). Le refus d'infiltration résulte du contraste entre l'infiltration instantanée dans le premier horizon (A) où la conductivité hydraulique est forte et où de plus c'est sa conductivité à saturation K_{sA} qui intervient, et l'infiltration instantanée dans le deuxième horizon (B) où la conductivité hydraulique est plus faible en général et où de plus c'est sa conductivité non saturée $K(\theta)$ qui joue. Cette dernière ira croissante au fur et à mesure que la teneur en eau θ croît dans l'horizon B sous-jacent, jusqu'à ce qu'il soit saturé à son tour. Une fois que l'horizon de surface organique et structuré a joué son rôle absorbant, puis que l'horizon B sous-jacent a commencé à se saturer sur une petite épaisseur, le ruissellement dépend de la conductivité à saturation (perméabilité) K_{sB} de ce dernier. Ce type de ruissellement dit Hortonien se déroule surtout dans des sols faiblement perméables, soit des sols fins (horizon B peu conducteur) soit des sols tassés en surface (chemins, zones de pâturages, sols battus par la pluie et encroûtés) où l'horizon A est lui-même peu absorbant et conducteur.

II.7.3 Le ruissellement Hewlettien

Le ruissellement Hewlettien (Hewlett, 1961) provient au contraire de l'aptitude du sol à transférer vers la profondeur toute l'eau qu'il absorbe à sa surface, écoulement a priori non saturé mais où $K(\theta)$ de l'horizon B est plutôt forte, jusqu'à un horizon plancher de faible perméabilité qui bloque la descente de l'eau et provoque la saturation par le bas qui remonte vers la surface jusqu'à embrasser l'ensemble des horizons du sol. Dans ce schéma, le ruissellement apparaît lorsque le sol saturé sur toute son épaisseur ne peut plus absorber en surface l'apport d'eau par la pluie. Seul l'écoulement latéral dans le sol saturé libère un peu de porosité, mais pas assez pour permettre un taux d'infiltration vertical significatif, donc la courbe de la capacité d'infiltration reste très proche de la perméabilité K_s . Dans ce cas qui se manifeste par une nappe perchée ou par une nappe de versant, Hewlett et Hibbert (1963) ont démontré expérimentalement la possibilité d'observer un « écoulement hypodermique » suivant la pente du terrain. Les sols peu profonds et très perméables sont propices à cet écoulement qui est souvent observé dans des sols agricoles labourés ou dans la litière

forestière mais se produit aussi dans l'horizon B sous réserve de l'existence d'un niveau très peu perméable à faible profondeur. Cela n'exclut pas l'apparition d'une composante de ruissellement Hortonien avant que la saturation soit complète sur toute l'épaisseur du sol si l'hydrogramme est plus intense par moments que la capacité d'infiltration instantanée.

Les deux types de ruissellement peuvent coexister sur un même bassin versant et il n'est pas facile de savoir lequel des deux dominera sous un événement pluvieux donné. En faisant abstraction de l'influence évidente de l'hydrogramme qui peut être extrême même là où on ne s'y attend pas, on peut dire que le second type de ruissellement domine en général dans les zones au climat tempéré et aux sols d'origine conservés. Ceux-ci sont « infiltrants », avec une courbe de capacité d'infiltration et une interception par la végétation qui se sont adaptées au climat et à ses variations à l'échelle de temps séculaire ou millénaire. L'équilibre relatif atteint sur des siècles entre le climat (son hydrogramme type) et les sols (leur végétation, leur structure et leur profondeur) n'est pas simple à modéliser et il a été rompu par des pratiques agricoles non soutenables. Les transferts de sédiments liés à l'érosion participent à « l'imperméabilisation » par la migration de particules fines remplissant les vides des horizons de surface (Darboux, 1999).

II.7.4 Le coefficient de ruissellement des hydrologues versus le coefficient d'imperméabilisation des urbanistes

Le ruissellement est l'un des principaux facteurs à intégrer pour dimensionner les ouvrages d'assainissement. Il nécessite d'appréhender la réponse du bassin versant à la pluie tout en considérant la capacité d'infiltration des sols. Il est donc variable suivant le degré de saturation des sols et l'avancement des cultures (Bertrand-Krajewski, 2008). L'expression la plus simple de la relation entre hauteur des précipitations H_p et lame d'eau ruisselée H_r est (Rodier, 1966) le rapport H_r / H_p dit **coefficient de ruissellement**. Les processus de ruissellement et d'infiltration sont alors liés par un simple coefficient de partage de la pluie. Le législateur dans son rapport : « sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France » a quant à lui défini le **coefficient d'imperméabilisation** comme le rapport entre les surfaces imperméabilisées (infiltration nulle et ruissellement total) dans l'emprise d'un projet et la surface totale au sol. S'il veut prendre en compte la possibilité d'un coefficient de ruissellement partiel qui ne serait pas égal à 0 ou 1, le coefficient d'imperméabilisation peut être enrichi par des coefficients affectés à chaque sous-surface en fonction du type d'occupation du sol. Ainsi, la somme des surfaces pondérées par leurs coefficients de ruissellement est appelée **surface active** (Miquel, 2003) ou « imperméabilisée équivalente ».

Il faut avoir un point de vue critique sur le coefficient de ruissellement donc sur tout ce qui en dépend, en particulier le coefficient d'imperméabilisation, d'autant que les deux notions se sont hélas amalgamées dans l'usage courant. Dans sa définition même, ce coefficient est une question-réponse : pour déterminer la part de pluie qui va ruisseler, il faut déjà connaître H_r c'est-à-dire... la part de la pluie qui va ruisseler. Ce coefficient est donc empirique et son pouvoir prédictif est toujours très incertain. Dans leur *Guide technique de l'assainissement*, Bourrier et al. (2010) introduisent le coefficient de ruissellement comme « un facteur de contraction du débit » ce qui dénote un certain goût du paradoxe car selon sa définition, le débit est en proportion directe du ratio H_r / H_p . Il est influencé par des facteurs tels que la topographie du bassin versant, le type d'urbanisme, la perméabilité du sol... Le coefficient, réduit à un rôle hydraulique, contient surtout l'influence de la pente et la nature de la surface ; aussi sera-t-il décliné par intervalles de la pente et par classe de couverture (tableau 1). Leur vision ne se fie pas à la seule influence de l'occupation du sol et elle ne se drapait pas derrière un faux-semblant scientifique sur la perméabilité. Réaliste, elle admet que le coefficient d'imperméabilisation, parfois pondéré par des coefficients de ruissellement, n'est rien d'autre qu'un paramètre de réglage (*tuning*) du débit produit à l'exutoire. S'il doit être évalué le plus justement possible pour dimensionner des ouvrages par méthode directe, une alternative courante est de le déterminer par une méthode inverse basée sur la mesure du débit mesuré à l'exutoire. Quand on dimensionne un nouveau réseau, on a besoin de le connaître pour faire tourner un modèle simple mais on ne le connaît pas... donc on l'estime d'après l'expérience d'un autre réseau soigneusement instrumenté (jaugé).

Tableau 1. Coefficient d'imperméabilisation (Bourrier et al., 2010)

Nature de la surface	Coefficient d'imperméabilisation
Pavage, chaussées revêtues, pistes ciment	$0,70 \leq c \leq 0,95$
Toitures et terrasses	$0,75 \leq c \leq 0,95$
Sols imperméables avec végétation :	
Pente < 2 %	$0,13 \leq c \leq 0,18$
2 % ≤ pente ≤ 7 %	$0,18 \leq c \leq 0,25$
Pente ≥ 7 %	$0,25 \leq c \leq 0,35$
Sols perméables avec végétation :	
Pente < 2 %	$0,05 \leq c \leq 0,10$
2 % ≤ pente ≤ 7 %	$0,10 \leq c \leq 0,15$
Pente ≥ 7 %	$0,15 \leq c \leq 0,20$

Les accès et voiries doivent être conçus de façon à prévenir le ruissellement des eaux pluviales (revêtement poreux ou stabilisés, pavés...); les surfaces de type autorégulé (infiltration et aucun rejet au réseau) ne seront pas comptabilisées dans le calcul de la surface active afin d'inciter à leur emploi, ni les espaces verts, dont l'étanchéité est négligeable (Eau-assainissement, annexe à l'article 4 de chaque règlement de zone, 2004).

Pour calculer le coefficient d'imperméabilisation en appréhendant réellement le contexte d'infiltrabilité du site, je propose de prendre en compte non seulement les paramètres liés au type de revêtement ou de sol mais aussi les contraintes du site comme le degré de saturation du sol ou bien le niveau de la nappe. Comprendre le phénomène de ruissellement nécessite d'appréhender l'ensemble des facteurs et phénomènes physiques qui lui donnent naissance.

II.8. Les facteurs physiques entrant en compte dans le ruissellement

Les modèles hydrologiques traitant du ruissellement s'appuient sur des modèles numériques de terrain associant la morphologie des bassins versants au comportement hydrologique, ainsi qu'aux informations géographiques sur l'occupation des sols. La définition des éléments composants du bassin versant se fait à travers des éléments hydrologiques urbains ; nous y retrouvons dans une parcelle cadastrale, les bâtiments, les voiries, les réseaux d'assainissement recueillant le ruissellement des eaux pluviales (Rodriguez et al., 2010).

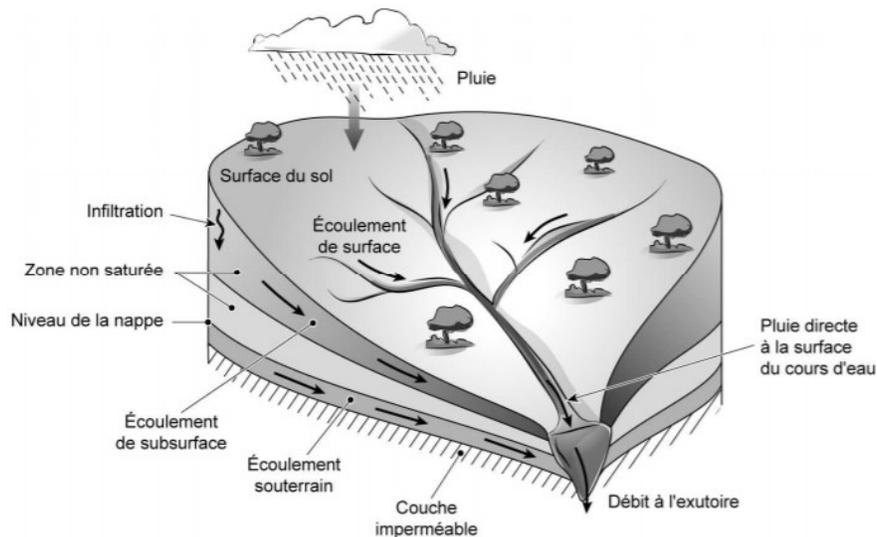


Figure 12. Typologie des écoulements dans un bassin-versant (Plumelle et al., 2017)

Le cycle de l'eau qui est l'expression du passage de l'eau à travers plusieurs étapes (figure 12, figure 13), s'exprime par l'équation du bilan des quantités (hauteur de la lame d'eau en

mm) entrant et sortant d'un système représentant généralement un bassin hydrologique, rapportées au temps, la durée étant l'année (Plumelle et al., 2017). L'équation bilan est :

$$P = ET + R + I \quad \text{Équation 2.}$$

Avec :

P : précipitations (liquide et solide) [mm]

R : ruissellement [mm]

ET : évapotranspiration [mm]

I : infiltration [mm]

II.8.1. L'infiltration

L'infiltration est définie comme un processus d'écoulement mixte, capillaire et gravitaire. En partant d'un sol sec, à teneur en eau croissante, la capillarité domine d'abord puis quand la continuité de la phase eau est atteinte dans le volume poreux (contenant aussi de l'air), cela lui permet de traverser une couche du milieu poreux et c'est alors que la gravité entre en jeu. Le pouvoir de succion des racines des plantes doit être suffisant pour vaincre la force capillaire (succion) qui retient l'eau aux grains solides du sol.

Des contraintes mécaniques ou hydrauliques pouvant aussi bien être d'origine anthropique que naturelle entrent aussi en jeu dans le mécanisme de l'infiltration, telles que :

- Le type de sol (texture, structure, porosité) déjà cités,
- La compaction de la surface du sol,
- Le type de couverture,
- La topographie et la géomorphologie,
- Le débit d'alimentation (pluie, irrigation),
- La teneur en eau initiale du sol.

Le profil d'infiltration instantané illustre la distribution spatiale de la teneur en eau dans un sol homogène après une submersion de sa surface et montre :

- Une **zone de saturation**, située immédiatement sous la surface du sol ;
- Une **zone de transmission** proche de la saturation en apparence uniforme ;
- Une **zone d'humidification** où la teneur en eau décroît en fonction de la profondeur ;
- Une zone dite **front d'humectation** peu épais, qui est la limite entre le sol humide et le sol sec sous-jacent : il est le siège d'un fort gradient d'humidité (figure 14 a).

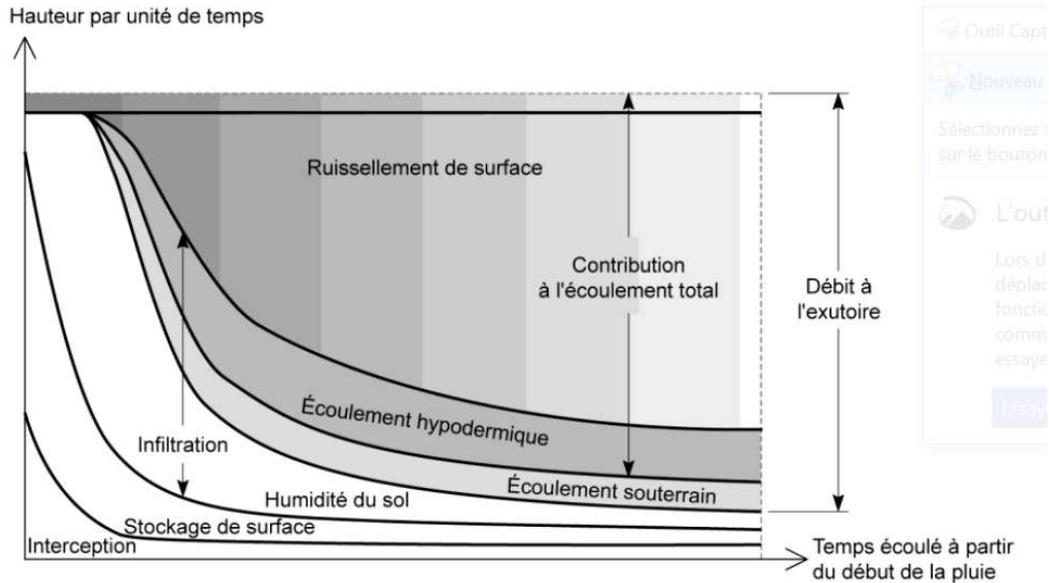


Figure 13. Évolution des proportions entre composantes de l'écoulement au cours d'une averse. D'après Réménieras (1972) dans (Plumelle et al., 2017)

La figure 14 illustre le déplacement vertical au cours du temps du front d'humectation influencé par l'apport de la pluie, les forces de gravité et de capillarité.

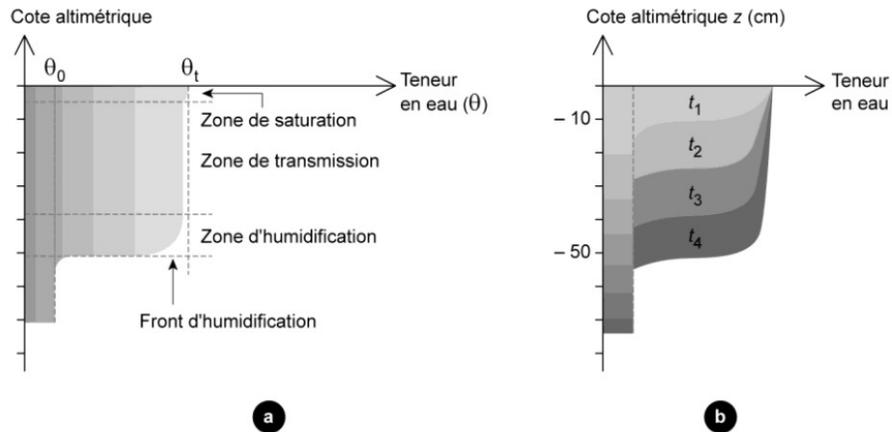


Figure 14. Profil hydrique du sol, vue temporelle : a. Zonation du profil hydrique, b. Évolution du profil hydrique au cours de la progression du front d'humectation.

D'après Musy et Soutter (1991) dans (Plumelle et al., 2017)

Deux modèles principaux sont utilisés pour déterminer la lame de pluie infiltrée par le sol à chaque instant appelée capacité d'infiltration instantanée $i(t)$: Green-Ampt et Horton.

Le modèle de Green-Ampt se fonde sur la loi de Darcy (Darcy, 1856) qui sera présentée à la section II.9.1.

$$i(t) = K_s \left[1 + \frac{h_o + h_f}{z_f(t)} \right] \quad \text{Équation 3.}$$

Avec $i(t)$ (mm.h⁻¹) capacité d'infiltration,
 K_s (mm.h⁻¹) conductivité hydraulique à saturation,
 h_o (mm) charge de pression en surface,
 h_f (mm) charge de pression au front d'humidification,
 z_f (mm) profondeur atteinte par le front d'humidification.

Le modèle de Horton basé sur une formulation empirique :

$$i(t) = i_f - (i_o + i_f)e^{-kt} \quad \text{Équation 4.}$$

Avec i_o (mm.h⁻¹) capacité d'infiltration initiale,
 i_f (mm.h⁻¹) capacité d'infiltration finale,
 k (h⁻¹) constante empirique qui dépend du type de sol.

II.8.2 La porosité et l'indice des vides du sol

Le milieu poreux est constitué de 3 phases, solide, gazeuse (air) et liquide (eau), occupant les « vides » d'un réseau de pores de forme et de dimension variable.

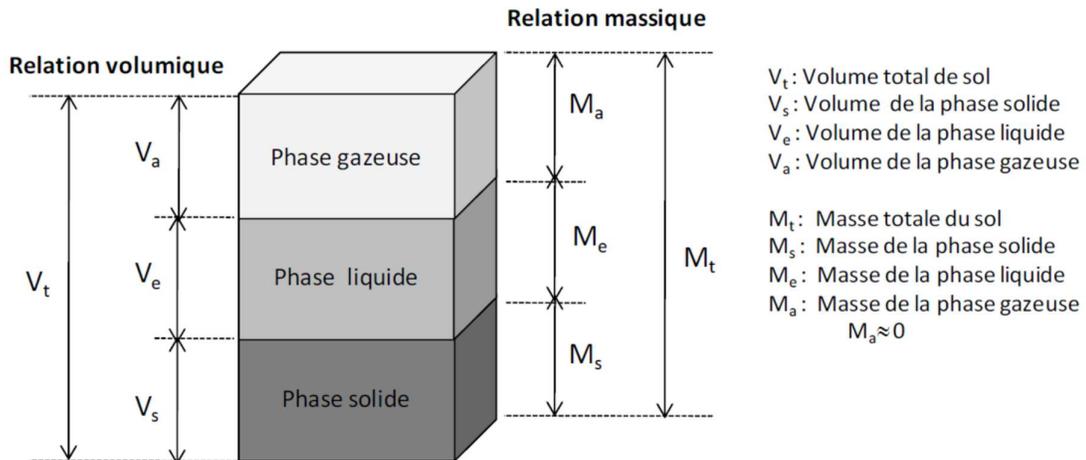


Figure 15. Schéma d'un volume de sol.

La porosité n est le rapport exprimé en pourcentage entre le volume des vides (phases liquide et gazeuse) ($V_e + V_a$) et le volume total du sol (V_t) :

$$n (\%) = \frac{V_a + V_e}{V_t} \times 100 \quad \text{Équation 5.}$$

La porosité n n'est pas une variable additive d'un mélange de sols :

$$n(\text{sol 1 \& sol 2}) \neq n_1 + n_2$$

L'indice des vides e (*empty*) est le rapport entre le volume des vides et le volume occupé par les particules :

$$e = \frac{V_a + V_e}{V_s} \quad \text{Équation 6.}$$

L'indice des vides e et la porosité n varient en fonction du compactage du sol qui réduit les « vides » du sol alors que le volume des particules reste constant.

On déduit les relations classiques suivantes où la porosité n n'est pas mise en pourcentage :

$$e = \frac{n}{1-n} \quad n = \frac{e}{1+e} \quad \text{Équation 7.}$$

Le degré de saturation s est le rapport exprimé en pourcentage entre le volume occupé par l'eau V_e et le volume des vides :

$$s = \frac{V_e}{V_a + V_e} \quad \text{Équation 8.}$$

Dans le cadre de leurs travaux sur la détermination de la porosité et de la conductivité hydraulique saturée des mélanges binaires, Zhang et al. (2011) rappellent que les essais de laboratoire se limitent principalement aux propriétés hydrauliques de la fraction de terre fine. Ils indiquent que la porosité d'un mélange binaire ϕ_m dépend de la fraction de chaque classe de particules. Ils notent que l'empilement obtenu lors de l'opération de mélange est imparfait et qu'il reste entre des gros grains des vides non remplis par la fraction fine. Les mélanges binaires ont un minimum de porosité lorsqu'ils répondent à une des deux conditions d'un mélange parfait : un remplissage interstitiel des grands pores par les particules fines ou des gros grains noyés dans la matrice fine (Clarke, 1979) :

$$\phi_m^{\text{lb}} = \phi_c - b_{\text{vf}}(1 - \phi_f) \text{ si } b_{\text{vf}} < \phi_c \text{ ou } b_{\text{vf}}\phi_f \text{ si } b_{\text{vf}} \geq \phi_c \quad \text{Équation 9}$$

Le maximum de la porosité d'un assemblage binaire est la combinaison linéaire des deux matériaux pris isolément, c'est-à-dire sans mélange :

$$\phi_m^{\text{ub}} = b_{\text{vc}}\phi_c + b_{\text{vf}}\phi_f \quad \text{Équation 10}$$

Avec : ϕ_c est la porosité du matériau grossier (*coarse*) en incluant les vides non remplis par la fraction fine ; ϕ_f est la porosité du matériau fin (*fine*). Exposant ub : limite supérieure (*upper bound*) ; indice c : composante grossière ; indice f : composante fine ; b_v : fraction d'une composante, telle que $b_{\text{vc}} + b_{\text{vf}} = 1$.

Zhang et al. (2011) introduisent un coefficient de mélange prenant des valeurs entre 0 et 1 où la porosité vraie d'un mélange est ϕ_m qu'ils ont ensuite extraite pour proposer leur modèle de mélange (non rapporté ici, qui donne une courbe intermédiaire entre ϕ_m^{lb} et ϕ_m^{ub}) :

$$\lambda = \frac{\phi_m^{ub} - \phi_m}{\phi_m^{ub} - \phi_m^{lb}}$$

Équation 11

II.9 Les équations hydrauliques applicables à mon projet

La compréhension du comportement hydraulique de l'écoulement à la surface du sol a fait l'objet de nombreuses études. Le cycle de l'eau évolue sous l'influence des surfaces revêtues et montre une augmentation des volumes et de la fréquence du ruissellement en fonction de la superficie imperméable empêchant l'infiltration des eaux pluviales dans le sol naturel. Déterminer les paramètres entrants du phénomène de ruissellement dans la qualification de futurs technosols sera ma priorité. On commence bien sûr en rendant honneur à Darcy.

II.9.1 Loi de Darcy

Cette loi empirique définit le milieu poreux comme un milieu conducteur. Son application aux modèles hydrauliques m'intéresse puisqu'elle permet de prévoir le débit de la circulation de l'eau aussi bien dans un massif filtrant, dans le sol que dans le substratum, dès que l'on connaît la valeur d'un paramètre unique, le coefficient de perméabilité (de Darcy) du matériau poreux. Celui-ci couvrant une gamme de 6 ou 7 puissances de 10, on peut en général connaître l'exposant, à défaut d'une estimation plus précise.

L'équation de Darcy exprime le débit Q d'un fluide incompressible en régime stationnaire traversant un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'un différentiel de charge ΔH .

$$Q = K_s A \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Équation 12.}$$

Avec :

Q : Débit volumique (en m^3/s)

K_s : conductivité hydraulique à saturation (coefficient de perméabilité de Darcy) (en m/s) dépendant des propriétés du milieu et du fluide.

A : surface de la section traversée orthogonalement par le flux (en m^2)

$\frac{\Delta H}{L}$: gradient hydraulique (sans unité)

ΔH : différence de hauteur piézométrique entre l'amont et l'aval de la longueur hydraulique.

II.9.2 L'équation de ruissellement de Bader

Bader propose de modéliser le ruissellement en utilisant l'équation de débit d'un déversoir à lame mince :

$$h_i(t + dt) = \max \left\{ 0, h_i(t) + \left[\frac{Q_{i-1}(t)}{L I_0} + P_i(t) - \frac{Q_i(t)}{L I_0} - \frac{l_i(t)}{L I_0} \right] dt \right\} \quad \text{Équation 13.}$$

Et :

$$\frac{Q_i}{I_0} = K (h_i - HI)^n \quad \text{Si } h_i > HI \quad \text{Équation 14.}$$

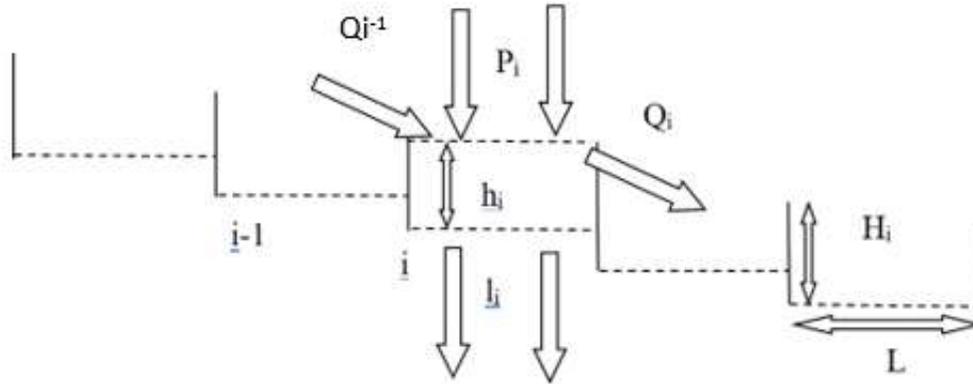


Figure 16. Schéma de principe du modèle de Bader (1994).

Avec :

Q_{i-1} et Q_i sont les débits ruisselés entrant et sortant ($m^3 s^{-1}$)

h_i est l'épaisseur d'eau moyenne (m)

l_i le débit infiltré ($m^3 s^{-1}$)

L est la longueur de la maille, dirigée dans le sens de l'écoulement (m)

I_0 est la largeur de la maille (m)

HI (m) hauteur d'eau à partir de laquelle il y a ruissellement

$K(m^{2-n} s^{-1})$ est n (sans dimension) dépendant de la rugosité et de la pente.

Le ruissellement peut se modéliser à partir du schéma réservoir qui fait le bilan des apports par les précipitations et des pertes par infiltration, évaporation et transpiration dans le cas des surfaces végétalisées. Le différentiel constitue la lame d'eau ruisselée formant le transfert d'eau vers l'aval.

II.9.3 Modèle de bilan hydrologique d'un sol ou substrat

Pour modéliser le bilan hydrologique d'un sol en milieu urbain, Rodriguez et al. (2010) proposent une approche conceptuelle décomposée en systèmes réservoirs se remplissant les uns les autres avec pour entrée la pluie et pour sortie le débit. Chacune des couches (végétation, substrat, drainage) est caractérisée par une hauteur maximale (H) et un niveau (N) pour chaque pas de temps.

Le flux des échanges d'eau entre le sol et l'atmosphère peut s'écrire sous la forme d'une équation bilan qui est plus ou moins détaillée selon les termes :

- la précipitation non interceptée l'apport de surface P_t

- l'évaporation qui renvoie une partie de l'eau d'apport dans l'atmosphère E_{surf}
- une partie des eaux d'apport s'infilte dans le sol et la zone non saturée (I_{ZNS})
- le ruissellement R se produit lorsque le stock de surface S_{surf} dépasse la capacité maximum du réservoir S_{max}
- l'eau qui percole dans le sol permet soit la recharge de nappes, soit la constitution d'une réserve utile pour la plante.

L'équation bilan du réservoir s'écrit pour chaque type d'occupation sous la forme :

$$S_{surf}(t) = S_{surf}(t - \Delta t) + [(1 - f_{arbre}) P(t) + f_{arbres} Pt(t) - E_{surf}(t) - I_{ZNS}(t) - R(t)]\Delta t \quad \text{Équation 15.}$$

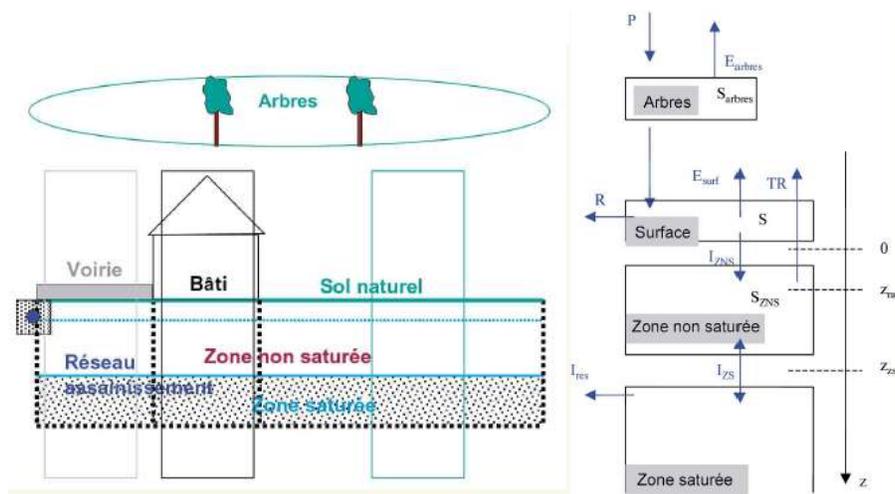


Figure 17. Représentation bidimensionnelle d'un élément hydrologique urbain EHU (Rodriguez et al., 2010)

II.9.4 Formule de Chézy pour l'écoulement dans un canal

Dans le cas théorique du régime uniforme dans un canal prismatique (vitesse constante tout au long du canal), il est démontré que la hauteur d'eau est constante et que la pente J de la ligne de charge est égale à la pente I du radier. La vitesse peut être déterminée par différentes formules, mais toutes déduites de la formule de Chézy.

La formule de Chézy permet de déterminer la vitesse de l'eau V (en m/s) dans un régime d'écoulement uniforme en fonction du rayon hydraulique R et de la pente I .

$$V = Ch \sqrt{RI} \quad \text{Équation 16.}$$

Le coefficient de Chézy Ch est le coefficient de frottement (en $m^{1/2}.s^{-1}$) qui reflète la rugosité des parois. En France, il fut calculé historiquement à partir du coefficient de Bazin puis de Manning (voir section suivante).

II.9.5 Coefficient de rugosité : celui de Manning, celui de Bazin

La formule la plus communément adoptée au niveau international est celle de Manning, dans laquelle le coefficient de Chézy (Ch) s'exprime ainsi :

$$Ch = \frac{1}{c} \cdot R^{1/6} \quad \text{Équation 17.}$$

où le paramètre c fut estimé pour les cours d'eau par Cowan : il se détaille en sous-paramètres pour prendre en compte les méandres, l'irrégularité du lit (fond, parois, ...), la variation de forme et de dimensions de la section mouillée et son obstruction, et la présence de végétation aquatique freinant l'écoulement.

Le coefficient de Bazin C mettait lui aussi de façon implicite en relation la rugosité (représentée par un paramètre m) et le rayon hydraulique R .

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \quad \text{Équation 18.}$$

Dans leur étude sur l'apport des haies et des fascines à la réduction du ruissellement, Ouvry et al. (2012) (tableau 2) ont utilisé dans une modélisation des valeurs du coefficient de Manning identiques aux valeurs issues de l'expérimentation par un simulateur de ruissellement. Ils ont trouvé des résultats assez proches pour la hauteur de la ligne d'eau.

En ce qui me concerne, j'utiliserai directement ces valeurs ou d'autres issues de la littérature.

Tableau 2. Comparaison des résultats de hauteur d'eau entre modèle numérique et modèle physique en fonction du coefficient de Manning (Ouvry et al., 2012)

	Données expérimentales			Données modélisées		
	Débits injectés dans le simulateur de ruissellement (l/s)	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})	Hauteur de la ligne d'eau à l'amont de l'objet (cm)	Débits modélisés (l/s)	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})	Hauteur de la ligne d'eau à l'amont de l'objet (cm)
Fascine La Gaillarde	0,98	0,44	2,8	1	0,44	3
	2,00	0,59	5,2	2	0,59	6
	2,87	0,59	6,6	2,99	0,59	7
	6,23	0,71	12,1	5,99	0,71	11
Haie Etalleville	1,334	0,49	3,0	1,340	0,49	3,7
	2,694	0,55	4,9	3,05	0,55	5,7
	6,647	0,54	8,5	5,97	0,54	8,7
	12,325	0,43	11,0	12,32	0,43	10,7

II.10 L'apport des végétaux, des haies et fascines à la réduction du ruissellement

II.10.1 Influence du couvert forestier, du bocage et de la végétation en général

La nature du couvert végétal influence le cycle de l'eau de différentes manières, tant au niveau du cheminement de l'eau qui se trouve modifié au gré des pluies, qu'au niveau du volume global de l'écoulement et de sa répartition dans l'année.

Une végétation abondante accroît l'évapotranspiration et réduit l'écoulement. Ainsi à titre d'exemple un albédo de 0,05 d'une forêt sombre, comparé à un albédo de 0,30 d'une prairie, augmente de 35 mm la valeur de l'ETP pour le mois de juillet en région parisienne (durée d'insolation 10 h et température de l'air 20°C). La rugosité plus forte attribuée à un sol couvert par une végétation forestière augmente la turbulence de l'air et assure une meilleure utilisation de l'énergie d'advection qui explique le surplus d'évaporation des milieux forestiers, notamment l'hiver (Cosandey, 1995).

La végétation permet aussi de lutter contre l'érosion du sol : d'une part, elle empêche l'ablation du substrat et d'autre part, elle favorise la sédimentation en retenant les sédiments érodés à l'amont.

Les parties aériennes des plantes favorisent aussi l'interception des gouttes de pluie, en fonction de la densité de la surface foliaire et de la structure du couvert végétal. Ainsi, en forêt, les précipitations inférieures à 2 mm en 24 h sont presque entièrement interceptées ; au-delà, plus la pluie est intense, plus l'interception est faible.

La végétation réduit l'effet de « *splash* », de battance et d'encroûtement du sol, grâce au rôle de la litière et des buissons, et limite le ruissellement au sol en augmentant l'infiltration de l'eau.

Dans son article sur l'érosion des forêts méditerranéennes (Giordano, 1994) rapporte qu'un sol forestier favorise particulièrement l'infiltration de l'eau grâce à une litière hétérogène et perméable qui peut absorber et retenir plus de 10 mm d'eau. Il ajoute qu'entre des terrains nus et une forêt, le ruissellement diminue et le temps de concentration puis d'écoulement de la pluie est multiplié jusqu'à 500 fois.

L'infiltration étant anti corrélée à la compacité du sol, un profil pédologique structuré permet une meilleure infiltration qu'un profil affecté par le tassement. Ainsi, Richet et al. (2006) montrent que sur les parcelles agricoles au trafic agricole inexistant, les taux d'infiltration fluctuent de 127 mm/h à 195 mm/h alors que sur des surfaces de cultures intensives subissant un trafic agricole important, l'infiltration tombe à 37 mm/h, voire devient nulle.

Rey et al (2004) soulignent que la forêt peut réduire d’au moins 80 % le débit de pointe de crue et d’au moins 50 % le volume total ruisselé. L’amélioration par les végétaux de la cohésion des sols, grâce aux racines pénétrant à 50 cm dans un sol, leur permet de renforcer leurs propriétés mécaniques. Des haies sont ainsi utilisées pour lutter contre l’érosion, notamment sur les berges afin de renforcer leur stabilité (Rey et al., 2004).

Tableau 3. Capacité d’infiltration moyenne (en mm/h) pour quatre catégories de sol définis par leur texture et selon le couvert végétal (Gray 1972)

Catégorie de sol	Sol nu	Culture en rang	Pâturage pauvre	Céréales	Pâturage de qualité	Forêt
I	7,5	12	15	18	25	75
II	2,5	5	7,5	10	12	22
II	1,2	1,8	2,5	3,8	5	6
IV	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Catégorie I : Sols de texture grossière

Catégorie II : Sols de texture moyenne

Catégorie III : Sols de texture fine

Catégorie IV : Sols minces

Au milieu des années 1980, on prenait conscience que les surfaces exposées à l’érosion avaient doublé en vingt ans en France (Wicherek, 1986) (cf. Annexe 12 : Relation entre l’accroissement des débits et le taux de déboisement). Le phénomène d’érosion est influencé par des conditions morphologiques, pédologiques et climatiques, le phénomène est amplifié en fonction du boisement et du type de culture. Le remembrement qui a eu pour conséquence d’accroître de la taille des parcelles de culture, a eu pour effet la disparition des haies, au bénéfice des surfaces labourées. Ces changements ont augmenté les longueurs de pente sans obstacles (Auzet 1987).

Le ruissellement peut augmenter considérablement à la suite du défrichement sur un sol de type sable fin laissé nu quelques années, sans que la pluviométrie puisse être mise en cause ; ceci a été illustré par les mesures effectuées sur des parcelles expérimentales de 100 m² avec une pente de 14 % à Cessières (Aisne). Les résultats démontrent qu’en l’absence de végétation, les débits solides sont les plus importants en été et au début de l’automne. Dans les champs fraîchement ensemencés des terrains cultivés des régions limoneuses du nord du Bassin Parisien, l’érosion se produit surtout en hiver sur les sols très humides, soumis aux alternances de gel et de dégel, et au printemps.

Pour Merot et al. (1999) qui a réalisé un suivi comparatif de deux petits bassins versants similaires, pour des crues fréquentes, le coefficient de ruissellement et le pic de crue sont de

1,5 à 2 fois plus forts sur le bassin sans bocage que sur un bassin bocager. Le bassin bocager obtient un coefficient de ruissellement de 5 %. Le bassin remembré a des valeurs variant de 5 à 15 %. Les facteurs de crue lors de la saison humide diffèrent également sur les deux sites : sur le bassin bocager le volume ruisselé n'est lié qu'à la hauteur des précipitations alors qu'il est fonction de l'humidité des sols, de la hauteur et de l'intensité de la pluie pour le bassin non bocager.

Fini et al. (2017) attirent l'attention sur le risque d'appauvrissement écologique des projets urbains qui utilisent principalement des végétaux supportant les sols imperméabilisés. Ils préconisent la mise en place de couloirs verts couplée avec des chaussées perméables, qui serait bénéfique pour la santé et la croissance des arbres et représenterait une opportunité de restaurer des processus naturels et des cycles d'éléments perturbés par l'urbanisation, notamment l'évapotranspiration qui participe à la régulation des températures ainsi qu'à la fixation d'une partie du CO₂.

L'association d'un futur technosol avec une végétation bien choisie est susceptible de favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol. Les haies en sont un bon exemple car elles freinent le ruissellement et favorisent l'infiltration de l'eau (et le dépôt des sédiments) à travers la présence de racines (ménisque racine / grains solides). Des études ont démontré que la présence racinaire permet d'enclencher l'activité biologique, la minéralisation de la matière organique ainsi que la pédogénèse (Damas & Coulon, 2016). L'effet est avant tout mécanique, les racines doivent fissurer et fracturer le sol pour le coloniser, elles participent à la décompaction et permettent l'infiltration en profondeur de l'eau de pluie.

II.10.2 L'utilité des fascines¹ et des haies dans la réduction de la vitesse d'écoulement et du lessivage

Les travaux cités mettent en exergue des pratiques séculaires, notamment en Normandie avec le paysage de Bocage existant avant le remembrement, constitué de parcelles agricoles cernées par des haies et noues. Ce paysage permettait une gestion des eaux pluviales efficace réduisant le ruissellement tout en favorisant l'infiltration à la parcelle avec des effets vertueux sur les stocks d'eau disponibles pour les cultures.

Ouvry et al. (2012) ont mené une étude visant à définir l'efficacité des fascines et des haies dans la réduction du lessivage des sols, de la mobilisation de sédiments et autres

¹ Fascine : c'est une construction généralement constituée de branchage de petit diamètre assemblée en fagot et maintenue par des fiches ou pieux plantés dans le sol.

conséquences du ruissellement, s'ajoutant à leur rôle bien connu dans l'accroissement de la biodiversité et la diversification des paysages.

Pour un débit par mètre de haie de 1 ou 12 l/s/m le taux d'abattement obtenu vaut respectivement 74 ou 91 % pour les particules inférieures à 125 μm et peut atteindre des valeurs comprises entre 93 et 99 % pour des particules plus grossières. Les vitesses d'écoulement du ruissellement enregistrées en aval immédiat de la haie et fascines sont limitées entre 0,01 et 0,10 m/s. L'infiltration a été évaluée au droit des haies, montrant une capacité d'infiltration estimée à 400 mm/h \pm 100 mm/h (Ouvry et al., 2012).

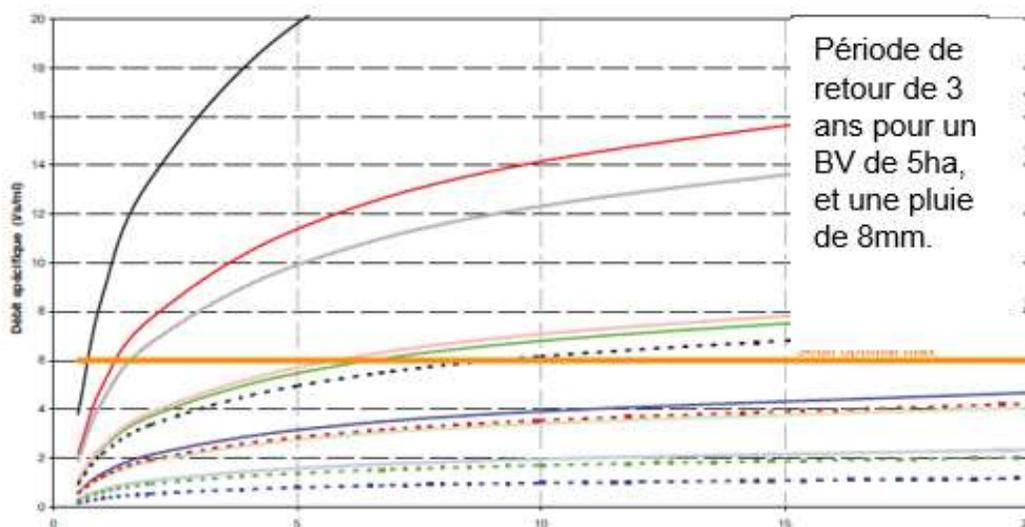


Figure 18. Estimation du débit spécifique par mètre de fascine ou de haie (l/s/m) en fonction de la probabilité de retour du débit de ruissellement de la surface du bassin versant de Bourville, en sol de limon (Ouvry et al., 2012)

La réintroduction de haies à hauteur de 1 % des surfaces cultivables ou d'agréments permettrait d'infiltrer les pluies de l'ordre de 3 à 5 mm/h. En augmentant le taux à 2 %, elle permettrait d'infiltrer les pluies de 10 mm/h, ce qui correspond aux averses courantes. Si le taux d'infiltration de la parcelle était de 37 mm/h, ce même taux de haies équivalant à 2 % permettrait de faire face à des pluies de 47 mm/h avec un ruissellement quasi nul. En associant la création de haies avec des fosses de plantation utilisant des technosols favorisant l'infiltration, on obtiendrait alors un levier dans la réduction du ruissellement. Favoriser son implantation sur les terres agricoles à minima au bordures extérieures en l'imposant pour obtenir les subventions de la politique agricole commune est une solution qui pourrait s'inscrire directement au sein des trames vertes et trames bleues et permettrait aussi de

compléter le tracé des corridors écologiques. À l'échelle urbaine, les PLUi imposent un coefficient permettant de calculer le nombre d'arbres à planter sur chaque parcelle cadastrale ; il pourrait en être de même pour les haies qui devraient couvrir 2 % de la surface totale.

Pour ralentir l'écoulement, les haies orientées perpendiculairement à la pente sont les plus efficaces à l'échelle d'un bassin versant car elles jouent plusieurs fonctions hydrauliques : elles participent à la régulation de l'écoulement par le travail de fissuration et de fracturation verticale effectué par l'enracinement ; l'eau est alors dirigée vers les strates plus profondes et la nappe phréatique. Les haies permettent aussi la réduction de la vitesse d'écoulement de la lame d'eau et l'augmentation du temps de concentration du bassin versant, ce qui permet une régulation du ruissellement tout en protégeant les sols contre l'érosion (Eaucea, 2010). Les travaux d'Ouvry et al. (2012) ont mis en avant le rôle des haies sur les écoulements de surface, permettant de réduire la vitesse du ruissellement à moins de 0,20 m/s, vitesse limite avant érosion. Dans tous les cas, seule une prise en compte de la variabilité des pertes initiales et continues permettra de « reproduire avec précision la dynamique de formation du ruissellement » (Ramier et al., 2013).

II.10.3 Les équations utilisées par Ouvry et al. dans la modélisation de la réduction du ruissellement par des haies et fascines

Ouvry et al. (2012) ont repris la formulation de Manning pour la loi de Chézy :

$$V = Ms R_h^{\frac{2}{3}} P^{\frac{1}{2}} \quad \text{Équation 19.}$$

Avec :

Ms : coefficient de Manning-Strickler ou coefficient de rugosité hydraulique ($m^{\frac{1}{3}} s^{-1}$)

R_h : (m) rayon hydraulique de l'écoulement = section de l'écoulement / périmètre mouillé

V : (m/s) vitesse d'écoulement au droit de l'obstacle = débit moyen / section mouillée

P : gradient d'énergie (pente du terrain) au lieu de I (pente du radier) ou J (pente de la ligne d'eau).

La pente de la ligne de charge s'écrit alors :

$$J = I = \left(\frac{Ms \cdot Q}{R_h^{2/3} \cdot S} \right)^2 \quad \text{Équation 20.}$$

S : section de l'écoulement ou « surface mouillée » en m².

De nombreuses recherches ont démontré les effets positifs de la végétation sur la réduction de la vitesse d'écoulement superficiel sur les sols et validé le rôle des haies (et les fascines) dans la réduction du lessivage des sédiments. Ouvry et al. (2012) ont utilisé l'équation 18 :

$$\frac{C_{out,k}}{C_{in,k}} = \exp\left(\frac{V_k \beta_k L}{q}\right) \quad \text{Équation 21.}$$

Avec :

k : fraction granulométrique

$C_{in,k}$: concentration (g/l) en sédiments entrant pour la fraction granulométrique k ;

$C_{out,k}$: concentration (g/l) en sédiments sortant pour la fraction granulométrique k ;

V_k : vitesse (m/s) de sédimentation des particules pour la fraction granulométrique considérée k ;

L : Longueur (m) de sédimentation, (entre le ressaut hydraulique et la haie) ;

Q : débit ($m^3/s/m$) par unité de largeur

β_k : constante dépendante de la fraction granulométrique considérée k (Ouvry et al., 2012)

Tableau 4. Valeurs des paramètres de l'équation
(d'après Ouvry et al. 2012)

k	μm	> 125	63 - 125	32 - 63	16 - 32	< 16
V_k	m/s	0,01400	0,00645	0,00222	0,00047	0,00013
β_k		0,80	0,69	0,86	1,85	4,69

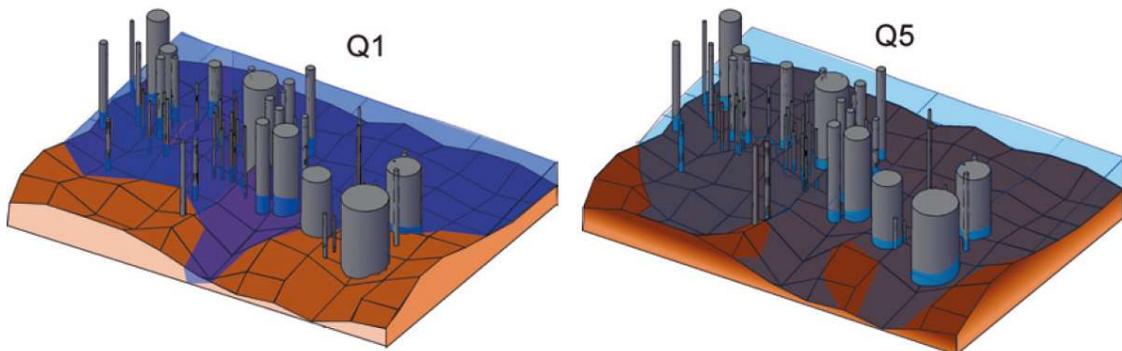


Figure 19. Schéma de circulation de l'écoulement de l'eau à travers des haies
(d'après Ouvry et al. 2012)

Tableau 5. Efficacité des ouvrages de type haie ou fascine. Ici, dans la colonne 2, c'est l'inverse du coefficient de Manning qui est utilisé : $n = 1/Ms$ (d'après Ouvry et al. 2012)

	Efficacité sur le ralentissement hydraulique	Coefficient de Manning ($s/m^{1/3}$)		Proportion volumique de tiges dans le fagot	Qualité du filtre
		Gamme de valeurs	Moyenne		
Fascines	Moyenne	$0,3 \leq n < 0,5$	$n = 0,4$	30 à 40 %	Fagot mal compacté ou détérioré (décomposition ± courts circuits)
	Forte	$0,5 \leq n < 1,0$	$n = 0,8$	40 à 45 %	Fagot bien compacté
	Très forte	$1,0 \leq n < 3$	$n = 1,2$	> 45 %	Fagot très bien compacté ou colmaté par des dépôts
Haies				Nb de tiges / ml	
	Faible	$0,06 \leq n < 0,08$	$n = 0,07$	< 20	
	Moyenne à forte	$0,4 \leq n < 0,8$	$n = 0,5$	> 50	Ou moins de 50, mais avec des débris accumulés devant les tiges (pailles, ...)

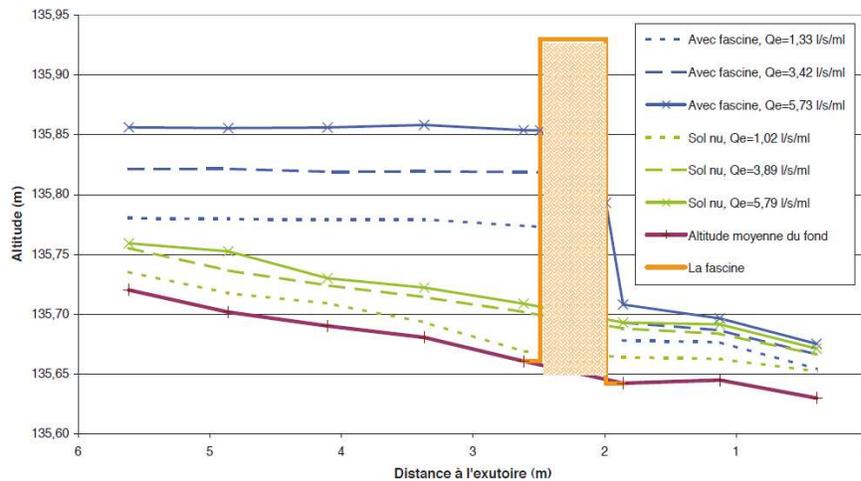


Figure 20. Schéma de l'effet de frein des fascines sur le ruissellement (d'après Ouvry et al. 2012)

II.11 Propriétés physiques du sol, essais d'identification

Dans cette section, je propose parmi les propriétés physiques des sols quelques critères à déterminer pour la construction d'un technosol, liés à l'utilisation souhaitée. Les objectifs fixés dans le cadre de ma recherche sont les suivants :

- Augmenter le temps de concentration en transformant l'écoulement de surface en écoulement de subsurface.
- Déterminer la réserve utile résultante du technosol, trouver la ou les compositions permettant d'atteindre des niveaux suffisants de réserve utile pour une disponibilité satisfaisante de l'eau pour les plantes.

La ligne directrice de mon approche consiste à utiliser les sols comme outil de réduction du ruissellement en apportant des caractéristiques permettant à la fois d'augmenter la capacité de stockage d'eau et de créer des sols qui facilitent l'implantation d'une végétation support biologique favorisant la biodiversité urbaine. Les paramètres que j'ai choisis dans cette section sont d'ordre géotechnique ou agronomique, permettant l'identification des sols à partir des masses et volumes mesurés d'un échantillon du sol.

Connaissant γ_w le poids volumique de l'eau, on sait calculer les poids volumiques et masses volumiques des grains solides, du sol sec et du sol saturé.

Pour caractériser les futurs technosols que je vais créer, il est nécessaire de réaliser une analyse granulométrique des matériaux constituant pour déterminer la répartition de taille des grains. La classification triangulaire est un système proportionnel à trois entrées intégrant le sable, le limon et l'argile mesurées sur la terre fine d'un échantillon de sol. Le diagramme est découpé en champs selon les proportions de matériaux. La classification triangulaire met en avant l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols. Cette fraction se mesure par sédimentométrie de préférence, voire au laser-granulomètre après étalonnage soigneux.

Les limites de plasticité et de liquidité entrent dans l'identification des sols à grains fins. La limite de retrait permet, pour des cas particuliers de connaître les variations de volume du sol en fonction des changements de la teneur en eau (problème de retrait-gonflement).

La valeur au bleu du sol (VBS) permet aussi de caractériser l'argilosité du sol. Les valeurs trouvées ont un intérêt pour définir la sensibilité d'un sol à l'eau. C'est un facteur déterminant pour l'étude du dimensionnement des voiries et il conviendra d'estimer ce paramètre en première approche lors de la caractérisation des matériaux puisqu'il déterminera d'office l'utilisation et enclenchera les séries d'essais suivantes.

Enfin, certains essais de géotechnique routière seront utiles : le Proctor Normal réservé aux couches de forme et de remblais, et le Proctor Modifié, utilisé pour les couches d'assise (Plumelle et al., 2017), ou encore l'essai à la plaque pour déterminer la portance du sol (CBR).

II.12 Classification des sols selon le WRB : World Reference Base for Soil Resources

Aujourd'hui il existe presque autant de classifications que de pays ; on peut citer sans en faire un inventaire exhaustif : le *Soil Taxonomy* aux Etats Unis, *l'Australian Soil Classification*, *The Canadian system of Soil Classification* ou encore le *référentiel Pédologique Français* de l'AFES (Schad et al., 2014). L'Union Internationale des Sciences du Sol (IUSS) a créé en 1998 la première édition d'une classification des sols à base scientifique : the *World Reference Base for Soil Resources* ou WRB en acronyme abrégé. La classification WRB permet l'inclusion des systèmes nationaux de classification des sols. Elle est utilisée pour classer tout matériau trouvé dans les deux premiers mètres d'épaisseur sous la surface terrestre en contact avec l'atmosphère (Duchaufour et al., 2018).

II.12.1 Principes généraux de la classification WRB

La classification des sols WRB est basée sur des caractéristiques mesurables et observables sur le terrain, définies en termes d'horizons diagnostiques, propriétés diagnostiques et matériaux diagnostiques. Le choix des caractéristiques diagnostiques prend en compte leurs relations avec les processus de formation des sols. Dans ce mémoire, les critères diagnostiques retenus seront ceux ayant de l'importance pour l'aménagement. La WRB comprend deux niveaux définissant les horizons ou propriétés liées aux processus de pédogenèse, chaque groupe (niveau 1) étant divisé en groupes de second ordre (niveau 2) :

- **Le premier niveau**, comprend 32 groupes de sols de référence (RSGs : Reference Soil Groups) distribués en 8 regroupements selon des facteurs dominants. Ces RSGs ou groupes principaux sont différenciés par les caractéristiques typiques du sol résultant du processus pédogénétique.
- **Le second niveau**, combine le nom du RSG avec un ensemble de qualificatifs, ce qui produit les groupes de second ordre. Les qualificatifs supplémentaires apportent plus de détails sur le sol et ils sont pratiquement identiques au référentiel Français.

On retrouve des désignations portant sur les horizons, la coloration, des qualificatifs issus des matériaux de base et enfin des informations concernant la structure et la composition de l'horizon diagnostique (FAO, 2014) (Duchaufour et al., 2018).

II.12.2 Etapes pour identifier et classer un sol dans le WRB

Le cheminement de la classification du WRB comporte trois étapes :

La première étape consiste à identifier les horizons, propriétés et matériaux diagnostiques observés sur terrain et à en déterminer les caractéristiques chimiques et physiques (Duchaufour et al., 2018).

La deuxième étape est l'affectation du sol à un groupe de référence en fonction de l'identification et de la description faite à l'étape précédente. Le sol prendra sa place parmi les 32 groupes référencés (les RSG).

Enfin la troisième étape permettra l'attribution des qualificatifs principaux et supplémentaires du sol : c'est le second niveau de la classification WRB.

La nomenclature d'un sol selon WRB :

Le nom du groupe RSG suivi des noms des qualificatifs principaux :

1 le qualificatif principal, puis on ajoute

2 les qualificatifs supplémentaires entre parenthèses, séparés les uns des autres par des virgules, dans l'ordre alphabétique.

Le nom du RSG : qualificatif principal 1 qualificatif principal 2 etc. (qualificatif supplémentaire 1, qualificatif supplémentaire 2, etc.) (Duchaufour et al., 2018).

Comprendre le comportement d'un sol depuis sa formation géologique jusqu'à son épanouissement pédologique et écosystémique nécessite une analyse pluridisciplinaire mobilisant à la fois des connaissances cartographiques, sociologiques, géologiques, pédologiques, agronomiques et enfin écologiques. Il est donc indispensable d'utiliser un vocabulaire commun permettant l'échange entre les pédologues du monde entier. Ne faisant pas exception, les technosols doivent s'inscrire dans cette logique de nomenclature scientifique.

II.12.3 La classification des technosols selon le WRB

Les technosols regroupent des sols dont les propriétés et la pédogenèse sont dominées par leur origine technique. Ils sont soumis (comme les sols naturels) aux interactions avec la biosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère. Ils sont le siège de modifications par l'homme qui peuvent aboutir à des réactions très fortes liées à l'introduction de matériaux issus de démolition ou de déchets urbains ou agricoles, modifiant notamment le pH en raison d'une forte concentration en produits carbonatés ou gypseux peu altérés (Séré, 2007).

On trouve sous cette dénomination aussi bien des sols colmatés ou renforcés par un matériau technique (ciment ajouté, géomembrane) que des sols sur déchets (boues, cendres, terrils et poussières, décharges), des chaussées, ainsi que tous les sols construits. Les technosols sont avant tout le fruit des activités humaines ayant pour objectif la construction de sols artificiels ou l'extraction de matériaux non modifiés par les processus de surface (figure 21).

Le WRB classe ainsi dans la catégorie des technosols, les sols issus de villes, routes, mines, décharges, marées noires, dépôts de cendres volantes ainsi que les matériaux apparentés. Du fait de l'activité humaine, la création de technosols privilégie les circuits courts par la réutilisation de déchets issus de démolition ainsi que la valorisation de produits issus de déchets. Par conséquent, la probabilité que la formation pédologique contienne des substances toxiques y est plus importante que dans un sol classique et ils doivent être manipulés ou réutilisés avec précaution.



Figure 21. Typologie des technosols avec l'influence croissante de l'homme sur les sols
(World Reference Base for Soil Resources 2006)

II.12.4 Les conditions pour classer un sol ou matériau en technosol

Un sol sera mis dans la classe des technosols si les caractéristiques suivantes sont présentes :

- Le volume ou le poids des artefacts dans la première tranche de sol de 0 à 100 cm doit être de plus de 20 % ; si la profondeur est moindre, cela s'évalue jusqu'à un substratum rocheux continu ou un matériau technique dur ou une couche cimentée

ou indurée (qualification : Leptic, Hyperskeletal) ; (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006).

- Les artefacts utilisés dans les technosols ne possèdent pas les qualifications d'horizon Argique, Chernique, Durique, Ferralique, Ferrique, Fragique, Hydragrique, Natrique, Nitique, Pétrocalcique, Pétrodurique, Pétrogypsique, Pétroplinthique, Pisoplinthique, Plinthique, Spodique ou Vertique ;
- On trouve aussi dans la nomenclature des technosols, des sols ayant une membrane continue de type géomembrane, très peu perméable à imperméable, d'une épaisseur quelconque (qualifications de Linic, Isolatic) ;

Les sols ayant un matériau technique dur d'une profondeur commençant à 5 cm de la surface du sol (ayant les qualifications de Ekranic, Isolatic) entrent aussi dans la nomenclature des technosols (cf. Annexe 13 ; La nomenclature des technosols suivant le WRB).

II.13 La pédogenèse

La pédogenèse est le processus de transformation des matériaux en sol par l'érosion et les phénomènes climatiques. La formation d'un sol aboutit à un équilibre dont l'échelle de temps est de l'ordre d'un millénaire pour des sols à développement rapide et atteint plusieurs millions d'années pour les sols à évolution lente. La formation des sols s'opère à partir de matériaux géologiques affleurants ayant subi des transformations physiques et chimiques. Cette altération permettra la néoformation de minéraux de la famille des argiles ou de la famille des oxydes. Un équilibre est atteint et se décrit par un profil vertical qui est constitué d'horizons repérables par des caractéristiques de couleurs, de textures... Les horizons se distinguent lorsque le profil se développe, un système horizontal des strates plus ou moins parallèles à la topographie se forme. L'évolution du profil, par exemple des limons des plateaux (figure 22) sera influencée par les facteurs écologiques au sein du biotope (Duchaufour et al., 2018). Avec la modification des éléments chimiques sous la surface du sol, le biotope devient favorable à la colonisation par des espèces dites pionnières telles que les mousses et lichens assurant une première humification du sol ; puis viennent les plantes herbacées et les vivaces, ensuite vient une végétation arbustive qui laissera place progressivement à une végétation forestière. Avec l'arrivée de la végétation, un écosystème particulier se met en place dont l'évolution est couplée à celle du profil. Lorsque l'écosystème se stabilise, on parle de « climax », lié à un écosystème de forêt avec le profil humique le caractérisant (pH neutre ou légèrement acide).

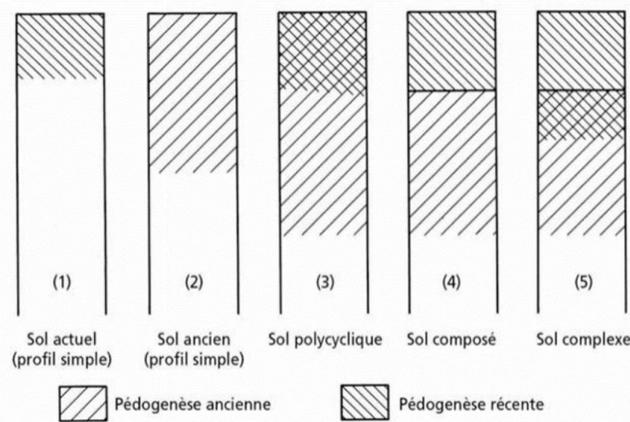


Figure 22. Schéma des cinq types d'évolution du limon éolien en climat tempéré (Duchaufour et al., 2018)

Le cycle d'un profil de type climax est estimé à 10 000 ans. La formation de l'humus passe dans un premier temps par de l'humus carbonaté épais qui donne des rendzines.

La pédogenèse des technosols qui est une évolution sur une échelle de temps courte, quelques années à quelques décennies, est un axe de recherche actuel de la pédologie.

II.14 L'utilité des fonctions de pédotransfert pour déterminer des caractéristiques physiques

Les fonctions de pédotransfert s'appuient essentiellement sur les données indirectes de la texture du sol et sur son pourcentage de matière organique. Les FPT sont issues d'essais de laboratoire. Établies par régression linéaire sur une population de sols, leur spectre d'utilisation se restreint au même type de sols et l'élargissement de l'utilisation à d'autres classes texturales nécessite d'en vérifier la validité (Daudin, 2019).

II.14.1 Perméabilité : évaluation à partir de la texture d'un sol

La détermination de la perméabilité à saturation d'un sol se réalise soit in situ, soit en laboratoire avec une multitude de méthodes permettant de déterminer la vitesse d'infiltration ou d'écoulement. Quelle soit effectuée in situ ou en laboratoire, la détermination de la perméabilité à saturation nécessite la mise en œuvre d'une logistique importante.

La première phase de caractérisation des limons de Saclay ne m'a pas permis de lancer des essais répétitifs d'infiltration. À ce stade d'avancement, l'utilisation d'abaques texturaux reste l'option la plus pertinente pour déterminer des valeurs de perméabilité.

Dans un tableau des ordres de grandeur de la conductivité hydraulique en fonction du type de sol (cf. tableau 6), les intervalles sont croissant avec un rapport de 10 à 100 fois. Je ne peux pas, à ce stade de l'étude, me satisfaire d'ordres de grandeur aussi flous.

Tableau 6. Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans différents types de sols (Musy & Soutter, 1991)

K (m/s)	10^{-1} 10^{-2} 10^{-3}	10^{-4} 10^{-5}	10^{-6} 10^{-7} 10^{-8}	10^{-9} 10^{-10} 10^{-11}
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins	Sable avec gravier, sable grossier à sable fin	Sable très fin Limon grossier à limon argileux	Argile limoneuse à argile homogène
Possibilités d'infiltration	Excellentes	Bonnes	Moyennes à faibles	Faibles à nulles

Une approche affinée, initiée par le Gouvernement du Québec dans le cadre de l'assainissement non collectif et repris par Xanthoulis dans ses cours de physique des sols, permet de déterminer la perméabilité d'un sol à partir d'un triangle de corrélation entre la texture du sol et la perméabilité. Le report des courbes d'iso-perméabilité sur le triangle de texture est le résultat d'une campagne d'essais ressemblant à l'essai Porchet.

Le report des classes texturales des technosols sur le triangle de corrélation permet d'obtenir des valeurs de la perméabilité (théorique). J'opte pour cette solution qui est une approche plus précise que celle présentée par Musy et Soutter (1991). Dans une seconde phase d'étude, au-delà de ce mémoire, je mènerai une série d'essais in situ pour vérifier si nos hypothèses de départ étaient valides et pour affiner le modèle en fonction de la spécificité des technosols. J'utiliserai les fonctions de pédotransfert répertoriées par Behzad Nasri (2013) et reprises par Daudin (2019) que je calibrerai pour les technosols afin de proposer une équation permettant d'évaluer la conductivité hydraulique d'un technosol.

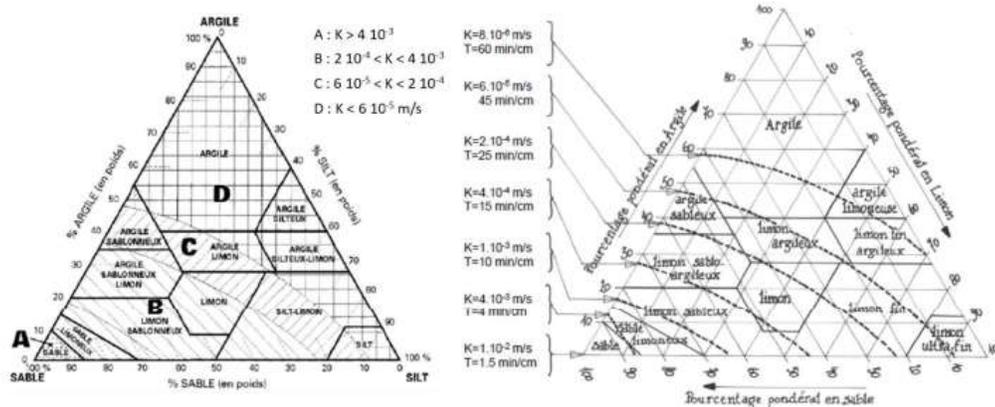


Figure 23. Triangle de corrélation entre texture du sol et perméabilité (Xanthoulis, s. d.)

II.14.2 Prédiction de la masse volumique apparente BD_m et de la perméabilité à saturation K_s à partir des équations de pédotransfert

Les fonctions de pédotransfert FPT sont des outils permettant de prédire des propriétés ou des comportements du sol qui sont généralement difficilement observables à partir d'autres caractéristiques dont on connaît les propriétés. Les FPT sont établies à partir de régression linéaires multiples faisant apparaître une corrélation entre différentes caractéristiques du sol notamment la composition granulométrique, la teneur en carbone organique, la densité apparente... (Baize, 2010). La nature empirique de chaque FPT restreint son utilisation à des régions spécifiques. Chapuis et al. (2012) ont travaillé aussi sur l'évaluation des équations prédictives de la perméabilité des sols. Le travail effectué a permis de faire ressortir les erreurs communément rencontrées lors d'essais de perméabilité, pour eux la qualité des échantillons est essentielle, c'est le paramètre influençant la qualité des résultats des équations prédictive (Chapuis, 2012). Afin de prédire la masse volumique apparente, Nasri (2013) a réalisé pour sa thèse une analyse et une confrontation des équations de pédotransfert pour en évaluer la pertinence dans une application différente, la gestion des eaux usées. Il a souligné que la mesure de la masse volumique apparente des sols contenant des cailloux est un exercice difficile à réaliser ; ses recherches lui ont permis de de décrire une corrélation entre la masse volumique de la matrice BD_m du sol in situ et la teneur en cailloux R_w (Nasri, 2013). J'utiliserai les équations sélectionnées dans sa thèse afin de vérifier l'opportunité d'utiliser le triangle de corrélation des textures et de prédire la masse volumique apparente de la matrice de sol caillouteux in situ ainsi que la conductivité hydraulique à saturation. Nasri (2013) propose l'utilisation de la fonction de Torri : celle-ci nécessite de connaître le taux pondéral d'éléments grossiers R_w (refus du tamis à 2 mm), pour en établir la BD_m :

$$R_w = \frac{M_c}{M} \times 100 \quad \text{Équation 22.}$$

Avec :

M_c : masse du refus sur le tamis à 2 mm,

M : masse sèche de l'échantillon du sol,

$$BD_m = BD_{m0}(1 - 1.67R_w)^{3.39} \quad \text{Équation 23.}$$

Avec R_w : teneur pondérale des cailloux en %

L'équation de Torri permet de tenir compte des cailloux dans l'équation de la perméabilité à saturation K_{sat} ; elle nécessite cependant d'évaluer la densité apparente de la matrice BD_{m0} . Daudin (2019) a repris de Nasri (2013) six FPT qui semblaient le plus adaptées (tableau 7).

Tableau 7. Fonction de pédotransfert pour prédire BD_{m0} avec CO, MO, A et L en fraction massique (Daudin, 2019)

Auteur principal	FPT	Données utilisées
Manrique	$\rho_{app,1} = 1,66 - 0,318(CO \times 100)^{0,5}$	1200 échantillons aux USA et dans le monde
Périé	$\rho_{app,2} = -1,977 + 4,105MO - 1,229\ln(MO) - 0,103(\ln(MO))^2$	Sols acides limoneux et forestiers du Québec
Tomasella	$\rho_{app,3} = 1,578 - 5,4CO - 0,6L - 0,4A^*$ *Classes L et A identique à la définition USDA	Sols de zones tropicales en Amazonie (396 données)
Huntinton - A	$\rho_{app,4} = \exp[-2,39 - 1,316\ln(MO) - 0,167(\ln(MO))^2]$	Petite forêt en Angleterre, horizon organique (mousse roseaux et débris ligneux)
Huntinton - B	$\rho_{app,5} = \exp[0,263 - 0,147\ln(CO \times 100) - 0,103(\ln(CO \times 100))^2]$	Petite forêt en Angleterre, horizon riche en gypse
Prévost	$\rho_{app,6} = \exp[-1,81 - 0,892\ln(MO) - 0,092(\ln(MO))^2]$	Sols sablo-limoneux

Daudin (2019) précise que l'hypothèse d'une matrice solide répartie de manière homogène n'est que théorie et les équations ne prennent pas en compte les fractures ou trous interconnectés liés à la présence de la faune du sol. J'utiliserai les deux équations du tableau 8 pour prédire le K_s de chaque technosol dans mon mémoire.

Tableau 8. Fonction de pédotransfert pour prédire K_{sat} (Daudin, 2019)

Référence	FPT	Données utilisées
[Campbell1985]	$K_{sat} = 4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1,3}{\rho_{app}}\right)^{1,3b} \exp(-6,9A - 3,7L) *$ <p>Avec $b = [\exp(\text{A} \ln(d_A) + \text{L} \ln(d_L) + \text{S} \ln(d_S))]^{-0,5} + 0,2 [(A \ln(d_A))^2 + L \ln(d_L)^2 + S \ln(d_S)^2 - (A \ln(d_A) + L \ln(d_L) + S \ln(d_S))^2]**$</p> <p>*Avec A et L les fractions d'argiles et de limon (même définition que pour le triangle USDA), ** $d_A = 0,001$ mm, $d_L = 0,026$ mm, et $d_S = 1,025$ mm [Nasri2013]</p>	Sols aux USA (Etat de Washington, mesures in situ type test de percolation, [Israelsen1962])
[Verreken1990]	$K_{sat} = 1,1574 \cdot 10^{-7} \exp(20,62 - 0,96\ln(A \times 100) - 0,66\ln(S \times 100) - 0,46\ln(MO \times 100) - 8,43\rho_{app})$	Mesures de K_{sat} par la méthode de la croûte, 127 échantillons de sols variés en Belgique

II.14.3 Estimation de la réserve utile

Le réservoir d'eau utilisable d'un sol ou RU (réserve utile), représentant la quantité d'eau maximale que le sol puisse contenir, est essentiel à la plante. La RU dépend de la texture du sol ainsi que de l'épaisseur de l'horizon concerné (Gis Sol, 2020).

En agriculture, la RU est traditionnellement calculée à partir de classes texturales dont les valeurs sont données par l'INRA (Delaunois et al., 2014) :

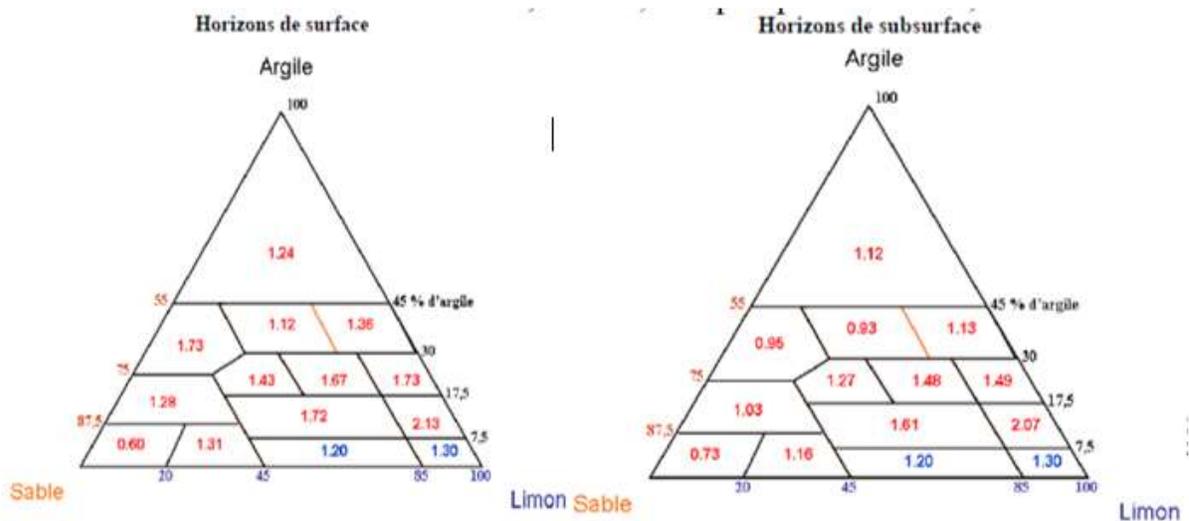
- 1,3 mm d'eau par cm de sol sableux,
- 1,6 mm d'eau par cm de sol sablo-limoneux,
- 2 mm d'eau par cm de sol limoneux ou argileux.
- Multiplier cette valeur par l'épaisseur de la couche de sol.

Pour évaluer la RU, il faut déduire pour chaque horizon, les éléments grossiers qui ne stockent pas l'eau.

Pour obtenir la RFU qui est la réserve facilement utilisable d'un sol, on minore la RU en fonction des éléments ci-dessous :

- 2/3 de la RU pour un sol très bien enraciné,
- 1/2 de la RU pour un sol moyennement enraciné,
- 1/3 de la RU pour un sol moins bien enraciné.

L'estimation de la réserve utile est réalisée à partir de la fonction de pédotransfert FPT (figure 24) et de l'équation 24 proposée par Bruand et al. (2006), modèle adapté par Vauthier (2010).



Pour obtenir le coefficient RU_{FPT} je reporte sur le triangle de texture (figure 24) les pourcentages de limon, argile et sable de chaque mélange ; le calcul de la FPT de la réserve utile potentielle passe par l'utilisation de l'équation 24 ; les calculs prennent en compte les épaisseurs de chaque horizon, surface, subsurface ou profond. Pour obtenir la valeur d'un complexe il suffit de réaliser la somme arithmétique des résultats par mélange.

$$RUP = RU_{FPT} \cdot E \cdot \frac{(100-P)}{100} \quad \text{Équation 24.}$$

Avec :

RUP : réserve utile potentielle de la strate en [mm],

RU_{FPT} : humidité volumique issue de la FPT [mm/cm],

E : épaisseur moyenne de la strate [cm],

P : pierrosité moyenne de la strate [% volumique].

II.14.4 Détermination de l'indice de battance des sols

Dans le process de construction d'un technosol, on aidera le mélange à stabiliser les agrégats. Le phénomène de battance est la conséquence de la destruction des agrégats de surface lors de pluies battantes (effet splash). Les structures de sol impactées sont généralement de type limoneux. L'indice de battance IB donne ainsi la sensibilité d'un sol à l'effet splash variant de supérieur à 2 (très battant) à inférieur à 1,4 (non battant) (Ancelin et al., 2008).

$$IB = \frac{1,5Lf + 0,75Lg}{A + 10 MO} \quad \text{Équation 25.}$$

Avec :

Lf = limons fins, Lg = limons grossiers, A = argiles, MO = matière organique,

LF, LG, A et MO exprimés en : pour mille.

L'horizon de surface est :

- IB supérieur à 2 : sol très battant,
- IB de 1,8 à 2 : sol battant,
- IB de 1,6 à 1,8 : sol assez battant,
- IB de 1,4 à 1,6 : sol peu battant,
- IB inférieur à 1,4 : sol non battant.

II.14.5 Détermination de la capacité d'échange cationique

La capacité d'échange en cations d'un sol correspond à la quantité totale de cations que le sol est capable de stocker et de restituer dans des conditions de pH bien définies. Elle s'exprime en centimoles de charges positives par kilogramme de terre fine ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$) (Ancelin et al., 2008). La CEC d'une terre dépend de la qualité des minéraux argileux et de la matière organique qui la compose, elle est aussi fonction du pH. Plus le sol est acide et plus la CEC diminue. La CEC est un bon indicateur de fertilité du sol car plus le sol est riche en argile et en matière organique, plus la CEC est importante.

Détermination de la CEC à partir de la formule proposée par Girard et al. (2011) :

$$CEC = 2,12 MO\% + 36,00A\% + 4,33 \quad \text{Équation 26.}$$

Avec :

MO : Matière Organique en pourcentage

A : Argile en pourcentage

Une autre approche de l'évaluation de la CEC basée sur la surface spécifique du sol issue des mesures au bleu de méthylène est proposée par Nasri (2013) : il propose des classes de surface spécifique qui sont caractérisées par des relations linéaires avec la CEC.

Tableau 9. Relation entre surface spécifique Ss et la CEC pour les classes texturales principales (Nasri, 2013)

Code de classe texturale	Classe texturale	Ss (VBM) m^2/g	CEC (meq/100g)	CEC=f(Ss)
1	Argile	150-250	4-60	CEC = 0,560 x VBM - 80
2	Limon argileux	120-200	4-35	CEC = 0,375 x VBM - 40
3	Limon	50-150	4-30	CEC = 0,260 x VBM - 9
4	Limon sableux	50-100	3-25	CEC = 0,440 x VBM - 19
5	Sable	10-50	2-17	CEC = 0,500 x VBM - 3

Tableau 10. Catégories des classes texturales (Nasri, 2013)

Code de classe texturale	Texture		
	1	Argile	Argile limoneuse
2	Limon argileux	Limon ultra-fin	-
3	Limon	Limon fin argileux	Limon fin
4	Limon sableux	Limon sableux argileux	
5	Sable	Sable limoneux	

Cette méthode est plus généralisable que celle proposée par Girard et al. (2011) car elle introduit dans l'équation la surface spécifique du sol résultat de la VBS, qui est une donnée standard internationale d'interprétation des caractéristiques physiques d'un sol comme le retrait gonflement et de soulèvement du sol ; cependant dans ma phase d'étude je ne peux pas l'utiliser car la VBS n'a été réalisée que sur le limon. Pour des raisons de justesse des résultats, la VBS devra alors être réalisée sur le mélange pro et il est hasardeux pour ce paramètre d'essayer une approche pondérale.

II.14.6 Évaluation du bilan humique

La production d'humus stable dans un sol est le résultat de deux processus : l'humification et la minéralisation.

La minéralisation est le processus de destruction de l'humus. Elle s'exprime avec le coefficient de minéralisation K_2 (tableau 11) et se calcule à partir de la quantité d'humus stable du sol. Les pertes d'humus sur mes technosols seront un bon indicateur de minéralisation.

Les travaux de Gaiffe et al. (1984) de l'université de Besançon ont montré que la stabilisation du complexe argilo-humique est fonction de la présence de Ca^{2+} et d'humus, le degré de maturité de l'humus étant un facteur déterminant de la perte par lessivage du Ca^{2+} . Leur protocole, appliqué sur un sol du Jura, sol humifère organo-minéral dans l'horizon A, comprenait deux expériences (cf. figure 36). Une première privait l'échantillon de la source de calcium ce qui a produit une légère désaturation et une deuxième où le départ du calcium était accéléré artificiellement par échange avec le potassium (apport de KCl en excès). Une structure non stabilisée donne lieu à un remplacement par l'ion K^+ monovalent qui est dans

l'incapacité d'assurer la liaison organo-minérale. Ainsi, dans leur conclusion les auteurs avançaient que la fragilité structurale résulte de la saturation en ion K^+ déstabilisant la matière organique qui redevient biodisponible (Gaiffe et al., 1984).

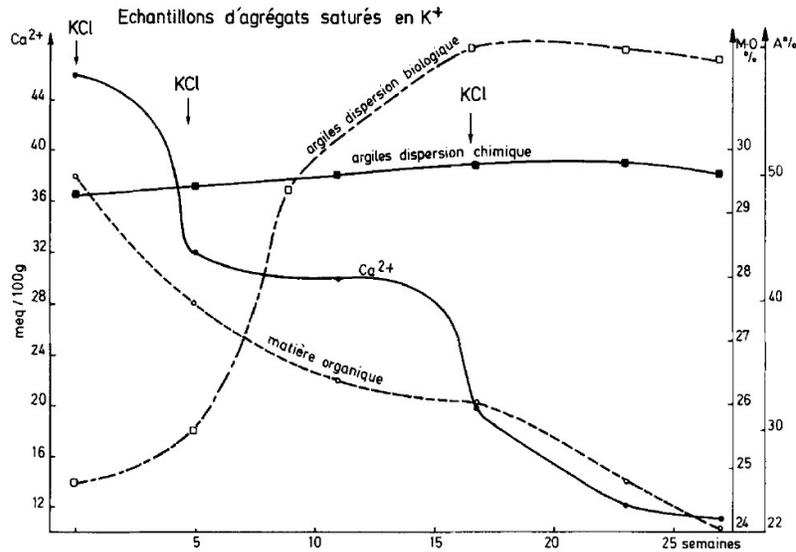


Figure 25. Evolution des teneurs en MO, Ca^{2+} et argile (A%) au cours de l'incubation (d'après Gaiffe et al. 1984)

La perte de structure atteint son paroxysme entre la 5^e et la 11^e semaine avec une migration du calcium sous l'action des ions HCO_3^- et NO_3^- ; au pic de l'activité microbienne qui génère une production importante de l'ion H^+ remplaçant les ions Ca^{2+} , le complexe argilo-humique se dissocie, il se produit une libération des argiles et matières organiques (Gaiffe et al., 1984).

Étape 1. Calcul du volume concerné :

Détermination du volume de sol (en m^3) : $V_t = \text{profondeur (en m)} \times 1 \text{ m}^2$ ou si la surface considérée est plus petite, disons que V_t est le volume d'excavation, mesurable par le remplissage au moyen d'un sable calibré.

Le volume de cailloux sera retranché du volume total du sol pour calculer le volume de la terre fine V_{tf} . La masse de terre fine M_{tf} (en t) est celle qui passe au tamis 2 mm.

La densité apparente de la terre fine s'en déduit : $B_{Dm} = M_{tf} / V_{tf}$. Dans le cas d'un limon de Saclay où les cailloux ou en général les particules supérieures à 2 mm sont rares, $B_{Dm} = \rho$ du sol.

$$M_{tf} / V_{tf} = M_t / V_t = \rho$$

Équation 27

Avec : ρ : densité apparente (t/m^3),

Étape 2. Détermination du stock d'humus Sh (en t) :

L'analyse de terre définit en fait la teneur en carbone organique du sol. La teneur en MO est obtenue par la relation % C organique x 1,725 = % MO, permettant de définir les pertes annuelles d'humus par minéralisation.

Le coefficient de minéralisation K2 peut être obtenu en tenant compte non seulement de la teneur en argile du sol, mais également de la teneur en calcaire total et de diverses conditions climatiques.

$$\text{Sh} = \text{Mtf} \cdot \text{MO} \quad \text{Équation 28.}$$

Avec :

Mtf : Masse de terre fine

MO : matière organique (%)

Étape 3 détermination de la perte annuelle d'humus :

Pour réaliser le calcul j'utiliserai l'équation 24 pour obtenir la valeur du coefficient K2. À titre d'indication le tableau 11 donne une idée des valeurs du coefficient K2 en fonction des types de sols.

Tableau 11. Valeurs du coefficient K2 (Collaud, 2014)

Type de sol	Coefficient K2 - %
sol léger (< 10 % argile)	2.00
sol léger à moyen (10 à 15 % argile)	1.75
sol moyen (15 à 25 % argile)	1.50
sol moyen à lourd (25 à 30 % argile)	1.25
sol lourd (> 30 % argile)	1.00

La minéralisation qui est représentée par le coefficient K2 est fonction de plusieurs paramètres : la température annuelle (plus elle augmente et plus la minéralisation s'accélère), le calcaire qui lui aura un effet inverse ralentissant le processus, la teneur en argile qui augmente le temps de résidence du carbone.

Pour déterminer le coefficient K2 j'utilise le modèle proposé par la chambre d'agriculture d'Occitanie qui prend en compte le taux d'argile et le calcaire total du sol (Borie et al., 2011).

$$K2 = 0,03. (1 + 0,2. (T^{\circ}C - 10)) \cdot \frac{1}{(1+0,005.Argile \text{ en } g/kg)} \cdot \frac{1}{(1+0,005.Calcaire \text{ TT } g/kg)} \quad \text{Équation 29.}$$

La perte annuelle d'humus (en t) est :

$$\delta 365h = Sh. K2 \quad \text{Équation 30.}$$

III Un projet de valorisation des terres excavées : travaux réalisés avec le limon de Saclay

La complexité des aménagements urbains participe largement à l'émergence de sols construits. Pour assurer la pérennité des ouvrages, les acteurs de l'aménagement proposent des mélanges terreux qui sont généralement des technosols reconstitués et travaillés à partir de terres issues de décapage. Aujourd'hui la raréfaction des chantiers de décapage et la volonté forte des pouvoirs publics incitant les opérateurs publics et privés à entrer dans une démarche d'écoconstruction permettant la valorisation des « déchets issus de la construction », nous oblige à réfléchir au devenir des sous-produits de terrassement tels que les limons ou les roches meubles ou désagrégées telles que les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses provenant d'excavations ou de tunnels. Les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche MMOTIVVÉS répondent à la Loi de transition énergétique pour la croissance verte LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 (loi Gouv. 2015c) qui, dans son volet « Energie », préconise notamment le recyclage des déchets du BTP à hauteur de 70 %. Dans ce contexte, l'EPA (établissement public d'aménagement)² de Paris Saclay a mis en place une démarche de gestion des terres issues des travaux d'excavation sur son territoire. Il a donc initié un travail d'identification des entrants et des sortants pour l'ensemble des opérations d'urbanisme de son territoire, avec comme levier, l'obligation de prendre en compte la valorisation des terres dans les cahiers des clauses techniques particulières des marchés publics d'aménagements et des marchés privés immobiliers.

III.1 Les limons de Saclay : gestion, propriétés, fosse pédologique

III.1.1 Contexte : un volet déjà bien avancé du Grand Paris

L'EPA de Paris Saclay s'est vu confier un vaste plan de rénovation et d'aménagement urbain dans le cadre d'une « Opération d'Intérêt National » par la loi du 3 juin 2010 (LOI n° 2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris, 2010). Cette opération devrait aboutir à la réalisation d'un pôle scientifique sur le plateau de Saclay qui permettra d'accueillir 20 000 enseignants chercheurs, 30 000 étudiants, 20 000 salariés et 15 000 habitants. Ce

² L'établissement Public d'aménagement de Paris Saclay est créé le 3 juin 2010 par la loi Grand Paris sous l'entité Établissement public Paris Saclay ou EPPS. Le décret du N°2015-1927 du 31 décembre 2015, en application de l'article 25 de la loi n°2014-58, transforme EPPS en établissement public d'aménagement Paris Saclay sous tutelle de l'état (ministère en charge de l'urbanisme et de l'enseignement supérieur et de la recherche), avec pour mission l'aménagement du territoire le développement économique et la conduite d'opérations immobilières (« Établissement public d'aménagement Paris-Saclay », 2020)

développement nécessitait l'aménagement de voies structurantes pour la desserte des transports en commun telles que :

- Transport en Commun en Site Propre TCSP Massy- Saclay,
- Ligne 18 du Grand Paris express qui ira d'Orly au CEA à Saclay,
- Amélioration de 3 échangeurs de la RN118.

Pour l'accueil des quelque 85 000 personnes qui seront présentes sur cette zone pour occuper un emploi ou pour y vivre, l'EPA s'est alors chargé de la construction de deux nouvelles ZAC :

- La ZAC du quartier Polytechnique,
- La ZAC du quartier du Moulon.

Dans ce cadre, l'EPA Paris-Saclay a identifié la gestion des déblais comme un des enjeux importants de l'aménagement des ZAC du plateau de Saclay. Son engagement pour le réemploi a été intégré dès la phase de programmation qui a abouti à la définition des objectifs suivants :

- Réduire les dépenses liées à l'acheminement et au stockage de matériaux,
- Limiter la pression sur les ressources naturelles,
- Éviter la mise en centre de stockage de matériaux inertes,
- Réduire les GES liés au transport de matériaux neufs vers les chantiers et de déblais depuis les chantiers vers des centres de stockage (Coppens et al., 2016).

L'engagement de l'EPA sur le réemploi des déblais de chantiers issus de ses espaces publics a permis d'obtenir de bons résultats sur le taux de valorisation, d'évacuation et de mise en dépôt des volumes de déblais. Les premiers retours montrent que :

- Pour la ZAC du quartier de l'école Polytechnique en 2015, l'objectif de récupération de 100 % des terres issues de décapage a été atteint. La terre dite végétale est décapée sur 25 cm.
- La réutilisation des terres végétales de décapage est estimée à 21 321 m³ soit 60 %.
- Les 40 % restant sont stockés en prévision de futurs chantiers soit 12 400 m³.
- Les limons sont les matériaux de la ZAC situés sous une profondeur de 25 cm pour un volume estimé à 47 140 m³ ; environ 50 % a servi en réemploi.
- Le stockage du limon représenterait un volume de 23 570 m³.
- Pour les argiles, le réemploi n'a concerné que la moitié du volume ; l'autre moitié a été évacuée en centre d'enfouissement en application de l'article L.541-1 du code de l'environnement concernant la politique nationale de prévention et de gestion des

déchets (loi Gouv. (2020)) et suivant les recommandations du *guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans les projets d'aménagement* (Coussy et al., 2017).

Il faut ajouter que la Région Ile-de-France a mis en place différents plans de gestion des déchets depuis 2006 pour aboutir, en 2015, au Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets de Chantiers du Bâtiment et des Travaux Publics, le **PREDEC** (Région Île de France, 2015).

En phase projet, l'EPA avait défini deux zones de stockage de matériaux :

- Stockage de la terre végétale avec une capacité de 25 000 m³ (stockage en andains pour les aménagements paysagers).
- Stockage des limons avec une capacité de 90 000 m³ (stockage avec traitement à la chaux pour utilisation sous voirie) (Toriel, 2016).

La gestion des andains semble ne pas avoir soulevé de difficulté puisque les couches de décapage restaient facilement identifiables en phase de travaux préliminaires lors de l'aménagement des circulations de la ZAC. Ceci implique que tous les matériaux entrants étaient identifiés et tracés comme de la terre végétale. Avec le démarrage des travaux, un manque de rigueur est rapidement apparu concernant la tenue des stocks de limons. Ainsi, pour certains chantiers où il restait des poches de terre végétale, une suspicion persiste sur le traitement de celles-ci, les fins de chantier se sont retrouvées en mélange avec les limons plus profonds. Parallèlement, le stock résiduel de terre végétale a été évacué pour libérer de la place aux limons. Il semble que ce stock ait été envoyé à l'extérieur du territoire de l'EPA Paris Saclay. Mon travail répond à une demande de l'entreprise RICHARD en charge de l'exploitation de la plateforme de réemploi des matériaux, qui souhaite en caractériser les propriétés et s'orienter vers la création de technosols ; le volume concerné représente environ 60 000 m³. Nos essais ont été effectués sur deux échantillons de limon de Saclay. La provenance des échantillons est visualisée sur les cartes de la figure 25 avec le cheminement des stocks. Noter que le prélèvement n°1 a été fait sur la position de la 2^e zone de stockage de limon, et réciproquement.

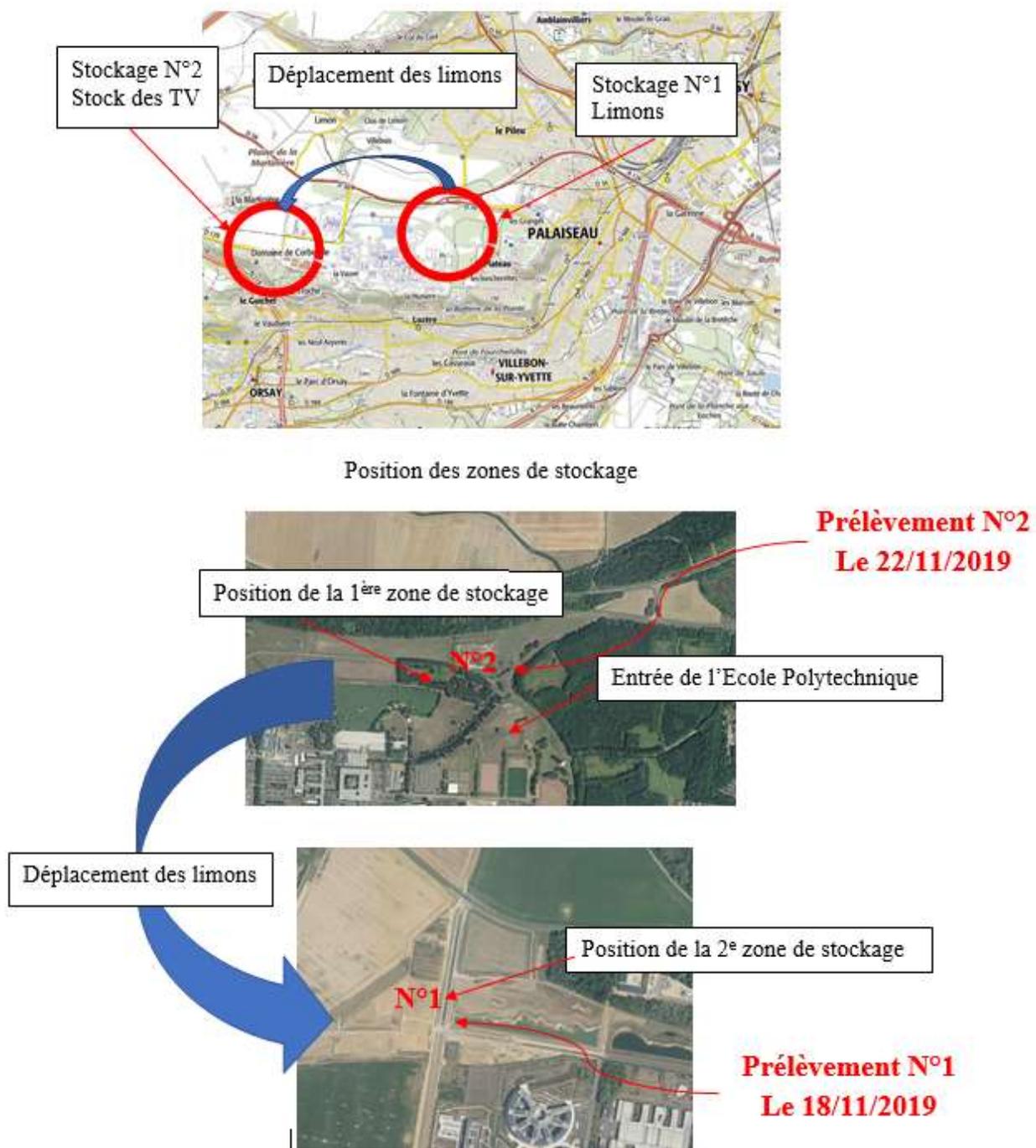


Figure 26. Schéma de suivi des stocks des limons à Saclay

La première prise a été prélevée le 18/11/2019 d'un tas de limon brassé chez la société RICHARD et la deuxième prise a été prélevée le 22/11/2019 d'une fosse pédologique créée dans ce but à l'entrée de l'École Polytechnique, sur le plateau de Saclay.

Les essais effectués à ce jour sont les suivants :

- La teneur en eau pondérale, méthode par étuvage,
- La masse volumique totale du sol, méthode trousse coupante,
- La masse volumique des grains solides, au pycnomètre,
- La capacité d'adsorption du bleu de méthylène, méthode à la tâche,
- Les limites d'Atterberg,
- La teneur en carbonate.

Les essais ont été effectués selon les normes indiquées par Ghada Snoussi, doctorante dans le cadre du projet MMOTIVVÉS.



Figure 27. Position de la fouille pédologique – Ecole Polytechnique, Saclay

III.1.2 Géomorphologie et hydrogéologie du plateau de Saclay

Le plateau de Saclay se situe à la limite de deux entités géomorphologiques, la Brie Française et l'Hurepoix. Il est intégré à un ensemble plus large de plateaux correspondant au nord-ouest de l'Hurepoix. Alors que les autres sont légèrement plus élevés et parfaitement horizontaux, le plateau de Saclay a été soumis à un basculement tectonique d'ouest en est. L'entité géomorphologique du plateau est bien délimitée par les profondes coupures des vallées de la Bièvre, l'Yvette et la Mérantaise. Le plateau est parcouru de deux vallons :

- Le long de l'étang de Saclay
- Entre le talweg de Villiers-le-Bâcle à l'ouest et celui du Guichet, à l'est.

Les versants sud et sud-ouest, correspondant aux coteaux de la vallée plus encaissée de l'Yvette, sont plus abrupts que les versants nord et nord-est. Le secteur de Moulon forme la

partie sud du plateau de Saclay, juste au nord de la vallée de l'Yvette (Terrien, 2013). Dans son étude hydrogéologique du plateau de Saclay (Vernoux et al. 1999), le BRGM en a fait une description stratigraphique comprenant certaines formations superficielles, telles que les limons des plateaux et les argiles à meulière :

- Les argiles et les meulière se sont formées par décalcification à une époque récente attribuée au Pliocène (CAUE, 2020). Le processus d'altération de la roche calcaire par décalcification a donné des argiles principalement formées de kaolinite. L'épaisseur est comprise entre 1 et 6 m (Vernoux et al., 1999).
- Les sables de Lozère datés du Pliocène se sont formés à partir de sables argileux constitués d'argile de type kaolinite, de quartz et de feldspaths ; l'épaisseur de la formation est comprise entre 2 et 5 m.
- Les limons des plateaux sont d'origine éolienne (löss) ; l'épaisseur est comprise entre 0,5 et 3 m.

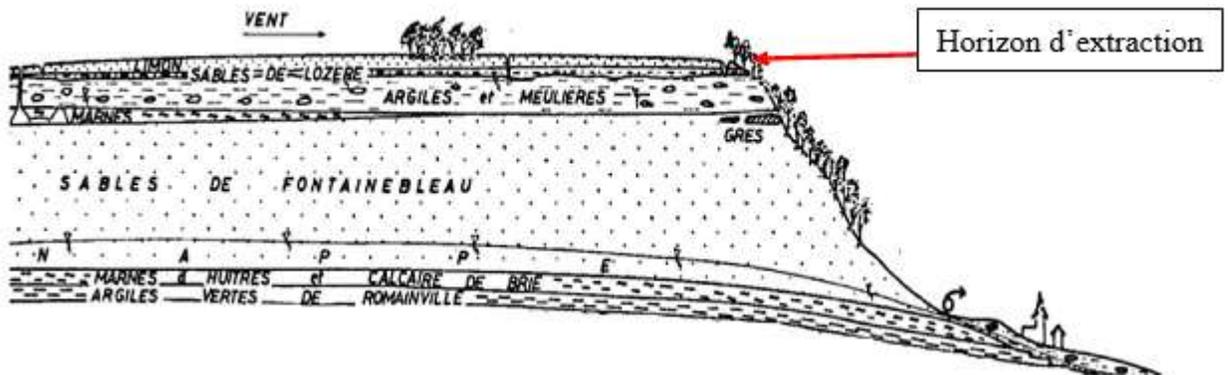


Figure 28. Schéma de la géologie de Saclay – Extrait du cahier de l'Université de Paris Sud (Cojean et al., 1982)

III.1.3 Propriétés des limons de Saclay

Les limons de Saclay se sont développés sur des sols bruns lessivés appelé löss. Le löss est une terre meuble limoneuse, finement poreuse, de couleur jaunâtre à brunâtre, formée principalement de quartz détritique, de carbonate de calcium (CaCO_3), avec une portion de particules d'argiles (souvent de la kaolinite) mais qui forme surtout des grains de limon fin, auquel cas il n'apparaît pas de particules de taille < 2 microns lors de la sédimentométrie. La composition granulométrique du löss comprend du sable fin pour 10 %, du limon pour 75 % et de l'argile pour 15 %. Les sables éoliens de couverture sont limono-sableux avec une dominante de sable fin. La structure comprend des grains compris entre 10 et 50 μm . Elle

est homogène, sans stratification mais avec une très forte porosité résultant de traces de racines et d'une cimentation carbonatée des grains.

Le limon de plateau est très présent en région Ile-de-France ; sur un territoire allant d'Orly au sud de Paris, au nord entre les Plaines du Vexin et l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle. La figure 27 représentant la coupe géologique type rencontrée sur le territoire de Paris Saclay présentée par Cojean (1982) où j'ai positionné l'horizon d'extraction du limon qui m'intéresse, me montre que le limon, d'origine éolienne, comprend toujours les trois niveaux suivants, de haut en bas :

- Limon argileux, brun, décarbonaté,
- Lœss calcaire, jaune clair,
- Mélange lœss-substratum (cryoturbation).

Les limons des plateaux d'Île-de-France sont souvent très homogènes. Selon Filliat (1981), il en existe deux familles :

- Les limons décalcifiés, plastiques,
- Les limons carbonatés, peu plastiques.

Remarque : le limon in situ de ce mémoire est apporté d'un horizon entre 0,5 et 1 m donc il s'agit d'un limon argileux, brun, décarbonaté (cf. figure 27).

Une corrélation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité a été proposée (Audric, 1973) à partir d'essais sur des limons du plateau d'Orly :

$$\omega_L = 0,75 I_p + 23,9$$

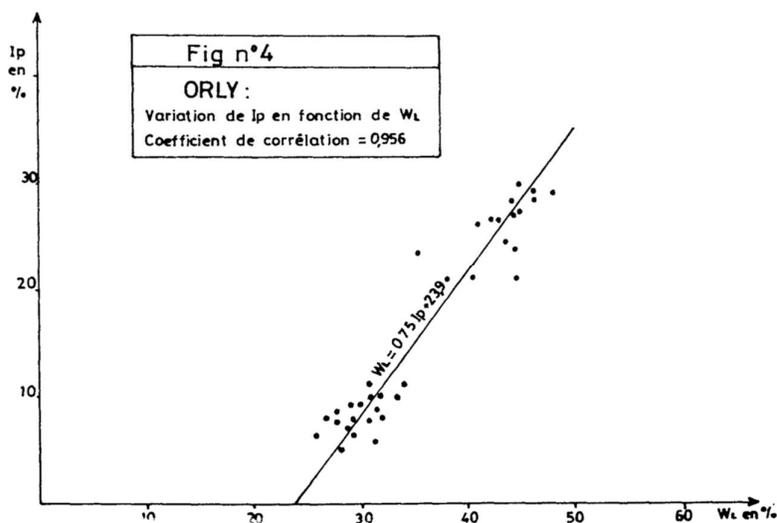


Figure 29. Corrélation entre la limite de liquidité W_L et l'indice de plasticité I_p (Audric, 1973)

III.1.4 Fosse pédologique du site Polytechnique

Ma base de données d'analyses de sols comporte une série de 9 analyses réalisées sur des échantillons prélevés à Saclay lors des travaux du Campus EDF Boulevard Gaspard Monge, sur les limons issus du terrassement. Je m'appuierai sur ces analyses pour caractériser les limons de Saclay qui constituent la matrice à valoriser, ils restent représentatifs des matériaux rencontrés sur la ZAC. La classification et l'identification des horizons de ma fosse pédologique de Saclay est réalisée à partir du référentiel pédologique Français de 2008. Du haut vers le bas nous rencontrons les horizons suivants (cf. Annexe 15 : Liste des horizons de référence du référentiel pédologique Français) :

Horizon Ztr

Matériau anthropique lié aux premiers travaux de stockage des limons ; épaisseur 24 cm. C'est un mélange non homogène constitué de matériaux argileux orangés, de limon beige, de terre végétale et de débris de matière organique.

Horizon LAb

L'horizon comporte un mélange de matières organiques et de matières minérales. La présence d'un horizon remanié et déplacé (anthropique) de 24 cm en partie supérieure de l'horizon le classe en horizon **Ab** (A = « enfoui »). L'incorporation de matière organique résulte de la décomposition des résidus des cultures de surface. La teneur en carbone organique du limon est comprise entre 0,93 et 12,21 pour une moyenne de 7,31 donc comprise dans l'intervalle $> 0,5 \text{ g/100 g}$ et $< 17 \text{ g/100 g}$ de la masse totale du limon.

Le qualificatif **L** a été ajouté car on note la présence d'une ancienne culture et d'un labour peu profond sur 25 cm constituant l'horizon.

Horizon éluvial Eg

L'horizon comporte environ 18 % d'argile et présente des taches de teinte brune.

Horizon structural S

Présence d'une structuration pédologique généralisée, avec une couleur différente du matériau de Ztr horizon anthropique.

Les horizons S diffèrent des horizons A, car ils ne sont pas le siège de l'humification primaire et d'une structuration d'origine biologique. Ils ne sont appauvris ni en minéraux argileux ni en fer et ils présentent une structuration pédologique nettement plus affirmée et une couleur différente. Cet horizon présente une épaisseur importante et homogène, il représente le matériau parental sain (= non altéré) et non perturbé (ni par l'homme ni par le gel ou par la végétation). La « structuration généralisée » ne serait pas pédologique mais traduirait les

conditions de dépôt (éolien), de cimentation (ciment carbonaté), et de compaction naturelle en présence d'infiltration et d'éluviation.

La fosse pédologique (figure 29, figure 30) présente un horizon anthropique Ztr de 24 cm datant du début des travaux d'aménagement de la ZAC.

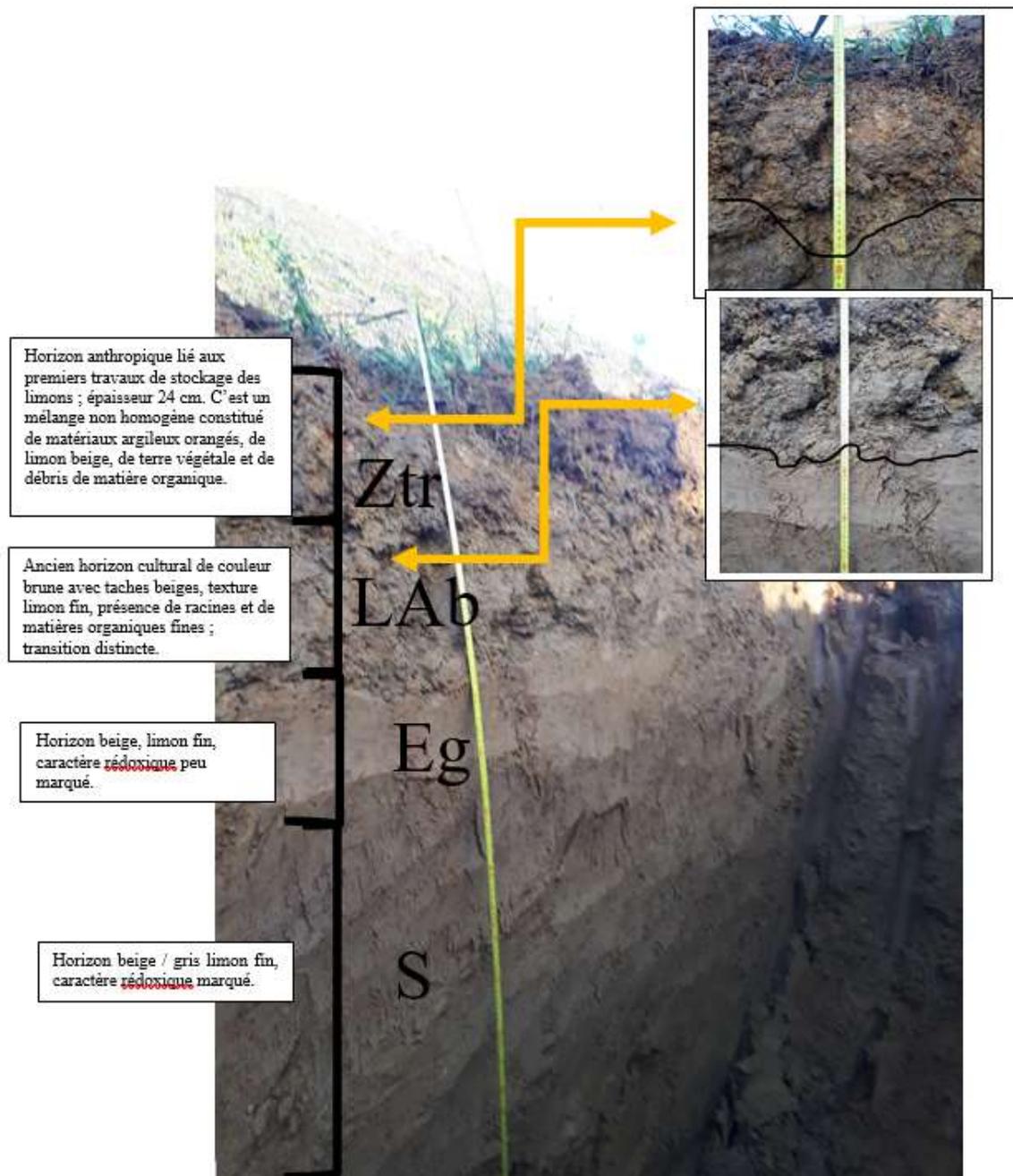


Figure 30. Fosse pédologique, Ecole Polytechnique, Saclay (cf. Annexe 14 : Nomenclature des horizons pédologiques)

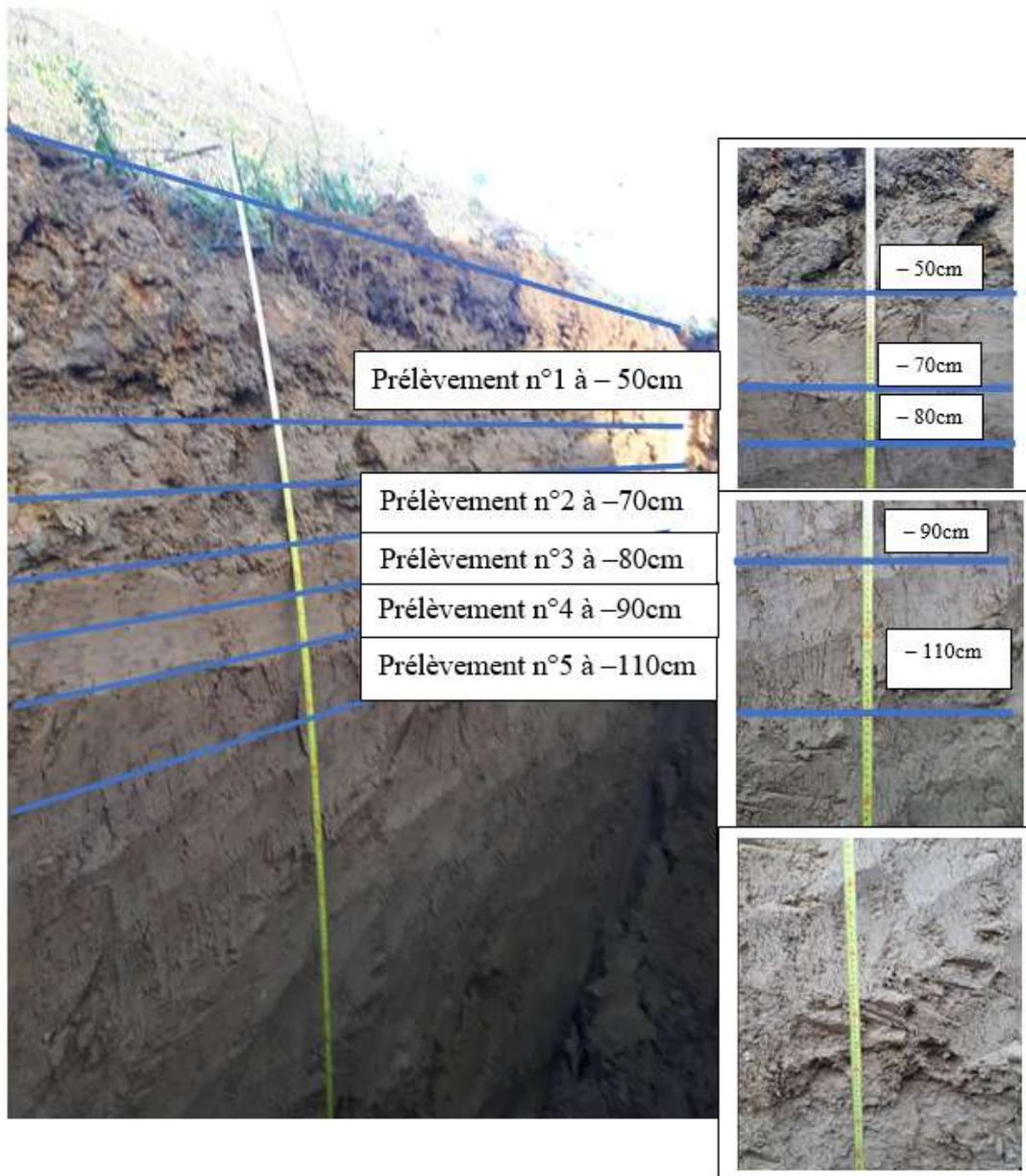


Figure 31. Fosse pédologique, Ecole Polytechnique, Saclay : horizons des prélèvements.

Pour déterminer si mon sol est classé comme hydromorphe, je retire l'horizon Ztr anthropique qui altère la lecture du tableau GEPPA (figure 31) : ainsi j'obtiens IV C un rédoxisol simple considéré comme zone humide. Lors de mes interventions sur site pour le prélèvement de mes échantillons à 4 jours d'intervalles, j'ai pu constater la présence d'une nappe ce qui explique le caractère rédoxique des horizons Eg et S. Il se caractérise par un

horizon composé de taches de rouille sur un fond gris-bleu ; les deux horizons comportent un milieu asphyxiant où les conditions du sol sont anaérobies par saturation en eau. La présence de taches de rouille est un indicateur d'interruption périodique de saturation, car elles sont observables lors de périodes de ressuyage en présence d'oxygène.

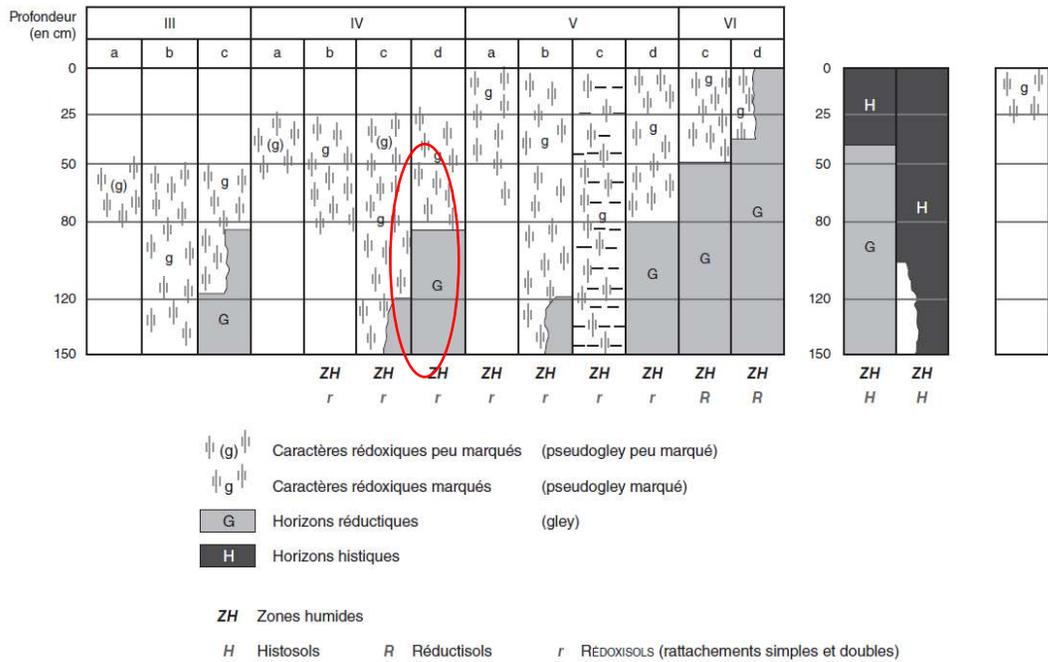


Figure 32. Morphologie de la coupe pédologique « zone humide » (GEPPA)

III.2 Les résultats d'analyses des limons de Saclay

III.2.1 Détermination de la texture type du limon

Les analyses de la BD sols IDF correspondent en majorité à des terres de grandes cultures décapées dans le cadre d'opérations d'aménagement de plateformes industrielles ou pour la construction de logements. La base de données réalisée regroupe 260 analyses de sol exploitables pour la détermination de la texture type ; pour l'ACP, 191 analyses de sol ont été conservées. L'analyse de la distribution de la provenance des analyses montre que l'essentiel des terres provient des départements de la grande couronne : 95, 78, 77 et 91 avec un pic pour le département de l'Essonne. Dans le chapitre 1, j'ai déterminé les causes de l'anthropisation des sols, parmi lesquelles le mitage urbain apparaît comme l'une des causes principales du scellement des sols. La figure 32 montre la distribution par département des sites d'extraction de terre végétale à l'échelle de la région parisienne. Il en résulte une grande disparité entre les départements puisque la majorité des sites se concentre autour de la grande

banlieue. Cette répartition correspond au recul toujours plus important des sites disponibles pour l'aménagement urbain, avec pour conséquence une diminution de la terre végétale disponible à mesure que l'on se rapproche de Paris et de sa petite couronne.

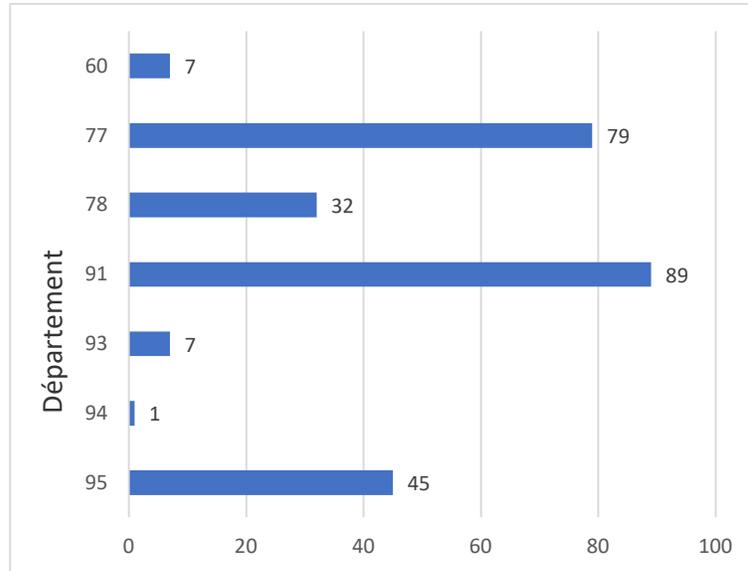


Figure 33. Provenance des analyses de sols de la BD sols IDF.

La figure 33 montre que l'éloignement de Paris et de sa petite couronne est propice à l'extraction de terres végétales. On note que la majorité des terres provient d'une bande comprise entre 15 et 30 km soit 77 % des analyses, les terres provenant de moins de 15 km représentent 15 %. Enfin la proportion des terres provenant de plus de 30 km atteint 8 %.

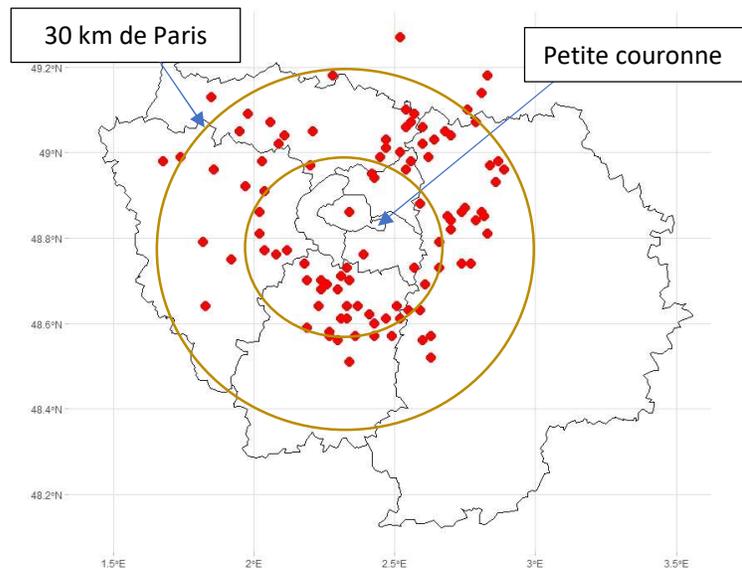
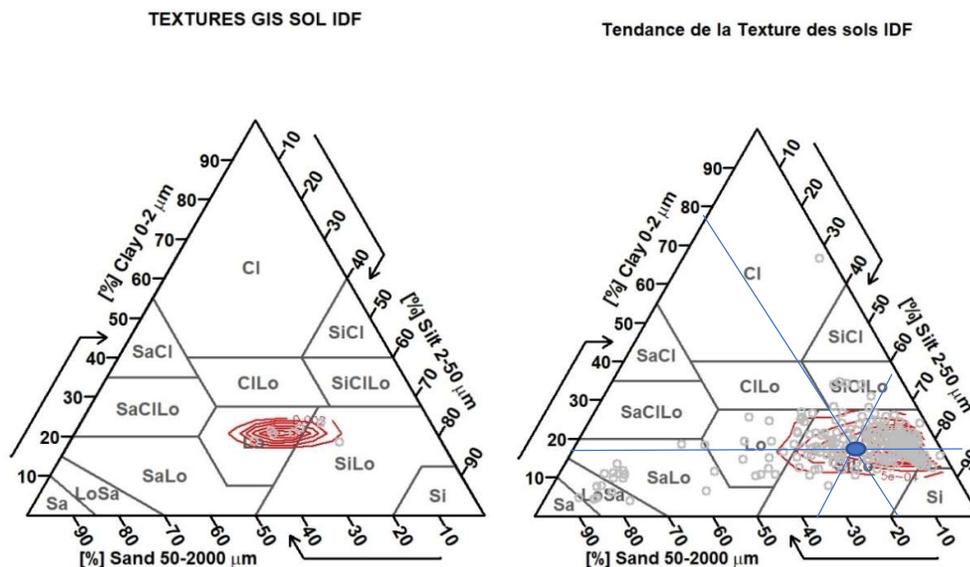


Figure 34. Sites de provenance des analyses de terres constituant la BD sols IDF (cf. Annexe 16 : Commande R pour la création de carte de provenance des terres de la BD)

À la lumière de ces données, on comprend l'intérêt de la recherche sur les technosols et la réutilisation de matériaux qui n'étaient considérés jusqu'alors que comme des produits de second choix.

J'ai effectué une comparaison entre nos données et les données du GIS Sol à partir de l'outil Geosol qui permet de visualiser des statistiques issues des données de la BDAT stockées dans le système d'information décisionnel. Un système d'information décisionnel (SID) s'appuie sur l'entrepôt de données qui est une structure analogue à une base de données permettant l'analyse d'une grande quantité d'informations épurées, organisées, historisées. Geosol cartographie les propriétés du sol à différentes échelles telles que commune, région, département, canton et selon une période temporelle, et donne le nombre de détermination, moyenne, écart-type, déciles pour les propriétés ordinales. Le SID permet la réalisation de calculs sur les résultats analytiques bruts (pH, carbone, phosphore, etc.), mais aussi sur des attributs issus d'un calcul, comme le ratio en pourcentage de limons fins sur limons grossiers, l'interprétation agronomique du phosphore, le taux de saturation³ du sol (Gis Sol, 2020). Les données du GIS Sol du Bassin de Paris reportées sur le triangle des textures me donnent une classe de sol limoneuse : autant de particules de sable que de limon (environ 40 %) et 20 % de particules d'argile granulométrique (ce qui n'implique pas autant d'argile minéralogique).



³ Le taux de saturation du sol¹ est le rapport de la somme des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} et Na^{+}) par la capacité d'échange cationique apportée par l'argile et les matières organiques présentes dans le sol. Ce rapport est utilisé en agronomie ou dans les sciences traitant du sol (Wikipédia, 2019).

	abbr	name
1	Cl	clay
2	SiCl	silty clay
3	SaCl	sandy clay
4	ClLo	clay loam
5	SiClLo	silty clay loam
6	SaClLo	sandy clay loam
7	Lo	loam
8	SiLo	silty loam
9	SaLo	sandy loam
10	Si	silt
11	LoSa	loamy sand
12	Sa	sand

- Texture moyenne issue des 260 analyses de sol

Figure 35. Triangle des textures USDA pour les données du GIS Sol et la BD sols IDF

(cf. Annexe 17 : Commande R pour la création du triangle des textures).

La moyenne générale de la BD sols IDF est plus à droite sur le triangle des textures avec une concentration maximale dans la classe des limons fins. Toutefois, je note une concentration secondaire vers la gauche du triangle dans la classe de texture sable limoneux et limon sableux. Cet amas s'explique par la géographie des sites d'extraction situés en bord de Seine (les nouveaux gisements de ce type devenant de plus en plus rares) ; voir la décomposition de la texture par département (cf. Annexe 18 : Triangle de textures BD sols IDF). Les échantillons du GIS Sol sont plus centrés, à mi-chemin entre les limons sableux et les limons fins alors que les échantillons tirés de la BD sols IDF, provenant d'horizons plus profonds, sont plus à droite du triangle dans les limons fins. La différence entre les données du GIS Sol et la BD sols IDF, claire sur la figure 34, peut provenir du procédé de décapage et de stockage des sols commercialisés. On note que pour limiter l'influence du stockage, les stocks sont généralement engazonnés. La pratique était que les sols, décapés sur une épaisseur de 0 à 80 cm soient stockés en andain mélangé (figure 35). Avec la législation récemment modifiée, article L541-1 du code de l'environnement (Code de l'environnement - Article L541-1, 2020) sur la valorisation des déchets, les prescripteurs demandent de plus en plus aux entreprises de procéder au stockage par strates. Ce changement de gestion permet une meilleure valorisation des matériaux de type limon profond. L'échantillonnage par strate produit forcément une distribution de la texture plus dispersée, voire multimodale. Ma base de données est issue d'une pluralité de techniques de stockage puisque les analyses balayent la période de 2005 à 2019.

Le protocole du GIS Sol est le suivant : il réalise un programme d'inventaire pour la gestion et la conservation des sols, assuré en partenariat avec des acteurs régionaux responsables de la mise en œuvre locale des cartographies. Le réseau de mesure de la qualité des sols de

France (RMQS) est dédié à la surveillance des sols, en particulier la matière organique et le carbone, et les contaminations. La constitution de la Base de Données d'Analyses de Terres (BDAT) est une capitalisation des analyses réalisées par les laboratoires d'analyses de sols à la demande des agriculteurs, pour la gestion de la fertilité de leurs parcelles. La Base de Données des Éléments Traces Métalliques (BDETM) est quant à elle la capitalisation des analyses réalisées de façon réglementaire, dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage (Arrouays et al., 2014).



Figure 36. Photo de stock de terre végétale à Saclay
(source ADEME Centre de Ressources Economie Circulaire et Déchets)

Par ailleurs, les différences rencontrées entre la BD sols IDF et celle du GIS Sol peuvent être expliquées par les différences de profondeur d'échantillonnage des matériaux. Pour les données du GIS Sol les analyses proviennent d'agriculteurs ayant pour intérêt la profondeur de labour de 0 à 40 cm. Les analyses de sol composant la BD sols IDF ont été réalisées sur une frange plus profonde d'horizons de 0 à 80 cm (cf. section III.1.4). Par ailleurs, comme il est attesté par M. SOIGNET, ancien directeur du laboratoire d'analyse INRA d'Arras, quand les analyses granulométriques sont effectuées par un laboratoire pouvant reproduire ses essais à l'identique (répétabilité), les résultats sont fidèles (Denis Baize, 2018). Cela n'est pas le cas pour les valeurs du GIS Sol puisqu'elles proviennent d'une collecte effectuée auprès des agriculteurs qui travaillent avec des laboratoires différents. La même remarque

vaut pour les échantillons de la BD sols IDF puisqu'elle fait appel à 4 laboratoires pour 9 analyses sur le limon de Saclay. Denis BAIZE présente les erreurs et l'estimation des incertitudes sur le tableau 12 et défend que l'interprétation des valeurs n'en est pas forcément impactée. Cependant, en ce qui me concerne, la disparité entre le nombre d'individus des deux BD et le nombre important de laboratoires ayant réalisé les analyses peut être aussi facteur de variations dans le triangle des textures.

Tableau 12. Erreurs relatives et absolues observées par la méthode « pipette » et par tamisage pour la détermination des textures (Denis Baize, 2018)

	Textures argileuses		Textures limoneuses		Textures sableuses		
A	50	50	18	18	10	10	Valeur supposée
	5 %	5 %	3-4 %	3-4 %	5 %	5 %	Erreur relative
	2,5	2,5	0,7	0,7	0,5	0,5	Erreur absolue max.
LF	26	16	50	40	10	10	Valeur supposée
	5 %	5 %	3-4 %	3-4 %	5 %	5,0 %	Erreur relative
	1,3	0,8	2,0	1,6	0,5	0,5	Erreur absolue max.
LG	22	12	30	20	10	10	Valeur supposée
	5 %	5 %	3-4 %	3-4 %	5 %	5 %	Erreur relative
	1,1	0,6	1,2	0,8	0,5	0,5	Erreur absolue max.
SF	1	21	1	21	70	30	Valeur supposée
	10-20 %	5 %	8-10 %	8-10 %	3 %	3 %	Erreur relative
	0,2	1,0	0,1	2,1	2,1	0,9	Erreur absolue max.
SG	1	1	1	1	1	40	Valeur supposée
	10-20 %	10-20 %	8-10 %	8-10 %	10 %	3 %	Erreur relative
	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	1,2	Erreur absolue max.

A : argile, LF : limon fin, LG : limon grossier, SF :sable fin, SG : sable grossier.

III.2.2 La structuration pédologique des limons, le rôle de la matière organique

Les caractéristiques des sols rencontrés ont une importance particulière dans le contexte d'un technosol. Certaines seront des facteurs que je devrais inclure dans la conception et la construction de mon technosol qui sera un mélange de sols ou de matériaux. Pour substituer la base limoneuse de mon mélange par des matériaux issus de grands travaux, la classe de matériaux aura une texture (terre fine) allant des limons fins aux limons sableux, voire à l'extrême, aux sables limoneux. Pour obtenir un technosol stable, il est important d'inclure une série de facteurs associés au comportement d'oxydoréduction du sol. Celui-ci est lié à des facteurs environnementaux, notamment la présence d'eau et d'air avec pour limite la submersion du sol et l'aération complète qui correspond à une absence d'eau. Rappelons

pour le lecteur non-pédologue qu'un sol aéré avec une quantité d'oxygène suffisante permettra l'oxydation de la matière organique. A contrario, un sol en excès d'eau offre des conditions anaérobies défavorables à l'oxydation, et le sol est donc réducteur (Vizier, 1971).

III.2.2.1 Les corrections à apporter à un technosol à base de limon

Les facteurs qui pénalisent la structuration d'un sol limoneux sont :

- Insuffisance d'argile provoquant la formation d'une structure massive à tendance compactée ; rappelons notamment le rôle colloïdal des particules argileuses assurant la cohésion des agrégats du sol (Duchaufour et al., 2018) ;
- Insuffisance de la matière organique, autre composant structurant des agrégats ;
- Insuffisance de la fraction minérale plus grossière, comme les sables de 2 mm à 0,2 mm et les sables fins de 0,2 mm à 50 μm (structure particulière) nécessaires à la formation d'agrégats ;
- Désagrégation mécanique de la structure du sol in situ soumis aux précipitations, qui conduit au phénomène de « splash » et à l'apparition d'une croûte de battance ;
- Réduction de la capacité d'infiltration due à la battance du sol (Annabi, 2005) ;
- Influence de l'érosion (due au ruissellement) sur les sols limoneux.

Je chercherai à corriger ces paramètres par une augmentation :

- du taux d'argile,
- du taux de matière organique,
- de la fraction granulaire (fraction minérale grossière).

Les corrections qui seront apportées interagiront avec les propriétés physiques du sol. En combinant l'humus à l'argile, j'agirai sur un levier déterminant de stabilité du sol en favorisant la floculation. La modification structurale qui en résulte donnera une structure grumeleuse associée au complexe argilo-humique⁴. L'obtention de la stabilité structurale est corrélée à la présence de calcium Ca^{2+} jouant un rôle de liaison entre les molécules d'argile et d'humus chargées négativement.

⁴ Le complexe argilo-humique (CAH) est une structure formée d'argile et d'humus. Les particules d'argiles et d'humus étant tous deux chargés négativement, ils **retiennent les cations** (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ...), éléments essentiels à la plante. L'agrégation des 2 éléments se fait par floculation via des ponts cationiques, liaisons issues des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le CAH a la propriété de retenir les cations présents dans le sol (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , H^+) par des interactions électrostatiques et sa capacité d'échange cationique avec le milieu environnant a une influence sur la fertilité chimique des sols. Il participe à la pédogenèse des sols.

III.2.2.2 Rappel du rôle de la matière organique dans un sol

Pour commencer, il est important de rappeler que la matière organique du sol assure plusieurs fonctions agronomiques et environnementales :

- Le stockage et la minéralisation des éléments nutritifs pour la plante.
- Elle favorise l'activité biologique des organismes du sol.
- Elle participe à la stabilité structurale du sol grâce à l'agrégation des constituants du sol, améliorant la perméabilité ainsi que l'aération.
- Elle participe à la rétention des polluants organiques et éléments traces métalliques.
- Elle influe sur la qualité de l'air en favorisant le stockage du carbone dans les sols (Borie et al., 2011).

La matière organique subit deux phases de minéralisation :

- Minéralisation primaire : à partir de la matière organique fraîche (MOF) du sol qui est d'origine végétale ou animale, peu dégradée, le cycle de transformation des molécules complexes qui composent la MOF produit l'humus.
- Minéralisation secondaire : à partir de l'humus, décomposition enzymatique par voie microbienne des molécules complexes de la cellulose et de la lignine plus difficile à décomposer (Duchaufour et al., 2018). Sous l'action microbienne, la transformation de l'humus résulte dans la formation de molécules simples. La minéralisation de la MO libère des composés inorganiques comme : CO_2 , NO_3^- , NH_3 , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} .

Le pH influence la minéralisation et l'humification. Un sol acide aura un rendement de minéralisation élevé avec stock d'humus faible, alors qu'un sol en milieu calcaire aura un stock fort en humus et une minéralisation faible. Les sols acides auront une bonne activité biologique due à la présence de champignons acidiphiles. La partie échappant à la minéralisation est reconnaissable à sa couleur foncée et constitue le socle de l'humification.

On distingue 3 grands types d'humus avec les caractéristiques suivantes :

- Le mor (pH 3,0 à 3,5) (rapport C/N 25 à 40) constitue l'humus le moins actif, il est constitué de débris végétaux seulement fragmentés avec une minéralisation faible voire inexistante. Le système s'organise avec un horizon O décomposé en 3 parties, il est le siège d'une dégradation mycélienne et l'humus se trouve en petite quantité en fond d'horizon. L'activité biologique y est peu importante et le fait qu'il n'y ait pas de brassage implique que le transfert des nutriments aux horizons sous-jacents se fait par voie soluble.

- Le moder (pH 4,0 à 4,5) (Rapport C/N 18 à 25), constitué d'un horizon O mince de 3 à 4 cm. On note le début d'une activité biologique avec la présence d'une faune, notamment les arthropodes. Le processus d'agrégation reste faible.
- Les mulls sont composés de deux catégories : eutrophe et mésotrophe (pH 5,0 à 5,5) (Rapport C/N 10 à 18). Les horizons O sont très vite décomposés, brassés et transférés à l'horizon A par la mésofaune. Un mull calcaire est constitué de calcaire actif, sa structure stable est formée d'agrégats, elle lui confère une bonne aération.

Il est convenu (en France) qu'un sol d'horizon cultural contient entre 3 et 5 % de matière organique. Une décroissance de la MO s'observe en général avec la profondeur mais c'est fonction du type de sol. La BD sols IDF donne une moyenne de MO égale à 18 g/kg soit 1,8 % et la valeur moyenne de la CEC avoisine 9,5. La valeur de la CEC est un indicateur de la dégradation avancée de la MO. Le sol moyen francilien présente une légère carence en réserve de nutriments. Le pH est un bon indicateur de l'activité biologique du sol : la figure 37 où j'ai projeté la valeur moyenne du pH de 7,35 suggère une bonne activité biologique. L'observation de nos données de pH moyen de la BD sols IDF rapportées sur la figure 37 me donne une tendance favorable d'activité biologique.

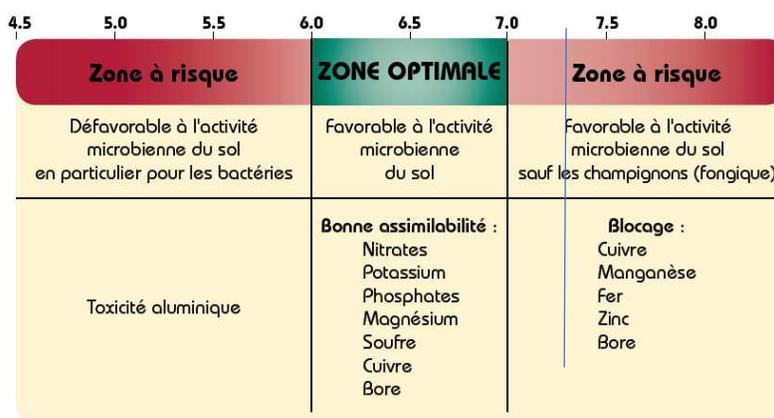


Figure 37. Evolution de l'activité microbienne en fonction du pH (Capinov, 2020b)

Lorsque les conditions de minéralisation de la matière organique sont optimales, la dégradation est rapide, sur environ 1 an. Cela a pour effet de réduire rapidement le stock. Un seuil limite agronomique en dessous duquel le sol n'a plus suffisamment de nutriments pour le renouvellement de sa biomasse a été évalué à 1,5 %, soit 15 g de MO pour 1 kg de sol. On est alors proche du seuil d'accident de culture (Capinov, 2020a).

Pour anticiper les problèmes de carence en éléments nutritifs, je programmerai, en fonction des résultats d'analyses du technosol, l'apport de matière organique sous forme de mull afin de stabiliser rapidement la structure du sol.

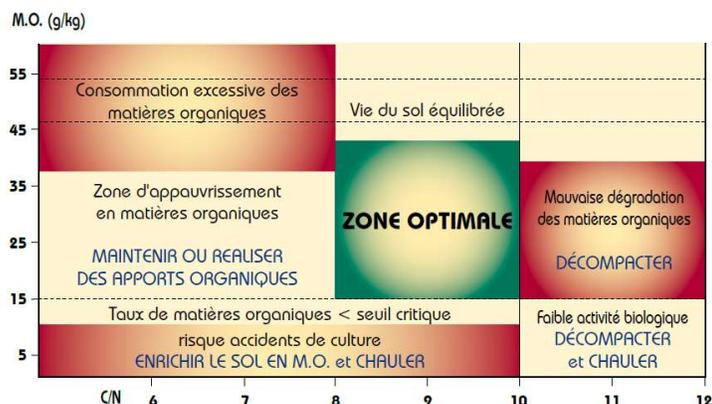


Figure 38. Schéma du bilan humique en fonction du rapport C/N (Capinov, 2020b)

III.2.3 Analyse physico-chimique du sol et calcul des matrices de corrélation

Dans cette partie, j'expliquerai les résultats obtenus par la BD sols IDF sur un plan chimique afin d'établir un fond géochimique représentatif en Île-de-France. Pour obtenir des résultats rapides permettant une analyse multidimensionnelle des nombreuses variables constituant la BD sols IDF, l'utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP) et des matrices de corrélation s'est vite imposée.

III.2.3.1 Rappel des matrices de corrélation

La matrice de corrélation est un outil statistique permettant de tester la relation entre deux variables. L'analyse s'effectue sur des variables ayant le même poids. Le passage par la covariance divisée par le produit des écart-types donne le critère de la corrélation.

$$Cov(x, y) = \sum_{i=1}^n p_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad \text{Équation 31.}$$

Lorsqu'il existe un lien entre deux variables x et y, l'observation des résultats issus du calcul de la covariance indique si les variables « vont dans le même sens » ou en sens opposé.

- $Cov(x, y) > 0$ si les variables x et y ont tendance à varier dans le même sens,
- $Cov(x, y) < 0$ si les variables x et y ont tendance à varier en sens opposé.

III.2.3.2 Rappel du principe de l'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse descriptive multidimensionnelle que l'on trouve souvent sous sa 1^{ère} appellation, « méthode factorielle »,

apparue dans les années 1930. L'ACP est une méthode statistique exploratoire et de description des informations présentes dans les grands jeux de données. Dans la plupart des applications, l'ACP consiste à étudier p variables mesurées sur n individus et elle facilite la compréhension des tableaux à multiples variables. C'est une méthode multifactorielle qui vise à trouver des combinaisons linéaires des p variables ou composantes ou coordonnées. Les données sont organisées dans un tableau rectangulaire de lignes ou individus et p colonnes pour les variables (Saporta & Keita, 2009).

Équation de similitude pour n individus dans l'espace à p coord. où se trouvent les individus:

$$d^2(i, i') = \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad \text{Équation 32.}$$

Équation des liaisons entre variables centrée et réduite de n individus (Lebart et al., 2006):

$$d^2(O, j) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} x_i^2 = 1 \quad \text{Équation 33.}$$

III.2.3.3 Résultats des matrices de corrélation et de l'ACP de la BD sols IDF

Dans la section III.2.1 Détermination de la texture type du limon, l'ensemble de la base de données a été utilisé pour obtenir nos résultats sur le triangle des textures ; cela a été rendu possible par la présence de valeurs pour l'ensemble des échantillons. Contrairement à l'analyse de la texture, l'analyse chimique des échantillons laisse une lacune de départ sur 69 individus pour lesquels des variables sont absentes. J'ai envisagé plusieurs stratégies pour s'adapter à ce manque :

- Calcul de la corrélation entre A et B : on enlève uniquement les sujets ayant des données manquantes pour A ou pour B. L'inconvénient réside dans le risque de ne pas avoir le même nombre de sujets pour les autres variables, ce qui réduit les propriétés algébriques de nos corrélations : **rejeté**
- Gestion simple par l'utilisation de la moyenne ou de la médiane : l'inconvénient est la sous-estimation de la variance de l'estimateur de la moyenne : **rejeté**
- Gestion des données par suppression des sujets ayant des données manquantes : présente l'avantage que les relations se font sur une base puissante : **retenue** (Monbet, 2020).

Les résultats des matrices de corrélation et de l'ACP issus de la BD sols IDF ont été calculés selon la stratégie adoptée concernant les données, à savoir la suppression des individus

présentant au moins une lacune de donnée. J'ai finalement une base constituée de 21 variables et 191 individus.

Dans le but de vérifier si les individus rejetés ne correspondent pas à un cluster spécifique pouvant remettre en cause les résultats trouvés de la texture de la BD sols IDF, j'ai réalisé un report des classes de texture à l'aide du logiciel R. La figure 39 représente la répartition sur le triangle USDA des individus supprimés pour constituer la BD sols IDF. La distribution des 69 individus est représentative des résultats obtenus sur la BD sols IDF, avec une texture essentiellement de limons fins à droite du triangle des textures. Comme dans la BD sols IDF, on retrouve une concentration secondaire vers la gauche avec une texture sable limoneux et limon sableux ; l'amas s'explique par la géographie des sites d'extraction situés en bord de Seine dans le département des Yvelines.

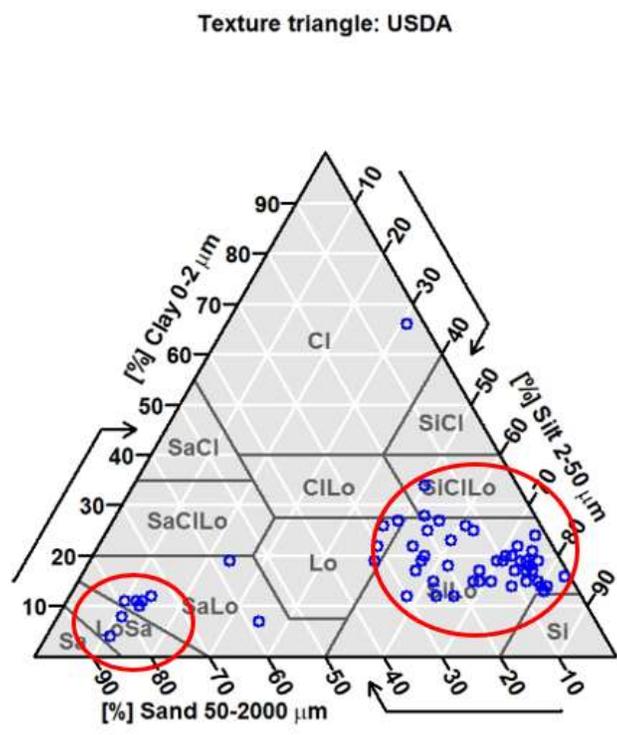


Figure 39. Triangle des textures USDA pour des individus rejetés des matrices de corrélation et de l'ACP.

On a envisagé deux matrices, une première regroupant l'intégralité des variables physiques et chimiques, une deuxième sans les propriétés physiques des sols. Le choix de présenter l'ACP à la suite de la matrice de corrélation permet une double vérification des résultats et d'en faciliter la compréhension ainsi que l'interprétation (cf. Annexe 18 : Commande R pour la création des matrices de corrélation).

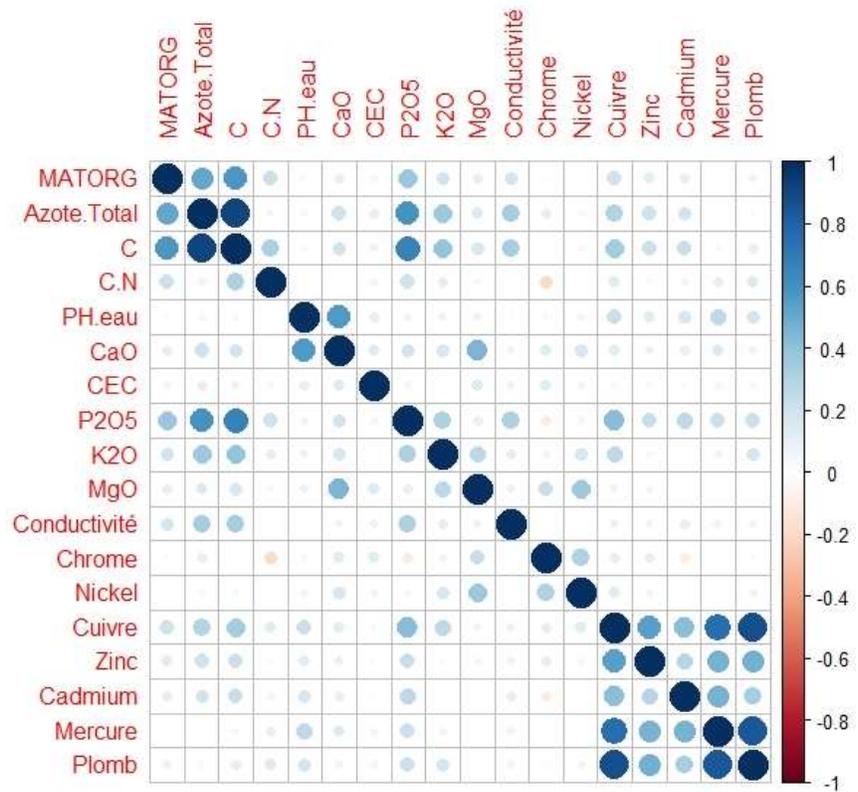
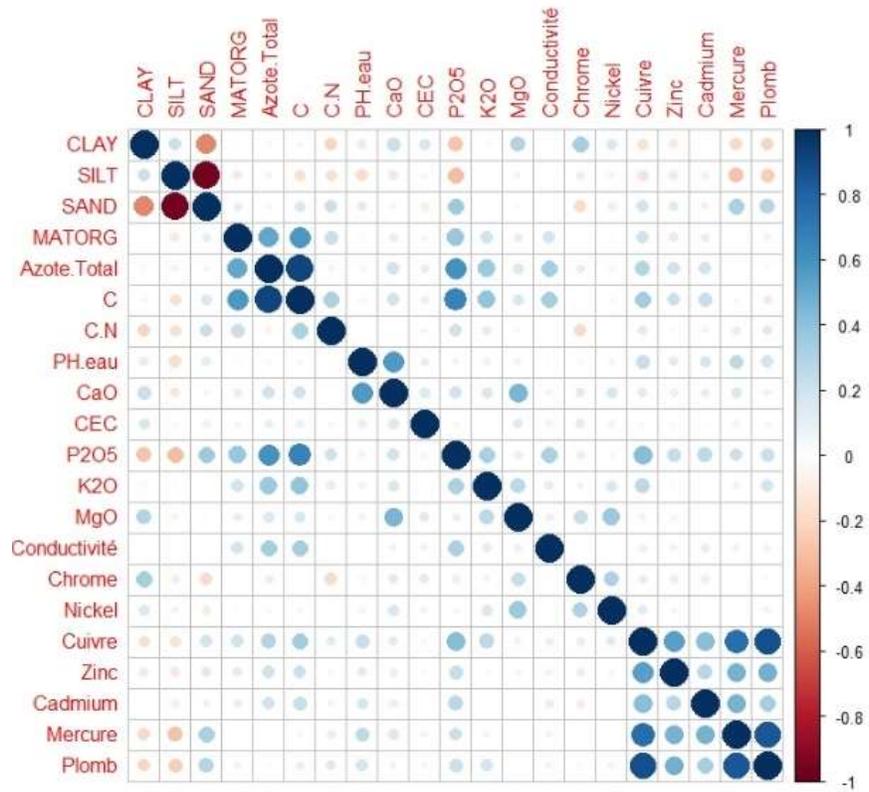


Figure 40. Matrice de corrélation des variables de la BD sols IDF

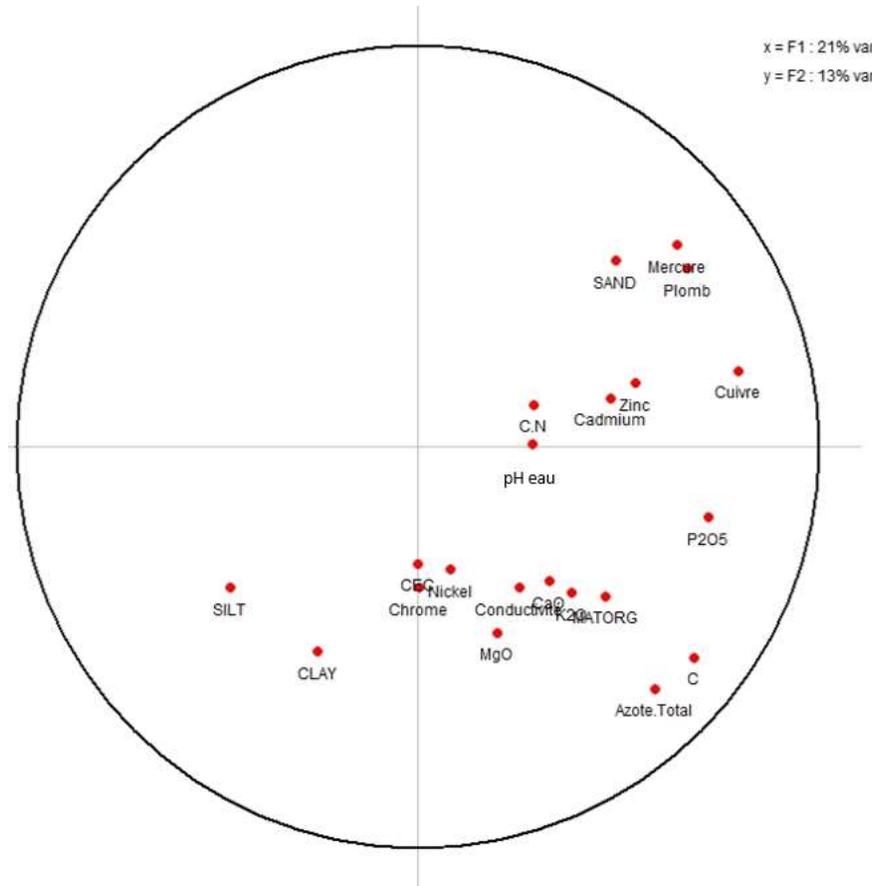


Figure 41. Analyse en composantes principales des variables issues de la BD sols IDF (cf. Annexe 20 : Commande R pour la réalisation de l'ACP)

Dans ce qui suit, on commente les résultats de l'ACP et les matrices de corrélation.

Tout d'abord, on note que SAND est diamétralement opposé à SILT, dont CLAY est assez proche. Cela signifie que la population totale des échantillons se distribue globalement entre un pôle sable et un pôle limon argileux.

Dans le nuage global des points, on observe une tendance qui peut s'exprimer ainsi : en s'éloignant du pôle SAND, plus un sol est limoneux (proche du pôle SILT), plus il est argileux (sa teneur en argile croît). Concernant les ETM, Hg et Pb, et dans une moindre mesure Cd, Zn, et Cu, sont présents surtout dans les sols les plus sableux (proches de SAND). Ceci est partiellement lié à la zone d'origine des échantillons, notamment la ville de Chanteloup-les-Vignes qui subit depuis longtemps l'épandage de boues issues de station d'épuration, polluées et sableuses. On en conclut que ces cinq ETM se trouvent plutôt dans les sols plus riches en sable en raison d'une pollution initiale de ces sols par des matériaux déchets qui n'ont pas été gérés conformément à la réglementation actuelle. Depuis la

directive européenne 86-278 du 12 juin 1986 modifiée relative à la protection de l'environnement, renforcée depuis par la loi sur l'eau, l'utilisation des boues d'épuration en agriculture est très encadrée. Il existe aussi des contraintes dans le cadre des ICPE, dans le code des communes et enfin dans l'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles (Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées - Légifrance, 1998). En substance, l'épandage doit respecter les normes d'application obligatoires et doit présenter un intérêt agronomique tout en protégeant l'homme, les animaux et l'environnement (Muller, 2016).

On a tenté une interprétation alternative fondée sur la composition de la matrice des sols : cette richesse en cinq ETM pourrait s'expliquer par une plus grande teneur en MO dans les sols sableux de cette BD. Par exemple, le mercure (Hg) est fixé par la matière organique sous forme de complexes organométalliques très stables (Marseille & Denot, 2019 ; Perrono, 1999). En effet, la principale contribution à la capacité de rétention par adsorption (et à la CEC) vient de la MO, qui libère facilement ses ETM dans le test de lixiviation. Or, la variable MO est exactement à la même distance dans le cercle vis-à-vis de SAND et SILT : il y a autant de MO statistiquement dans les sols sableux que dans les sols limoneux de cette BD. Notons aussi que la différence d'argilosité accroît la rétention mais beaucoup moins que la MO : d'ailleurs, si elle était visible dans cette BD, elle serait en faveur du pôle limon argileux et non du pôle sable ! La teneur en MO n'est pas négligeable, dans l'ensemble de la BD, donc l'effet de la différence de teneur en argile entre les deux sols extrêmes de la population pourrait être brouillé par la MO ; en tout cas, il ne pèse pas lourd face à la pollution des sols sableux. La richesse des sols sableux de cette BD en cinq ETM n'est donc pas un biais de matrice (richesse en MO), mais elle révèle bien une pollution par des matériaux rapportés. La CEC est en position intermédiaire entre MATORG (matière organique, même chose que MO) et le SILT. C'est parfaitement logique d'après la définition de la CEC qui est influencée par la MO et par les fines des limons ou limons argileux. On note aussi que pH et CLAY sont opposés par rapport à CEC : plus un sol est argileux, plus le pH de l'eau est acide, logique !

Les métaux Ni et Cr sont groupés autour de la CEC. Baize et Paquereau (1997) qui ont travaillé sur : « Teneurs totales en éléments traces des sols agricoles de Seine-et-Marne », ont montré, à partir d'une matrice de corrélation reprenant les 11 variables suivantes : CEC ;

C ; CU ; Zn ; Cr ; Ni ; Pd ; Cd ; Hg ; Se, que trois des variables (CEC ; Ni et Cr) étaient fortement corrélées entre elles. Ils en déduisent que ces éléments sont d'origine anthropique, après avoir écarté les anomalies naturelles. Ils expliquent ce résultat par la proximité de Paris et de ses banlieues qui constituent probablement une source de pollution atmosphérique mais aussi par le fait que les pollutions des populations limoneuses ont reçu depuis les années 70 des boues d'épandages provenant notamment de la station d'Achères. Le résultat de ma matrice montre aussi une corrélation entre le Nickel et le Chrome ; je la retrouve de façon plus marquée dans l'analyse en composantes principales qui souligne aussi l'existence d'une corrélation du Ni et Cr avec la CEC, rejoignant ainsi les observations de Baize et Paquereau (1997). La BD sols IDF a donc elle aussi été perturbée par la pollution atmosphérique de la région parisienne, ainsi que par l'épandage de boues issues de stations d'épuration.

CaO et MgO sont proches et la conductivité électrique de l'eau interstitielle leur est liée : en effet, la minéralisation de l'eau est dominée en général par les ions bicarbonates HCO_3^- qui se combinent le plus avec les cations de calcium et magnésium. Une forte minéralisation de l'eau se trouvera donc surtout dans les sols les plus carbonatés ou granulaires liés par un ciment calcaire ou dolomitique. C'est logique. La coordonnée en x (axe F1) de ce groupe est identique à celle du pH : la richesse en carbonates est responsable d'un pH élevé ainsi que d'un rapport C/N important. Les phosphates (P_2O_5) sont isolés, à mi-chemin du binôme C et N total et des sols sableux à métaux lourds. Les P_2O_5 ne sont proches ni des sols sableux à métaux lourds ni des carbonates, ils ont une source indépendante, et ils sont rares aussi dans les sols limoneux. Dans la matrice 21x21, P_2O_5 n'est pas sans corrélation aux autres nutriments, C et N total.

On retient que pH est sur l'axe x, et CEC sur l'axe y, ce sont deux variables indépendantes. Toutes les autres variables dépendent de ces deux axes. La CEC représente l'adsorption, la rétention et la capacité d'échange alors que l'influence du pH est reconnue comme un facteur de la mobilité des éléments traces ainsi que des oligo-éléments et leur disponibilité vis-à-vis des êtres vivants avec un optimum entre 6,5 et 7,5. L'ACP fait apparaître une liaison entre les sols carbonatés riches en Ca, Mg et la MATORG. Par conséquent les sols sont riches en MO et donc en C, N, K. La corrélation entre le couple alcalinoterreux Ca, Mg et MO est par conséquent un marqueur fort de dégradation de la matière organique par l'activité biologique du sol, comme vu à la section III.2.2.2 Rappel du rôle de la matière organique dans un sol. On peut émettre l'hypothèse qu'il s'agit d'une preuve forte de l'activité biologique du sol dans le processus de dégradation de la matière organique.

III.2.4 Résultats des essais au laboratoire de géotechnique du Cnam

Les premières investigations sur les limons de Saclay ont été réalisées lors d'une campagne de prélèvements et d'essais qui ont eu lieu entre le 18 et le 22 novembre 2019. Les résultats des essais sont synthétisés dans le tableau 13 (Snoussi & Fouché, 2019).

Tableau 13. Résultats des essais d'identification sur le limon de Saclay

Essai	Norme	Limon du stock N°1	Limon échantillons in situ	Résultats Filliat et al. (1981) Limons des plateaux à Rungis	Résultats Plumelle et al. (2013) Limons des plateaux	
Teneur en eau pondérale	NF P 94-050	16,00	17,00	14,00	10 à 25	%
Masse volumique des sols	NF P94-053	-	1,90	1,98		t/m ³
Masse volumique des particules solides	NF P 94-054	2,65	2,63	2,60 à 2,70		t/m ³
Capacité d'adsorption du bleu de méthylène	NF P 94-068	3,25	2,91			g
Limite de liquidité	NF P 94-051	33,00	34,00	35,00	19 à 70	%
Détermination des limites d'Atterberg	NF P 94-051	12,00	13,00	13,00	7 à 39	%
Détermination de la teneur en carbonate	NF P94-048	2,50	2,50	10,00	1 à 40	%
Identification granulométrique NF EN ISO 17892-4	2 (mm)	98,35	99,2		97 à 100	%
	0,4 (mm)	96,93	97,58		90 à 100	%
	0,08 (mm)	93,84	94,99		90 à 100	%
	0,063 (mm)	93,28	94,22		60 à 95	%
	0,023 (mm)	58,54	54,83		40 à 60	%
	0,002 (mm)	25,09	23,23		20 à 40	%

La moyenne de la masse volumique in situ des limons de Saclay est $1,96 \text{ t/m}^3$ et celle du sol sec $1,68 \text{ t/m}^3$. Ce résultat confirme les données de Filliat et al. (1981), de même que la masse volumique des particules solides avec une moyenne de $2,64 \text{ t/m}^3$. La teneur en eau pondérale est supérieure de 2 à 3 % aux résultats de Filliat et al. (1981) mais reste dans l'intervalle indiqué par Plumelle et al. (2013). Les résultats de la limite de plasticité d'Atterberg montrent que le sol est « peu plastique ». La teneur en carbonate de 2,5 % reste en dessous des résultats de Filliat et al. (1981) mais restent dans l'intervalle de Plumelle et al. (2013), la valeur classe le sol en « non marneux ». Cette valeur est probablement liée à la décarbonatation des limons en surface. Les résultats de nos analyses confirment ceux publiés par Filliat et al. (1981) mais aussi ceux du CEREMA dans son étude « des interactions entre les aménagements urbains, la nappe superficielle et les conditions de rejets des eaux pluviales : cas d'étude sur le futur campus urbain du Moulon ». Les mesures de l'argilosité en laboratoire à différentes profondeurs avec la valeur au bleu sur les limons ont mis en évidence une baisse de l'argilosité liée à la profondeur allant de 1,25 à 2,75 m pour des valeurs d'adsorption au bleu de 2,8 et 4,1 g/100g. Le résultat est en cohérence avec une décalcification de la frange supérieure sous l'effet des précipitations responsable d'une argilosité des limons de surface (Berthier, 2018).

Les deux résultats de Snoussi et Fouché (2019) montrent que ce sol est un limon argileux. La valeur au bleu de la prise d'essai prélevée sur le lieu de stockage est plus grande. La figure 42 montre que les deux courbes granulométriques des limons de Saclay s'inscrivent dans le fuseau donné par Cojean (1975), ce qui rend nos résultats crédibles et sans surprise. Je remarque que les deux courbes de nos échantillons suivent sensiblement la même trajectoire et qu'elles se superposent par moment. On peut en conclure que les matériaux, après avoir été remaniés puis déplacés, conservent leur intégrité. Les différences montrent que nos échantillons n'ont pas subi de contamination par des corps granulaires (peut-être quelques particules apportées par le trafic et le vent sur la plateforme de stockage).

III.2.5 Analyse agronomique des limons de Saclay

Pour mon projet, j'ai choisi de ne pas faire une nouvelle campagne d'analyse agronomique des terres de Saclay. J'ai à disposition une série d'analyses sur 9 sites, effectuées de 2009 à 2017, depuis la ZAC du Moulon jusqu'à la ZAC Polytechnique, ce qui était suffisant pour mon premier objectif d'identification du matériau limoneux de Saclay dans le cadre de mon

étude de conception de technosol. Le triangle des textures pour les 9 échantillons montre un nuage de points très concentré dans le champ des limons fins (silt loam).

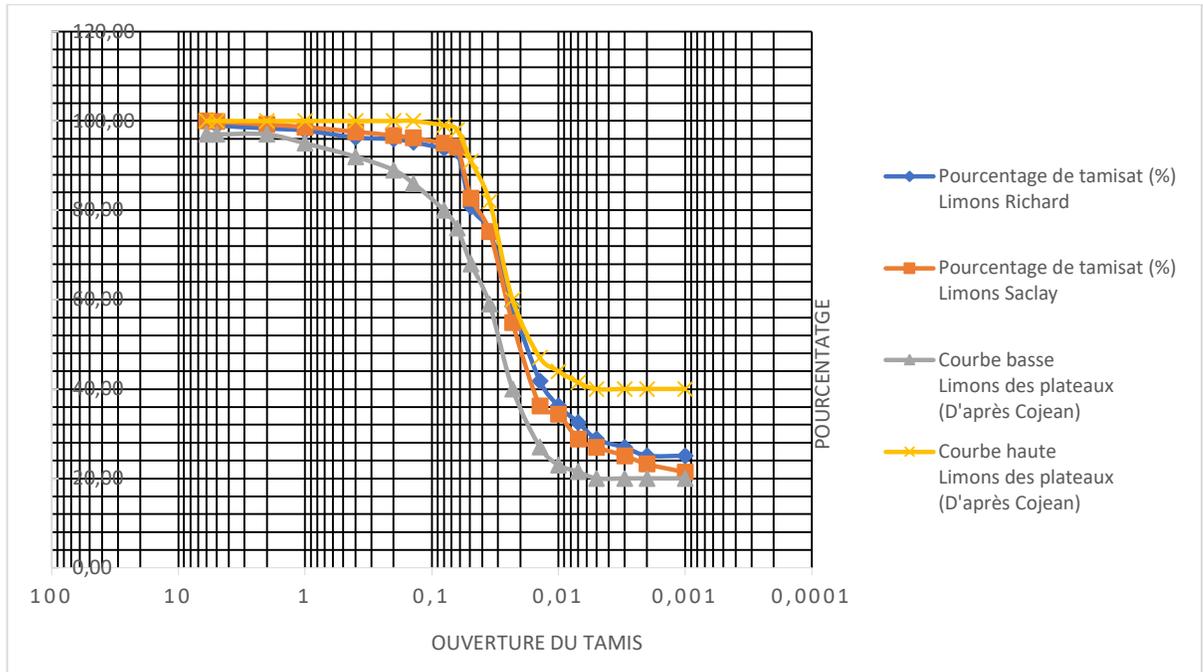


Figure 42. Courbes granulométriques des limons de Saclay

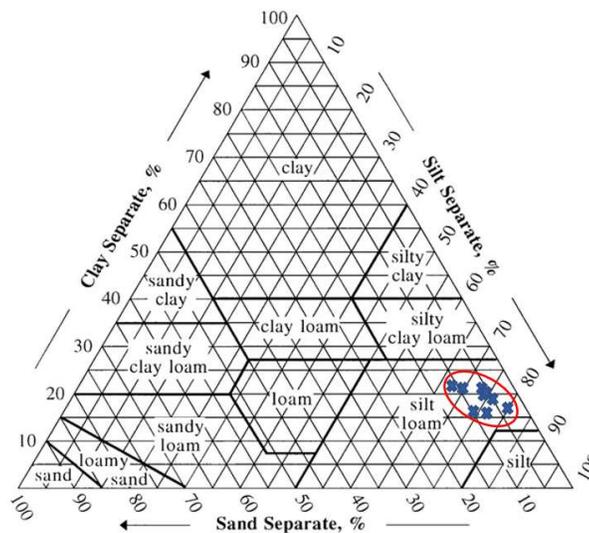


Figure 43. Triangle de texture des 9 échantillons de la BD sols IDF issus de Saclay

L'étude sur la nappe superficielle de la ZAC du Moulon a montré que sur 12 sondages, la formation des Limons des plateaux se rencontre sur une épaisseur moyenne de 1,20 m entre un minimum de 0,50 et un maximum de 2,50 m (Berthier, 2018).

Tableau 14. Épaisseurs des formations géologiques rencontrées dans les piézomètres réalisés par le CEREMA (Berthier, 2018)

Épaisseurs des formations rencontrées (en m)	PzA	PzB	PzC	PzD	PzE	PzF	PzG	PzH	PzI	PzL	PzJ	PzK	Épaisseur moyenne (en m)
Limons des Plateaux	1,4	1	0,6	1,2	1	1,7	0,5	1,6	0,3	1,2	1,3	2,5	1,2
Formation de Lozère	4,8	1,7	1,4	0,4	1,7	0,3	1,9	0	0	1,7	1,6	0	1,3
AM de Beauce (en blocs)	2,4	4,8	>5,65	>3,8	2,3	5,8	1,5	1,3	0	1,8	3,6	5	>3,2
AM de Beauce (compacte)	>1,6	>1,2			>1,9		4,4		7	2,5	>1,2		>2,8

NB. AM = argiles à meulière.

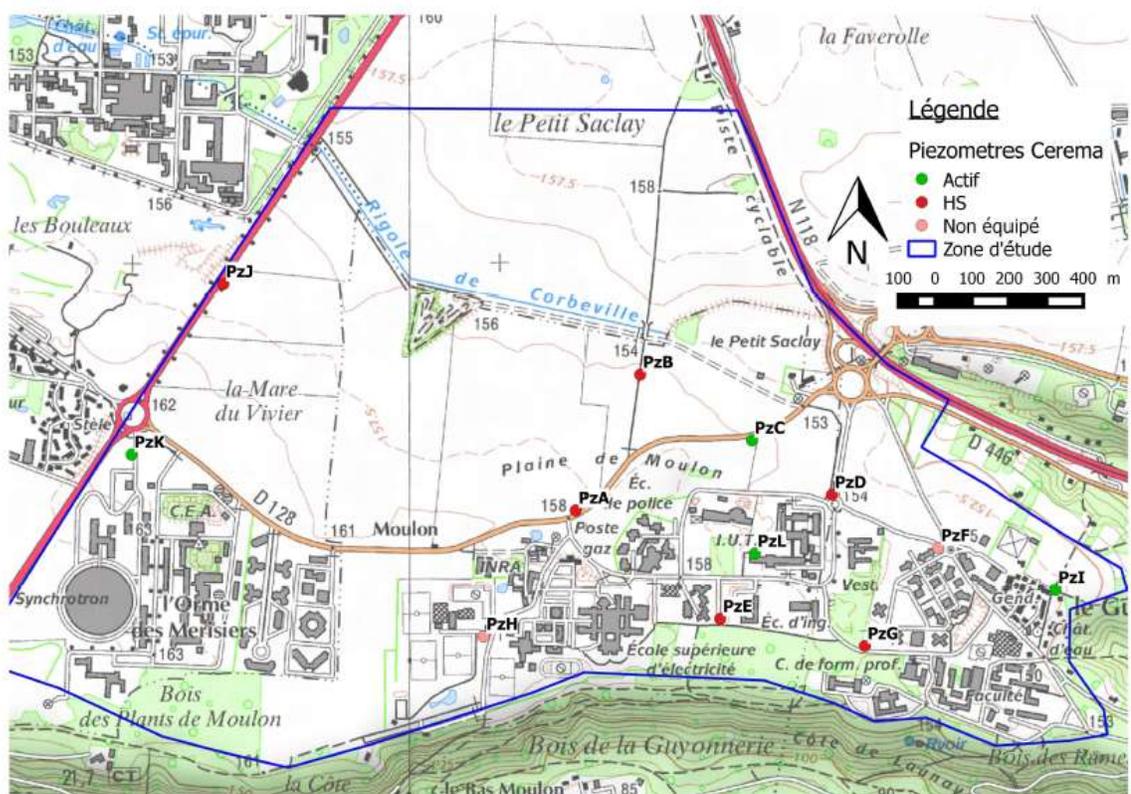


Figure 44. Emplacement des piézomètres installés par le CEREMA (Berthier, 2018)

La figure 48, graphique de comparaison entre les valeurs de la moyenne et de la médiane des analyses des limons de Saclay, montre que les différences sont minimales ; autrement dit, les distributions des valeurs sont pratiquement symétriques, ce qui signifie que les moyennes sont très peu influencées par des valeurs extrêmes, à l'exception de la conductivité (moyenne : 0,65 ; médiane : 0,15) ainsi que du Cadmium (moyenne : 0,26 ; médiane : 0,18). Je peux donc travailler à partir des moyennes pour l'ensemble des variables.

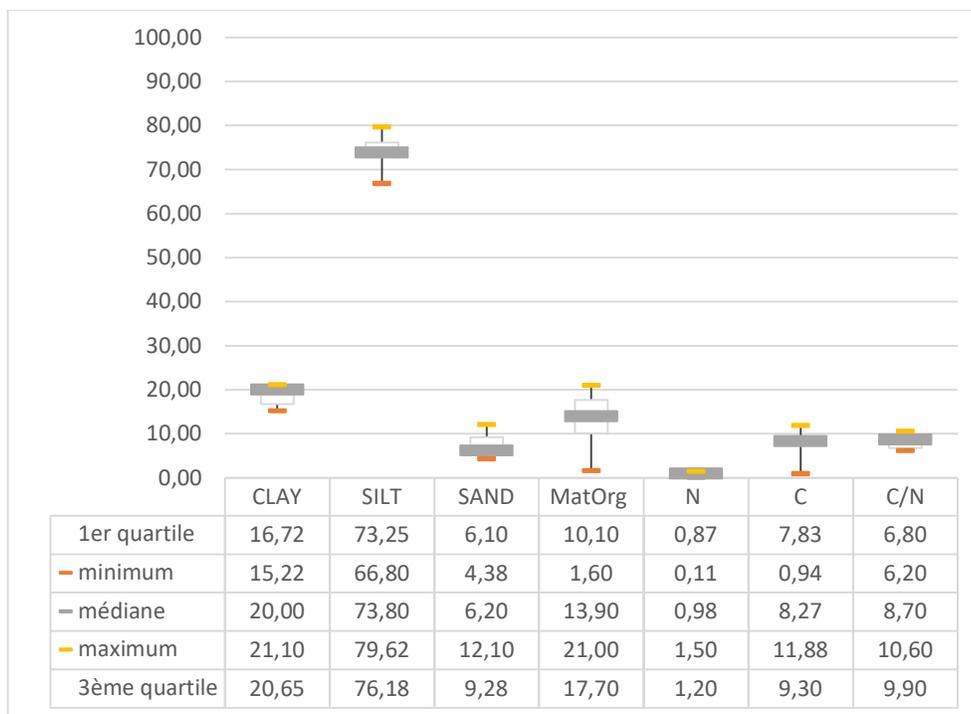


Figure 45. Boite à moustache des analyses de terre de Saclay issues de la BD sols IDF

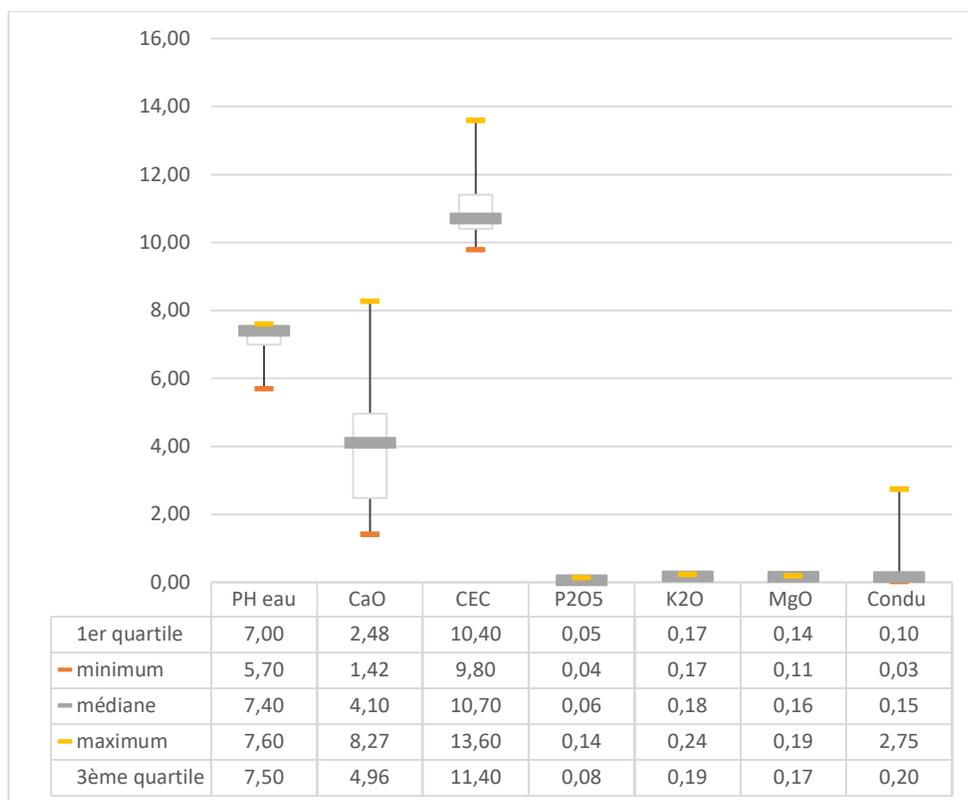


Figure 46. Boite à moustache des analyses de terre de Saclay issues de la BD sols IDF

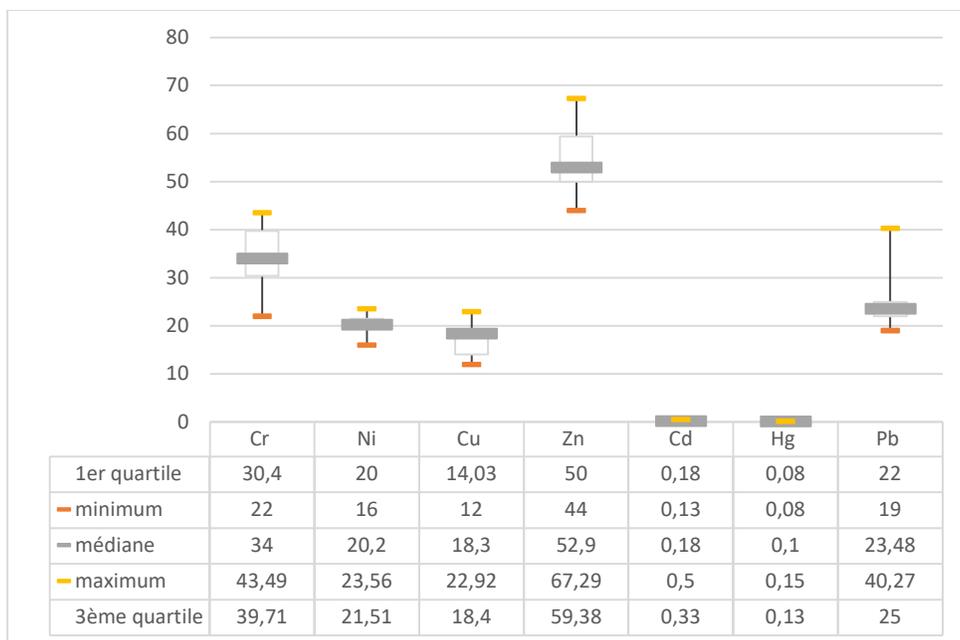


Figure 47. Boîte à moustache des analyses de terre de Saclay issues de la BD sols IDF

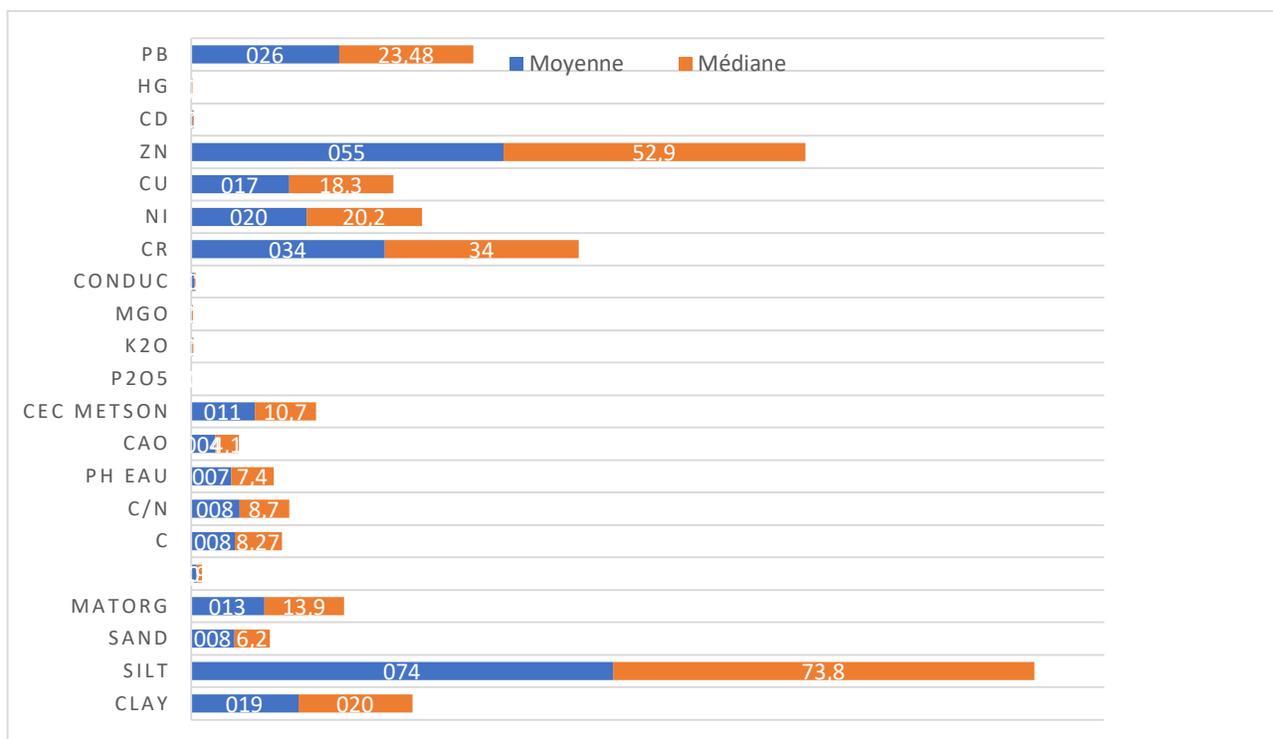


Figure 48. Graphique de comparaison des valeurs entre la médiane et la moyenne des terres de Saclay issues de la BD sols IDF

Tableau 15. Moyenne et médiane des analyses des limons de Saclay
de la BD sols IDF

	CLAY	SILT	SAND	MATORG g/kg	N mg/kg	C mg/kg	C/N mg/kg	pH eau	CaO	CEC
Valeur Moyenne SACLAY BD sols IDF	18,20	73,71	7,51	12,58	0,98	7,99	8,43	7,01	4,09	11,03
Médiane SACLAY BD sols IDF	20,00	73,80	6,10	13,90	0,98	8,27	8,70	7,40	4,10	10,7
Valeur Moyenne BD sols IDF	18,29	63,95	17,76	18,14	1,09	10,10	9,37	7,34	5,90	11,11

Tableau 16. Moyenne et médiane des analyses des limons de Saclay
de la BD sols IDF (mg/kg)

	P205	K2O	MgO	Conductivité	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
Valeur Moyenne SACLAY BD sols IDF	0,07	0,19	0,16	0,43	34,33	20,35	16,89	54,39	0,20	0,11	25,04
Médiane SACLAY BD sols IDF	0,06	0,18	0,16	0,15	34,00	20,20	18,30	52,90	0,18	0,10	23,48
Valeur Moyenne BD sols IDF	31,52	1,05	1,47	0,15	32,60	20,97	21,47	65,57	0,28	0,17	33,77

Je dois d'abord comparer la concentration en éléments traces des limons aux valeurs seuils de la réglementation sur les déchets qui me permet de définir si le matériau est inerte ou réactif ou encore pollué (cf. Annexe 5 / 6 / 7 ; liste des valeurs seuils).

Tableau 17. Comparaison des valeurs en éléments traces de Saclay, BD sols IDF
avec les valeurs seuils (mg/kg)

	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
Valeurs moyennes SACLAY BD sols IDF	34,33	20,35	16,89	54,39	0,20	0,11	25,04
Valeurs seuils	90,00	60,00	40,00	150,00	0,40	0,10	50,00

La valeur moyenne du phosphate est très faible, en effet la base de données du Gis Sol donne un l'intervalle de 71 à 80 mg/kg. Les valeurs des éléments traces sont bien en dessous des valeurs seuils avec des indices allant de 1,5 pour le Cadmium jusqu'à 2,9 pour le Nickel. Pour le Mercure, la valeur dépasse un peu mais je m'appuierai sur la médiane car le jeu de données présente des valeurs extrêmes. Je note que la concentration en éléments traces est 2 à 3 fois inférieure aux seuils de la réglementation, autrement dit les limons de Saclay composant la strate de -0,30 m à -0,80 m sont d'une bonne qualité du point de vue environnemental. Les éléments traces sont en dessous des seuils prescrits (cf. Annexe 5 / 6 / 7 ; liste des valeurs seuils), les valeurs moyennes des éléments traces tirés de la BD sols IDF pour Saclay font ressortir que le fond géochimique est inerte. Son innocuité est alors une force dans mon processus de construction de technosol, pour un matériau répondant aux exigences environnementales et disponible en grande quantité. Une attention particulière devra être accordée aux matériaux anthropiques d'apport qui seront choisis pour la réalisation des mélanges, afin de caler les valeurs en fonction du fond géochimique suivant la réglementation européenne, l'arrêté du 12 décembre 2014 Analyse du fond pédogéochimique, et la norme NF X 31-620-2 (NF X31-620-2 Qualité du sol — Prestations de services relatives aux sites et sols pollués — Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle, 2018).

Dans sa thèse, Behzad NASRI propose l'utilisation du tableau de Miller & Wolf (1975) (cf. tableau 18) sur la CEC pour en déduire le type d'argile des échantillons des sols de son étude (Nasri, 2013).

Tableau 18. Détermination du type d'argile en fonction de la CEC – Miller et Wolf (1975)

Constituant	CEC (meq/100g)
Kaolinite	3-15
Illite	10-40
Montmorillonite	80-150
Vermiculite	100-150
Matière organique	200-400

Reprenant la même démarche, je peux évaluer le type d'argile rencontré dans les limons du plateau de Saclay à partir de la CEC moyenne provenant des 9 analyses agronomiques issues

de la BD sols IDF pour une valeur de 11,30 meq/100 g. La lecture du tableau 18 indique que parmi les différents types d'argiles, le limon de Saclay ne contient que de la kaolinite.

La composition moyenne des 9 limons de Saclay de la BD sols IDF est dans les grandes lignes identique à la valeur type des terres végétales rencontrées dans la région Île-de-France. On retrouve l'argile en proportion quasiment identique avec une moyenne de 18,78 % pour la valeur moyenne des limons de Saclay de la BD sols IDF et une valeur de 18,28 % pour la BD sols IDF générale. La différence provient du pourcentage de sable qui est inférieur pour la sélection Saclay à la valeur type avec un pourcentage de 7,51 % contre 17,75 % de la BD sols IDF, ce qui engendre par le jeu des proportions une valeur supérieure en limon sur la moyenne de Saclay avec 73,76 %, alors que la valeur type est de l'ordre de 63,97 %.

La matière organique de Saclay est nettement inférieure à la BD sols IDF générale avec une valeur de 12,58 g/kg de sol, soit 1,3 %, alors que la moyenne de la BD sols IDF est de 18,14g/kg, soit 1,8% et dans l'intervalle des valeurs admises en agronomie (Calvet et al., 2015). Le taux de MO faible des limons de Saclay s'explique d'une part par l'utilisation agricole intensive des parcelles avant le démarrage des travaux et d'autre part par la profondeur de provenance des échantillons prélevés sur le campus Polytechnique comprise entre 30 cm et 80 cm, donc en dessous du profil de culture.

De façon logique, je trouve des valeurs pour C/N, C et N plus faibles ; les oligo-éléments y sont aussi en dosage faible puisque l'essentiel des minéraux sont soit captés en surface par les cultures, soit lessivés vers la profondeur.

III.2.6 Détermination de la conductivité hydraulique des limons

La conductivité hydraulique à saturation K_s relative à mon projet n'ayant pas été mesurée, ni en laboratoire ni in situ, je m'aiderai des éléments déjà renseignés par les bureaux d'études ayant travaillé sur le site pour en faire une estimation.

Dans son étude sur la ZAC du Moulon, le CEREMA a procédé à une série d'essais de perméabilité dans différents faciès géologiques notamment sur la strate qui m'intéresse, celle des limons des plateaux. Les statistiques descriptives obtenues pour chaque type d'essai de perméabilité sont exposées dans le tableau 19.

Les valeurs n'ont pu être vérifiées car la base de données n'est pas accessible. Je suppose que les calculs effectués sur la base des mesures sont justes et que je peux m'y fier. Les résultats d'essais concernent différentes méthodes d'injection ou d'infiltration : essai Lefranc, essai en piézomètre, et essai Porchet. Si les résultats de chaque essai sont cohérents,

cette approche multi-essais devrait permettre soit de recouper les résultats obtenus soit de les utiliser dans leur complémentarité.

Tableau 19. Synthèse des essais de perméabilité réalisés sur la ZAC du Moulon, Saclay (Berthier et al., 2018)

	Lefranc / Nasberg		Essai piezomètre		Porchet	
K (m/s)	LP	FL/AM	LP	FL/AM	LP	FL/AM
Nb essais	10	69	3	24	8	7
K min	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$
K max	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$
K moy	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$
K med	$4,3 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Ecart type	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$

En première approche, je note que les essais Porchet, essai d'infiltration à saturation dans un trou superficiel, ont donné des valeurs comprises entre Max $1,3 \cdot 10^{-5}$ et Min $2,7 \cdot 10^{-7}$ m/s ; l'intervalle présente donc un rapport $\times 200$ entre le minimum et le maximum. Berthier et al. (2018) expliquent les disparités par la présence de racines et de macropores qui influencent l'écoulement entre la surface et au moins 50 cm de profondeur et donnent une perméabilité accrue.

Rien n'est dit dans l'étude sur le protocole de l'essai Porchet réellement appliqué mais on sait que cet essai est très sensible à l'état de saturation du sol et que la durée de saturation préalable préconisée (24h, voire 4h au pire) n'est presque jamais respectée par l'opérateur. Les essais Lefranc, d'injection à saturation à une profondeur choisie, ont donné une perméabilité comprise entre Min $2,0 \cdot 10^{-9}$ et Max $5,3 \cdot 10^{-8}$ pour une moyenne de $1,4 \cdot 10^{-8}$ et une médiane de $6,8 \cdot 10^{-9}$. Le rapport est de 3,26 et on en déduit que la moyenne est influencée par des valeurs extrêmes. Néanmoins, pour l'essai Lefranc et dans une gamme de perméabilité aussi faible, c'est un ensemble de valeurs cohérent.

En deuxième approche, on note une grande disparité des résultats entre les trois types d'essais effectués. Les auteurs du rapport émettent l'avis suivant pour en expliquer les causes : « les différences pourraient provenir de la proximité de racines ou être liées au protocole expérimental » (Berthier, 2018).

Il serait pratique de transcrire une valeur obtenue par le CEREMA au moyen d'un essai Porchet vers une valeur proche de ce que donnerait un essai Guelph. En effet, ce dernier

apparaît plus pertinent pour mon projet, notamment car il est normalisé et reproductible. Néanmoins, il n'existe pas dans la littérature de corrélation entre les résultats donnés par ces deux protocoles d'essais différents. On a quand même recherché des données pour tester l'existence d'une corrélation : dans l'environnement du projet MMOTIVVÉS, on a trouvé la thèse de Nasri (2013) et le mémoire de Daudin (2019).

Dans sa thèse, Nasri (2013) discutait des différences de résultats suivant le protocole d'infiltration utilisé. Les investigations de terrain mises en place lors des essais Porchet et des essais Guelph montrent des valeurs Porchet qui tendent à donner une K_s quatre à cinq fois plus grande que le test de Guelph. La différence de perméabilité mesurée dans un espace maximal d'un m^2 résulterait du protocole. En effet, les essais Porchet nécessitent la mise en place d'une saturation (au minimum, plusieurs heures) créant un bulbe saturé de volume plus important que les essais de perméabilité réalisée avec le perméamètre de Guelph. Le bulbe plus petit de ce dernier le rend moins influençable par les fissures et macropores rencontrés. Même sans invoquer les macropores, je dois prendre en compte que la porosité d'un sol est constituée par deux types de porosité : texturale et structurale. La porosité texturale est régie par l'arrangement et la dimension des constituants solides élémentaires. La porosité structurale est quant à elle le résultat de l'assemblage des agrégats influencés par des facteurs externes au sol qui, avec les variations de volume le plus souvent liées à l'humidité, retrait, gonflement, dessiccation, le gel, engendrent la fissuration. Il faut aussi ajouter l'activité biologique du sol ainsi que le travail de l'homme. La porosité structurale est donc le principal facteur de circulation de l'eau dans le sol (Chossat, 2005).

Pour vérifier s'il existe une corrélation entre les essais d'infiltration du modèle de Porchet et celui de Guelph, je réalise une régression linéaire simple à partir des données comparatives récupérées dans Nasri (2013) (cf. tableau 20).

Cette analyse est réalisée avec le logiciel R. L'analyse de la régression linéaire de ma droite composée en O_x par les essais de Guelph et en O_y par les essais de Porchet, m'impose un formalisme pour justifier de la validité des paramètres. Je procède donc au test de Pearson pour vérifier la corrélation entre les deux variables qui, pour être validée, doit être d'au moins 95 % et un $b \neq 0$.

Tableau 20. Synthèse des essais de perméabilité par les méthodes de Guelph et Porchet (Nasri, 2013)

Site	Code	Répétabilité spatiale	Conductivité hydraulique (m/s) (Guelph)	Conductivité hydraulique (m/s) (Porchet)
Sementron	1	1	1,96E-06	2,76E-05
Chéry	2	1	7,43E-07	1,31E-05
		2	3,46E-07	1,13E-05
Merry-Sec	4	1	1,19E-07	8,11E-06
		2	1,26E-07	9,89E-06
Egleny	9	1	0,76E-05	2,99E-05
		2	1,70E-05	3,13E-05
Les Ormes	10	1	7,34E-07	1,76E-06
Les Doigts	11	1	3,65E-07	5,58E-07
Moyenne	-	-	2,67E-06	1,48E-05

Avec la commande *summary* de R les résultats obtenus sont :

a = 9,931 e-06

b = 1,548

p = 0,01364 *

Call :

lm(formula = KSP ~ KSG, data = smpks)

Residuals :

Min 1Q Median 3Q Max
-9,938e-06 -4,210e-06 2,504e-07 1,723e-06 1,464e-05

Coefficients :

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	9,931e-06	2,947e-06	3,370	0,00979 **
KSG	1,548e+00	4,917e-01	3,148	0,01364 *

Signif. Codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error : 7,912e-06 on 8 degrees of freedom

Multiple R-squared : 0,5533, Adjusted R-squared : 0,4975

F-statistic : 9,909 on 1 and 8 DF, p-value : 0,01364

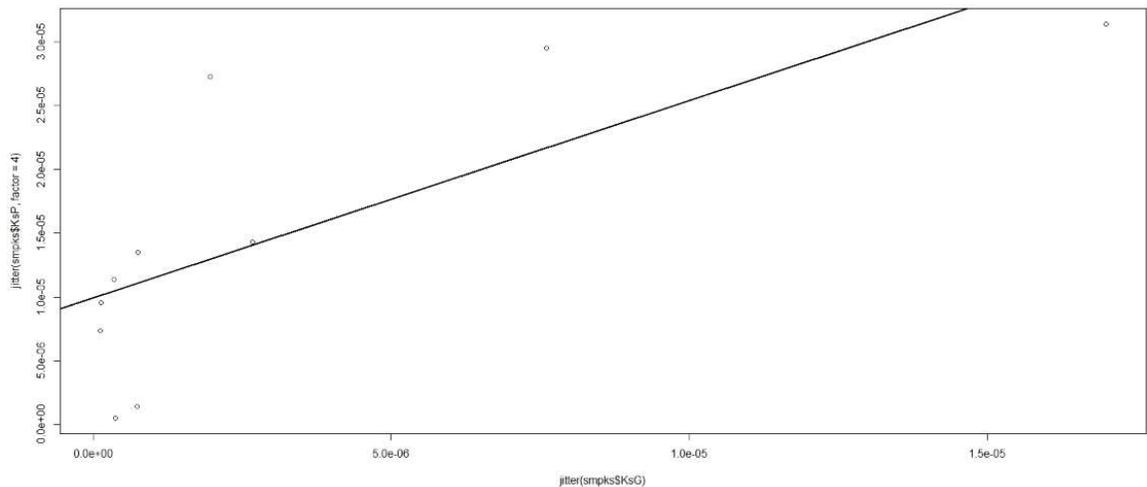


Figure 49. Courbe de régression linéaire appliquée sur les résultats des essais de perméabilité Guelph et Porchet (cf. tableau 20)

L'équation est donc de la forme :

$$y = 9,931 \cdot 10^{-6} + 1,548x \quad \text{Équation 34.}$$

Avec :

en x les valeurs Guelph

en y les valeur Porchet

Toutefois, le coefficient de corrélation entre les deux variables, KsG (en m/s) pour l'essai Guelph et KsP (en m/s) pour l'essai Porchet, réalisé avec le test de Pearson, ne dépasse pas 74 % pour dix couples de comparaison.

Une corrélation faible pourrait trouver sa source, comme dit précédemment, dans la différence de protocole entre ces deux types d'essais qui font contribuer de façon différente les composantes de la porosité. Le résultat aurait été probant si la population concernée avait été importante, or ici avec 10 individus le résultat aurait dû se situer au-dessus de 95% ce qui n'est pas le cas, j'en déduis que la courbe ne suit pas la loi normale.

En deuxième approche, j'ai cherché à établir une corrélation par une régression linéaire multiple entre Ks de Guelph et les variables de texture, Argile, Limon et Sable. Là encore le modèle n'est pas concluant avec des valeurs pour p-value bien au-dessus de la valeur seuil de confiance de 5 %. On en déduit donc qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les

quatre variables. C'est sans surprise et c'est pourquoi Nasri (2013) avait préféré tester des fonctions de pédotransfert de la littérature.

```
Call :
lm(formula = KsGuelph ~ SILT + CLAY + SAND, data = txtKs)
```

```
Residuals :
Min      1Q      Median      3Q      Max
-1,071e-04 -6,664e-05 -4,443e-05  1,498e-05  2,097e-04
```

Coefficients : (1 not defined because of singularities)

Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	3,349e-05	5,753e-04	0,058	0.955
SILT	3,207e-06	9,716e-06	0,330	0.747
CLAY	-1,144e-06	7,646e-06	-0,150	0.884
SAND		NA	NA	NA

```
Residual standard error : 0,0001182 on 12 degrees of freedom
Multiple R-squared : 0,02254, Adjusted R-squared : -0,1404
F-statistic : 0,1384 on 2 and 12 DF, p-value : 0,8721
```

De toute façon, cette approche par recherche de corrélation nécessiterait d'avoir des résultats obtenus par des tests d'infiltration qu'aujourd'hui je n'ai pas. Je reprendrai alors des hypothèses issues des travaux réalisés sur le couplage du triangle des textures avec la perméabilité des sols réalisées à partir d'essais en milieu saturé de type Porchet (avec saturation sur 24 heures) utilisé par Daudin (2019). À partir des données de la BD sols IDF sur les limons du plateau de Saclay, je déterminerai la conductivité à saturation KsP.

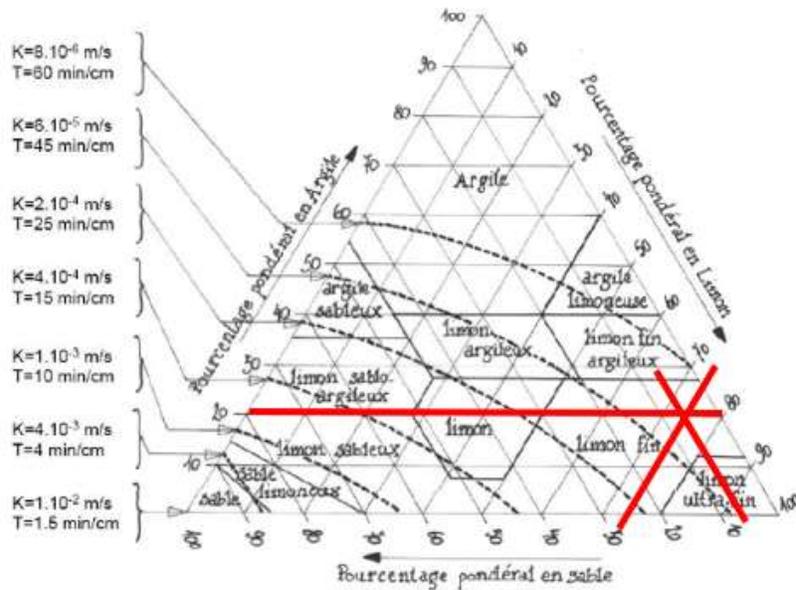


Figure 50. Triangle de corrélation entre texture du sol et perméabilité (Xanthoulis, s. d.)

La valeur obtenue pour ma texture moyenne sur les limons de Saclay est positionnée à égale distance des valeurs de 6.10^{-5} et 8.10^{-6} m/s.

Je retiens la valeur de 8.10^{-6} m/s qui est proche de la valeur moyenne des essais d'infiltration Porchet effectués par le CEREMA.

L'ordre de grandeur de la conductivité hydraulique est donné au tableau 21.

Tableau 21. Tableau des valeurs caractéristiques de conductivité hydraulique usuelles en milieu saturé (Wikhydro, 2014)

k (m/s)	Type de matériaux	Niveau de perméabilité
$1 > k > 10^{-2}$	Graviers sans éléments fins	Très perméable
$10^{-2} > k > 10^{-4}$	Sables grossiers, graviers sableux sans éléments fins	Perméable
$10^{-4} > k > 10^{-6}$	Sables moyens à fins, limons peu argileux, loess	Peu perméables
$10^{-6} > k > 10^{-8}$	Sables argileux, roche altérée à fracturée	Très peu perméables
$k < 10^{-8}$	Argiles homogènes, roche non fracturée	Quasi imperméable

Je remarque que l'approche par corrélation texturale me donne une valeur comprise dans l'intervalle 10^{-5} à 10^{-7} m/s c'est-à-dire dans la tranche des sables très fins, sables limoneux et loess.

Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeurs et ne sont pas suffisantes pour l'application que je souhaite en faire, à savoir la création de technosols jouant un rôle de barrière contre le ruissellement avec comme levier l'infiltration et l'augmentation du temps de concentration de la lame d'eau. Je réaliserai une métrologie plus précise sur nos différents mélanges et constituants pour m'assurer qu'ils répondent aux objectifs ci-dessus.

Je viens de caractériser le constituant de base des technosols que je proposerai dans le chapitre suivant. Je déduis que mon matériau est un limon classique des plateaux du Bassin de Paris et qu'il est représentatif de la matrice moyenne que j'ai identifiée à partir de la BD sols IDF.

Pour ôter tout doute sur les performances hydrauliques des limons, je procéderai à partir de l'année 2021 à une campagne d'essais pour déterminer avec précision la valeur de K_s et nous tenterons d'établir une relation de prédiction fondée sur la texture. Je proposerai et définirai un ensemble d'essais qu'il conviendra de réaliser sur les mélanges, pour sélectionner les mélanges les plus prometteurs.

III.2.7 Un volet du projet en attente de matériaux de marinage en vue des essais sur la plateforme expérimentale

Si les travaux de terrassement des tunneliers du Grand Paris sont en cours de réalisation, ils n'ont cependant pas atteint la formation des Marnes et Caillasses qui m'intéressait pour mon projet. On obtiendra en revanche une livraison d'un camion de Sables de Beauchamp en septembre 2021. À ce stade, on ne peut ici que reprendre les axes de gestion retenus par la SGP (cf. tableau 22) sans pouvoir dire dans quelle mesure cette méthodologie de gestion prévisionnelle s'applique avec succès depuis le démarrage des travaux.

Tableau 22. Tableau de synthèse des matériaux et du potentiel de réutilisation dans le BTP à l'échelle du projet (Société du Grand Paris, 2015)

Formations géologiques	Volume potentiel (m ³ en place)
Alluvions	~ 88 000 m ³
Sables de Beauchamp	~ 240 000 m ³
Marnes et caillasses	~ 80 000 m ³
Calcaire Grossier	~ 37 000 m ³
Fausses Glaises	~ 48 000 m ³
Argile plastique	~ 10 000 m ³
Total :	503 000 m ³

Les déblais excédentaires réutilisables générés par les chantiers du Grand Paris Express doivent donc être stockés ou valorisés, en prenant en considération leurs caractéristiques géotechniques ainsi que leur degré de pollution et leurs spécificités de creusement.

Les possibilités de valorisation retenues sont les suivantes :

- Valorisation via des plateformes de transit-regroupement et/ou tri-recyclage (granulats pour béton) qui reçoivent les déchets ayant des caractéristiques intéressantes pour la réutilisation ou assurent un traitement (tri, criblage, concassage) pour les rendre admissibles à une réutilisation. Les déchets sont destinés à l'élimination, définie par l'ensemble des opérations qui ne peuvent être considérées comme étant de la valorisation qui consiste généralement à incinérer les déchets ou à les stocker. Ils peuvent être stockés jusqu'à un an, ceux qui feront l'objet d'une valorisation, jusqu'à 3 ans.
- Valorisation dans le cadre du projet du Grand Paris Express : selon leurs caractéristiques géotechniques et de pollution, les matériaux excavés pourront

constituer un apport en remblais pour la construction des gares, des zones de transition aérien/souterrain ou des viaducs.

- Valorisation dans le cadre de projets d'aménagement et autres chantiers locaux ; afin de réaliser l'ensemble des bâtiments et travaux publics (ouvrage d'art, voiries, *etc.*) le Grand Paris doit pouvoir s'approvisionner en matériaux de construction. L'identification des ressources exploitables provenant des matériaux de démolition et des déblais excavés issus des chantiers est donc en cours cependant avec seulement 45 % de valorisation des terres excavées, l'objectif de 70 % reste non atteint, pour des raisons techniques, matériaux pollués, ou désintéressement des acteurs du BTP pour certains matériaux.

IV Les technosols, un outil prometteur pour améliorer l'aménagement des espaces publics

Dans ce chapitre, je présente plusieurs catégories de technosols construits dans le cadre des aménagements urbains puis j'expose la méthodologie choisie pour élaborer nos propres technosols.

IV.1 Les différents types de technosols

Dans un premier temps, j'évoquerai des projets réalisés en région Ile-de-France, avec un exemple d'utilisation de mélanges terre/pierres adaptés aux contraintes de voirie, un exemple de technosol allégé mise en place sur une toiture de magasin à Boulogne-Billancourt, et un cas d'aménagement d'une zone partagée où la structure de chaussée drainante réalisée en technosol permet le stockage et l'infiltration de l'eau dans le sol.

IV.1.1 Définition du sol selon l'AFES

« Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et microorganismes) » (AFES, 2017).

La définition de l'AFES donne une vision générale d'un sol. Pour concevoir un technosol, l'appréhension des processus de formation du sol et de l'influence des facteurs qui participent à la pédogenèse sont donc des enjeux importants que je dois approfondir. Je m'inspirerai de la pédogenèse pour l'agencement de nos technosols, en gardant un esprit critique et en me questionnant sur les qualités que doit revêtir un sol pour être propice au développement et au support d'une future végétation. Devrai-je réaliser des strates, est-il plus judicieux de réaliser des mélanges complets en une seule épaisseur, quelles opportunités s'offrent à moi en termes d'utilisation de matériaux : recyclage, MATEX... On tentera d'apporter une solution théorique et technique en s'aidant des études ayant été réalisées jusqu'ici. Cependant, il me faudra assurer des expérimentations in situ pour tenter de valider nos hypothèses. Cette tâche restera à effectuer au-delà du mémoire.

IV.1.2 La réutilisation des terres : approches rencontrées en espaces verts

Le mélange terre-pierres (MTP) constitue généralement le support de plantation des arbres en milieu fortement urbanisé. Il est constitué de granulats et de terre végétale associant des propriétés de porosité, de perméabilité et de fertilité. Raymond GRAS dans son ouvrage « Sol caillouteux et production végétale » confronte les travaux sur la pomme de terre en sol caillouteux de Saini et Mc Learn (1969) à ceux de Magier et Ravio (1984) concernant la production arboricole en sol caillouteux (Gras, 2006). Il en déduit une efficacité proche de 30 % pour la production arboricole et de 12 % pour la pomme de terre. De plus, pour le programme SITERRE, Canavo et al. (2018) soulignent la croissance racinaire importante des sols constitués de MTP avec un pourcentage volumique de cailloux compris entre 65 % et 75 % (Cannavo et al., 2018). Il permet la réalisation de fosses de plantation ayant la particularité d'offrir une portance pouvant accueillir des structures routières. L'agencement des éléments grossiers généralement compris entre 50 et 100 mm, devient jointif sous l'action d'un compactage et procure la stabilité du support. Les vides intergranulaires sont remplis par la terre végétale qui se trouve protégée et devient le siège de l'accroissement racinaire. Le mélange génère une perméabilité importante participant à l'infiltration des eaux de ruissellement.



Figure 51. Mise en place de mélange terre-pierre
Gare routière de Saint-Germain-en-Laye (Photos EONO David 2010)

Les valeurs caractéristiques trouvées dans la documentation spécialisée des entrepreneurs paysagistes (Muller et al., 2012) sont les suivantes :

- Classe de portance exprimée par un module d'élasticité EV2 entre 35 et 65 MPA (essai à la plaque) ;
- Perméabilité comprise entre 10^{-5} et 10^{-4} m/s ;
- Indice des vides pouvant atteindre 0,45 ;

Substrat de plantation

Le substrat de plantation sera fonction du type de végétation et de la profondeur racinaire nécessaire à son bon développement ; les profondeurs des horizons seront réparties comme suit (Muller et al., 2012) :

- **Strate herbacée** : un horizon de 20 à 30 cm composé d'un seul matériau ayant les qualités d'un sol support de culture ;
- **Strate de vivaces, et plantes à petit développement** : horizon de 20 à 30 cm avec une qualité de terre support ;



Figure 52. Mélange allégé (compost et laine de roche) en toiture du monoprix de Boulogne-Billancourt (Photos EONO David 2010)

- **Strate arbustive** : elle sera composée de deux horizons de 20 à 30 cm pour une épaisseur totale de 40 à 60 cm, l'horizon de surface aura des qualités de terre dite « végétale » et l'horizon sous-jacent pourra être composé d'une terre support simple.
- **Strate arborée** : sera constituée de 3 horizons pour une épaisseur allant de 80 à 120 cm ; l'horizon de surface sera constitué d'une terre dite « végétale » de 20 à 30 cm ou horizon A, d'un horizon intermédiaire pouvant être aussi l'horizon profond ayant une qualité type terre de support pour une épaisseur de 40 à 100 cm ou horizon B, et d'un horizon de profondeur constitué de matériaux terreux de 0 à 60 cm à mi-chemin entre A et B.

Pour faciliter la compréhension des différents termes d'une coupe pédologique, je m'appuie sur le schéma proposé par Baize et al. (2018) figure 53 qui associe les termes communs utilisés en génie civil aux termes pédologiques.

- **Substrat de parking, pistes cyclables et voies circulables** : le substrat utilisé doit être insensible à l'eau et constitué de 10 % d'argile et de limon au maximum, les constituants correspondent au mélange terre-pierre et communément appelé micro-terre pierre du fait de sa

- Granulométrie de 0 à 16 mm.

Il est confectionné généralement avec des matériaux de type sable volcanique ou silico-calcaire de 0/4 à 8/16 mm alluvionnaire, gisement de carrières, du gravier ou de la brique concassée, du limon et argile dans les proportions vues ci-dessus ainsi que du compost.

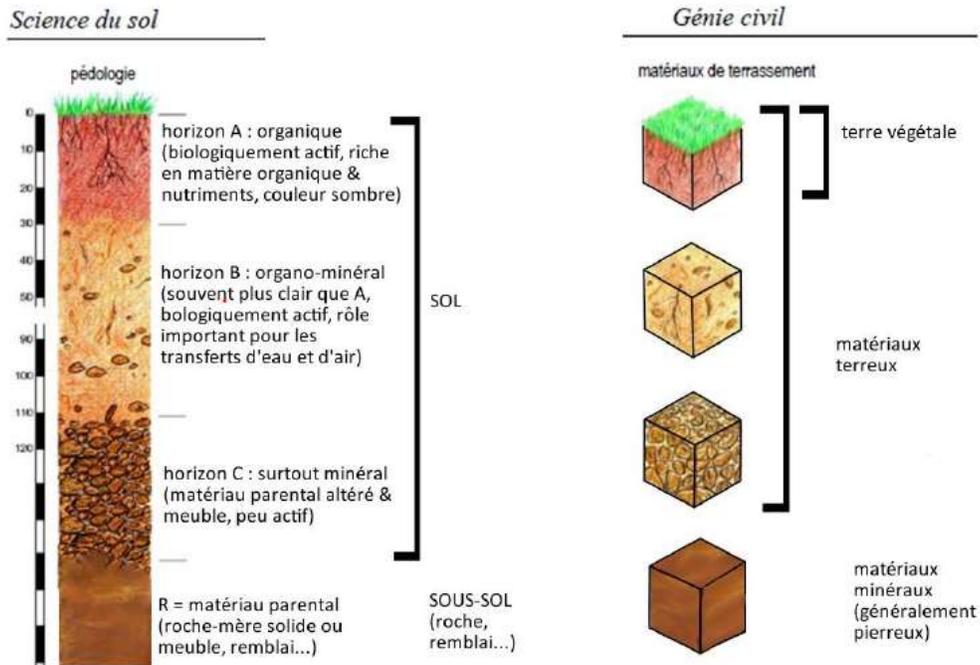


Figure 53. Schéma entre les terme de pédologie et de génie civil (Baize et al., 2018)



Figure 54. Réalisation d'une chaussée perméable en pavés de béton posés sur une structure en grave drainante et mélange micro-terre pierre (rue du Château-du-Loir, à Courbevoie (Photos EONO David, 2009)

Les valeurs caractéristiques trouvées dans (Muller et al., 2012) sont :

- Classe de portance exprimée par un module d'élasticité EV2 entre 40 et 80 MPA (essai à la plaque) ;
- Perméabilité généralement de 10^{-6} m/s ;

IV.2 Données, méthodes et contraintes de création d'un technosol

J'ai énuméré ci-dessus les différents usages des technosols en milieu urbain ; ces unités représentent la grande majorité des utilisations pour des volumes allant de 575 000 m³ en Île-de-France jusqu'à 3 100 000 m³ sur l'ensemble du territoire français (Damas & Coulon, 2016). L'objectif de nos technosols sera la réduction du ruissellement et l'augmentation du temps de concentration.

Il existe deux grands mouvements au sein des technosols :

- Le premier est le **sol reconstitué** à partir de la « terre-ressource » (volume estimé en France 3 100 000 m³) constituée d'un mélange de terres qui sont issues d'horizons superficiels ou profonds avec, le plus souvent, de la matière organique pour une teneur comprise entre 3 et 15 %. Elles peuvent être associées à des matériaux de carrière, sable, cailloux, pouzzolane, pour donner des caractéristiques particulières, notamment l'association de pouzzolane pour réaliser des MTP. Ces technosols sont utilisés en génie paysager pour des structures de plantation avec un ou plusieurs horizons reconstitués.
- Le deuxième est le **sol construit** avec de la « terre de construction de sol » qui se veut moins consommatrice des ressources naturelles ; dans cette catégorie figure notamment la « terre végétale », support de cultures pour l'agriculture. Il serait une alternative multifonction pour palier à la raréfaction de la terre de support (provenant de la commercialisation des décapages liés à la construction) en milieu fortement urbanisé et répondrait à la loi Grenelle imposant un recyclage de 45 % de tous matériaux dont les matières organiques.

Dans le cadre de mon étude de conception de technosols, je vais me concentrer sur la création de technosols liés aux aménagements paysagers à travers les MTP et les sols supports pour le gazon et vivaces, arbustes et arbres. J'étudierai différents mélanges comprenant **des sols reconstitués** et **des sols construits**.

Je ferai une comparaison entre des types de technosols sur la base des critères physiques et chimiques que j'ai établis dans le chapitre V. Afin d'assurer la meilleure lisibilité possible, j'ai privilégié le travail avec des matériaux déchets inertes et du compostage.

Je vais définir un profil pédologique calqué sur les modèles du référentiel pédologique WRB traitant des technosols, tout en faisant une analogie avec les profils pédologiques naturels qui sont le siège d'un écosystème stable ou Climax. Je déterminerai ainsi le nombre d'horizons composant le profil. J'étudierai parallèlement le couplage avec la végétation afin

d'entraver le ruissellement. Il conviendra d'inclure une réflexion sur les composantes agronomiques essentielles permettant l'enracinement et la croissance des végétaux. Les propositions de création de sol doivent se conformer à la réglementation environnementale vue précédemment.

Il me faut auparavant tenter de définir la « matrice type » qui est le plus souvent utilisée en région Parisienne, essentiellement en culture paysagère. Dans le cadre de mon approche, je dois alors caractériser la terre type rencontrée en Ile-de-France. Je définirai le type de matrice primaire faisant office de matériau parent de base pour la création des mélanges. Comme principale source de données, j'ai accès aux analyses de sols issus de sites d'extraction (décapage et terrassement) de 2006 à 2019 d'un acteur majeur de la distribution de mélange terreux de la région Parisienne. Avec un volume de vente annuel de mélange approchant les 250 000 m³ l'entreprise RICHARD fournit à elle seule 43 % du volume annuel (environ 575 000 m³) destiné aux aménagements paysagers d'Île-de-France. La base de données issue de ces analyses de sols, BD sols IDF, sera considérée comme un échantillonnage représentatif de la terre échangée en Île-de-France. La BD constituée a été comparée à celle du GIS-Sol avec pour en vérifier la pertinence qui permettraient d'éclairer nos futurs résultats. Pour ma caractérisation du limon, je me suis aidé d'outils statistiques comme les matrices de corrélation et l'analyse en composantes principales, pour faire ressortir finalement que toutes les corrélations trouvées étaient logiques dans un cadre explicatif classique de pédologie. Les corrélations ont montré la robustesse de la BD. Elle est exploitable car les relations internes sont logiques. Elle a donc une valeur représentative à l'échelle régionale.

Je classerai le support de culture à l'aide du triangle de texture de USDA. Puis, j'aborderai la physico-chimie moyenne des sols d'Ile-de-France et la qualité du fond pédo-géochimique. Je vérifierai la compatibilité des formulations de technosols que j'envisage avec les normes environnementales actuelles.

Je me servirai de ma matrice des limons de Saclay comme une base à laquelle j'ajouterai plusieurs matériaux. L'objectif est de prévoir les propriétés physiques et chimiques des combinaisons proposées. Le choix de matériaux entrant dans le processus de construction des technosols doit prendre en compte un nombre important de critères. Je compte travailler à partir des recherches réalisées par l'ADEME dans le cadre du projet SITERRE (de 2011 à 2015) auxquelles j'ajouterai un ou deux matériaux susceptibles d'entrer dans la formulation.

L'approche mise en place par l'ADEME pour sélectionner les matériaux a consisté dans un premier temps à éprouver la liste du Catalogue des déchets de l'UE (836 déchets) face à 17 critères éliminatoires notamment sur leur dangerosité, l'impact environnemental et sanitaire, ce qui aboutit à une 1^{ère} liste de 142 matériaux. Dans un deuxième temps, la liste a été soumise à notation en fonction de différents critères : propriétés du matériau, la nature et le caractère pathogène de chaque élément, fertilité, portance... Cette deuxième sélection réduit la liste à 27 matériaux dont 13 matériaux minéraux et 14 matériaux organiques. De ces 27 matériaux, seulement 10, considérés comme des modèles représentatifs des 27, ont été retenus par l'ADEME pour leur potentiel au niveau national.

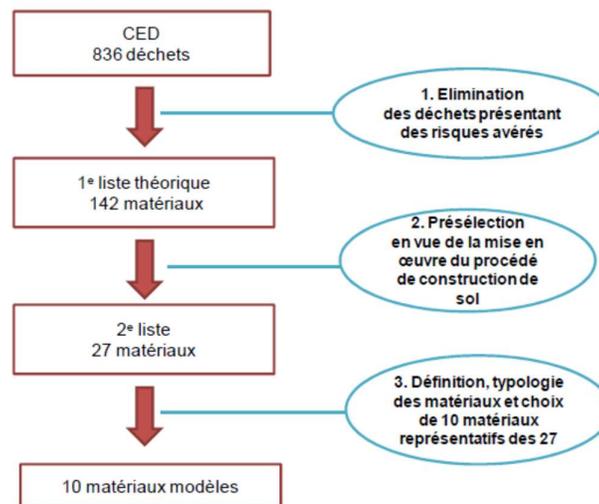


Figure 55. Schéma de synthèse de sélection des matériaux (Rokia, 2014)

À partir de cette liste finale je peux faire ma propre notation en fonction de ce que doit être un technosol pour mon application, à savoir un sol exerçant des fonctions écosystémiques identifiées. Rappelons le service rendu qui est attendu de mon technosol, à savoir une augmentation du temps de concentration d'une surface contributive (on considère la concentration d'un ensemble de gouttes d'eau tombées sur un sous-bassin versant), par l'infiltration et si possible un écoulement en subsurface dans le technosol. Au-delà de la régulation du ruissellement et d'un support de végétation, ce technosol pourra aussi viser la réduction de l'érosion et la régulation de la qualité de l'air et du climat local, et être un support de la faune. Je propose le tableau ci-dessous pour noter les matériaux en m'inspirant des travaux de Rokia (2014).

Tableau 23. Tableau de perception des matériaux suivant la liste ADEME SITERRE (notation David EONO)

Matériaux	Notation
Briques	3
Ballast de chemin de fer	3
Déchets de construction en mélange	1
Terres de déblais acides	3
Terres de déblais alcalines	3
Déchets verts broyés	2
Déchets de balayages des rues	1
Boues papetières	2
Boues de station d'épuration STEP	1
Compost de déchets verts et boues de STEP	3

Notation : 3 = bon ; 2 = Moyen ; 1 = faible
(Cf. Annexe 21 : tableau des matériaux)

J'utiliserai uniquement les matériaux ayant une note de 3 et pour compléter cette liste, j'ajouterais les scories de houille qui semblent être un bon matériau de substitution de la pouzzolane communément utilisée pour la confection de mélanges de type MTP. Enfin j'accorde une grande attention aux matériaux excavés issus de travaux du Grand Paris Express au tunnelier qui représentent un défi majeur pour les pouvoirs publics. On espère fournir une solution pour l'utilisation d'une partie de ces volumes, notamment des formations Sables de Beauchamp ou Marnes et Caillasses connues dans le Bassin de Paris.

IV.3 Détermination des horizons de technosols

Dans la section IV.3 qui porte sur la conception des horizons d'un technosol, j'étudierai plusieurs exemples de projets montrant différentes approches de conception des technosols. J'aborderai d'abord l'exemple de l'aménagement de la cité internationale de Lyon à laquelle j'ai participé en tant que directeur de travaux, pour lequel la Ville de Lyon a souhaité mener une étude sur plusieurs années afin de recueillir des données sur l'évolution des technosols mis en place et d'évaluer l'opportunité du travail en profil pédologique. Dans cet exemple, les profils sont adaptés aux plantations, alors que mon projet fait intervenir d'autres paramètres ayant pour objectif la réduction du ruissellement.

La littérature sur les technosols décrit différentes techniques de construction de sols en fonction des matériaux parentaux et fait ressortir des similitudes concernant leur mise en place. L'approche pédologique fait l'unanimité. On la trouve par exemple dans la démarche

initiée par la Ville de Lyon entre 1994 et 2000 pour répondre aux attentes de la maîtrise d'ouvrage publique sur la reprise des arbres de grande taille après plantation dans des profils de sols reconstitués. La ville a ainsi fait un bilan des plantations de gros sujets qui met en exergue une mortalité pouvant dépasser 50%. Profitant des grands travaux de la cité internationale réalisée entre 2006 et 2008, elle a mis en place un projet de suivi pluridisciplinaire associant les collectivités qui participaient au financement (Ville de Lyon, Villeurbanne, la SEM de la Cité Internationale, l'enseignement supérieur et la recherche (INHP et INRA) et les pépiniéristes ayant fourni les végétaux. Ce programme intitulé SCIENCIL – Observatoire de l'arbre urbain, dans sa partie gestion des sols, a eu pour approche l'adéquation des matériaux et des profils avec le développement de la végétation supportée. Le travail s'est articulé autour d'un modèle de sol fertile comprenant :

- Une épaisseur de 5 cm de mulch organique ou de paillage minéral (pouzzolane 7/15),
- Un profil de 20 à 30 cm de terre végétale mélangée avec du compost,
- Un profil de 50 à 70 cm constitué d'un mélange terre-pierre drainant.

On constate que les projets sont conçus en prenant en compte l'aspect pédologique du sol qui est généralement constitué par plusieurs horizons. On retrouve une typologie variable, de 2 à 3 horizons voire 4, ce qui est un mimétisme des sols naturels :

- Horizon H1 dit fertile ou de croissance,
- Horizon H2 de développement,
- Horizon H3 technique, de drainage ou horizon de confinement,
- Horizon H4 horizon drainant ou autre.



Figure 56. Fosse pédologique creusée par Sol Paysage dans le cadre de la synthèse thématique des Sols de la CIL pour des fosses de plantation (Sol Paysage, 2013)

Ces sols ont été classés en **anthroposols reconstitués** suivant le référentiel pédologique 2008 (Sol Paysage, 2013b).

L'approche pédologique, on la retrouve aussi dans la synthèse thématique « Sols de la Cité internationale de Lyon » éditée en 2013 par Plante et Cité (figure 56) sur la Cité internationale de Lyon (CIL). Concernant l'exemple de la zone amont de la CIL (figure 57), les sols reconstitués présentent deux types de profils (figures 58 et 59).

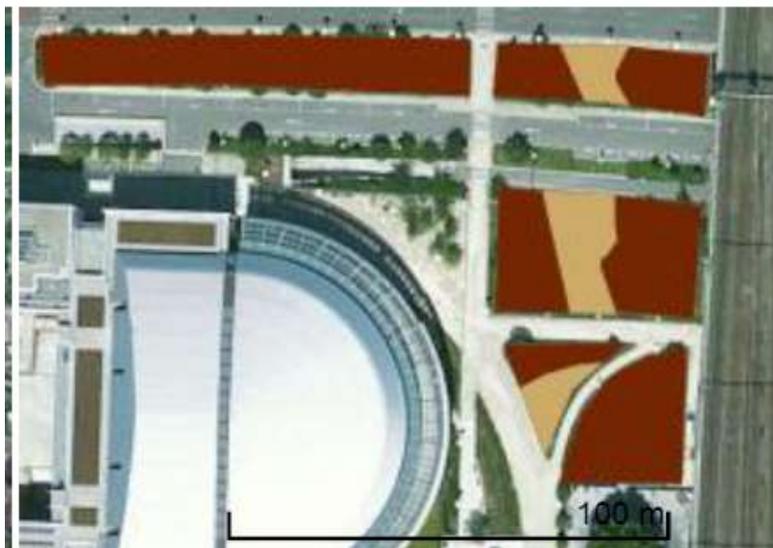


Figure 57. Plan de la Cité internationale de Lyon, zone amont (Sol Paysage 2013)

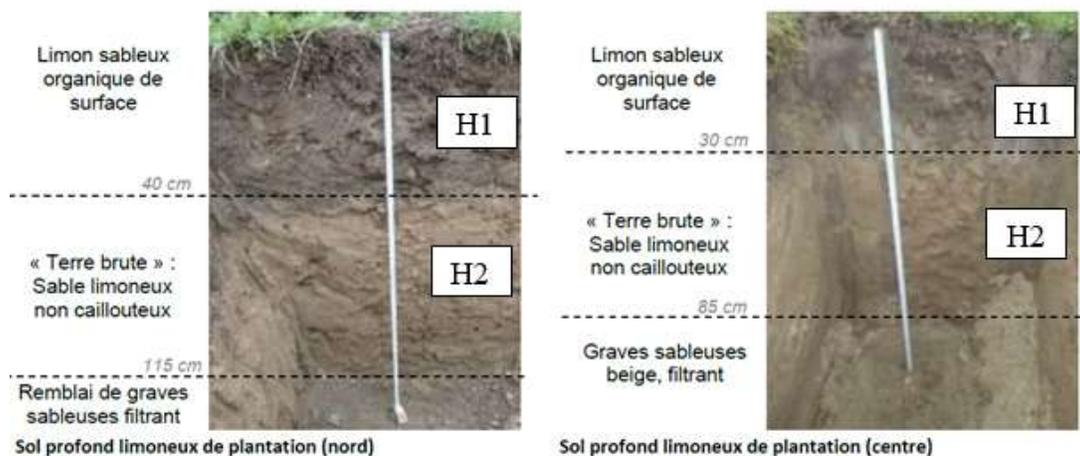


Figure 58. Fosse pédologique creusée par Sol Paysage dans le cadre de la synthèse thématique des Sols de la CIL pour les horizons profonds (Sol Paysage, 2013)

La formation pédologique reconstituée lors des travaux d'aménagement de la CIL en 2007 a fait l'objet d'une étude approfondie par le bureau d'étude Sol Paysage en 2013 afin de comprendre l'évolution de la pédogénèse d'un sol reconstitué. Le profil pédologique présenté en figure 58 a été réalisé sur un sol reconstitué dit « horizon profond » ; celui-ci présente, après 5 ans d'installation, une pédogénèse similaire aux sols naturels. La coupe fait apparaître les horizons suivants : un horizon H1 qui a été constitué d'un mélange terreux à partir de limon, de sable et de matière organique sur une épaisseur variable de 30 à 40 cm ; un horizon H2 constitué d'un mélange limon (issu d'un décapage de ZAC de la banlieue lyonnaise) et sable (sable alluvionnaire de Loire) sur une épaisseur variable de 55 à 70 cm. L'épaisseur du H2 est variable en fonction du type de végétaux qui ont été plantés (Sol Paysage, 2013b).

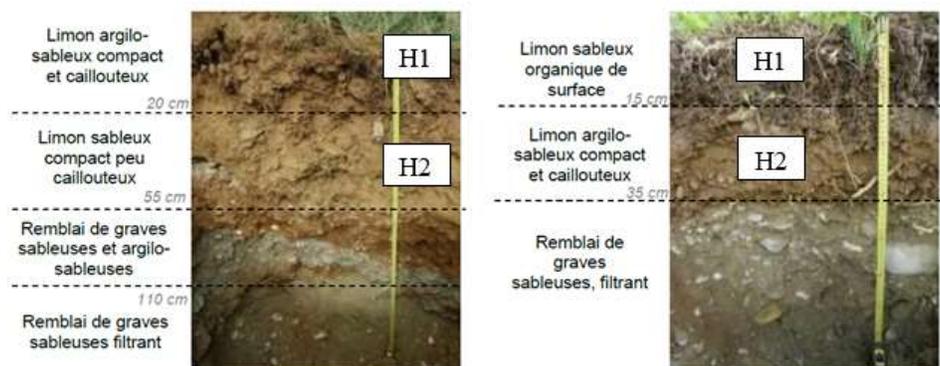


Figure 59. Fosse pédologique creusée par Sol Paysage dans le cadre de la synthèse thématique des Sols de la CIL pour les horizons de surface (Sol Paysage 2013)

La figure 59 montre deux profils différents ; à gauche un profil pensé pour accueillir une végétation arbustive constituée d'un horizon H1 de 20 cm dit horizon de croissance. Celui-ci est composé de limon sableux organique avec cailloux permettant la croissance racinaire de plantations vers l'horizon de développement H2 qui a pour fonction l'ancrage racinaire durable de la végétation. Le profil de droite qui est moins profond que celui de gauche est une variante pour la végétation basse (vivaces, annuelles et gazon) dont le système racinaire colonise une frange de sol d'environ 40cm. On constate une anomalie de profil entre celui de gauche et celui de droite notamment à gauche pour l'horizon H1 et H2 pour l'horizon de droite. Le protocole mis en place dans le cadre des plantations de la CIL définit, comme horizon de croissance, un horizon constitué d'un mélange terre / sable / matière organique. L'horizon de croissance est quant à lui constitué de terre / sable / matière organique et

cailloux. On constate que l'agencement du profil de droite respecte la définition des deux profils et que le profil de gauche est victime d'une inversion de profil puisque H2 aurait dû être à la place de H1 ; il ne fait aucun doute qu'il s'agit là d'une erreur de mise en œuvre. Pour illustrer les différences techniques entre technosols, sans pour autant s'inspirer des sols contaminés issus d'activités industrielles, minières ou militaires, on peut citer le cas de la friche industrielle de l'ancienne cokerie localisée sur la commune d'Homécourt au nord-ouest de Metz (54) sur une parcelle de 1,1 hectares. Les technosols présentés ont été étudiés pour la valorisation de produits organiques couplé avec des terres traitées thermiquement dans le cadre du programme GESSOL financé par l'ADEME (Cortet, 2013).

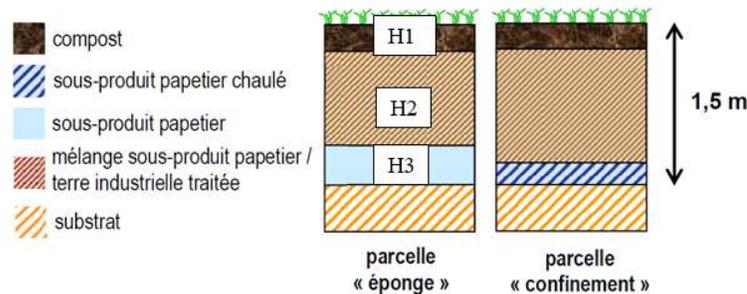


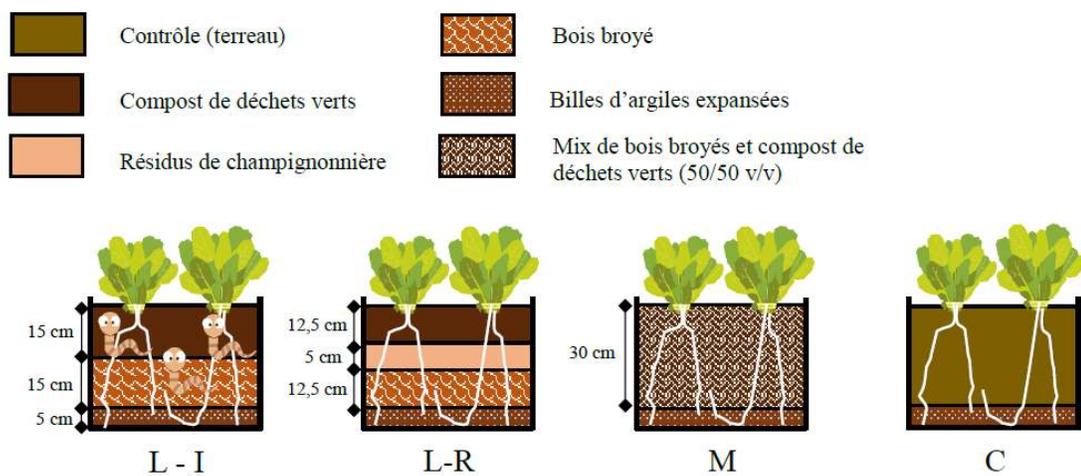
Figure 60. Horizons envisagés dans (Cortet, 2013)

Le projet s'est focalisé sur la création de 2 technosols issus de sous-produits de papeterie : La création d'un technosol dit « éponge végétale », profil de sol construit avec une réserve en eau pour les végétaux :

- Horizon H1 horizon de croissance de 0,10 m : constitué de compost ;
- Horizon H2 horizon de développement de 1,0 m : mélange de sous-produit papetier / terre industrielle traitée ;
- Horizon H3 horizon hydrique de 0,40 m : constitué de sous-produit papetier pur.

La réflexion sur la constitution des technosols proposés dans ce projet met en avant des produits issus de déchets et sous-produits industriels tels que les terres thermiquement désorbées et les papetiers ou boues de papèteries. L'agencement dit de « confinement » est un profil de sol dans lequel les sous-produits de papeterie ont subi un traitement à la chaux avant d'être compactés. L'étanchéité est donc assurée par l'ajout de chaux combiné au compactage mécanique réalisé par un rouleau vibrant, avant le mise en place des autres horizons. L'objectif étant de créer un confinement pour limiter le transfert de polluants vers l'aquifère. L'objectif est de permettre une rétention d'eau en milieu sableux et lorsque le sol est sur substratum karstique (Cortet, 2013).

Dans sa thèse, Baptiste GRARD (2017) a travaillé sur les mélanges allégés de toiture à partir de produits résiduaux urbains (figure 61) pour la création de sols techniques à vocation de production d'agriculture urbaine. L'apport des technosols en toiture influe aussi sur : l'isolation thermique et phonique du bâti, la diminution des ilots de chaleur urbain, support de biodiversité, la production de biomasse, la rétention des eaux pluviales. Cependant, il a pointé un dysfonctionnement sur la séquestration du CO₂, une perte liée probablement au ruissellement des eaux pluviales entraînant une désagrégation du complexe argilo-humique, libérant ainsi le carbone organique (Grard, 2017).



Le choix des indicateurs est fait suivant l'utilisation souhaitée des horizons. Le programme ADEME- SITERRE privilégie pour les horizons H1 et H2, une fertilité et une réserve utile en eau élevée favorisant la croissance des végétaux. L'horizon H3 technique permet de remplir différentes fonctions dont la perméabilité qui peut être couplée avec une résistance mécanique élevée.

Les travaux réalisés dans le cadre de l'étude « sols fertiles reconstitués : état initial des placettes expérimentales » initié par le Conseil Départemental de Seine-Saint-Denis, l'IRD (UMR IEES-Paris) et la société ECT reposent uniquement sur des profils techniques, où chaque profil est un horizon unique, afin d'étudier la colonisation par la faune (vers de terre) et son rôle (Deeb, 2015).

Je propose donc un profil type de « sol polycyclique de climat tempéré » composé de 3 horizons. Le système sera influencé dans ses premières années par la nature des matériaux le composant. Je choisis les matériaux qui favoriseront la mise en place rapide d'une pédogénèse permettant une stabilisation de l'humus, tout en créant les conditions physico-chimiques pour que le sol soit un support de culture. Il permettra ainsi l'implantation et le développement de micro-organismes, de bactéries et d'organismes. Les matériaux devront aussi répondre à la problématique hydrique des sols, du point de vue du ruissellement ainsi que de la recharge des nappes phréatiques et de la réserve utile pour la plante (Duchaufour et al., 2018).

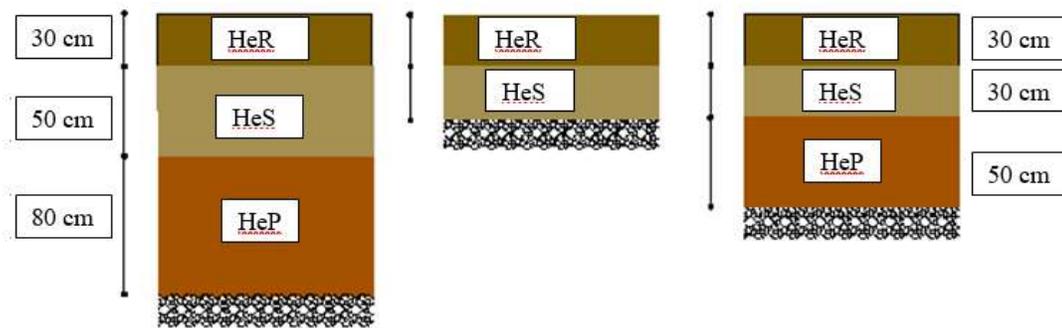


Figure 62. Horizons proposés dans le cadre de mon projet

Je présente ci-dessous ma nomenclature, spécifique pour mes horizons d'écoulement :

- Horizon d'écoulement de surface (ruissellement) : HeR
- Horizon d'écoulement de subsurface : HeS
- Horizon d'écoulement profond pour l'infiltration vers la nappe : HeP

Les profils proposés correspondent à l'état du travail à cet instant. Ils seront probablement complétés par d'autres types de profils en fonction de l'avancée de mes recherches.

V Les résultats

V.1 Nombre de composantes d'un mélange par horizon

Dans cette partie, je propose différents assemblages. Il s'agit avant tout de mettre en place un protocole de validation des mélanges dans le cadre de la campagne d'études et d'essais afin d'optimiser la démarche. Je souhaite réaliser des comparaisons entre différents types de technosols et avoir une approche technique permettant l'adhésion du plus grand nombre à leur utilisation, c'est-à-dire aux acteurs de la filière Paysage qui perçoivent de plus en plus la raréfaction des matériaux à travers l'augmentation des coûts des matériaux.

Si l'on se réfère à la littérature, on remarque que les mélanges constituant les technosols comprennent généralement 2 ou 3 matériaux. Ainsi, Séré (2007) a proposé des formulations reposant sur 2 matériaux en mélange et Grard (2017) a créé des mélanges de 2 matériaux parents pour l'horizon dit squelette H2 et l'horizon nutritif H1. Quant à elle, Rokia (2014) a adopté une démarche systématique partant d'un maximum de 3 matériaux en mélange ; elle a listé les combinaisons possibles pour 2 ou 3 matériaux et a sélectionné 25 combinaisons en tout. Je cite également les travaux réalisés dans le cadre du Projet Science CIL initié par le Grand Lyon au milieu des années 90 dans lequel les mélanges de sols ont été réalisés avec un maximum de trois matériaux, notamment pour la réalisation de MTP.

On retrouve aussi des mélanges composés de 2 à 3 composantes pour les associations de MTP dans le Projet IEES Paris « Impact de la nature des technosols sur la morphologie racinaire des plantes ».

Enfin, un travail de restauration environnementale des carrières de calcaire a mis en avant les matériaux parentaux issus du site calcaire (Buondonno et al., 2018) : l'auteure propose deux assemblages d'horizons en fonction de l'utilisation : un assemblage de deux horizons sur une épaisseur de 70 cm et un assemblage de quatre horizons sur une épaisseur de 120 cm.

V.2 Composition des horizons

L'assemblage des matériaux pour obtenir un mélange homogène se limite généralement à 3 matériaux car au-delà, le coût engendré pour obtenir le mélange deviendrait vite prohibitif. Aussi je me cantonnerai à proposer 3 matériaux au maximum en mélange. Ce choix permettra de faire des comparaisons. Cependant, nos mélanges doivent contenir comme base le limon de Saclay qui est le limon fin illustré par le triangle de texture de la figure 43.

Les matériaux entrant dans la composition des mélanges peuvent vite amener à un nombre de combinaisons important, au risque de multiplier le nombre d'essais à effectuer sur les mélanges. Il est donc nécessaire de définir les caractéristiques physiques et chimiques de chacun des matériaux pour identifier quelles caractéristiques seront utilisables comme des indicateurs d'une tendance au regard des services attendus du futur technosol. Comment définir les matériaux nécessaires à la réalisation de mes technosols ? Je dois sélectionner les matériaux dont les paramètres physiques permettent de répondre à ma problématique de réduction du ruissellement.

V.2.1 Attribution des matériaux parents en fonction des horizons

L'attribution de matériaux en fonction des horizons est réalisée à partir de l'identification des opportunités qu'offrent les matériaux à l'égard des services demandés par mon projet. Je pars des services attendus de nos technosols identifiés au chapitre II au deuxième paragraphe de l'introduction. Ils constitueront les critères d'opportunité de décision intervenant dans le choix des matériaux.

- Support de la végétation
- Gestion des flux hydrauliques,
- Rétention, stockage pour les végétaux,
- Filtration des polluants et protection de la nappe,
- Stockage de carbone

Tableau 24. Tableau de positionnement des matériaux parents au sein des horizons

Matériaux	Utilisation
BR : Briques concassées	HeR / HeS
BAL : Ballast de chemin de fer	HeS / HeP
Li : Limons	HeR / HeS / HeP
DVB : Déchets verts broyés	HeR
SH : Scorie de houille	HeR/ HeS
MC : Marnes et Caillasses	HeR / HeS / HeP
CO : Compost de déchets verts	HeR / HeS / HeP
Horizon d'écoulement de surface : HeR	cf. figure 62.
Horizon d'écoulement de sub-surface : HeS	
Horizon d'écoulement profond : HeP	

Je propose de créer, à partir des matériaux parents présentés au tableau 24, plusieurs types de mélanges qui constitueront les horizons des profils choisis ; soit 5 mélanges binaires et 6

mélanges ternaires. Parallèlement, il m'apparaît important de pouvoir comparer les mélanges que nous proposons aux mélanges vulgarisés dans le secteur de l'aménagement paysager ; je mettrai alors en place des planches témoins à partir des mélanges identifiés au tableau 26. Les résultats obtenus seront comparés aux résultats de nos technosols, faisant ressortir leurs qualités ou leurs défauts. Nous pourrons ensuite réaliser des ajustements sur nos technosols si nécessaire. L'analyse comparative est aussi une formidable opportunité de prouver aux professionnels l'intérêt de ces technosols pour en développer la commercialisation. Les planches témoins seront constituées de 3 mélanges binaires et 2 mélanges ternaires. Pour des questions pratiques de surface et d'économie, je choisis de partir de l'inventaire de matériaux fourni par Rokia (2014). De plus, souhaitant obtenir des mélanges pouvant se stabiliser rapidement, je ne prendrai pas en compte comme constituant des déchets verts broyés DVB. Les travaux de Nagase & Dunnett (2011) concernant la croissance des végétaux en fonction du pourcentage de matière organique introduite dans des technosols de toitures, ont mis en évidence qu'un optimum est atteint avec un pourcentage de 10 % de matière organique et qu'une teneur de 25 % de MO favorise la production de biomasse végétale en quantité importante. Toutefois, elle nécessite un apport substantiel d'eau par arrosage entraînant un affaiblissement du végétal face à la sécheresse. Pour ces raisons, je me fixe un intervalle d'apport de MO compris entre 10 et 20 % pour chaque horizon. Par ailleurs, je choisis d'introduire des mélanges terre-pierre dans nos formulations car cela permet à la fois d'augmenter la résistance du sol face aux contraintes mécaniques et de répondre à la problématique de l'exploration racinaire pour favoriser la production arboricole. Je fixe donc le pourcentage volumique de cailloux à 60%. J'obtiendrai finalement les mélanges présentés par les tableaux 25 et 26 :

Tableau 25. Mélanges préconisés pour le projet

	<i>L'association des mélanges binaires</i>	<i>L'association des mélanges ternaires</i>
HeR	Li/BR, Li/SH, Li/MC, Li/CO BR/Li, SH/Li, MC/Li	Li/MC/BR, Li/MC/SH, Li/CO/BR, Li/CO/SH
HeS	Li/BR, Li/SH, Li/MC, Li /CO BR/Li, SH/Li, MC/Li	Li/MC/BR, Li/MC/SH, Li/CO/BR, Li/CO/SH
HeP	Li /BAL, BAL/Li,	Li//MC/ BAL, Li/CO/ BAL

BR : brique, BAL : Ballast de voie ferrée, Li : Limons, SH : Scorie de Houille, MC : Marnes et Caillasses, CO : Compost de déchets verts

Tableau 26. Mélanges témoins utilisés en aménagement paysager

	<i>L'association des mélanges binaires</i>	<i>L'association des mélanges ternaires</i>
HeR	TV/CO	TV/CO/MPZ
HeS	TV/CO, TV/MPZ	TV/CO/MPZ
HeP	TV/PZ	TV/CO/PZ

TV : terre végétale, CO : Compost de déchets verts, PZ : Pouzzolane 60/80, MPZ : Pouzzolane 7/15

Finalement je prends en compte (tableau 25) un nombre total de 16 mélanges binaires et 10 mélanges ternaires.

V.2.2 Mélanges binaires, mélanges ternaires

Les mélanges binaires seront réalisés, pour chaque combinaison (/) A / B, suivant les formulations (proportions) ci-dessous :

Matériau A / Matériau B ou Matériau B / Matériau A

Assemblage Type A/B : 10A/90B, 20A/80B, 30A/70B, 40A/60B,

Assemblage Type B/A : 10B/90A, 20B/80A, 30B/70A, 40B/60A

Je proscriis l'assemblage de type B/A sur les matériaux organiques de type CO.

Les mélanges binaires sont constitués de 10 formulations pour les Horizons HeR et HeS, et 4 formulations pour les Horizons HeP. Nous retrouvons donc 4 formulations pour le tableau 26 et 14 formules de mélanges binaires pour le tableau 28 et, soit 18 formules binaires.

Pour les mélanges ternaires je choisis volontairement de bloquer les matériaux grossiers à un maximum de 60 % du volume, conformément aux prescriptions des règles professionnelles de l'Union Nationale des Entreprises du Paysage UNEP qui rappellent que la première fonction d'un mélange terre-pierres est de permettre : « une bonne stabilité mécanique du sol ». Le matériau terreux vient se loger dans la porosité intergranulaire qui représente généralement 40% du volume (Muller et al., 2012). Le projet comporte les formulations ci-dessous :

Matériau A / Matériau B / Matériau C (brique, scories de houilles, ballast) :

Assemblage A/B/C : 10A/10B/80C, 20A/10B/70C, 10A/20B/70C, 20A/20B/60C ;

Les mélanges ternaires sont constitués de 4 formulations pour le tableau 27 et de 12 formulations pour le tableau 28 soit 16 formules (tableau 27 et 28).

Tableau 27. Combinaisons des mélanges témoins

Mélanges témoins			
%	Horizons	Mélanges ternaires	%
10/90	HeS/HeSb	TV/CO/MPZ	10/20/70
20/80			20/20/60
30/70	HeP	TV/CO/PZ	10/20/70
40/60			20/20/60

Tableau 28. Combinaisons des mélanges du projet

Combinaisons des mélanges proposés pour le projet					
Horizons	Mélanges binaires	%	Horizons	Mélanges ternaires	%
HeR / HeS	Li/BR	10/90	HeR / HeS / HeP	Li/CO/BR	10/10/80
		20/80			20/10/70
		30/70			10/20/70
		40/60			20/20/60
	Li/SH	10/90		10/10/80	
		20/80		20/10/70	
		30/70		10/20/70	
		40/60		20/20/60	
Li/CO	90/10	Li/CO/Bal	10/10/80		
	80/20		20/10/70		
			10/20/70		
HeP	Li/Bal	10/90		20/20/60	
		20/80			
		30/70			
		40/60			

V.3 Prédiction des propriétés des mélanges à partir de modèles de la littérature pour confirmer les associations avant les essais

Cette section vise à faire des prédictions sur les mélanges que je souhaite mettre en œuvre. Elles me permettront d'en vérifier l'opportunité de mise en œuvre, ainsi que de vérifier s'il existe des corrélations pour prédire les caractéristiques physiques et agronomiques des futurs mélanges proposés pour les aménagements urbains. Les essais qui suivront serviront à tester et valider mes prédictions. Les propriétés physiques et chimiques qu'il est techniquement possible de prédire restent aujourd'hui peu nombreuses. Je m'appuierai sur la connaissance

de chaque matériau pour en déterminer les paramètres physiques et chimiques ; connaissant les proportions entre les composantes d'un mélange, et la teneur d'un élément chimique ou d'une fraction texturale dans chaque composante, alors on connaît la teneur de cet élément dans le matériau total (le mélange). C'est un système linéaire avec autant de polynômes que d'inconnues. Bien sûr, s'il me manque des teneurs ou des proportions, le système linéaire algébrique ne peut plus être résolu. Dans ce cas, l'utilité des corrélations entre variables prises deux à deux est la solution envisagée, ce qui aidera à résoudre le système linéaire. Parallèlement je déterminerai certaines caractéristiques à partir d'équations de pédotransfert.

Prédictions physiques :

- Texture,
- Masse volumique apparente du sol ρ_{DM}
- Masse volumique du sol sec ρ_d
- Indice des vides e
- Porosité n
- Volume de particules solides V_s en m^3
- Volume de l'eau V_w en m^3
- Volume de l'air V_a en m^3

Fonctions de pédotransfert :

- Perméabilité du mélange à partir du triangle
- Estimation du réservoir utilisable maximum R_{Umax}
- Estimation de la Réserve Utile R_U
- Indice de battance I_b
- Capacité d'échange cationique CEC.

V.3.1 Caractérisation de la texture des mélanges et détermination de la conductivité hydraulique par pédotransfert

L'analyse granulométrique fournit la distribution des grains en fonction de leur taille, ce qui permet d'en déduire la classe granulométrique du matériau et de faire des comparaisons.

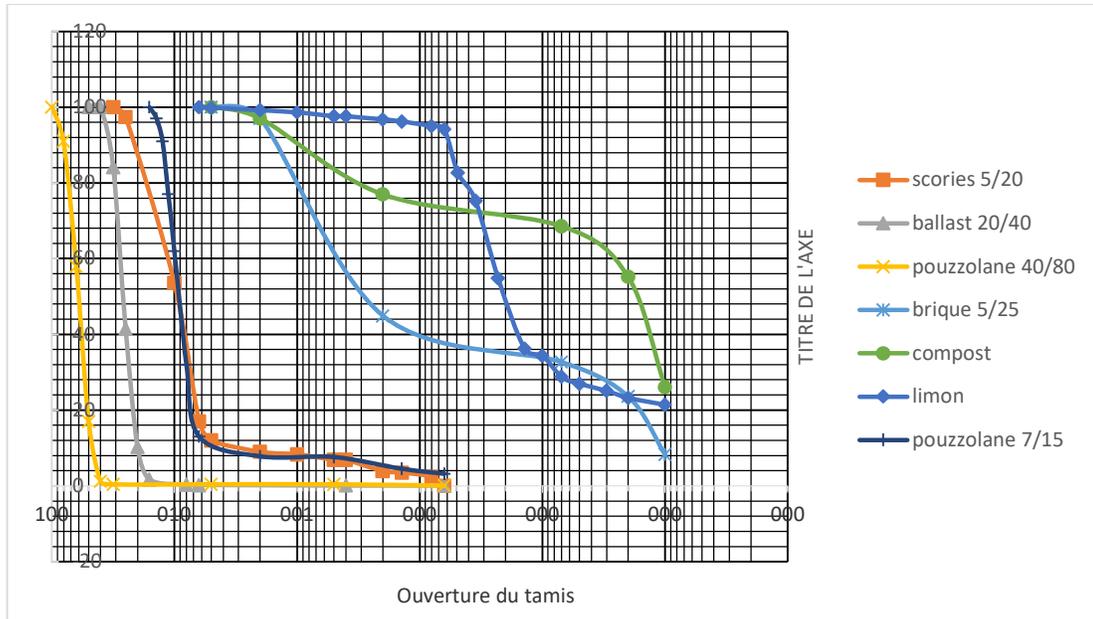


Figure 63. Courbe granulométrique des matériaux entrant dans la composition des technosols (cf. Annexe 21 : Données des courbes granulométriques)

Les courbes des pouzzolanes 7/15, scories 5/20, ballast 20/40 et pouzzolane 40/80 sont sensiblement parallèles entre elles avec une pente très forte ; la granulométrie est dite uniforme et le diamètre efficace (d_{10}) change peu d'une courbe à l'autre. On remarque une grande similitude entre les courbes des scories 5/20 et des pouzzolanes. Par la suite je ferai une comparaison des propriétés physiques et chimiques avec l'espoir de trouver d'autres similitudes qui permettraient d'envisager que la scorie de houille 5/20 soit un excellent candidat de substitution à la pouzzolane 7/15. Les courbes de la brique 5/25 et du compost présentent une forme granulométrique étalée, graduée, non uniforme. Les pourcentages des cinq classes de texture de chaque mélange ont été calculés à partir des proportions des matériaux parents et de la granulométrie de chacun d'eux.

Tableau 29. Association limon et brique

Désignation	Limon (BD sols IDF)	Brique (Damas & Coulon, 2016) Fiche N°6.04	Li/BR							
			10/90		20/80		30/70		40/60	
Granulométrie (pour mille)			Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%
Argile < 2 µm	191,56	83,00	9,86	9,00	104,71	10,00	115,57	11,00	126,42	13,00
Limons fins	314,56	153,00	169,16		185,31		201,47		217,62	
Limons grossiers	443,11	91,00	126,21	30,00	161,42	35,00	196,63	40,00	231,84	44,00
Sables fins	47,44	122,00	114,54		107,09		99,63		92,18	
Sables grossiers	34,00	551,00	499,30	61,00	447,60	55,00	395,90	49,00	344,20	43,00

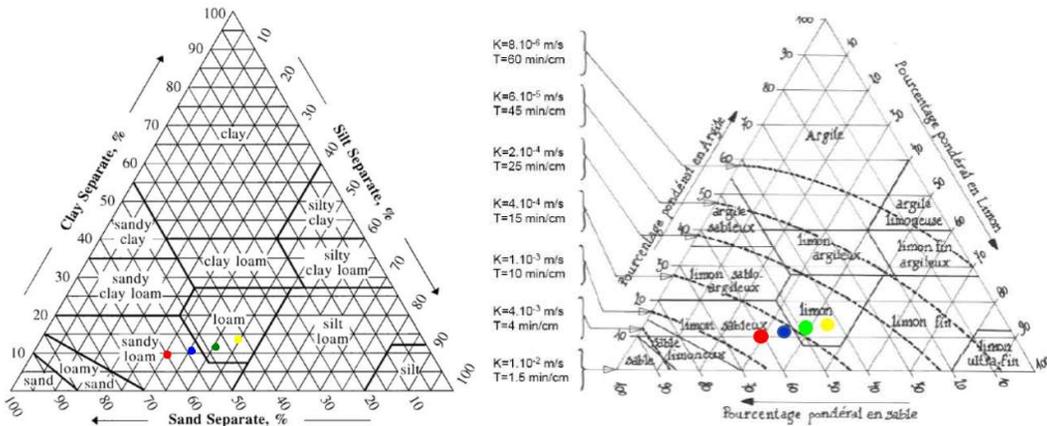


Figure 64. Triangle des textures - Association limon et brique

La figure 64 montre qu'avec une proportion de brique décroissante, le mélange créé évolue du limon-sableux au limon ; la variation est essentiellement horizontale avec un effet de translation vers la droite pour des valeurs de $7 \cdot 10^{-4}$ m/s pour un taux de 60 % de brique à $3 \cdot 10^{-4}$ m/s pour un taux de 90 %. À ce stade, on peut dire qu'augmenter la proportion en brique de la masse totale permet d'améliorer significativement la perméabilité du mélange.

Tableau 30. Association limon et scories de houille

Désignation	Limon (BD sols IDF)	Scorie 5/25 annexe N°24	Li/SH							
			10/90		20/80		30/70		40/60	
Granulométrie (pour mille)			Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%
Argile <2 µm	191,56		19,00	1,90	38,00	3,80	57,00	5,70	76,00	7,60
Limons fins	314,56	0,00	32,00		63,00		94,00		125,00	
Limons Grossiers	443,11	0,00	44,00	7,60	88,00	15,10	132,00	22,60	177,00	30,20
Sables Fins	47,44	40,00	40,00		41,00		42,00		42,00	
Sables grossiers	34,00	960,00	865,00	90,50	770,00	81,10	675,00	71,70	580,00	62,20

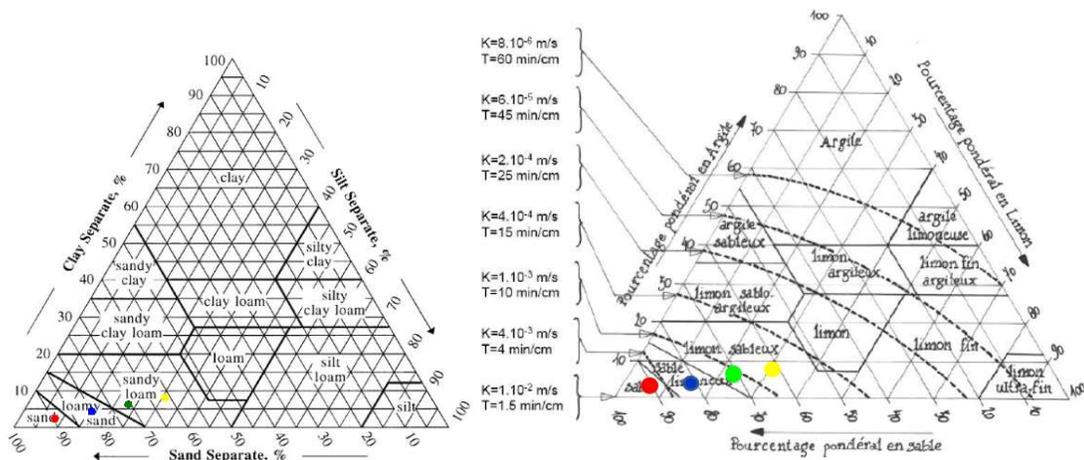


Figure 65. Triangle des textures - Association limon et scories de houille

Le mélange limon/scorie est qualifié dans une classe texturale comprise entre le limon sableux et le sable. Plus la proportion de scorie est importante, plus le mélange tend vers la gauche du triangle dans la classe texturale du sable. Les valeurs vont de 4.10^{-3} à 1.10^{-2} m/s, ce qui confère aux mélanges une très grande perméabilité exploitable pour des horizons types. La perméabilité très élevée constitue un paramètre important à introduire dans l'élaboration de nos technosols, visant à réduire le phénomène de ruissellement.

Tableau 31. Association limon et compost

Désignation	Limon (BD sols IDF)	Compost (Damas & Coulon, 2016) Fiche N°6.10	Li/CO			
			90/10	80/20		
Granulométrie (pour mille)			Masse (gr)	Masse (gr)	%	%
Argile <2 µm	191,56	259,00	198,30	205,05	19,00	20,00
Limons fins	314,56	289,00	312,00	309,45		
Limons Grossiers	443,11	133,00	412,10	381,09	71,00	68,00
Sables Fins	47,44	83,00	51,00	54,55		
Sables grossiers	34,00	230,00	53,00	73,20	10,00	12,00

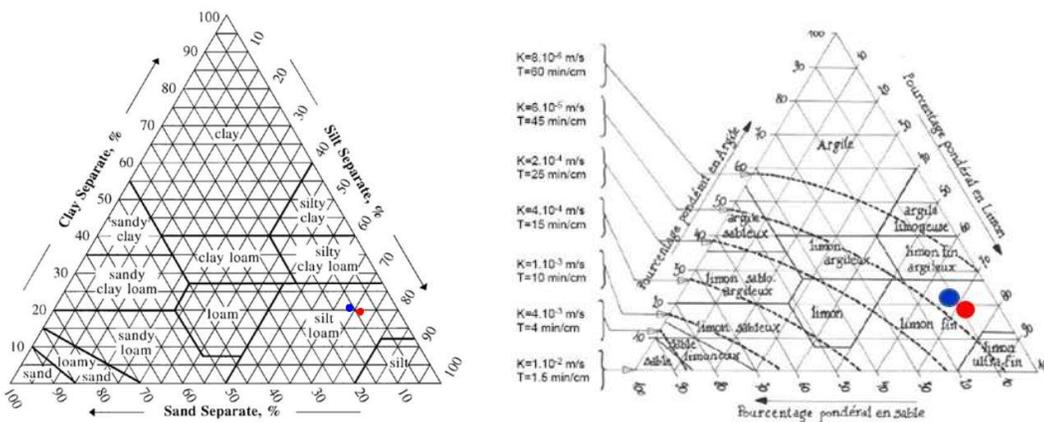


Figure 66. Triangle des textures - Association limon et compost

Le mélange limon/compost où le pourcentage de limon reste important entre 90 % et 80 % par rapport au compost montre que le limon est très peu influencé par l'ajout de compost. Le mélange reste dans la classe texturale du limon de Saclay, celle des limons fins, avec une évolution selon un axe perpendiculaire au côté A-S du triangle, donc une dilution du limon sans modifier la proportion entre argile et sable. Cependant, on constate qu'il reste sans incidence sur le coefficient K_s qui vaut environ $4,70 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Tableau 32. Association limon et ballast

Désignation	Limon (BD sols IDF)	Ballast 20/40 annexe N°25	Li/BAL							
			10/90		20/80		30/70		40/60	
Granulométrie (pour mille)			Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%
Argile <2 µm	191,56	83,00	93,86	9,00	104,71	10,00	115,57	11,00	126,42	12,00
Limons fins	314,56	130,00	148,46		166,91		185,37		203,82	
Limons Grossiers	443,11	103,00	137,01	29,00	171,02	34,00	205,03	39,00	239,04	44,00
Sables Fins	47,44	187,00	173,04		159,09		145,13		131,18	
Sables grossiers	34,00	497,00	450,70	62,00	404,40	56,00	358,10	50,00	311,80	44,00

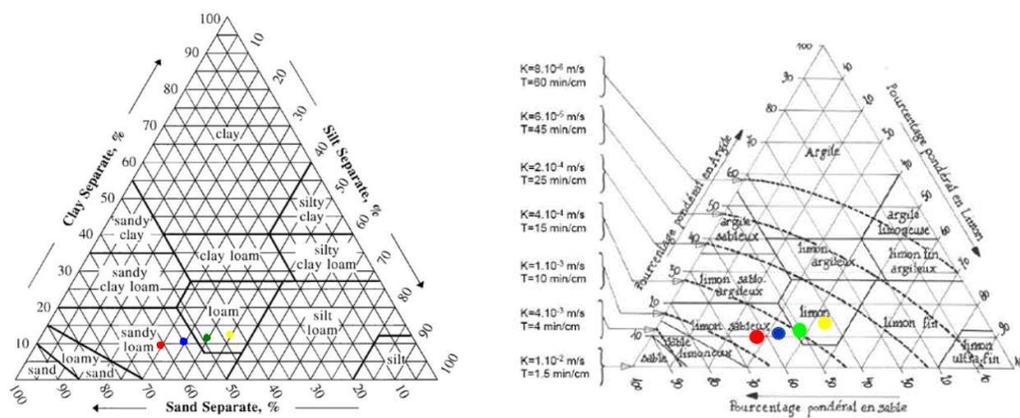


Figure 67. Triangle des textures - Association limon et ballast

Le mélange limon / ballast tend vers la gauche du triangle (limon sableux) lorsque la proportion de ballast augmente. La perméabilité est comprise entre $3,50 \cdot 10^{-4}$ et $2,50 \cdot 10^{-3}$ m/s, les variations apportées sur le ballast montrent qu'en augmentant son pourcentage pondéral dans le mélange celui-ci augmente proportionnellement à sa perméabilité.

Tableau 33. Association limon, compost et brique

Désignation	Limon (BD sols IDF)	Brique (Damas & Coulon, 2016) Fiche N°6.04	Compost (Damas & Coulon, 2016) Fiche N°6.10	Li/CO/BR							
				10/10/80		20/10/70		10/20/70		20/20/60	
Granulométrie (pour mille)				Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%
Argile <2 µm	191,56	83,00	259,00	111,46	11,00	122,31	12,00	129,06	13,00	139,91	14,00
Limons fins	314,56	153,00	289,00	182,76		198,91		196,36		212,51	
Limons Grossiers	443,11	91,00	133,00	130,41	31,00	165,62	36,00	134,61	33,00	169,82	38,00
Sables Fins	47,44	122,00	83,00	110,64		103,19		106,74		99,29	
Sables grossiers	34,00	551,00	230,00	467,20	58,00	415,50	52,00	435,10	54,00	383,40	48,00

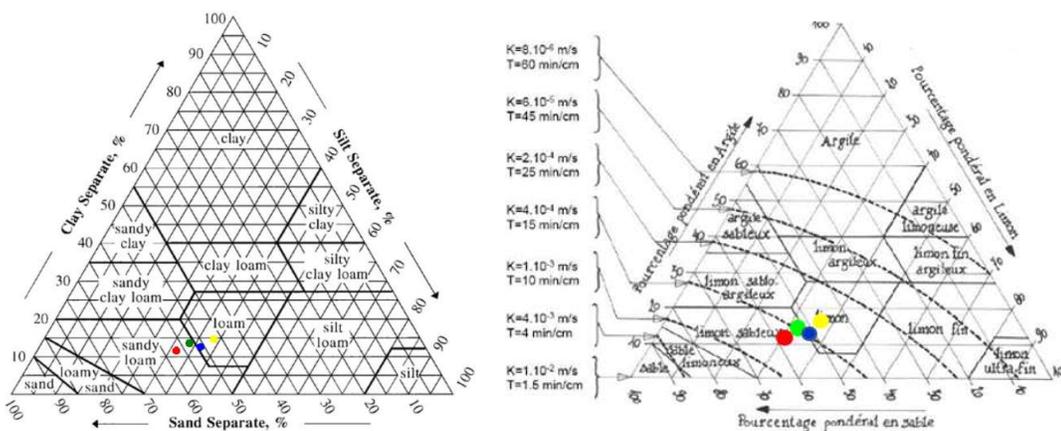


Figure 68. Triangle des textures association du limon, compost et brique

Le mélange ternaire constitué de limon / compost / brique est compris dans une classe texturale allant du limon sableux au limon. On note des variations en x pour l'augmentation du taux de brique, avec une translation vers le sable, et à la fois en y qui est le résultat de l'augmentation du taux de matière organique produisant un effet en y assimilable à l'argile. Le coefficient K_s est élevé comme pour les mélanges binaires limon / brique ou encore limon / scorie.

Tableau 34. Association limon, compost et ballast

Désignation	Limon (BD sols IDF)	Ballast 20/40 annexe N°25	Compost (Damas & Coulon, 2016) Fiche N°6.10	Li/CO/BAL							
				10/10/80		20/10/70		10/20/70		20/20/60	
Granulométrie (pour mille)				Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%
Argile <2 µm	191,56	83,00	259,00	111,46	11,00	122,31	12,00	129,06	13,00	139,91	14,00
Limons fins	314,56	130,00	289,00	164,36		182,31		180,26		198,71	
Limons Grossiers	443,11	103,00	133,00	140,01	30,00	174,02	36,00	143,01	32,00	177,02	37,00
Sables Fins	47,44	187,00	83,00	162,64		148,69		152,24		138,29	
Sables grossiers	34,00	497,00	230,00	424,00	59,00	377,70	52,00	397,30	55,00	351,00	49,00

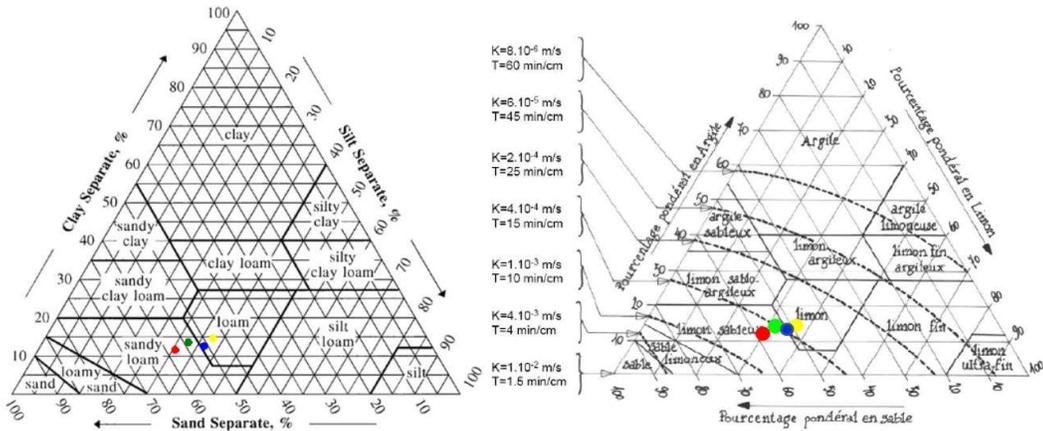


Figure 69. Triangle des textures - Association limon, compost et ballast

L'introduction du compost dans les mélanges s'accompagne d'une oscillation des points de mesure sur le triangle des textures ; il semble que les mélanges ternaires n'aient pas la même linéarité que les mélanges binaires lors de variation des pourcentages de matériaux.

Tableau 35. Association limon, compost et scories de houille

Désignation	Limon (BD sols IDF)	compost (Damas & Coulon, 2016) Fiche N°6.10	Scorie 5/25 annexe N°24	Li/CO/SH							
				10/10/80		20/10/70		10/20/70		20/20/60	
Granulométrie (pour mille)				Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%	Masse (gr)	%
Argile <2 µm	191,56	259,00		45,00	4,50	64,00	6,40	70,00	7,00	90,00	9,00
Limons fins	314,56	289,00	0,00	60,00		91,00		89,00		120,00	
Limons Grossiers	443,11	133,00	0,00	57,00	11,70	101,00	19,20	70,00	15,90	115,00	23,50
Sables Fins	47,44	83,00	40,00	45,00		45,00		49,00		50,00	
Sables grossiers	34,00	230,00	960,00	793,00	83,30	699,00	74,40	722,00	77,10	625,00	67,50

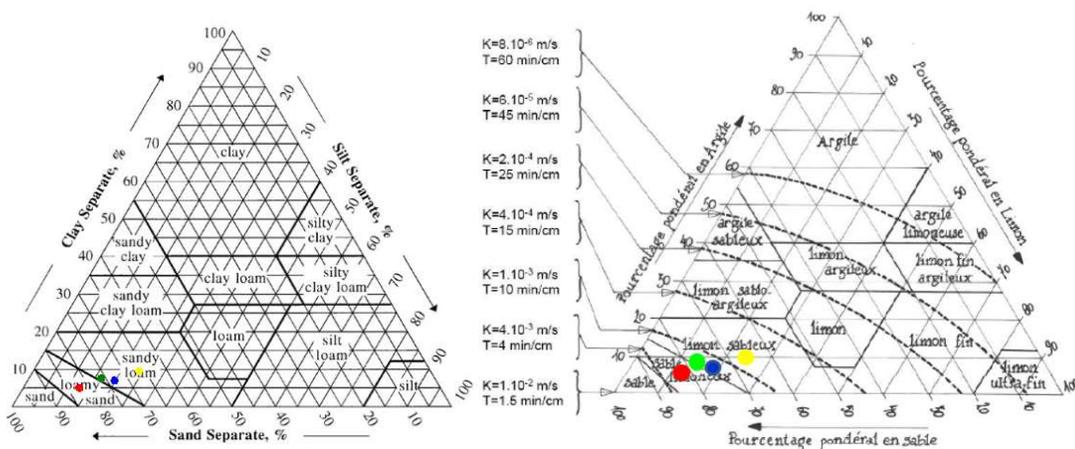


Figure 70. Triangle des textures - Association limon, compost et scories de houille

L'évolution du mélange est ici plus marquée vers le sable (limon sableux, sable limoneux) que pour les autres mélanges ternaires. On note que les valeurs sont plus regroupées autour d'une Ks de 4.10^{-3} m/s. L'introduction du compost comme composant tertiaire rend les mélanges plus homogènes autour de la texture sable limoneux avec une valeur Ks de 4.10^{-3} m/s. La perméabilité y est très élevée ce qui lui confère une caractéristique intéressante dans le choix des types de mélange puisqu'il participera fortement à réduire le ruissellement.

V.3.3 Classification géotechnique des technosols

Les calculs ci-dessous reprennent les prescriptions édictées par l'UNEP dans les règles professionnelles « travaux des sols supports de paysage » notamment pour le calcul de la masse volumique des mélanges terre-pierre. L'association d'un squelette minéral avec une terre fertile peut être trompeur sur le rendu des volumes. En effet réaliser un mélange composé par exemple de 60% de pierre et de 40% de terre (la terre est elle-même mélangée avec les matériaux fins composant le mélange, puis brassée avant de l'incorporer à un mélange terre-pierre), doit prendre en compte le volume des vides du matériau caillouteux qui est généralement compris entre 35 et 45% du volume pour des matériaux de 40/80 ou 60/120 rapport d/D. Si le volume n'est pas respecté, l'excès de terre reviendrait à libérer le contact entre les granulats de cailloux, ce qui entrainerait une perte de portance du mélange terre-pierre. Il faut donc approvisionner pour 1 m³ de granulat 0,4 m³ de terre (Muller et al., 2012). Le tableau 36 de classification géotechnique des matériaux parents a été réalisé à partir des analyses agronomiques et des fiches de matériaux de la société RICHARD, ainsi que des fiches matériaux utilisées par Rokia (2014) dans son mémoire. J'ai réalisé mes calculs à partir des paramètres issus des différentes fiches et analyses et retranscrits dans le tableau 37 classification géotechnique des mélanges.

Tableau 36. Classification géotechnique des matériaux parents

Désignation	Limons de Saclay	Scories 5/20	Ballast 20/40	Brique	Compost
Densité apparente ρ (BDM)	1,90	1,64	1,30	1,50	0,53
Masse volumique du sol sec ρ_d	1,68	1,40	1,10	1,40	0,30
Masse volumique des particules solides ρ_s : densité réelle	2,63	3,60	2,90	2,60	2,00
Indice des vides e	0,56	1,63	1,63	0,89	0,82
Porosité n	0,36	0,62	0,62	0,47	0,45
Volume de particules solides V_s en m ³	0,64	0,38	0,38	0,53	0,55
Volume de l'eau V_w en m ³	0,22	0,24	0,20	0,10	0,33
Volume de l'air V_a en m ³	0,14	0,38	0,42	0,37	0,12
Volume de vides V_v en m ³	0,36	0,62	0,62	0,47	0,45
Teneur en eau pondérale ω	13,00	17,00	18,00	7,00	112,00

Le limon est un facteur déterminant de la masse volumique de nos technosols. Les résultats présentés dans le tableau 37 ont été réalisés à partir des pourcentages de matériaux utilisés pour chaque mélange. J'ai concentré mes calculs sur la détermination des valeurs de ρ : Densité apparente ; ρ_d : Masse volumique du sol sec ; ρ_s : Masse volumique des particules solides. Seule cette dernière se calcule par simple combinaison linéaire de la densité réelle des composants. Dans un second temps je me suis attaché à déterminer la porosité qui présente un comportement non linéaire, comme les masses volumiques ρ et ρ_d .

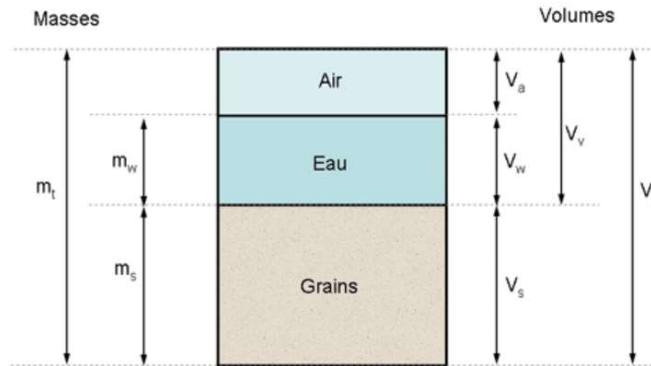


Figure 71. Diagramme des phases du sol (Plumelle et al., 2017)

Les résultats du tableau 37 ont été calibrés sur la base d'un volume de 1 m^3 . Les mélanges caillouteux (brique, ballast et scories) possèdent une grande porosité comme vu ci-dessus. Pour le calcul des valeurs : ρ ; ρ_d ; ρ_s et V_s , j'ai pris le parti de figer le volume des matériaux caillouteux à 1 m^3 et d'ajouter au poids des cailloux le poids des matériaux parents fins (limon, compost). Pour le calcul de V_v j'ai appliqué la relation ci-dessous :

$$V_{Vm} = (V_{vc} - V_{mp1} - V_{mp2}) + V_{vmp1\%} + V_{vmp2\%}$$

Avec :

V_{vm} : volume des vides du mélange

V_{vc} : volume des vides du matériau caillouteux

V_{mp1} : volume du matériau parent 1

V_{mp2} : volume du matériau parent 2

$V_{vmp1\%}$: volume des vides du matériaux parent 1 pondérale

$V_{vmp2\%}$: volume des vides du matériaux parent 2 pondérale

L'approche que nous suivons pour calculer la BDm0 est d'utiliser la relation de pédotransfert de Manrique à partir du carbone organique et de R_w .

Tableau 37. Classification géotechnique des mélanges

Désignation	Texture	Masse volumique	Bdm0	ps	e	n	Vs	Vv	FPT Triangle Ks	FPT Vereecken	FPT Campbell
										Ks (m/s)	Ks (m/s)
Mélange Limons / Briques											
10 % / 90 %	Sa lo	1,69	1,25	2,86	0,68	0,41	0,59	0,41	7.10 ⁻⁴	7,73.10 ⁻⁴	2,70.10 ⁻⁴
20 % / 80 %	Sa lo	1,88	1,26	3,13	0,52	0,34	0,66	0,34	4,6.10 ⁻⁴	6,10.10 ⁻⁵	1,16.10 ⁻⁴
30 % / 70 %	Lo	2,07	1,27	3,39	0,39	0,28	0,72	0,28	6.10 ⁻⁴	2,70.10 ⁻⁵	8,90.10 ⁻⁵
40 % / 60 %	Lo	2,26	1,27	3,65	0,27	0,21	0,79	0,21	3.10 ⁻⁴	1,80.10 ⁻⁵	4,90.10 ⁻⁵
Mélange Limons / Scories											
10 % / 90 %	Sa	1,83	1,56	3,86	1,25	0,56	0,44	0,56	7.10 ⁻³	2,89	
20 % / 80 %	Sa lo	2,20	1,51	4,13	0,97	0,49	0,51	0,49	2,5.10 ⁻³	2,09.10 ⁻²	3,80.10 ⁻⁴
30 % / 70 %	Sa lo	2,21	1,48	4,39	0,75	0,43	0,57	0,43	1,1.10 ⁻⁴	7,56.10 ⁻⁴	2,52.10 ⁻⁴
40 % / 60 %	Sa lo	2,40	1,45	4,65	0,57	0,36	0,64	0,36	1,2.10 ⁻³	8,00.10 ⁻⁵	1,68.10 ⁻⁴
Mélange Limons / Compost											
90 % / 10 %	SiLo	1,76	1,05	2,57	0,66	0,40	0,63	0,31	4,1.10 ⁻⁵	1,43.10 ⁻⁴	1,50.10 ⁻⁵
80 % / 20 %	SiLo	1,63	0,86	2,50	0,67	0,40	0,62	0,25	4,1.10 ⁻⁵	6,07.10 ⁻⁴	1,60.10 ⁻⁵
Mélange Limons / Ballast											
10 % / 90 %	Sa lo	1,49	1,16	3,16	1,25	0,56	0,44	0,56	7.10 ⁻⁴	1,13.10 ⁻⁴	1,57.10 ⁻⁴
20 % / 80 %	Sa lo	1,68	1,17	3,43	0,97	0,49	0,51	0,49	2,8.10 ⁻³	6,50.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁴
30 % / 70 %	Lo	1,80	1,19	3,69	0,75	0,43	0,57	0,43	4.10 ⁻⁴	4,20.10 ⁻⁵	9,20.10 ⁻⁵
40 % / 60 %	Lo	2,06	1,21	3,95	0,57	0,36	0,64	0,36	3.10 ⁻⁴	2,85.10 ⁻⁵	7,00.10 ⁻⁵
Mélange Limons / Compost / Briques											
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,74	1,01	3,06	0,76	0,43	0,65	0,35	7.10 ⁻⁴	2,94.10 ⁻³	2,50.10 ⁻⁴
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	1,93	1,01	3,33	0,70	0,41	0,71	0,29	4.10 ⁻⁴	2,10.10 ⁻⁴	9,60.10 ⁻⁵
10 % / 20 % / 70 %	Lo	1,80	0,83	3,26	0,70	0,41	0,70	0,30	4.10 ⁻⁴	8,83.10 ⁻⁴	1,04.10 ⁻⁴
20 % / 20 % / 60 %	Lo	1,99	0,84	3,54	0,65	0,39	0,77	0,23	3.10 ⁻⁴	6,43.10 ⁻⁴	8,00.10 ⁻⁵
Mélange Limons / Compost / Scories											
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,88	1,17	4,06	1,39	0,58	0,50	0,50	1,9.10 ⁻²	9,43.10 ⁻²	4,10.10 ⁻⁴
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	2,07	1,11	4,33	1,29	0,56	0,56	0,44	1,6.10 ⁻³	6,43.10 ⁻³	2,73.10 ⁻⁴
10 % / 20 % / 70 %	Sa lo	1,94	0,91	4,26	1,29	0,56	0,55	0,45	1,6.10 ⁻³	2,20.10 ⁻²	2,96.10 ⁻⁴
20 % / 20 % / 60 %	Sa lo	2,13	0,90	4,53	1,19	0,54	0,62	0,38	8,2.10 ⁻⁴	3,64.10 ⁻³	1,94.10 ⁻⁴
Mélange Limons / Compost / Ballast											
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,54	0,95	3,36	1,39	0,58	0,50	0,50	7.10 ⁻⁴	3,89.10 ⁻⁴	1,30.10 ⁻⁴
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	1,73	0,96	3,63	1,29	0,56	0,56	0,44	4.10 ⁻⁴	2,62.10 ⁻⁴	9,90.10 ⁻⁵
10 % / 20 % / 70 %	Lo	1,60	0,79	3,56	1,29	0,56	0,55	0,45	4.10 ⁻⁴	1,04.10 ⁻³	1,07.10 ⁻⁴
20 % / 20 % / 60 %	Lo	1,79	0,80	3,83	1,19	0,54	0,62	0,38	3.10 ⁻⁴	1,03.10 ⁻³	1,07.10 ⁻⁴

Masse volumique totale du sol ; Bdm0 densité apparente de la matrice ; ps : Masse volumique des particules solides ;
e : Indice des vides ; n : Porosité ; Vs : Volume de particules solides en m³ ; Vv : Volume de vides en m³ ;
Ks coefficient d'infiltration

Les calculs du tableau 37 ont été réalisés sur l'hypothèse que chaque technosol est un mélange parfait. La porosité entre les cailloux est comblée par les matériaux fins donc la porosité totale diminue avec l'augmentation de la part de matériaux fins qui contribuent en même temps à l'augmentation de la masse totale du sol. Ainsi, dans les mélanges constitués de ballast, brique et scories, la macroporosité est remplacée par la microporosité des matériaux fins. L'hypothèse du mélange parfait est vraisemblablement fautive car il reste toujours des gros interstices à l'issue d'un processus d'homogénéisation mécanique.

Globalement, l'apport de matériaux fins comblera les vides entre les matériaux caillouteux et participera à l'augmentation de la masse volumique. Par exemple, le mélange limon / brique de proportion 10 / 90 % a une densité totale de 1,69 ; elle passe à 2,26 pour la proportion 40 / 60 %, soit une hausse de 35 % de la masse. Les mélanges binaires auront une augmentation forte de leur masse volumique par ajout de matériaux fins, environ +34%, alors que les mélanges avec le compost seront plus limités avec, une augmentation de l'ordre d'environ +14%.

On remarque que la porosité est équivalente entre les mélanges ternaires Li/CO/SH et Li/CO/BAL pour des valeurs comprises entre 0,54 et 0,58. La similitude des valeurs est liée à l'équation de pédotransfert de ZHANG et al. (2011) qui fait intervenir des proportions de matériaux fins et grossiers dans le calcul de la porosité. C'est aussi le cas de l'indice des vides, qui est compris entre 1,19 et 1,39. On constate aussi que le fait d'apporter du compost impacte plus l'indice des vides (en diminution) pour ces mêmes mélanges (passant de binaire à ternaire par ajout de compost). A l'inverse le passage du mélange binaire à ternaire par ajout de compost pour le Li/BR → Li/CO/BR semble moins impacter l'indice des vides qui reste stable. On note pour les autres mélanges ternaires que l'indice des vides y est aussi important, l'apport de matériaux de gros diamètre influence le volume des vides.

En complément, on peut considérer que la brique a des propriétés intrinsèques spécifiques. La conductivité hydraulique de nos mélanges est dans l'ensemble plutôt élevée, c'est probablement l'indicateur le plus important à exploiter dans le cadre de mon projet. Les résultats issus de la FPT triangle Ks montrent que les mélanges à partir de scories, aussi bien ternaires que binaires, se démarquent de l'ensemble avec des valeurs qui se rapprochent de $1,9 \cdot 10^{-2}$ m/s pour les mélanges ternaires ayant un pourcentage de scories de 80 %. Pour les mélanges binaires les valeurs sont aussi élevées avec des taux de 90 % et 80 % de scories. La FPT de Vereecken (tableau 8) obtient des résultats sur les mélanges ternaires et binaires à base de scories sensiblement similaires à la FPT triangle Ks sauf pour la valeur du mélange

composé de 10% de limon et 90% de scories. Les résultats semblent être faussés aussi bien pour la FPT Vereecken que pour la FPT Campbell. L'explication se trouve dans le taux d'éléments grossier R_w de 87 %, la formule de calcul semble ne plus fonctionner au-dessus de 85 % d'éléments grossiers.

En conclusion, les résultats entre les équations de pédotransfert et le triangle Ks montrent que les mélanges binaires auront des valeurs proches de l'équation de Campbell, alors que pour les mélanges ternaires ce sera l'équation de Vereecken qui prendra l'ascendant sur le triangle Ks.

V.3.4 Estimation de la réserve utile

Les calculs de la réserve utile sont faits en reportant la texture de chaque mélange sur la figure 24, les résultats obtenus de la RU_{FPT} sont introduits dans l'équation 24. Tous les résultats de réserve utile potentielle RUP sont reportés dans le tableau 38, ils prennent en compte les épaisseurs définies pour chaque horizon, surface, subsurface ou profond. Pour obtenir la valeur d'un complexe il suffit de réaliser la somme arithmétique des résultats par horizon. Les résultats du tableau 38 montrent que la RUP, le limon ainsi que le compost sont corrélés, plus les proportions de limon et de compost augmentent et plus la RUP augmente. On retrouve bien là une des caractéristiques communes du compost et du limon qui est la capacité de rétention de l'eau dans le sol.

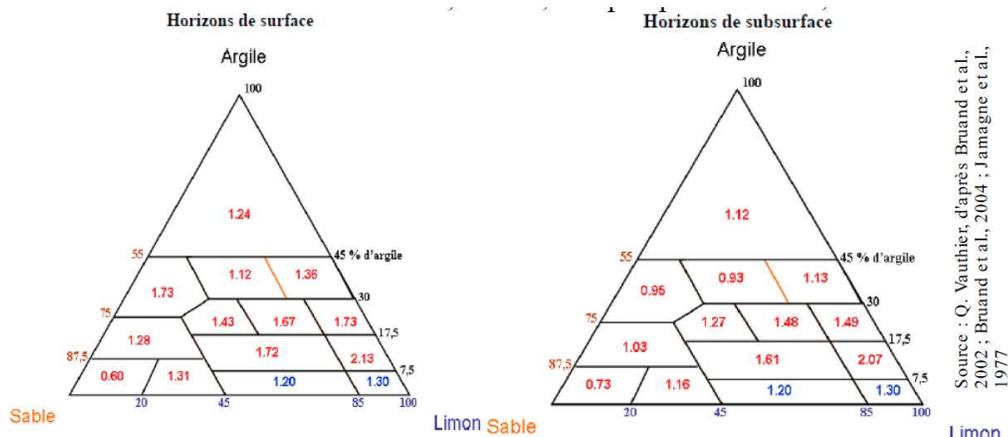


Figure 24. Triangle de détermination de la valeur de la RU en mm/cm (Vauthier, 2010)

V.3.5 Calcul de l'indice de battance

L'indice de battance est un indicateur important de suivi de la destruction des agrégats sous l'effet des précipitations ; les résultats sont reportés dans le tableau 38 et l'analyse en est faite ici. L'équation de pédotransfert établie pour les sols cultivés du nord de la France sur

des limons d'origine éolienne me donnera des éléments sur l'état probable de mes technosols : vont-ils être stables face à l'effet d'une pluie battante ? Pour m'en assurer j'applique l'équation 24 qui me donne les résultats du tableau 38, 7^{ème} colonne. L'ensemble des valeurs trouvées concernant l'indice de battance potentiel des différents types de mélanges donne une classe comprise entre 3,28 et 1,03. Les sols qui seront très peu sensibles à la battance seront ceux réalisés à partir de brique en mélange binaire et ternaire. En effet les résultats donnent des valeurs supérieures à 2 ce qui les classe en sol non sensible. Dans un premier temps, on peut considérer que le matériau composé de terre cuite permet le piégeage de la goutte d'eau grâce à sa grande porosité lors de son impact. Ensuite, les granulats joueront aussi un rôle de protection en captant une grande partie de la pluie. Les mélanges binaires limon / compost seront aussi très battants avec une tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de compost. Les mélanges qui semblent être les moins battants sont ceux dont la matrice est composée par des scories ; l'indice de battance potentiel est compris entre 1,07 et 1,88 pour les mélanges binaires et en dessous de 1,4 pour l'ensemble des mélanges ternaires. La scorie de houille semble être un bon candidat pour réaliser les mélanges pour les horizons de surface qui sont les plus exposés aux pluies. L'augmentation du taux de compost ne semble pas favoriser la diminution de l'indice de battance. Le travail sur les mélanges sera fonction de la position en tant qu'horizon. À ce stade je peux conclure que les hypothèses de calculs sont en faveur d'une bonne stabilité structurale potentielle pour l'ensemble des mélanges. Une vérification lors des levés de terrain devra le confirmer.

V.3.6 Calcul de la CEC

Determination de la CEC à partir de la formule équation 23 établie par Girard et al. (2011) : les résultats sont reportés dans le tableau 38 et l'analyse en est faite au paragraphe suivant. Je précise qu'une incertitude demeure sur l'équation de pédotransfert utilisée pour l'évaluation de la CEC des mélanges car elle provient d'une étude réalisée sur des sols Alsaciens, j'en vérifierai la validité lors de travaux métrologie que je vais mener. La CEC est un bon indicateur de fertilité du sol car plus le sol est riche en argile et en matière organique, plus la CEC est importante. L'ajustement des taux de chaque matériau parent du mélange sera fonction du type d'utilisation souhaitée et de sa position dans le futur profil. Un mélange composant un horizon HeP ne contiendra pas le même taux de matière organique qu'un horizon HeSb et HeS.

Tableau 38. Tableau d'évaluation des indicateurs de pédotransfert

Désignation	Texture	Mo	Coef FPT RUP	FPT RUP en [mm]	RU 2/3 de la RUP en [mm]	FPT Ib	FPT CEC
Mélange Limons / Briques							
10 % / 90 %	Sa lo	1,29	1,72	5,16	3,44	3,28	10,41
20 % / 80 %	Sa lo	2,57	1,72	10,32	6,88	3,07	13,47
30 % / 70 %	Lo	3,86	1,72	15,48	10,32	2,92	16,56
40 % / 60 %	Lo	5,14	1,72	20,64	13,76	2,82	19,62
Mélange Limons / Scories							
10 % / 90 %	Sa	5,69	0,60	1,80	1,20	1,07	16,96
20 % / 80 %	Sa lo	6,97	0,60	3,60	2,40	1,50	20,34
30 % / 70 %	Sa lo	8,26	1,31	11,79	7,86	1,73	23,73
40 % / 60 %	Sa lo	9,54	1,31	15,72	10,48	1,88	27,10
Mélange Limons / Compost							
90 % / 10 %	SiLo	14,27	1,73	51,90	34,60	2,26	41,25
80 % / 20 %	SiLo	15,69	1,73	51,90	34,60	2,06	44,49
Mélange Limons / Ballast							
10 % / 90 %	Sa lo	1,60	1,31	10,48	6,99	2,97	11,06
20 % / 80 %	Sa lo	2,89	1,31	20,96	13,97	2,84	14,15
30 % / 70 %	Lo	4,17	1,72	41,28	27,52	2,75	17,21
40 % / 60 %	Lo	5,46	1,72	55,04	36,69	2,68	20,29
Mélange Limons / Compost / Briques							
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	3,99	1,28	7,68	5,12	2,74	16,71
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	5,27	1,28	11,52	7,68	2,42	19,77
10 % / 20 % / 70 %	Lo	6,69	1,72	15,48	10,32	2,03	23,02
20 % / 20 % / 60 %	Lo	7,97	1,72	20,64	13,76	2,04	26,08
Mélange Limons / Compost / Scories							
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	8,39	0,60	3,60	2,40	1,03	23,57
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	9,67	0,60	5,40	3,60	1,33	26,94
10 % / 20 % / 70 %	Sa lo	11,09	0,60	5,40	3,60	1,03	30,14
20 % / 20 % / 60 %	Sa lo	12,37	1,31	15,72	10,48	1,25	33,55
Mélange Limons / Compost / Ballast							
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	4,30	1,31	20,96	13,97	2,29	17,36
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	5,59	1,72	41,28	27,52	2,27	20,45
10 % / 20 % / 70 %	Lo	7,00	1,72	41,28	27,52	1,90	23,67
20 % / 20 % / 60 %	Lo	8,29	1,72	55,04	36,69	1,94	26,75

Mo : matière organique ; Coef FPT RUP : reporté et lecture de la figure N°24 ; FPT RUP : Réserve Utile Potentielle du sol ; RU : réservoir utilisable par la plante ; FPT Ib : indice de battance du sol ; FPT CEC : capacité d'échange cationique d'un sol

V.3.7 Analyse des résultats de l'évaluation des indicateurs de pédotransfert

La capacité d'échange cationique (CEC)

Le tableau 38 met en évidence la relation déjà bien documentée entre le taux de matière organique et la CEC. Celle-ci est encore plus forte lorsque la matière organique est associée à la matrice du limon de Saclay qui est elle-même composée de limon et d'argile. L'agrégation de l'humus à l'argile passe par la formation du complexe argilo-humique. Ce processus est à l'origine de la stabilité structurale d'un sol et du pouvoir tampon (stabilisation du pH). Le mélange binaire Li/CO ressort (tableau 38) avec une CEC potentielle (si tout le compost se transformait en matière organique restant dans le technosol) de 44,49 $\text{cmol}^{-1}/\text{kg}$ qui est pratiquement 4 fois supérieure à la CEC du mélange Li 10 % / Br 90 % qui, elle, a une CEC de 10,41 $\text{cmol}^{-1}/\text{kg}$. La figure 72 donne des classes qualitatives sur la facilité des échanges ioniques en fonction des plages de valeurs de la CEC. On retiendra que la classe de valeurs 8 à 15 $\text{cmol}^{-1}/\text{kg}$ est qualifiée de moyenne : en dessous, le risque de lessivage est important, et au-dessus les échanges deviennent de plus en plus contraints au complexe argilo-humique (CAH).

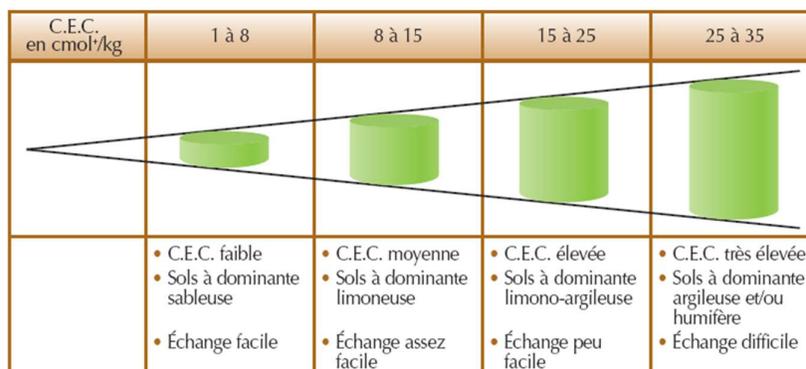


Figure 72. Valeurs de la CEC (Wiki Auréa, 2016)

Globalement, les mélanges se situent entre un minimum de 10,41 et un maximum de 44,49. Je constate que les mélanges réalisés sur la base Li/CO ont des valeurs de CEC comprises en 41,25 et 44,49 ce qui implique que les échanges cationiques sont difficiles ; la matière organique introduite dans les mélanges est un facteur d'augmentation de la CEC, il faut donc être attentif aux proportions de matière organique introduites et vérifier son évolution pour se prémunir des phénomènes de blocage cationique. Le seuil des 20 unités de CEC semble dépassé dès que le taux de MO atteint 20 %. Lorsque les essais sur les mélanges débiteront, une vérification de la stabilité de la matière organique sera réalisée en utilisant le coefficient

de minéralisation K2. Le coefficient K2 donne la proportion annuelle de minéralisation de l'humus qui varie en fonction des caractéristiques pédoclimatiques : température, humidité du sol, teneur en argile et en calcaire. L'apport de MO ne suffit pas à stabiliser le substrat, il faut aussi prendre en compte la perte de MO in situ liée au lessivage naturel. Les volumes apportés prendront en compte la perte annuelle naturelle de la MO qui sera estimée à partir des pertes d'humus sur mes technosols en suivant les étapes de calcul du bilan humique annuel d'une parcelle.

La RUP réserve utile potentielle du sol et RU réserve utile pour la plante

La réserve utile potentielle du sol est un indicateur important, il sert entre-autre à déterminer la réserve d'eau facilement utilisable par la plante. Dans notre cas elle correspond à la zone tampon de stockage d'eau. Elle permet une restitution lente de l'eau emmagasinée. Les mélanges possédant une grande RUP seront utilisés notamment sur des terrains ayant une infiltration importante avec une nappe proche de la surface : la RUP doit restituer lentement l'eau à la nappe, participant ainsi à sa régulation.

Pour l'horizon de surface, le mélange binaire limon / compost montre une grande capacité de réserve avec une valeur de 51,90 mm, on note que les autres mélanges binaires restent dans des proportions modestes avec pour le limon / brique des valeurs comprises entre 5,16 mm et 20,64 mm et pour le limon / scories des valeurs entre 1,80 mm et 15,72 mm. Il existe deux formules de mélanges qui se positionnent sur les horizons de subsurface et profond, le mélange binaire limon / ballast avec des valeurs de 10,48 mm à 55,04 mm et le mélange ternaire limon / ballast / compost avec des valeurs allant de 20,96 mm à 55,04 mm.

On constate qu'un mélange ayant un fort pourcentage de limon et de MO aura une bonne RU (tableau 39). Ces mélanges devront être choisis en fonction de l'utilisation et de l'horizon occupé dans le profil.

Tableau 39. Détermination de la perte annuelle d'humus Ph sur les mélanges

Désignation	Texture	ρ	Mo	V.t en m ³	M.Tf en t	Sh en t	K2	Ph
Mélange Limons / Briques								
10 % / 90 %	Sa lo	1,69	1,29	0,0500	0,950	0,001	2,810	0,002
20 % / 80 %	Sa lo	1,88	2,57	0,1500	0,850	0,004	1,990	0,008
30 % / 70 %	Lo	2,07	3,86	0,3500	0,650	0,014	1,960	0,026
40 % / 60 %	Lo	2,26	5,14	0,3500	0,650	0,018	1,950	0,035
Mélange Limons / Scories								
10 % / 90 %	Sa	1,83	5,69	0,0500	0,950	0,003	3,450	0,010
20 % / 80 %	Sa lo	2,20	6,97	0,1500	0,850	0,010	3,170	0,033
30 % / 70 %	Sa lo	2,21	8,26	0,2500	0,750	0,021	2,940	0,061
40 % / 60 %	Sa lo	2,40	9,54	0,3500	0,650	0,033	2,730	0,091
Mélange Limons / Compost								
90 % / 10 %	SiLo	1,76	14,27	0,9500	0,050	0,136	1,880	0,255
80 % / 20 %	SiLo	1,63	15,69	0,8500	0,150	0,133	1,850	0,247
Mélange Limons / Ballast								
10 % / 90 %	Sa lo	1,49	1,60	0,0500	0,950	0,001	2,560	0,002
20 % / 80 %	Sa lo	1,68	2,89	0,1500	0,850	0,004	2,470	0,011
30 % / 70 %	Lo	1,80	4,17	0,2500	0,750	0,010	2,390	0,025
40 % / 60 %	Lo	2,06	5,46	0,3500	0,650	0,019	2,310	0,044
Mélange Limons / Compost / Briques								
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,74	3,99	0,1500	0,850	0,006	1,940	0,012
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	1,93	5,27	0,2500	0,750	0,013	1,920	0,025
10 % / 20 % / 70 %	Lo	1,80	6,69	0,2500	0,750	0,017	1,880	0,031
20 % / 20 % / 60 %	Lo	1,99	7,97	0,3500	0,650	0,028	1,870	0,052
Mélange Limons / Compost / Scories								
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,88	8,39	0,1500	0,850	0,013	3,080	0,039
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	2,07	9,67	0,2500	0,750	0,024	2,860	0,069
10 % / 20 % / 70 %	Sa lo	1,94	11,09	0,2500	0,750	0,028	2,790	0,077
20 % / 20 % / 60 %	Sa lo	2,13	12,37	0,3500	0,650	0,043	2,590	0,112
Mélange Limons / Compost / Ballast								
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,54	4,30	0,1500	0,850	0,006	2,420	0,016
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	1,73	5,59	0,2500	0,750	0,014	2,330	0,033
10 % / 20 % / 70 %	Lo	1,60	7,00	0,2500	0,750	0,018	2,280	0,040
20 % / 20 % / 60 %	Lo	1,79	8,29	0,3500	0,650	0,029	2,210	0,064

ρ : Masse volumique totale du sol ; Mo : matière organique ; Tf : taux de terre fine ; Vt : volume de terre ; Mtf : masse de terre fine ; Sh : stock d'humus ; K2 : coefficient de minéralisation ; Ph : perte d'humus

Conclusion partielle

Créer un technosol est un exercice qui nécessite des connaissances pluridisciplinaires, comme l'étude pédologique, la connaissance agronomique ou encore des notions de géotechnique. Ces compétences sont nécessaires pour appréhender les processus pédogénétiques qui interagissent au sein de chaque horizon, pour anticiper les réponses que je souhaite faire notamment dans le cadre de la gestion de l'eau de pluie des projets urbains. J'ai déterminé le profil type de technosol, à partir des projets scientifiques traitant des technosols et de la pédologie. Les technosols doivent se rapprocher d'un profil naturel type : « sol polycyclique de climat tempéré » composé de 2 ou 3 horizons. Je m'attache particulièrement à introduire des matériaux parents dans la composition des technosols permettant la mise en place rapide d'un processus physico-chimique et organo-minéral pour tendre le plus rapidement vers une stabilité texturale.

Mon approche portant sur 14 mélanges binaires et 16 mélanges ternaires a permis de montrer que l'ensemble des mélanges proposés ont des coefficients de perméabilité qui sont prometteurs, variant de 10^{-2} à 10^{-5} m/s. Les technosols qui ressortent comme étant les plus prometteurs pour le critère d'infiltration sont dans l'ordre : le mélange binaire limon / scories avec des coefficients oscillant autour de 10^{-3} m/s, ensuite le mélange ternaire composé de limon / compost / scories avec une grande variabilité liée à l'ajout de compost avec des valeurs allant de 10^{-2} à 10^{-4} m/s. Enfin viennent tous les autres mélanges qui ont des valeurs autour de 10^{-4} m/s. Les essais géotechniques montrent que l'apport de matériaux fins à un matériau constitué de la fraction cailloux augmente la masse volumique du mélange avec une augmentation de 34% pour les mélanges binaires, 14% pour les mélanges ternaires. On note que l'indice des vides et la porosité sont fortement influencés par l'apport de compost. La CEC est elle aussi fortement corrélée au taux de compost sous l'hypothèse qu'il se transforme totalement en matière organique stable dans le sol, qui se situe pour mes mélanges entre un minimum de 10,41 et un maximum de 44,49. Le seuil des 20 unités de CEC semble dépassé dès que le taux de compost considéré comme MO atteint 20 %.

Les résultats des mélanges pour la RUP soulignent que le mélange binaire limon / compost montre une grande capacité de réserve avec une valeur de 51,90 mm et qu'il sera un très bon candidat pour l'horizon de surface. Les mélanges binaires et ternaires composés de ballast seront quant à eux de bons candidats pour l'horizon de subsurface et l'horizon profond, avec des valeurs respectives de 10,48 mm à 55,04 mm et de 20,96 mm à 55,04 mm.

L'indice de battance des mélanges réalisés à partir de brique en mélange binaire et ternaire montre que ceux-ci ont une tendance à être très battants. Les mélanges qui semblent être les moins battants sont ceux composés avec des scories, ils semblent être de bons candidats pour les horizons de surface qui sont les plus exposés aux pluies.

Chaque mélange pourra trouver une place dans une structure à plusieurs horizons et en fonction de l'utilisation souhaitée. Les estimations des résultats géotechniques (densité apparente, porosité, indice des vides) des mélanges restent incertaines car elles ont été construites sur la base d'un simple rapport entre les matériaux. Néanmoins elles prennent en compte le vide des matériaux caillouteux. Toutes les fonctions de pédotransfert qui dépendent de la densité apparente sont donc affectées par l'approximation faite sur la densité apparente. L'acquisition des valeurs obtenues dans le tableau 38 issues de fonctions de pédotransfert donne une vision agronomique des mélanges qui, couplée avec le tableau 37 de classification géotechnique des mélanges, me permet de faire ressortir les mélanges les plus prometteurs. Les mélanges réalisés à partir de scories seront de bons candidats pour les horizons d'écoulement de surface avec des coefficients d'infiltration compris entre 10^{-2} et 10^{-4} m/s, ils pourront aussi constituer des horizons de subsurface. Cependant, le type de couverture végétale devra se limiter à de la végétation herbacée ou de toundra car les valeurs de RU sont très faibles. Les mélanges à partir de limon et ballast répondent aussi aux critères de gestion des eaux pluviales, qu'ils soient des mélanges binaires ou des mélanges ternaires, avec des valeurs de 10^{-4} m/s et des valeurs de RU élevées. Ils pourront être candidats pour les horizons profonds et de subsurface et pourront être couplés avec des strates arbustives et arborescentes qui nécessitent des apports en eau importants. On note aussi que pour une réalisation à strate unique, notamment pour la plantation de gazon ou de végétation de type vivaces, le mélange limon / compost est adapté car il possède à la fois une grande RU et un taux de matière organique important, favorable à la bonne nutrition des plantes à fleurs.

À ce stade, je peux dire que mon travail s'inscrit dans une méthodologie globale de conception d'un technosol. Cependant, il est différent et original car la majorité des recherches est orientée vers la fonction de support de culture du technosol. Mon choix a été de définir le technosol comme un élément à part entière de gestion des eaux pluviales, sa fonction étant de permettre la réduction du ruissellement en jouant sur la capacité du sol à infiltrer l'eau. Là où la plupart des travaux définissent les horizons comme étant des horizons de croissance, horizon de développement et horizon hydrique, je me démarque par une définition différente de mes horizons, comme unité hydraulique, à savoir horizon de surface,

horizon de subsurface et horizon profond d'écoulement. Chaque horizon doit avoir des qualités intrinsèques lui permettant d'assurer la fonction de zone de transit et de stockage des eaux pluviales. Mes travaux apportent un concours supplémentaire à la réflexion globale sur les possibilités offertes par la création de technosols.

Conclusion

Au cours des dernières décennies, l'artificialisation des terres due à l'urbanisation et au développement des infrastructures a progressé deux fois plus rapidement que la population et s'accompagne de ce qu'il est convenu désormais d'appeler « l'imperméabilisation », terme d'urbaniste et non d'ingénieur. De toute évidence, cette tendance n'est pas soutenable à long terme. Cependant, résister à l'artificialisation des sols n'induit pas de stopper le développement économique ni de geler à tout jamais les usages actuels des terres. Il faut plutôt parvenir à une utilisation plus efficace et plus durable des ressources naturelles dont le sol est un élément essentiel. La France dispose de moyens juridiques et scientifiques pour atteindre cet objectif ou s'en approcher, notamment en affinant le suivi de l'artificialisation afin de mesurer plus précisément son évolution annuelle à l'échelle locale. L'idée d'un aménagement plus rationnel de l'espace par une approche intégrée fait son chemin par nécessité. Les outils techniques cités – pour mieux gérer les eaux pluviales et prévenir les risques d'inondation, rationaliser le choix parmi des types de chaussées et accroître la présence du végétal – apportent des solutions spécifiques au service des ingénieurs et durables en renforçant la coopération entre les acteurs des projets urbains et les usagers et riverains des espaces concernés. Dans le cadre de la réflexion nécessaire sur une meilleure gestion de l'eau, le projet de création de technosols au cœur de ce mémoire m'a conduit à travailler sur des agencements de sol agrégés en profils permettant une gestion de l'eau qui réponde soit à l'objectif d'infiltration et recharge de la nappe, soit à celui de constituer des stocks d'eau pour la végétation. À travers mon étude de conception de technosol, j'ai fait ressortir des indicateurs forts pour la création de technosols ayant pour service rendu la réduction du ruissellement. Ces indicateurs permettent de choisir judicieusement les variables à ajuster pour favoriser une infiltration rapide d'une partie des eaux de ruissellement vers les horizons drainants de subsurface ou créer un horizon de rétention mettant à disposition de l'eau pour les plantes. Avec cette approche menée du point de vue de la maîtrise d'ouvrage, on pourra travailler sur la maîtrise du ruissellement dans les zones urbaines classées inondables ou risquant de le devenir. La mise en place de planches tests en phase recherche et développement permettra de confirmer ou infirmer nos hypothèses sur les propriétés physiques et chimiques de chaque mélange et de valider l'approche présentée d'agencement des matériaux réalisés par ratio.

Perspectives

Le travail de recherche et développement se fera à travers une thèse dans le cadre d'un partenariat avec la société RICHARD, celle-ci mettant à ma disposition une plateforme dans ses locaux d'Orgeval (cf. annexe 23 : Poster SimHydro 2019). Je ferai des essais géotechniques sur les matériaux parents, puis des mélanges avec pour objectif de vérifier s'il est possible de retrouver les valeurs d'un mélange uniquement par un jeu de proportions entre les constituants. Si cela n'est pas vérifiable pour certains paramètres, on tentera de trouver des ajustements permettant d'en faire le calcul. Cette approche pourrait favoriser la valorisation des matériaux issus de terrassement ou de démolition (qui est devenue obligatoire depuis 2020) en phase avant-projet des projets d'aménagement urbain. Il reste à déterminer pour les donneurs d'ordres (maître d'ouvrage) et leurs équipes de maîtrise d'œuvre quelle valorisation ils pourront en faire en termes de technosols. Pour cela, l'anticipation est essentielle afin de pouvoir proposer une méthodologie de dimensionnement des ouvrages terreux en fonction de l'utilisation et des ressources disponibles.

Les essais à réaliser sur les planches d'essais de technosols incluront notamment :

- La portance et la compacité (densité apparente) du sol.
- Le partage entre réflexion et absorption du rayonnement atmosphérique à la surface du sol.
- Le partage entre infiltration et ruissellement, ce qui nécessitera la mesure fine de K_s , le coefficient de perméabilité de Darcy (donc à saturation du sol), et du profil de teneur en eau du sol.
- Le partage du carbone entre la matière organique du sol et le CO_2 atmosphérique.
- Des analyses physiques et chimiques du sol à des âges successifs.

Après cette première phase de caractérisation des technosols in situ, qui permettra une sélection des technosols prometteurs, nous réaliserons des mésocosmes⁵ dans une serre expérimentale du CNRS (à Saint-Pierre-lès-Nemours) où les conditions (P, T, humidité) sont contrôlées, grâce au soutien de chercheurs de l'équipe de l'IRD. Nous installerons des colonnes de technosols de 25 cm de diamètre, représentatives des sols que j'aurai testé sur la plateforme d'Orgeval. L'objectif de cette étude est de comprendre l'évolution de la matière organique en corrélation avec l'activité de la faune du sol et de la végétation dans nos prototypes de technosols.

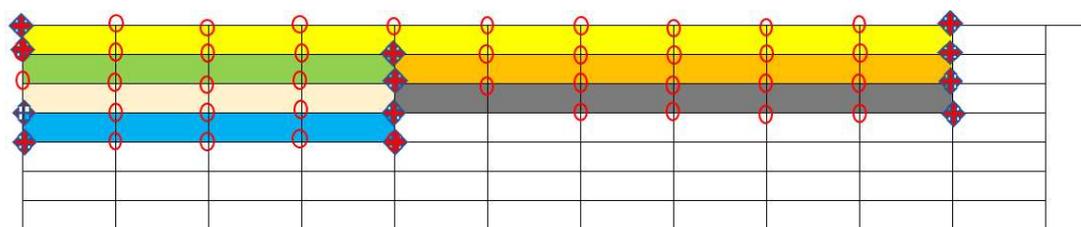
⁵ Un mésocosme est un *dispositif expérimental, instrumenté, confiné et contrôlé ou semi-contrôlé* permettant une variation des paramètres du milieu : sol, hygrométrie, température, teneur de l'air en CO_2 ou polluants...Il permet l'étude des réponses d'espèces dans un milieu (reconstitué) ou l'étude d'organismes soumis à des variations de l'environnement (Wikipedia, 2020).



Figure 73. Planche d'essais de la société RICHARD

Je rappelle que cette planche d'essais constitue le premier niveau d'essais pour l'ensemble des mélanges et qu'à l'issue, les formulations les plus prometteuses seront choisies pour réaliser des mésocosmes sur des colonnes de technosols sous serre expérimentale au centre du CNRS à Saint-Pierre-lès-Nemours.

La dimension rectangulaire est de 19 m x 14 m, soit une surface de 266 m². J'établirai un process d'échantillonnage pour l'ensemble de nos 26 formulations du tableau 25 et réaliserai des planches de 3,40 m² réparties comme suit : une planche d'1 m² qui demeurera intacte durant l'ensemble des travaux et une planche d'essais de 2,40 m² où les essais seront réalisés.



- Planches Binaires Hes / HeSb
- Planches Binaires HP
- Planches Ternaires HeS / HeSb
- Planches Ternaires HP
- Planches témoins matériaux parents
- Planches Témoins mélanges utilisés en aménagements paysagers
- Zone libre

Figure 74. Schéma de la disposition des planches d'essais

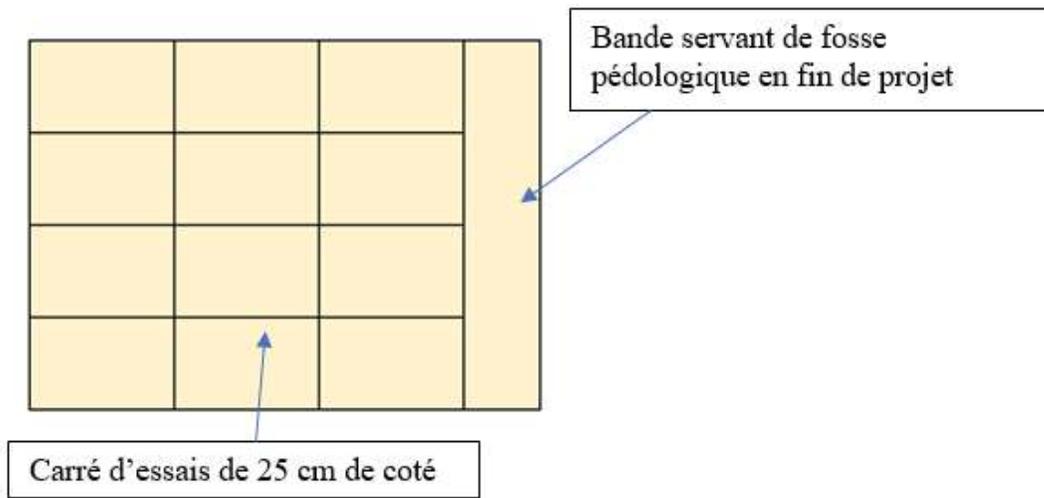


Figure 75. Schéma de principe d'une planche d'essais

Bibliographie

- Adindu, R., Igbokwe, K., Chigbu, T., & Ike, A. (2014). Kostiakov, Model parameters, Infiltration, Soil, Water, Irrigation. *American Journal of Environmental Engineering*, 6 p.
- AEE. (2010). Signaux de l'AEE 2010 la biodiversité, le changement climatique et vous. *Agence européenne pour l'environnement*, 33 p.
- NF X31-620-2 Qualité du sol—Prestations de services relatives aux sites et sols pollués. Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle, X 31-620-2 décembre 2018.
- Alba, D., Bigorgne, J., & Blancot, C. (2012, décembre). *Les îlots de chaleur urbains à Paris, cahier #1*. Document de travail, 40 p.
- Alba, D., Bigorgne, J., RICHARD, O., Senegas, G., Yassin, D., Bourlon, A.-M., Delahaye, C., & Servais, A. (2015, novembre). *Un Plan Local Energie pour la métropole du Grand Paris*. Document de travail, 116 p.
- Alligand, G., Hubert, S., Legendre, T., Millard, F., & Müller, A. (2018). *Guide d'aide à la définition des mesures ERC*. Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable. Guide, 134 p.
- Allinne, C. (2007). Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 13- n° 1, 67-84.
- Ancelin, O., Duranel, J., Duparque, A., Dersigny, C., & Fleutry, L. (2008). *Mémento_sols_et_matière_organique*. Agro-Transfert R&T et Chambres d'Agriculture de Picardie Chambre d'Agriculture de Picardie, 52 p.
- Annabi, M. (2005). *Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : Relation avec les caractéristiques de leur matière organique*. Thèse, INAPG (AgroParisTech), 237 p.
- Antrop, M. (2004). Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 67(1), 9-26.
- Arnaud, G., Battaglia, P., Bauer, T., Bellefleur, D., Berthier, E., Bruyelle, J.-C., Chastel, C., Cusenier, P., Guignard, J.-C., Joannis, C., Krommydas, C., Lahalle, D., Laplace, D., Le Nouveau, N., Lovera, M., Lyard, S., Martaud, M., Mauvais, F., Michaud, A.-C., ... Wittner, C. (2017). *Memento technique. Conception et dimensionnement des systèmes de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées*. ASTEE, 274 p.

- Arrouays, D., Bardy, M., Munier-Jolain, N., Gaunand, A., Colinet, L., (2014). Analyse Socio-économique des Impacts de la Recherche Publique Agronomique. *Système d'information sur les sols de France*. INRA département Environnement et Agronomie. Rapport de recherche, 14 p.
- Audric, T. (1973, décembre). Etude géologique et géotechnique des limons de plateau de la région Parisienne. Bulletin N°8 Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 49-59.
- Baize, D., Berrier, P., Billard, A., Branchu, P., Brunet, J., Collet, B., Demougeot-Renard, H., Douay, F., Droissart, A., Eychène, C., Faucheux, C., Hulot, C., Le Guern, C., Leprond, H., Philippe, P., Roussel, H., Saby, N., Sancho, L., & Sauvaget, B. (2018). *Guide pour la détermination des valeurs de fonds dans les sols – échelle d'un site*. Guide N° 1372C0052 ; Expertises, ADEME, 133 p.
- Baize, D., & Girard, M.-C. (2009). *Référentiel pédologique 2008* (Association française pour l'étude du sol). Livre, Editions Quae, 435p.
- Baize, D., & Paquereau, H. (1997). Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Etudes et gestion des sols*, 77-94.
- Baize, Denis. (2018). *Guide des analyses en pédologie : Édition revue et augmentée Ed. 3 -*. Éditions Quae, 339 p.
- Béchet, B., Bissonnais, Y., Ruas, A., Aguilera, A., André, M., Andrieu, H., Ay, S., Baumont, C., Barbe, E., Beaudet, L. V., Belton-Chevallier, L., Berthier, E., Billet, P., Bonin, O., Cavailles, J., Chancibault, K., Cohen, M., Coisnon, T., Colas, R., ... Desrousseaux, M. (2017). *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : Déterminants, impacts et leviers d'action*. Rapport d'expertise scientifique collective, INRA DEPE et IFSTTAR, 620 p.
- Bellec, P., Lavarde, P., Lefebvre, L., & Madignier, M.-L. (2015). *Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols* (CGEDD n° 010068-01, CGAAER n° 14135 ; p. 135).
- Berthier, E. (2018). *Interactions entre les aménagements urbains, la nappe superficielle et les conditions de rejets des eaux pluviales : Cas d'étude sur le futur campus urbain du Moulon* Rapport de recherche n°C16PV0147, Cerema et IFSTTAR, 139 p.
- Bertrand-Krajewski, J.-L. (2008). *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*. Livre, Éditions Lavoisier, 792 p.
- Blanc, C., Lefevre, F., Boissard, G., Scamps, M., Hazebrouck, B. (2012). Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement. Bureau des Recherches Géologiques et Minières, Rapport v4, BRGM/RP-60013-FR.

- Borie, G., Chambost, J., Castagnet, M., Bargues, R., Sirjean, L., Gaspard, M., Roudaut, J.-P., Vignaud, P., Colombini, H., Launay, F., Bour, L., Tancogne, M., Constant, N., Infray, C., Gauffier, A., Pior, J., Lormeau, I., & Demade-Pellorce, L. (2011). *Guide des produits organiques utilisables en Languedoc-Roussillon—Tome 1*. Guide de travail, Agricultures et territoires, 17-28 p.
- Bourrier, R., Satin, M., & Selmi, B. (2010). *Guide technique de l'assainissement*. Livre, Éditions le Moniteur, 775 p.
- Bourrier, R., Selmi, B., Lattuca, C., Bouteveille, A., Bouteveille, U., Maraï, R., Vilmain, S., & Lesueur, K. (2012). *Pratique des VRD et aménagement urbain : Voirie et réseaux durables*. Editions, le Moniteur, 973 p.
- Bruand, A., Duval, O., & Cousin, I. (2006). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 323-334 p.
- Buondonno, A., Capra, G. F., Di Palma, D., Grilli, E., & Vigliotti, R.-C. (2018). Pedotechnologies for the Environmental Reclamation of limestone quarries. A protocol proposal. *Land Use Policy*, 230-244 p.
- Calvet, R., Chenu, C., & Houot, S. (2015). *Les matières organiques des sols*. Livre, Éditions France Agricole, 304 p.
- Cannavo, P., Guénon, R., Galopin, G., & Vidal-Beaudet, L. (2018). *Technosols made with various urban wastes showed contrasted performance for tree development during a 3-year experiment*. *Environmental Earth Sciences* 77 : 650, 13 p.
- Capinov. (2020a). *Analyse de sol—Laboratoire d'agronomie*. Document de travail, 7 p.
- Castro, R., Geipel, F., Andi, G., Grumbach, A., Klouche, D., Lion, Y., Maas, W., Nouvel, J., Duthilleul, J.-M., Cantal-Dupart, M., Rogers, R., Secchi, B., & Vigano, P. (2010). *Esquisse pour un projet Métropolitain*. Document, Atelier International du Grand Paris, 19 p.
- Chamoux, C. (2013). *Techniques alternatives en assainissement pluvial : De la théorie à la pratique*, thèse SOPHIA ANTIPOLIS, Nice, 503 p.
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils : A review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), 401-434.
- Charmes, E. (2013). L'artificialisation est-elle vraiment un problème quantitatif? *Etudes foncières*, Compagnie d'édition foncière, 23-28 p.
- Chéry, P., Lee, A., Commagnac, L., Thomas-Chery, A.-L., Jalabert, S., & Slak, M.-F. (2014). Impact de l'artificialisation sur les ressources en sol et les milieux en France métropolitaine. Evaluation

- selon trois sources d'informations indépendantes. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 26 p.
- Chocat, B., & Savary, P. (2014). *Procédures d'autorisation et de déclaration des projets d'aménagement au titre du code de l'environnement rubrique 2.1.5.0 : Rejets d'eaux pluviales Conditions pluviométriques locales*. Fiche instructeur, Cerema, 16 p.
- Chossat, J.-C. (2005). *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols : Choix des méthodes*. Livre, Editions Tec et Doc - Lavoisier, Hermès - Lavoisier, 720 p.
- Cojean, R. (1975). *Contribution à une cartographie géotechnique pour l'aménagement régional : Plateaux de Trappes-Saclay, vallées de la Bièvre et de l'Yvette*. Thèse, Paris VI, Paris, 63 p.
- Cojean, R., Poisson, A., & Prevost, F. (1982). Aspects de la géologie de l'Ile-de-France Sud. *Cahiers de l'Université Paris-Sud (XI)*, 3. Cahiers de l'Université Paris-Sud (XI), Document de travail, 269-285 p.
- Collaud, G. (2014). Fertilité à long terme. Ufa-fertilite-humus. *Revue UFA*, 4 p.
- Colsaet, A. (2019). *Artificialisation des sols : Quelles avancées politiques pour quels résultats ? Développement durable et relations internationales*. *Revue SciencesPo*. 4 p.
- Comité interministériel biodiversité. (2018). *Plan-biodiversité Biodiversité tous vivants*. Plan, Ministère de la transition écologique et solidaire, Paris, 27 p.
- Coppens, M., Jayr, E., Burre-Espagnou, M., & Neveux, G. (2016). *Identification des freins et des leviers au réemploi de produits et matériaux de construction*. Rapport final n°1506C0024, ADEME, 149 p.
- Cortet, J. (2013). *Biodiversité et fonctionnement d'un technosol construit utilisé dans la restauration de friches industrielles (biotechnosol)*. Rapport final n° S.6-0006653, 16 p.
- Cosandey, C. (1995). La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? *Annales de géographie*, 104(581), 7-25 p.
- Coussy, S., Hulot, C., & Billard, A. (2017). *Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement*. Guide, MTES, Direction générale de la prévention des risques, service des risques technologiques, bureau du sol et du sous-sol, 62 p.
- Damas, O., & Coulon, A. (2016). *Créer des sols fertiles : Du déchet à la végétalisation urbaine*. Livre, Éditions « Le Moniteur », 327 p.
- Darboux, F. (1999). *Modélisations numérique et expérimentale du ruissellement. Effet de la rugosité sur les distances de transfert*. Thèse, RENNES 1, Rennes, 161 p.

- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon : Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau... V. Dalmont. VII-647 p.
- Daudin, K. (2019). *Analyse du contexte territorial et caractérisation de la conductivité hydraulique des sols de l'agglomération de Montpellier*. Mémoire de thèse professionnelle, AgroParisTech-ENGREF, Montpellier, 102 p.
- Deeb, M. (2015). Influence des plantes, des vers de terre et de la matière organique sur la structure de Technosols construits. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 192 p.
- Delaunois, A., Boucher, G., & Plence, A. (2014). *Caractérisation de la réserve en eau des sols à partir des sondages pédologiques à la tarière*. Document de travail, Chambre d'Agriculture du Tarn, 5 p.
- DGPR. (2017). *Modalités d'application de la nomenclature des installations classées pour le secteur de la gestion des déchets*. Annales des Mines N°91, Institut des Mines Télécom, 94 p.
- Dress, P., & Rafa, A. (2012). *Les matériaux pour le Grand Paris—DRIEE Ile-de-France*. DRIEE. Document, Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie, 2 p.
- Duchaufour, P., Faivre, P., & Poulencard, J. (2018). *Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement Ed. 7*. Livre, Éditions Dunod, 450 p.
- Eauca. (2010). *Étude de localisation des haies et autres éléments du territoire qui favorisent la rétention des eaux de ruissellement* (p. 66). SMIVAL. Étude, Syndicat Mixte Interdépartemental de la Vallée de la Lèze, 65 p.
- Eono, D. & Fouché, O. (2019). Soil sealing hazards to be accounted in urban planning projects. Poster presentation, 5th int. conf. Simhydro, 12-14 June 2019, Sophia Antipolis, France.
- FAO. (2014). *World reference base for soil resources 2014 : International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Classification internationale des sols, FAO, 192 p.
- Fini, A., Frangi, P., Mori, J., Donzelli, D., & Ferrini, F. (2017). Nature based solutions to mitigate soil sealing in urban areas : Results from a 4-year study comparing permeable, porous, and impermeable pavements. *Environmental Research*, 156, 443-454 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (Éd.). (2006). *World reference base for soil resources, 2006 : A framework for international classification, correlation, and communication* (2006 ed). Food and Agriculture Organization of the United Nations, 128 p.
- Fosse, J., Belaunde, J., Dégremont, M., & Grémillet, A. (2019). *Objectif « zéro artificialisation nette » : Quels leviers pour protéger les sols ?* Rapport, France stratégie, 51 p.

- Gaiffe, M., Duquet, B., Tavant, H., Tavant, Y., & Bruckert, S. (1984). Stabilité biologique et comportement physique d'un complexe argilo-humique placé dans différentes conditions de saturation en calcium ou en potassium. *Plant and Soil*, 77(2), 271-284 p.
- García, P., & Pérez, E. (2016). Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index : A case study in Madrid (Spain). *Geoderma*, 268, 100-107 p.
- Giordano. (1994, janvier). *L'érosion en forêt méditerranéenne*. Article de revue, Forêt Méditerranéenne (n°1), 12-21 p.
- Girard, M.-C., Schwartz, C., & Jabiol, B. (2011). *Etude des sols. Description, cartographie, utilisation*. Éditions Dunod, 416 p.
- Grard, B. (2017). *Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : Services écosystémiques fournis et évolution*, Thèse AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 301 p.
- Gras, R. (2006). *Sols caillouteux et production végétale Ed. 1*. Livre, Éditions INRA, 180 p.
- Guillon, A., Roux, C., Bertrand, C., & Pierlot, D. (2010). *Cartographie de l'infiltrabilité à l'échelle du Département des Hauts-de-Seine (170km²) pour l'aide au choix d'une technique de maîtrise des eaux pluviales à la source*, 9 p.
- Hamel, P., Daly, E., & Fletcher, T. D. (2013). Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow : A review. *Journal of Hydrology*, 485, 201-211 p.
- Horton, R.E. (1933). "The role of infiltration in the hydrological cycle." *Trans. American Geophys. Union*, 14: 446-460.
- Lebart, L., Piron, M., & Morineau, A. (2006). *Statistique exploratoire multidimensionnelle : Visualisations et interférences en fouille de données* (4e éd, Vol. 1-1). Livre, Éditions Dunod, 464 p.
- Marseille, F., & Denot, A. (2019). *Mobilité et biodisponibilité des contaminants présents dans les sols aux abords des infrastructures et impact sur la santé : Utilisation de CALTOX pour la dispersion multimédia*. Rapport, Certu et Sétra, 81 p.
- Merot, Ph., Gascuel-Oudou, C., Walter, C., Zhang, X., & Molenat, J. (1999). Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface. *Revue des sciences de l'eau*, 12(1), 23-44 p.
- Miller, F. P., & Wolf, D. C. (1975). *Renovation of sewage effluents by the soil. Presented at the 2nd National Conference of Individual onsite wastewater systems, National Sanitation Foundation and USEPA*, USA 87-102 p.
- Miquel, G. (2003). *La qualité de l'eau et de l'assainissement en France*. Rapport n° 705 et n° 215, Assemblée Nationale et SÉNAT, 293 p.

- Monbet, V. (2020). *Chapitre 4 Données manquantes*. Cours, Université Rennes 1, V. MONBET. 24-27 p.
- Muller, F. (2016). *Fiche technique épandage*. Document, ADEME, 15 p.
- Muller, T., Marié, X., Rossignol, J. P., Grosbellet, C., & Ruaud, M. (2012). *Règles professionnelles : Travaux de sols, supports de paysage*. Règles professionnelles P.C.1-R0, UNEP / AITF / FFP / HORTIS, 57 p.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Livre, Éditions Eyrolles 348 p.
- Nagase, A. & Dunnett, N. (2011). The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning* 103 : 230– 236.
- Nasri, B. (2013). *Évaluation des fonctions de pédotransfert d'un sol hétérogène, milieu récepteur d'eau usée traitée, sur un site pilote dédié*. Thèse, Ecole des Ponts ParisTech, Paris-est, 367 p.
- Ouvry, J. F., Richet, J.-B., Bricard, O., Lheritau, M., Bouzid, M., & Saunier, M. (2012). *Fascines & haies. Pour réduire les effets du ruissellement érosif*, 69 p.
- Paquier, F., Daloz, A., Billy, C., & Cygler, C. (2019). Agro-écologie et Trame verte et bleue : Des synergies à valoriser | Trame verte et bleue. *Agence française pour la biodiversité*, 12 p.
- Philippe, S., Noiret, S., & Gay, E. (2012). *Repères de la trame verte et bleue... à sa traduction dans les schéma de Cohérence Territoriale et Plans Locaux d'Urbanisme*. Document, DREAL Lorraine, 38 p.
- Pinson, S., & Bault, V. (2019). *Profondeur des entités hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole - Projet PHOEBUS*. Rapport final n°RP-68599-FR, BRGM, 81 p.
- Plumelle, C., Cui, Y. J., Fabre, D., Fouché, O., Hirschauer, A., & Tabbagh, A. (2017). *Théorie et pratique de la géotechnique – Tome 1*. Livre, Éd. Le Moniteur, 2^e édition, 998 p.
- Ramier, D., Berthier, E., Gallis, D., Dussuchale, A., Pinta, P., Versini, P.-A., & De Gouvello, B. (2013, décembre). Analyse du fonctionnement hydrologique de toitures végétalisées : Observations et modélisation. *Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain*, 11 p.
- Rees, F., Dagois, R., Derrien, D., Fiorelli, J.-L., Watteau, F., Morel, J. L., Schwartz, C., Simonnot, M.-O., & Séré, G. (2019). Storage of carbon in constructed technosols : In situ monitoring over a decade. *Geoderma*, 53 p.
- Région Île de France (2015). *Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics*. PREDEC, Région Ile-de-France, 256 p.

- Région Ile de France, & ADEME. (2012). *Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain*. Guide, ADEME, 54 p.
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Géoscience*, 336(11), 991-998 p.
- Rodier, J. (1966). Méthodes utilisées pour le calcul du coefficient de ruissellement sur les bassins représentatifs et expérimentaux. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 3(4), 27-38 p.
- Rodriguez, F., Mosini, M. L., Andrieu, H., & Morena, F. (2010). Un modèle hydrologique distribué pour les bassins versants urbains. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 277, 43-63 p.
- Rokia, S. (2014). *Contribution à la modélisation du processus d'agrégation et du transfert d'éléments nutritifs dans des Technosols construits à partir de déchets*. Thèse, Université de Lorraine, Lorraine, 291 p.
- Saporta, G., & Keita, N. N. (2009). *Principal Component Analysis : Application to Statistical Process Control*, 1-23p.
- Schad, P., van Huyssteen, C., Michéli, E., & Vargas, R. (2014). *Classification des sols | Portail d'information sur les sols | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture* (ISSN 1020-430X). Document, food and agriculture organization of the united nations, 203 p.
- Sédillot, B., & Poulette, B. (2014). Utilisation du territoire en France métropolitaine. *AGRESTE PRIMEUR, N°313*, 8 p.
- Séré, G. (2007). *Fonctionnement et évolution pédogénétiques de Technosols issus d'un procédé de construction de sol*. Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, Lorraine, 227 p.
- Séré, G. (2018). *Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires Laboratoire Sols et Environnement, Lorraine, 119 p.
- Snoussi, G., & Fouché, O. (2019). *Compte rendu Analyse Limon de Saclay*. Compte rendu n°V2 08-12-2019, CNAM, 14 p.
- Snoussi, G., Yang, Y., Fouché, O., & Hamdi, E. (2019). *Recycling of tbm-excavated materials of the paris basin into technosol : A numerical assessment of its hydrological transfer functions*, 13 p.
- Société du Grand Paris. (2015). *Ligne 15 est dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique étude d'impact annexe : Schéma directeur d'évacuation des déblais dispositifs opérationnels pour la ligne 15 est Saint-Denis Pleyel—Champigny centre (ligne orange)*. Etude d'impact pièce G.4.2, Société du Grand Paris, 94 p.

- Société du Grand Paris. (2017). *Schéma de gestion et de valorisation des déblais*. Document, Société du Grand Paris, 41 p.
- Sol Paysage. (2013a). Synthèse thématique—Sols de la CIL. *Plante et Cité*, 32 p.
- Sol Paysage. (2013b). Synthèse thématique—Sols de la CIL. *Plante et Cité*, 32 p.
- Terrien, B. (2013). *Etude d'impact de la ZAC du Quartier de l'Ecole Polytechnique*, 233 p.
- Thiers, S., & Peuportier, B. (2007, avril). *Modélisation thermique d'un échangeur air-sol pour le rafraîchissement de bâtiment*. Journée thématique SFT-IBPSA Froid solaire et confort d'été, Aix-les-Bains, 8 p.
- Valérian, F., Couveinhes, P., Amouyel, P., Bourrelier, P.-H., Campana, L., M., Dron, D., Goellner, J., Lavergne, R., Saint-Raymond, P., Sauvalle, B., Serris, J., & Tutenuit, C. (2018). Responsabilité et environnement Sols en danger : Réduire l'artificialisation. *Annales des Mines*, 91, 97 p.
- Vallin, V., Dumont, E., Petillon, G., Gérolin, A., Degrave, M., Le Nouveau, N., Ferrier, V., & Borst, W. (2016, juin). *Cartographier l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales : L'expérience de 6 collectivités en France*, 10 p.
- Vauthier, Q. (2010). *Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne*. Rapport de stage, Nancy-Université, Nancy, 54 p.
- Vernoux, J. F., Barbier, J., & Seguin, J. J. (1999). *Etude hydrogéologique du plateau de Saclay*. Rapport N° R40840, BRGM, 78 p.
- Véronique Auzet. (1987). *L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement*. Annales de Géographie, Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques, 530-556 p.
- Vidal-Beaudet, L. (2018). Du déchet au Technosol fertile : L'approche circulaire du programme français de recherche SITERRE. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 31*.
- Viollet, P.-L. (2004). *L'hydraulique dans les civilisations anciennes : 5000 ans d'histoire*. Éditions Presses des Ponts, 384 p.
- Vizier, J. F. (1971). *Etude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes*. ORSTOM, 374-397 p.
- Wicherek, S. (1986). Ruissellement, érosion sur les versants de la France des plaines et des collines. Exemple : Cessières (02 Aisne). *Hommes et Terres du Nord*, 4(1), 254-261 p.
- Zhang, Z., Ward, A., & Keller, J. (2011). Determining the Porosity and Saturated Hydraulic Conductivity of Binary Mixtures. *Pacific Northwest National Laboratory*, 10, 31 p.
- Zucca, M. (2020). La séquence ERC au service du ZAN ? *L'Institut Paris Région, Atelier #4*, 30 p.

Réglementation

- Code de l'environnement, Article Annexe à l'article R122-2, Pub. L. No. Décret n°2019-190, Annexe à l'article R122-2 Code de l'environnement (2019).
- Code de l'environnement, Article L122-3, Pub. L. No. 2018-148 art.2 (V), L122-3 Code de l'environnement (2018).
- Code de l'environnement, Article L211-7, Pub. L. No. 2019-1461, L211-7 Code de l'environnement (2019).
- Code de l'environnement, Article L371-3, L371-3 Code de l'environnement (2016).
- Code de l'environnement, Article L541-1, Pub. L. No. 2020-105, L541-1 Code de l'environnement (2020).
- Code de l'environnement, Article R214-1, Pub. L. No. Décret n°2017-81, R214-1 Code de l'environnement (2017).
- Code de l'environnement, Article R371-16, R371-16 Code de l'environnement (2016).
- Code général des collectivités territoriales, Article L2224-10, Pub. L. No. Loi n°2010-788, L2224-10 Code général des collectivités territoriales (2010).
- Gouv. (2020). *BD ORTHO | Trame verte et bleue*. Rapport, Direction de l'eau et de la biodiversité, sous-direction des espaces naturels, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 54 p.
- L'Assemblée nationale, le Sénat et le Président de la République : loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques. Journal officiel de la République Française, 0303 du 31 décembre 2006.
- L'Assemblée nationale, le Sénat et le Président de la République : loi n° 2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris. Journal officiel de la République Française, 0128 du 05 juin 2010.
- L'Assemblée nationale, le Sénat et le Président de la République : loi n° 2014-1170 du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt. Journal officiel de la République Française, 0238 du 14 octobre 2014.
- L'Assemblée nationale, le Sénat et le Président de la République : loi NOTRE n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République (1). Journal officiel de la République Française, 0182 du 8 août 2015.
- L'Assemblée nationale, le Sénat et le Président de la République : loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, Pub. L. No. Ordonnance n°2015-1174, L151-1 à L151-4 2015-992. Journal officiel de la République Française, 0189 du 18 août 2015.

Le Ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et dans les installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées. Journal officiel de la République Française, 0289 du 14 décembre 2014.

Le Ministre de l'intérieur, le ministre de l'agriculture et de la pêche, la ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, le ministre de la fonction publique, de la réforme de l'État et de la décentralisation et le secrétaire d'État à la santé. Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. Journal officiel de la République Française, 26 du 31 janvier 1998.

Le Parlement européen et le conseil de l'union européenne, Directive n° 2006/118/CE du 12/12/06 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration. Journal officiel de la L'Union européenne, L372/19 du 27 décembre 2006.

Le Président de la République, Sur le rapport du Premier ministre et de la ministre du logement, de l'égalité des territoires et de la ruralité. Ordonnance n°2015-1174 du 23 septembre 2015. Journal officiel de la République Française, 0221 du 24 septembre 2015. Code de l'urbanisme Legifrance Plan Local d'Urbanisme, Urbanisme (2015).

Lille Métropole, *Eau-assainissement annexe à l'article 4 de chaque règlement de zone*. (2004). Article, Lille Métropole Communauté urbaine, 10 p.

Ministère de la recherche et de la technologie, Ministère des départements d'outre-mer, Ministère de la culture et de la communication, Ministère des relations avec le parlement, Ministère de l'économie, finances et budget, Ministère du logement et des transports et de la mer, Ministère des affaires étrangères, Ministère de l'éducation nationale. Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, Pub. L. No. 92-3. Journal officiel de la République Française, 3 du 4 janvier 1992.

Ministère de l'écologie, du transport durable et de l'énergie, Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO5. Journal officiel de la République Française, 0190, 19 août 2015.

Ministère de l'économie et des finances, Ministère de la défense, Ministère de la coopération, Ministère de l'équipement, Ministère de la santé, Ministère de l'industrie et de la recherche, Secrétariat

d'état aux départements et territoires d'outre-mer, Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature. Journal officiel de la République Française, 13 juillet 1976.

Ministère d'état chargé des affaires culturelles, Ministère de la justice, Ministère des affaires étrangères, Ministère de l'intérieur, Ministère des armées, Ministère de l'éducation nationale, Ministère des travaux publics et des transports, Ministère de l'industrie, Ministère de l'agriculture, Ministère de la construction, Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution. Journal officiel de la République Française, 0295, 18 décembre 1964.

Parlement européen et Conseil européen proposition de directive définissant un cadre pour la protection des sols modifiant la directive 2004/35/CE.

Web-références

AFES. (2017). *Sols et Définitions – AFES – Association Française pour l'Etude du Sol*. Association Français pour l'étude du sol (consulté le 8 août 2019). Disponible en ligne : <https://www.afes.fr/sols-et-definitions/>

Baize, D. (2010, novembre 2). *Fonction de pédotransfert : Les Mots de l'agronomie*. Les mots de l'agronomie. Histoire et critique (consulté le 7 février 2021). Disponible en ligne : https://loexplor.istex.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Fonction_de_p%C3%A9dotransfert

Berté, C. (2020, avril 30). *Peut-on compter sur la séquence « Éviter, réduire, compenser » pour atteindre le zéro artificialisation nette ?* (consultation le 27 juin 2020). L'Institut Paris Région. Disponible en ligne : <https://www.institutparisregion.fr/environnement/zero-artificialisation-nette-en-ile-de-france/peut-on-compter-sur-la-sequence-eviter-reduire-compenser-pour-atteindre-le-zero-artificialisation-nette.html>

Bertucci, A.-E. (2020, septembre 25). *Entretien avec RICHARD Sennett, sociologue : « une ville ouverte semble davantage capable de réagir à l'imprévisible »* (consultation le 7 décembre 2020). Le Moniteur. Disponible en ligne : <https://www.amc-archi.com/article/entretien-avec-richard-sennett-sociologue-une-ville-ouverte-semble-davantage-capable-de-reagir-a-l-imprevisible,12933>

Bigard, C. (2019, juin). *« Éviter, Réduire, Compenser » : Trois clés pour limiter l'artificialisation des terres* (consultation le 30 juin 2019). Fondation pour la recherche sur la biodiversité. Disponible en ligne : <https://www.fondationbiodiversite.fr/eviter-reduire-compenser-trois-cles-pour-limiter-lartificialisation-des-terres/>

- Biosca, L. (2019, avril 29). *Où en est le Grand Paris, 10 ans après le discours fondateur de Nicolas Sarkozy ?* (consultation le 14 juin 2020). CNEWS. Disponible en ligne : <https://www.cnews.fr/france/2019-04-29/ou-en-est-le-grand-paris-10-ans-apres-le-discours-fondateur-de-nicolas-sarkozy>
- Capinov. (2020b). *Cahier-agronomie* (consultation le 30 août 2020). Capinov. Disponible en ligne : <https://www.capinov.fr/analyse-de-sol-laboratoire-php.php>
- CAUE, L. C. (2020). *Le calcaire de Beauce* (consultation le 19 janvier 2020). CAUE Loir-et-Cher. Disponible en ligne : http://www.atlasdespaysages.caue41.fr/page1.php?id_chapitre=133
- Cerema. (2019, octobre 17). *L'occupation du sol à la loupe avec l'OCS GE* (consultation le 5 juillet 2020). Cerema. Disponible en ligne : <http://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/newsletters/signature/signature-69-artificialisation-sols-sa-mesure/occupation-du-sol-loupe-ocs-ge>
- Cerema. (2020, juin 9). *Le schéma de cohérence territoriale* (consultation le 27 juin 2020). Cerema. Disponible en ligne : <http://outil2amenagement.cerema.fr/le-schema-de-coherence-territoriale-scot-r402.html>
- EPA Paris-Saclay. (2020). (consultation le 21 octobre 2020). *Wikipédia*. Disponible en ligne : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89tablissement_public_d%27am%C3%A9nagement_Paris-Saclay&oldid=175774114
- Fashahi, M. (2018, août 6). Une métropole en crise Ép. 2/4 Le Grand Paris (N° 2). In *Le Grand Paris -4 épisodes*. (consultation le 14 juin 2020). France Culture. Disponible en ligne : <https://www.franceculture.fr/emissions/lsd-la-serie-documentaire/le-grand-paris-24-une-metropole-en-crise>
- Gis Sol. (2020). *Réserve utile en eau des sols* (consultation le 31 décembre 2020). Gissol. Disponible en ligne : <https://www.gissol.fr/thematiques/reserve-utile-en-eau-des-sols-18>
- Guidi, C. (2020, septembre 17). *La lutte contre l'artificialisation des sols s'oppose-t-elle à la construction ?* (consultation le 17 septembre 2020). Politique du logement.com. Disponible en ligne : <https://politiquedulogement.com/2020/09/la-lutte-contre-lartificialisation-des-sols-soppose-t-elle-a-la-construction/>
- Observatoire Régional Eau et Milieux Aquatiques. (2014, décembre 8). *Un littoral français bétonné et artificialisé* (consultation le 08 décembre 2014). Observatoire Régional Eau et Milieux Aquatiques en PACA. Disponible en ligne : <http://www.observatoire-eau-paca.org/environnement/bla-mediterranee-b/un-littoral-franaais-betonne-et-artificialise~587.html>

- Perrono, P. (1999). *ETM dans les sols*. Les micropolluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduelles urbaines (consultation le 08 janvier 2020). Perrono Patrick. Disponible en ligne : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/ducc/perrono/perrono.htm>
- Toriel, M. (2016, juin). *Réemploi systématique des déblais de chantier des espaces publics* | (consultation le 14 décembre 2019). Ademe. Disponible en ligne : <https://www.optigede.ademe.fr/fiche/reemploi-systematique-des-deblais-de-chantier-des-espaces-publics>
- Universalis, E. (George). *Définition de l'urbanisme* (consultation le 28 juin 2020). *Encyclopædia Universalis*. Disponible en ligne : <https://www.universalis.fr/dictionnaire/urbanisme/>
- Wikhydro. (2014, juin 30). *Écoulements souterrains* (consultation le 12 décembre 2020). Wikhydro. Disponible en ligne : http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Wikigeotech:Ecoulements_souterrains
- Wiki Auréa. (2016, octobre 4). *La Capacité d'Échange en Cations, Wiki Auréa* (consultation le 30 août 2020). Wiki Auréa. Disponible en ligne : https://wiki.aurea.eu/index.php/La_Capacit%C3%A9_d%E2%80%99%C3%89change_en_Cations
- Wikipédia. (2019). Taux de saturation du sol (consultation le 07 décembre 2020). In *Wikipédia*. Disponible en ligne : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Taux_de_saturation_du_sol&oldid=161163295
- Wikipedia. (2020, mars). *Mésocosme—Wikipédia* (consultation le 29 février 2020). Wikipedia. Disponible en ligne : <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9socosme>
- Xanthoulis, D. (s. d.). *Cours de Physique du Sol*. Consulté 27 décembre 2020, à l'adresse <https://fr.scribd.com/document/129794120/Xanthoulis-Physique-du-sol-pdf>

ANNEXES

Annexe 1. Principales procédures du code de l'environnement pour lesquelles la séquence ERC s'applique (Alligand et al., 2018)

Procédures	Références réglementaires du code de l'environnement
Évaluation environnementale (plans programmes)	L.122-4 et L.122-6 (contenu de l'évaluation environnementale) R.122-19 et R.122-20 (contenu du rapport environnemental)
Évaluation environnementale (projets) - Études d'impact	L.122-1 et L.122-3 (contenu de l'étude d'impact) R.122-4 et R.122-5 (contenu de l'étude d'impact)
Autorisation environnementale	L.181-1 et L.181-2
Autorisation, déclaration ou enregistrement au titre des « ICPE »	L.512-1, L.512-7 ou L.512-8
Autorisation ou déclaration au titre de la loi sur l'eau	L.214-3 et R.214-1 R.214-6 (autorisation) R.214-32 (déclaration, contenu du dossier)
Évaluation des incidences « Natura 2000 »	L.414-4 R.414-19 et R.414-20 R.414-23 (contenu du dossier)
Déroptions « espèces protégées »	L.411-2 4°

Annexe 2. Plan biodiversité

Objectif : Limiter la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers pour atteindre l'objectif de zéro artificialisation nette.

- Action 6 Nous procéderons à une évaluation de l'ensemble des mesures existantes pour lutter contre l'artificialisation et des difficultés rencontrées par les élus locaux dans leur application.
- Action 7 Nous publierons, tous les ans, un état des lieux de la consommation d'espaces et mettrons à la disposition des territoires et des citoyens des données transparentes et comparables à toutes les échelles territoriales.
- Action 8 Nous soutiendrons l'inscription dans la loi pour le logement, l'aménagement et le numérique (ELAN) de l'obligation pour les collectivités de lutter contre l'étalement urbain et de favoriser la densification.
- Action 9 Nous donnerons instruction aux préfets de vérifier systématiquement l'application des mesures de lutte contre l'étalement urbain et de rendre régulièrement compte de leurs actions en ce domaine.
- Action 10 Nous définirons, en concertation avec les parties prenantes, l'horizon temporel à retenir pour atteindre l'objectif « zéro artificialisation nette » et la trajectoire pour y parvenir progressivement. Les collectivités, à l'occasion du renouvellement de leurs documents d'urbanisme, devront se fixer un objectif de maîtrise ou de réduction de l'artificialisation des sols compatible avec la trajectoire définie au niveau national, tout en tenant compte des spécificités locales.
- Action 11 Nous soutiendrons, d'ici 2020, 10 projets innovants ou démonstrateurs en matière de désartificialisation ou renaturation de sites dégradés ou fortement artificialisés.
- Action 12 Nous moderniserons le cadre réglementaire et la gouvernance relatifs à l'aménagement commercial dans l'objectif de limiter l'artificialisation des sols. Par ailleurs, nous accorderons au préfet de département la possibilité de suspendre les projets d'aménagement commercial qui seraient susceptibles de compromettre les opérations de revitalisation des centres-villes couvertes par une convention entre l'État et les collectivités concernées. Les commerces qui s'implantent dans ces centres-villes seront exonérés de demande d'autorisation. Enfin, nous obligerons toute construction de

nouveau parking à être perméable afin de favoriser l'infiltration des eaux dans le sol dans le but de lutter contre les inondations.

- Action 13 Parallèlement, un groupe de travail partenarial sera constitué pour faire des propositions (instruments économiques, mesures réglementaires ou autres) pour favoriser le recyclage urbain, mieux intégrer les enjeux de préservation des espaces naturels et agricoles dans les politiques et documents d'urbanisme. Ce groupe pourra examiner l'opportunité d'étendre l'approche « éviter, réduire, compenser » les impacts sur l'environnement à l'ensemble des projets d'aménagement commercial et logistique. Il sera appuyé par le Comité pour l'économie verte pour identifier des instruments économiques capables de freiner fortement la consommation d'espace non artificialisés et inciter à la densification des constructions.

Axe 3 : Protéger et restaurer la nature dans toutes ses composantes

- Action 48 Nous mettrons en place des mesures visant la conservation physique des sols (lutte contre l'érosion et le tassement), mais aussi le maintien et la restauration de leur qualité, par exemple via le déploiement d'un plan d'actions impliquant l'ensemble des acteurs concernés. • Pour la prévention de l'érosion : nous produirons un document descriptif des processus d'érosion, proposant des solutions adaptables aux contextes (par exemple, aide à l'observation des types d'érosion, aide à l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion, aide à l'identification de solutions de prévention de l'érosion). • Pour la prévention du tassement des sols : nous diffuserons des documents existants relatifs au tassement des sols forestiers, proposant des solutions de prévention adaptables aux contextes. Afin de favoriser l'utilisation de machines certifiées, nous ferons la promotion du label éco-épandage (certification des machines d'épandage comprenant des critères relatifs au tassement des sols) auprès des agriculteurs, coopératives d'utilisation du matériel agricoles et entreprises et nous inscrirons ce label comme critère prioritaire pour l'aide à l'investissement en matériel agricole dans le Grand Plan d'investissement. • Pour le maintien de la qualité : nous porterons des actions de normalisation et de certifications ayant une portée sur le maintien de la qualité des sols.
- Action 50 Nous encouragerons la recherche sur la biodiversité des sols afin d'améliorer, sans recours à l'engrais, les capacités du sol à accompagner le développement des plantes cultivées et à réduire les adventices.
(Comité interministériel biodiversité, 2018)

Annexe 3. Principe de réduction des écoulements superficiels par infiltration

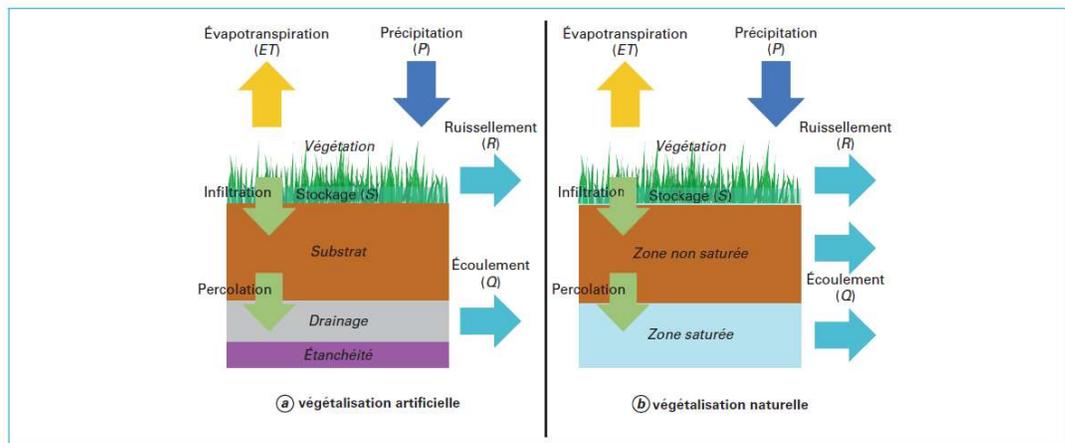


Figure 2 - Échanges d'eau dans le système sol/atmosphère

Annexe 4. Code de l'environnement Installations classées pour la protection de l'environnement

Concernant les plateformes hors site de valorisation de terres excavées

Elles relèvent de la réglementation sur les ICPE (régime de l'autorisation, de l'enregistrement ou de la déclaration définis dans le code de l'environnement), notamment au titre des rubriques suivantes, en fonction du type de plateforme exploitée :

2515 : Broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes.

2517 : Station de transit de produits minéraux ou de déchets non dangereux inertes autres que ceux visés par d'autres rubriques.

2716 : Installation de transit, regroupement ou tri de déchets non dangereux non inertes à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2710, 2711, 2712, 2713, 2714, 2715 et 2719.

2718 : Installation de transit, regroupement ou tri de déchets dangereux ou de déchets contenant les substances dangereuses ou préparations dangereuses mentionnées à l'article R. 511-10 du code de l'environnement, à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2710, 2711, 2712, 2717, 2719 et 2793.

2790 : Installations de traitement de déchets dangereux ou de déchets contenant des substances ou mélanges dangereux mentionnés à l'article R. 511-10, à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720, 2760, 2770 et 2793.

2791 : Installation de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720, 2760, 2771, 2780, 2781 et 2782.

Elles peuvent aussi relever des dispositions de la directive IED, notamment au titre de la rubrique 3532 : Valorisation ou mélange de valorisation et d'élimination de déchets non dangereux non inertes avec une capacité supérieure à 75 tonnes par jour et entraînant une ou plusieurs des activités suivantes, à l'exclusion des activités relevant de la directive 91/271/ CEE : traitement biologique ; prétraitement des déchets destinés à l'incinération ou à la co-incinération ; traitement du laitier et des cendres ; traitement en broyeur de déchets métalliques, notamment déchets d'équipements électriques et électroniques et véhicules hors d'usage ainsi que leurs composants.

L'arrêté préfectoral d'autorisation/enregistrement/déclaration et les arrêtés complémentaires fixent les règles et conditions d'exploitation des plateformes, qui concernent entre autres la conception et l'aménagement général des installations ; les conditions d'exploitation ; la prévention des risques ; la prévention de la pollution de l'air ; la prévention de la pollution de l'eau ; la prévention des risques liés au bruit ; la surveillance des rejets et de l'impact sur l'environnement ; les informations sur le fonctionnement ou l'arrêt de l'installation (Coussy et al., 2017).

Annexe 5. Liste des valeurs seuils de niveau 1 pour les éléments traces et composés organiques persistants

(Guide de valorisation hors-site des terres excavées, Coussy et al., 2017)

Famille	Substance	Valeurs seuils de niveau 1 (mg/kg MS, analyse en contenu total)
Eléments traces métalliques	As	25
	Ba*	100
	Cd	0,4
	Co*	20
	Cr ¹	90
	Cu	40
	Hg ¹	0,1
	Mo*	1,5
	Ni	60
	Pb	50
	Sb*	1
	Se*	0,7
	Zn	150
	Composés organiques persistants	PCB (somme des 7 congénères)
Dioxines/furannes*		2 ng/kg MS (exprimé en TEQ OMS 1998 (nd=LQ) et hors contribution PCB-dl)
Somme des 16 HAP ²		10

Annexe 6. Liste des valeurs seuils de niveau 1 pour les substances organiques
(Guide de valorisation hors-site des terres excavées, Coussy et al., 2017)

Famille	Substance	Valeurs seuils (mg/kg MS, en contenu total)
HC	Hydrocarbures C5-C10	40
	Hydrocarbures C10-C40	50
BTEX	Benzène	0,05
	Somme des TEX (Toluène, Ethylbenzène, Xylènes)	1,5
COHV	Tétrachloroéthylène	0,2
	Trichloroéthylène	0,1
	Cis-Dichloroéthylène	0,1
	Chlorure de vinyle	0,1
HAP	Naphtalène	0,1

Annexe 7. Liste des valeurs de niveau 2 et 3 pour les composés organiques en mg/kg (Guide de valorisation hors-site des terres excavées, Coussy et al., 2017)

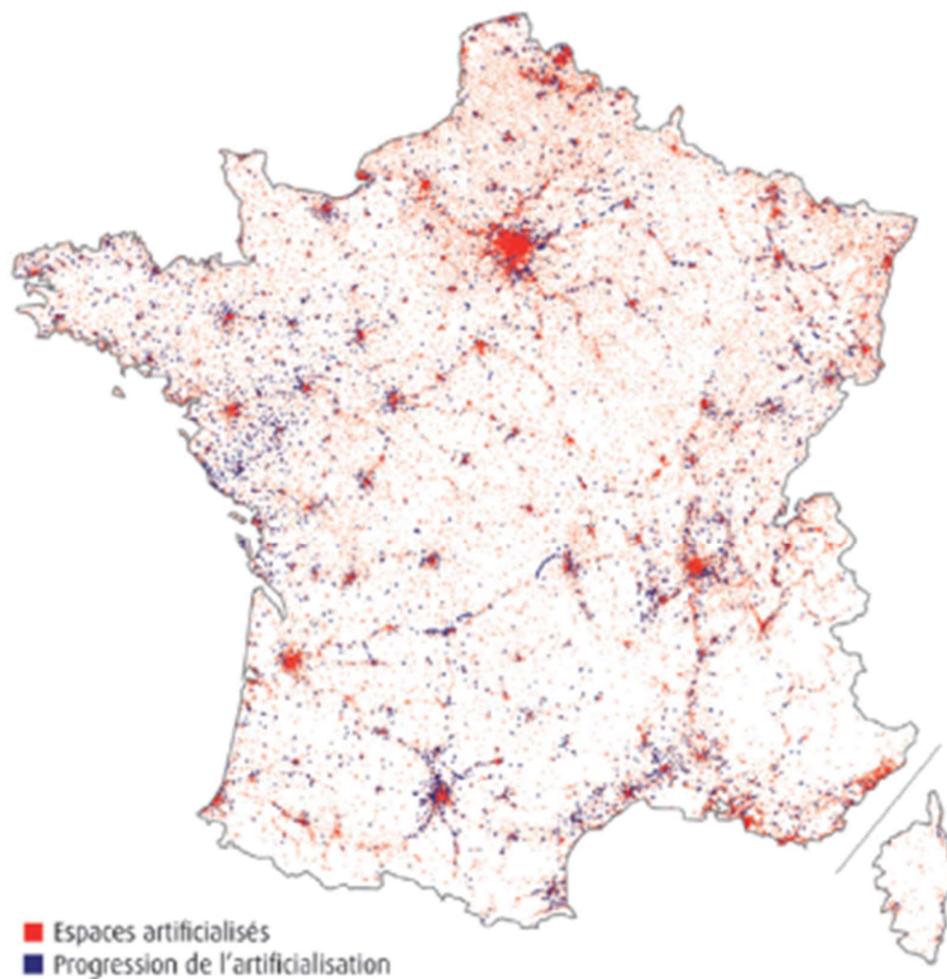
Famille	Substance	VSA (bureaux, industriel, commercial)	VSB (aménagement paysager ou routier)
HC	Hydrocarbures C5-C10	40	200
	Hydrocarbures C10-C40	50	500
BTEX	Benzène	0,05	0,05
	Somme des TEX (Toluène, Ethylbenzène, Xylènes)	4,5	15
COHV	Tétrachloroéthylène	1	1
	Trichloroéthylène	1	1
	Cis-Dichloroéthylène	0,3	0,3
	Chlorure de vinyle	0,2	0,2
HAP	Naphtalène	0,3	5

Ces valeurs seuils permettent à la fois de garantir le maintien de la qualité des sols du site receveur et de maîtriser les risques sanitaires pour ces usages dans une démarche de niveau 2.

Annexe 8. Artificialisation des sols par région administrative (avant 2017)

NOM_REG	surf artificialisée	surface totale	% artificialisation
ILE-DE-FRANCE	260177,61	1206414,64	21,57%
CHAMPAGNE-ARDENNE	95237,23	2571155,34	3,70%
PICARDIE	130490,20	1952837,12	6,68%
HAUTE-NORMANDIE	95601,16	1236283,93	7,73%
CENTRE-VAL DE LOIRE	161257,79	3946997,74	4,09%
BASSE-NORMANDIE	77095,84	1775772,86	4,34%
BOURGOGNE	112582,89	3170031,90	3,55%
NORD-PAS-DE-CALAIS	178029,16	1248267,19	14,26%
LORRAINE	141912,76	2366308,75	6,00%
ALSACE	91091,66	832354,10	10,94%
FRANCHE-COMTE	80094,57	1627963,17	4,92%
PAYS-DE-LA-LOIRE	212067,63	3232659,30	6,56%
BRETAGNE	186941,49	2744519,42	6,81%
POITOU-CHARENTES	121343,64	2592059,49	4,68%
AQUITAINE	189369,38	4178984,46	4,53%
MIDI-PYRENEES	142201,76	4562542,38	3,12%
LIMOUSIN	42920,87	1702651,46	2,52%
RHONE-ALPES	292442,52	4466495,76	6,55%
AUVERGNE	77844,57	2613138,44	2,98%
LANGUEDOC-ROUSSILLON	126923,07	2778773,23	4,57%
PROVENCE-ALPES-COTE-D'AZUR	206041,83	3168572,47	6,50%
CORSE	18471,91	875975,05	2,11%
France METROPOLITAINE km²	3040139,55	54850758,20	5,54%

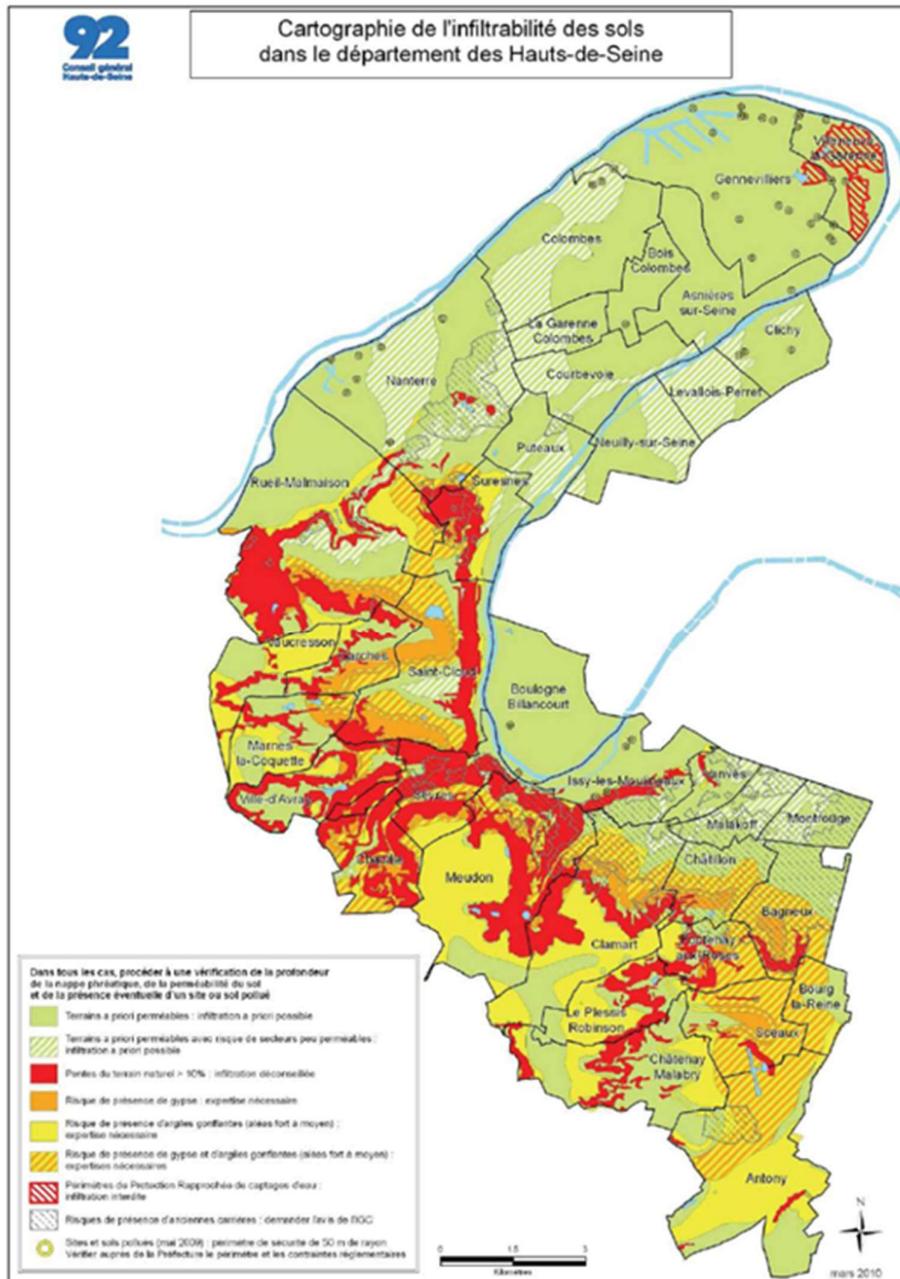
Annexe 9. Carte de la France « Progression de l'imperméabilisation »



Note : Les polygones de changement ont été épaissis par souci de lecture.

Source : UE-SOeS, CORINE Land Cover, 2006.

Annexe 10. Carte d'infiltrabilité des sols dans le département des Hauts-de-Seine

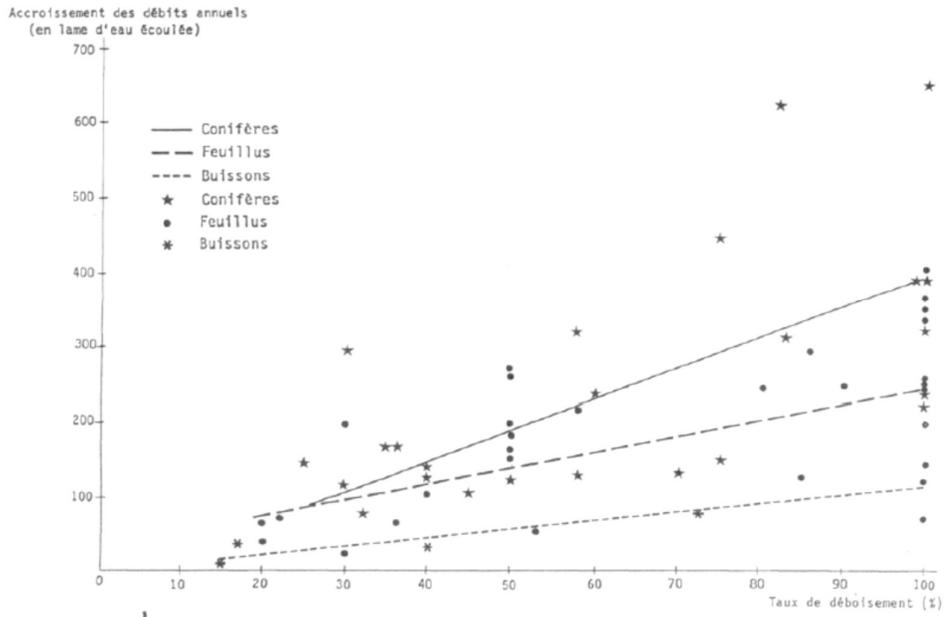


Annexe 11. Localisation des 27 Cartes d'infiltrabilité réalisées en France



Localisation des 27 cartes d'infiltrabilité des eaux pluviales identifiées

Annexe 12. Relation entre l'accroissement des débits annuels et le taux de déboisement



(D'après Bosch et Helwette 1982)

Annexe 13. La nomenclature des technosols suivant le WRB

Ekranic : (ek) (du français écran) ayant un matériau technique dur à partir d'une profondeur de 5 cm de la surface du sol.

Linic : (lc) (du latin linea, ligne) ayant une géomembrane continue, très peu perméable à l'imperméable de n'importe quelle épaisseur et commençant d'une profondeur de 100 cm de la surface du sol.

Urbic : (ub) (du latin urbs, ville) ayant dans les 100 premiers centimètres une couche d'une épaisseur supérieure à 20 cm qui contienne plus que de 20 % (en volume, en poids moyen) d'artéfacts contenant plus de 35 % (en volume) de gravats⁴ ou de déchets d'implantation humaine.

Spolic : (sp) (du latin spoliare, extraire) ayant dans les 100 premiers centimètres une couche d'une épaisseur supérieure à 20 cm qui contienne plus que de 20 % (en volume, en poids moyen) d'artéfacts contenant plus que 35 % (en volume) de résidus industriels (terrils⁵, dragage, mâchefers⁶, cendres, gravats, etc.).

Garbic : (ga) (de l'anglais garbage, détrit) ayant dans les 100 premiers centimètres une couche d'une épaisseur supérieure à 20 cm qui contient plus de 20 % (en volume, en poids moyen) d'artéfacts contenant plus de 35 % (en volume) de déchets organiques.

Crylic : (cy) (du grec kryos, froid, glace) ayant un horizon cryique⁷ commençant d'une profondeur de 100 cm de la surface du sol ou ayant un horizon cryique commençant d'une profondeur de 200 cm de la surface du sol et des preuves de cryoturbation⁸ dans certaines couches à partir d'une profondeur de 100 cm de la surface du sol.

Isolatic : (il) (de l'italien isola, île) ayant au-dessus d'un matériau technique dur, d'une géomembrane ou d'une couche continue d'artéfacts commençant à partir d'une profondeur de 100 cm de la surface du sol, un matériau de sol contenant de la terre fine sans aucun contact avec tout autre matériau de sol contenant de la terre fine (ex. sols sur les toits ou en pots).

Leptic : (le) (du grec leptos, mince) ayant une roche continue ou un matériau technique dur commençant d'une profondeur de 100 cm de la surface du sol.

Subaquatic/ Tidalic : pour les Technosols submergé dans l'eau

Subaquatic : (sq) (du latin sub, en dessous, et aqua, eau) submergé de manière permanente par de l'eau d'une profondeur plus que 200 cm.

Tidalic : (td) (de l'anglais tide, marée) affecté par les marées, c-à-d. localisé entre les lasses moyennes des marées hautes et basses de vives eaux.

Reductic : (du latin reductus, ramené) ayant moins de 25 % du volume de la terre fine à partir d'une profondeur de 100 cm de la surface du sol des conditions réductrices causées par des émissions gazeuses comme du méthane ou du dioxyde de carbone, ou par des infiltrations de liquides autres que l'eau (ex. pétrole).

Hyperskeletalic : (jk) (du grec hyper, au-dessus, et skeletos, asséché) ayant une teneur en terre fine supérieure à 20 % (en volume) en moyenne pondérée sur une profondeur de 75 cm, à partir de la surface du sol ou jusqu'à une roche continue, un matériau technique dur ou une couche cimentée ou indurée commençant à partir d'une profondeur de 25 cm de la surface du sol.

Qualificatifs supplémentaires des technosols Alcalic/ Dystric/ Eutric, Andic, Anthraquic/ Irragric/ Hortic/ Plaggic/ Pretic/ Terric, Archaic, Arenic/ Clayic/ Loamic/ Siltic, Aridic, Calcic, Ca.mbic, Carbonic, Densic, Dolomitic/ Calcaric, Drainic, Fluvic, Folic/ Histic, Gleyic, Gypsic, Gypsic, Humic/ Ochric, Hyperartefactic, Immissic, Laxic, Lignic, Mollic/ Umbric, Novic, Oxyaquic, Raptic, Relocatic, Salic, Sideralic, Skeletic, Sodc, Protosodic, Stagnic, Sulfidic, Tephric, Thionic, Toxic, Transportic, Vitric.

(FAO, 2014) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006)

Annexe 14. Nomenclature des horizons pédologiques

- **Horizon argique** : Couche subsuperficielle avec contenu en argile nettement plus élevé que dans la couche sus-jacente et/ou présence d'argile illuviale.
- **Horizon chernique** : est un horizon épais, très foncé, taux de saturation en bases élevé, teneur en matière organique moyenne à élevée, bien structuré, forte activité biologique (cas particulier de l'horizon mollique).
- **Horizon durique** : est un horizon subsuperficiel présentant des nodules ou concrétions faiblement cimentés ou indurés dont le ciment est la silice.
- **Horizon ferrique** : est un horizon dans lequel la ségrégation du Fe (ou Fe et Mn) a pris une telle ampleur que de grandes taches ou des concrétions tendres ou des nodules se sont formés rendant la matrice entre les taches. Contenant plus que 5 % concrétions et/ou nodules rougeâtres à noirâtres ou plus que 15 % taches grossières rougeâtres à noirâtres, avec accumulation.
- **Horizon fragique** : est un horizon subsuperficiel naturel non cimenté avec une structure et une porosité telles que les racines et l'eau de percolation n'y peuvent pénétrer qu'entre les agrégats. Le caractère naturel exclut les semelles de labour et de trafic.
- **Horizon hydragrique** : est un horizon subsuperficiel résultant de l'activité humaine liée à la culture sous eau. Exemple les rizières inondées : couche sous l'horizon anthraquique montrant des caractéristiques rédoxymorphiques et/ou une accumulation de Fe et/ou Mn.
- **Horizon natrique** : Couche subsuperficielle avec contenu en argile nettement plus élevé que dans la couche sus-jacente et/ou présence d'argile illuvial, teneur élevée en Na échangeable.
- **Horizon nitique** : est un horizon subsuperficiel riche en argile et en oxydes de Fe, structure modérée à forte, faces des agrégats brillantes.
- **Horizon pétrocalcique** : est un horizon induré qui est cimenté par du carbonate de calcium et quelquefois également par du carbonate de magnésium. Il est massif ou lamellaire et est extrêmement dur.
- **Horizon pétrodurique** : est un horizon contenant des accumulations de silice secondaire cimentée ou indurée de manière assez continue.
- **Horizon pétrogypsiq**ue : est un horizon contenant des accumulations de gypse secondaire ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) cimenté ou induré de manière assez continue.

• **Horizon pétroplinthique** : est une couche continue, fissurée ou brisée de matériau induré, dans laquelle les oxydes de Fe (et dans certains cas de Mn) forment un ciment majeur et dont la matière organique est absente ou n'est présente que sous forme de traces.

• **Horizon pisoplinthique** : est un horizon contient des concrétions ou des nodules fortement cimentés ou indurés par des oxydes de Fe (et parfois également de Mn) (plus que 40 %).

• **Horizon plinthique** : est un horizon subsuperficiel riche en oxydes de Fe (et parfois de Mn) et pauvre en humus¹¹. L'argile est surtout kaolinitique ; elle est accompagnée d'autres produits issus d'une forte altération, comme de la gibbsite¹².

• **Horizon spodique** : est un horizon subsuperficiel contenant des substances illuviées faites de matière organique et d'Al ou de Fe illuvial. Les matériaux illuviés sont caractérisés par une charge fortement dépendante du pH, une assez grande surface spécifique et une rétention en eau élevée.

• **Horizon vertique** : est un horizon argileux subsuperficiel qui présente des faces de glissement et des agrégats cunéiformes, résultats de gonflements-retraits. Couche dominée par les argiles gonflantes.

Horizon cryique

• Description générale Un horizon cryique (du grec kryos, froid, glace) est un horizon de sol gelé en permanence dans un matériau minéral ou organique (glace visible ou ≤ 0 °C si absence d'eau).

Les horizons cryiques se trouvent dans des zones à permagel (i.e. : couche de sol ou roche, à une certaine profondeur sous la surface, dans laquelle la température a été continuellement négative durant plusieurs années au moins) et montrent une ségrégation de glace permanente souvent associée à des marques de processus cryogéniques (matériau du sol mélangé, horizons disloqués, involutions, intrusions organiques, foisonnement dû au gel, tri entre matériaux de sol grossiers et fins, fissures).

Annexe 15. Liste des horizons de référence du Référentiel pédologique Français de 2008 (Baize & Girard, 2009)

Code	Code	Nom	Remarques diverses	Page
A		Horizons A	Code traditionnel * Utilisable seul	9
	A	A hapliques	N'ont pas les caractères des autres horizons A	
	Aca	A calcaires		
	Ach	A cherniques	De <i>tcherno</i> = noir en russe	
	Ac	A calciques		
	Ado	A dolomitiques		
	Ac	A éluviaux		
	AG	A à caractères réductiques		
	Alu	A aluandiques		
	Amg	A magnésiques		
	An	A d'anmoor		
	And	A silandiques		
	Aso	A sombriques	Ancien code : Ahs	
	Avi	A vitriques		
BT		B argilluviaux	B = code traditionnel T pour « textural »	17
	B'13	BT bêta	Ancien « horizon bêta »	
BP		B podzoliques	B = code traditionnel P pour « podzolique »	19
	BPh	BP humifères		
	BPs	BP sesquioxydiques		
C		Horizons C	Code traditionnel * Utilisable seul	25
E		Horizons éluviaux	Code utilisable seul	14
F		Horizons ferrallitiques	Jaunes et rouges * Variantes: Fox, Fhy	149
FE		Horizons ferrugineux	Code utilisable seul pour les horizons ferrugineux meubles	170
Fe	Fe	Horizons ferriques	Ancien code : FE	20
	Fem	Horizons pétroferriques	Ancien code : FEm	
	Femp	Horizons placiques	Ancien code : FEmp	

Code	Code	Nom	Remarques diverses	Page
FS		Horizons fersiallitiques		179
G		Horizons réductiques	Code traditionnel Go, Gr et Ga sont des variantes	22
g		Horizons rédoxiques	Code traditionnel	21
H		Horizons histiques	Ne pas utiliser seul • Essayer de préciser	205
	Ha	H assainis		
	Hf	H fibriques		
	Hm	H mésiques		
	Hs	H sapriques		
J		Horizons jeunes	Ne pas utiliser seul • Préciser Js ou Jp	25
	Js	J de surface		
	Jp	J de profondeur		
K		Horizons calcariques		20
	K	Horizons calcariques discontinus		
	Kc	Horizons calcariques continus		
	Km	Horizons pétrocalcariques		
L		Horizons labourés	Exemples: L, LA, LE, LS, LBT, LH	14
Na		Horizons sodiques	Exemples: NaA, NaS, NaBT	24
ND		Horizons nodulaires		154
O		Horizons organiques	Ne pas utiliser ce code seul • Essayer de préciser	7
	OF	Horizons O de fragmentation	Code utilisable seul • Variantes: OFr, OFm	
	OH	Horizons O « humifiés »	Code utilisable seul • Variantes: OHr, OHf	
	OHta	Horizons de tangel		
	OL	Horizons O de litières	Code utilisable seul • Variantes: OLn, OLv, OLt	
OX		Horizons oxydiques		150
	OX	Horizons oxydiques meubles	Variantes: OXal, OXf, OXfr, OXba, OXti	
	OXc	Horizons duroxydiques	Carapaces	
	OXm	Horizons pétroxydiques	Cuirasses	
RT		Horizons réticulés	Correspond au « réticron » et à la « plinthite »	152
S		Horizons structuraux	Code utilisable seul	15
	S	S hapliques	N'ont pas les caractères des autres horizons S	
	Sal	S aluminiques		
	Sca	S calcaires		
	Sci	S calciques		
	Sdo	S dolomitiques		
	Slu	S aluandiques		
	Smg	S magnésiques		
	Sn	S nitiques		
	Snd	S silandiques		
	Sp	S pélosoliques		
	SV	S vertiques		
Sa		Horizons saliques	Variantes: SaA, SaS, SaBT	24

Code	Code	Nom	Remarques diverses	Page
Si		Horizons siliciques		20
	Sim	Horizons pétrosiliciques		
U		Horizons sulfatés		25
V		Horizons vertiques sphénoïdes		23
			Variantes Vs, Vy, Vk, Vn2, Vsa	318
X		Horizons peyriques		24
	X	Horizons grossiers		
	Xc	Horizons cailloutiques		
	Xgr	Horizons graveliques		
	Xp	Horizons pierriques		
Y		Horizons gypsiques	Ne pas utiliser ce code seul • Essayer de préciser	197
	Ym	Horizons pétrogypsiques		
	Yp	Y de profondeur		
	Ys	Y de surface		

Horizons de transition (exemples)

A-S S-C B-C C-M Z-S.

Lettres suffixes qui peuvent être ajoutées à tous les types d'horizons

	Signification	Exemples
-b	(buried) Horizon situé sous un apport naturel ou artificiel de plus de 50 cm d'épaisseur, qui devrait normalement être situé en surface ou presque (horizon enfoui)	
-cry	Très cryoturbé	Ccry
-g	Horizon à caractère rédoxique	Eg, BTg, Sg, Scag, Cg, etc.
-h	Horizon plus humifère que la norme	Ah, Eh, BTh, ScAh, Salh, Xh, etc.

Lettres suffixes qui peuvent être ajoutées à certains horizons, couches ou matériaux

	Signification	Exemples (Ex. :) ou liste complète (LC. :)
-a	Albique	LC : Ea, Ga, ga
-c	Induré	Ex : Kc, OXc (mais pas Xc)
-ca	Calcaire (horizons C et couches)	LC : Cca, Dca, Mca, Rca
-cn	Accumulation de sesquioxydes (Fe, Mn) sous forme de films, concrétions ou nodules nombreux	Ex : BTcn, FEcn (ferruginosols)
-cra	Horizons C et couches crayeuses	LC : Ccra, Dcra, Mcra
-d	À dégradation morphologique	LC : BTd, Sd
-ho	Hémiorganique	Ex : Aho, Acaho, Sho, Zho
-j	À caractère xanthomorphe	Ex : Sj, Scij, BTj
-k	Début d'accumulation de calcite secondaire	Ex : Scak, Vk, Ck

	Signification	Exemples (Ex. :) ou liste complète (LC. :)
-m	Fortement induré	LC : Fem, Km, OXm, Sim
-nod	Grande abondance de nodules d'oxydes métalliques	LC : Anod, Fnod, OXnod, RTnod
-noz	D'origine non zoogène	LC : OFnoz, OHnoz
-s	À accumulation de sesquioxydes (mais pas sous forme de nodules)	Ex : BTs, BPs
-t	Illuviation d'argile débutante ou importante	LC : St, Ct, FSt
-tp	Matériau pédologique ou géologique transporté	Ex : Ltp, Dtp
-v	À propriétés vertiques	Ex : Av, Sv, Cv
-x	À caractères fragiques	Ex : Ex, Sx, BTx
-y	Contenant du gypse	Ex : Cy, Sy, Vy
-z	Très anthropisé	Ex : Lz
-zo	D'origine zoogène	Ex : OFzo, OHzo
π-	« paléo- » (pour un horizon)	Ex : πBT, πBPh

Subdivision d'un horizon en sous-horizons

Utilisation de chiffres suffixes 1, 2, 3... du haut vers le bas, sans autre signification que leur ordre d'apparition.

Exemples: A1/A2 S1/S2/S3 BT1/BT2 C1/C2.

Horizon montrant la juxtaposition de deux types de volumes

Exemple: E&BT (cas des LUVISOLS DÉGRADÉS).

Superposition de plusieurs matériaux (= discontinuités lithologiques)

Utilisation de chiffres romains (le I est omis). Système international.

Exemple: A/S/II C/III R.

Couches et matériaux

D	Couches D
M	Couches M
Mli	Matériaux limniques (histosols)
Mt	Matériaux terriques (histosols)
P	Couches P = pergélisol
R	Couches R
TH	Matériaux thioniques (THIOSOLS, SULFATOSOLS)
Z	Matériaux anthropiques
Zar	Matériaux archéo-anthropiques
ZO	Matériaux anthropiques holorganiques
Ztc	Matériaux anthropiques technologiques
Ztr	Matériaux anthropiques terreux

Lettres suffixes qui peuvent être ajoutées uniquement à certaines couches R et D

	Signification	Liste complète
-cri	Constituées de roches cristallines ou cristallophylliennes dures	Rcri, Dcri
-do	Constituées de roches dolomitiques dures	Rdo, Ddo
-sch	Constituées de schistes durs	Rsch, Dsch
-si	Constituées de roches siliceuses dures ni cristallines ni cristallophylliennes (grès, meulières, roches silicifiées)	Rsi, Dsi
-vo	Constituées de roches volcaniques dures	Rvo, Dvo

Annexe 16. Commande R pour la création de la carte de provenance des terres la BD sols IDF (Library SoilTexture).

```
> setwd("~/Mémoire BD")
> #Création d'une carte de spatialisation des analyses de sol
> CARTOGPS <- read.csv2("CARTLONLAT.csv")
> view(CARTOGPS)
> #Librairies
> library(GADMTools)
> library(sp)
> library(rgdal)
> library(RColorBrewer)
> library(ggplot2)
> #création d'un data.frame pour les coordonnées GPS des analyses de sol
> longitude <- c(CARTOGPS$Longitude)
> latitude <- c(CARTOGPS$Latitude)
> view(mydf)
> mydf <- data.frame(longitude, latitude)
> view(mydf)
> #Création de la carte de l'île de de France
> CARTOIDF <- gadm_sf_loadCountries("FRA", level = 2)%>%
+ gadm_subset(level = 1, regions="île-de-France")
> gadm_plot(CARTOIDF)
> #Ajouter les points des Analyses de sol
> dots(CARTOIDF, mydf, color="red", size = 3)
> |
```



```

> #Contoure Texture 60
> kde.res <- TT.kde2d(
+ geo = geo,
+ tri.data = BDTVR60
+ )
> TT.contour(
+ x = kde.res,
+ geo = geo,
+ main = "Estimation de la Texture des sols du 60",
+ lwd = 2,
+ col = "red"
+ )
> TT.plot(
+ class.sys = "USDA.TT",
+ tri.data = BDTVR60,
+ geo = geo,
+ grid.show = FALSE,
+ add = TRUE, # <<-- important
+ col = "gray"
+ )
"-- . . . . . --

> #Contoure Texture 93
> kde.res <- TT.kde2d(
+ geo = geo,
+ tri.data = BDTVR93
+ )
> TT.contour(
+ x = kde.res,
+ geo = geo,
+ main = "Estimation de la Texture des sols du 93",
+ lwd = 2,
+ col = "red"
+ )
> TT.plot(
+ class.sys = "USDA.TT",
+ tri.data = BDTVR93,
+ geo = geo,
+ grid.show = FALSE,
+ add = TRUE, # <<-- important
+ col = "gray"
+ )
> #Contoure Texture 94
> kde.res <- TT.kde2d(
+ geo = geo,
+ tri.data = BDTVR94
+ )
> TT.contour(
+ x = kde.res,
+ geo = geo,
+ main = "Estimation de la Texture des sols du 94",
+ lwd = 2,
+ col = "red"
+ )
> TT.plot(
+ class.sys = "USDA.TT",
+ tri.data = BDTVR94,
+ geo = geo,
+ grid.show = FALSE,
+ add = TRUE, # <<-- important
+ col = "gray"
+ )
"-- . . . . . --

> #Contoure Texture 95
> kde.res <- TT.kde2d(
+ geo = geo,
+ tri.data = BDTVR95
+ )
> TT.contour(
+ x = kde.res,
+ geo = geo,
+ main = "Estimation de la Texture des sols du 95",
+ lwd = 2,
+ col = "red"
+ )
> TT.plot(
+ class.sys = "USDA.TT",
+ tri.data = BDTVR95,
+ geo = geo,
+ grid.show = FALSE,
+ add = TRUE, # <<-- important
+ col = "gray"
+ )
> |

```

```

> setwd("~/Mémoire BD")
> BDIDF<-read.csv2("BDTVRIDF.csv")
> #Contoure Texture IDF
> kde.res <- TT.kde2d(
+ geo = geo,
+ tri.data = BDIDF
+ )
> TT.contour(
+ x = kde.res,
+ geo = geo,
+ main = "Tendance de la Texture des sols IDF",
+ lwd = 2,
+ col = "red"
+ )
> TT.plot(
+ class.sys = "USDA.TT",
+ tri.data = BDIDF,
+ geo = geo,
+ grid.show = FALSE,
+ add = TRUE, # <<-- important
+ col = "gray"
+ )

```

Triangle des 69 individus non sélectionnés

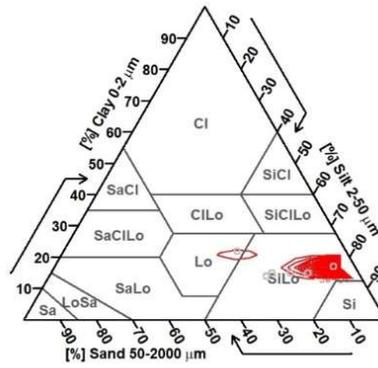
```

> smp4<-read.csv2("BDTEXT.csv")
> TT.plot(class.sys = "USDA.TT",
+ tri.data=smp4,
+ col = "blue")
>

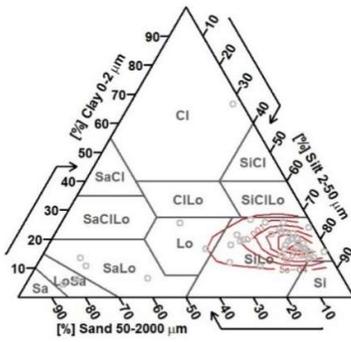
```

Annexe 18. Triangle des textures de la BD sols IDF

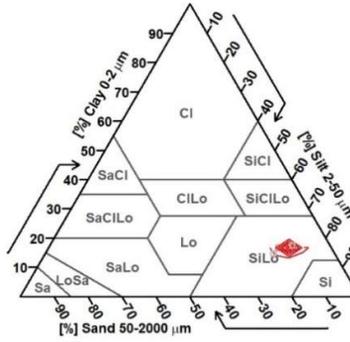
Tendance de la Texture des sols 60



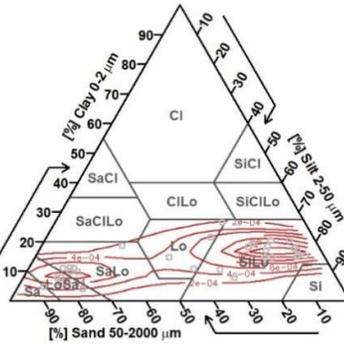
Tendance de la Texture des sols 95



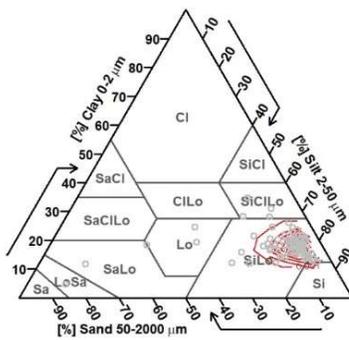
Tendance de la Texture des sols 94



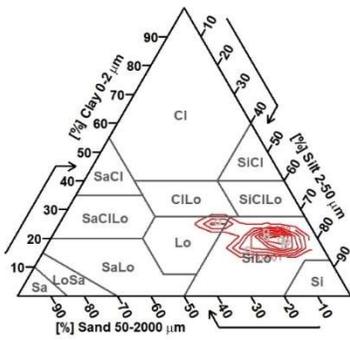
Tendance de la Texture des sols 78



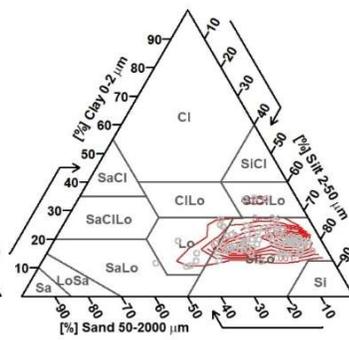
Tendance de la Texture des sols 77



Tendance de la Texture des sols 93



Tendance de la Texture des sols 91



Annexe 19. Commande R pour la création des Matrices de corrélations

```
> #Matrice de corrélation
> var1 <-c("CLAY", "SILT", "SAND", "MATORG", "Azote.Total", "C", "C.N", "PH.eau", "CaO", "CEC", "P2O5", "K2O", "MgO", "Conductivité", "Chrome", "Nickel", "Cuivre", "Zinc", "Cadmium", "Mercure", "Plomb")
> corplot(cor(ACPBD1[,var1],use = "complete.obs"),method = "circle")
>
> var2 <-c("MATORG", "Azote.Total", "C", "C.N", "PH.eau", "CaO", "CEC", "P2O5", "K2O", "MgO", "Conductivité", "Chrome", "Nickel", "Cuivre", "Zinc", "Cadmium", "Mercure", "Plomb")
> corplot(cor(ACPBD1[,var2],use = "complete.obs"),method = "circle")
>
> var3 <-c("CLAY", "SILT", "SAND", "MATORG", "Azote.Total", "C", "C.N", "PH.eau", "CaO", "CEC", "P2O5", "K2O", "MgO", "Conductivité")
> corplot(cor(ACPBD1[,var3],use = "complete.obs"),method = "circle")
> |
```

Annexe 20. Commande R pour la réalisation de l'analyse en composantes principales.

```
> #ACP Sand
> expliquer<-"SAND"
>
> #ACP Sand
> expliquer<-"SAND"
> explicatives <-c("CLAY", "SILT", "MATORG", "Azote.Total", "C", "C.N", "PH.eau", "CaO", "CEC", "P2O5", "K2O", "MgO", "Conductivité", "Chrome", "Nickel", "Cuivre", "Zinc", "Cadmium", "Mercure", "Plomb", "Texture", "Dépt")
>
fPCA(data=ACPBD1,y=expliquer,x=explicatives,partial = "No")

>
> #ACP C
> expliquer<-"C"
> explicatives <-c("CLAY", "SILT", "SAND", "MATORG", "Azote.Total", "C", "C.N", "PH.eau", "CaO", "CEC", "P2O5", "K2O", "MgO", "Conductivité", "Chrome", "Nickel", "Cuivre", "Zinc", "Cadmium", "Mercure", "Plomb", "Texture", "Dépt")
> fPCA(data=ACPBD1,y=expliquer,x=explicatives,partial = "No")
>
>
> #ACP Matière Organique
> expliquer<-"MATORG"
> explicatives <-c("CLAY", "SILT", "SAND", "MATORG", "Azote.Total", "C", "C.N", "PH.eau", "CaO", "CEC", "P2O5", "K2O", "MgO", "Conductivité", "Chrome", "Nickel", "Cuivre", "Zinc", "Cadmium", "Mercure", "Plomb", "Texture", "Dépt")
> fPCA(data=ACPBD1,y=expliquer,x=explicatives,partial = "No")
> |
```

Annexe 21. Tableau des matériaux

Désignation	Caractéristiques	Photographie
Limon de Saclay	Matériau fin terreux MO en faible quantité	
Compost	Matière organique en décomposition Riche en phosphore et Azote	
Scories	Matériau criblé Aspect Graveleux avec fines Grande porosité	
Ballast	Matériau criblé Graveleux	
Brique	Matériau criblé Aspect graveleux avec fines Bonne porosité	

Annexe 22. Données des courbes granulométriques

Ouverture de maille (mm)	limon	scories 5/20	brique 5/25	compost	ballast 20/40	pouzzolane 7/15	pouzzolane 40/80
100,00							100,00
80,00							91,00
63,00							58,00
50,00					100,00		17,00
40,00					100,00		1,20
31,50		100,00			84,10		0,40
25,00		97,40			41,50		
20,00					10,30		
16,00					1,70	100,00	
14,00						97,00	
12,50						91,00	
11,20						77,00	
10,00		53,60				62,00	
8					0,30	32,00	
6,3	100,00	17,00			0,20	13,00	
5	99,86	12,00	100,00	100,00			0,40
2	99,20	9,00	97,00	97,00		7,80	
1	98,61	8,30					
0,5	97,58	6,90				7,60	0,40
0,4	97,58	6,90			0,11		
0,2	96,74	3,90	44,90	76,97			
0,14	96,20	3,50				4,50	
0,08	94,99	2,40					
0,063	94,12	0,00			0,10	3,20	0,10
0,049	82,70						
0,035	75,27						
0,023	54,83						
0,014	36,24						
0,010	34,38						
0,007	28,81		32,70	68,57			
0,005	26,95						
0,003	25,09						
0,002	23,23		23,60	55,17			
0,001	21,37		8,30	26,10			

Annexe 23. Poster presentation SimHydro 2019 (EONO & FOUCHÉ, 2019)

SimHydro 2019
5TH INTERNATIONAL CONFERENCE
12 – 14 JUNE 2019
SOPHIA ANTIPOLIS - FRANCE

Soil sealing: hazards to be accounted in urban planning projects

le cnam

EONO David & FOUCHÉ Olivier
Department of construction and energy engineering
Le Cnam, 292 rue Saint-Martin, 75003 Paris

Introduction

Soil sealing continues its inexorable progression, resulting in the disappearance of open environments and irreversibly compromising the provision of essential ecosystem services. In France, in thirty years, agricultural land (cultivated soils and still grassland) fell by 7% in favour of urbanization and transport, according to the yearly Teruti-Lucas survey in 2014. More and more, 9.3% of French soil was artificialized in 2016 (Béchet et al., 2017). Today, as part of the research project MMOVIVÉS, we claim a new vision of the soil, promoting it as a management tool for communities and practitioners through two levers.

Figure 1. Distribution of artificial surfaces by land occupation (Masero et al., 2014)

How to decrease the runoff coefficient?

In our urban projects, we promote an integrated approach to manage rainwater by technosol and the increased presence of vegetation. This way, we will better prevent the risks of flooding and heat island and fight against erosion of the soil in two ways: prevent the ablation of the substrate and favour sedimentation by retaining the eroded sediments upstream. The aerial parts of the plants favour interception of raindrops, depending on the density of the leaf area and the structure of the canopy. The improvement by the roots of the soil cohesion will strengthen all mechanical properties of the soil.

	Données expérimentales			Données modélisées		
	Débits injectés dans le simulateur de ruissellement (l/s)	Coefficient de Manning (s/m ²)	Hauteur de la ligne d'eau à l'amont de l'objet (cm)	Débits modélisés (l/s)	Coefficient de Manning (s/m ²)	Hauteur de la ligne d'eau à l'amont de l'objet (cm)
Maie Etalville	1.304	0.49	3.0	1.340	0.49	3.7
	2.004	0.58	4.9	3.05	0.53	5.7
	8.647	0.54	6.5	5.97	0.54	8.7
	12.305	0.43	11.0	12.32	0.43	10.7

Table 1. Comparison of water levels between modelling and experimentation according to Manning coefficient (Ouvry et al., 2012)

Managing runoff with a technosol

As impervious areas increases, so do the velocity and volume of runoff and infiltration decreases. From natural ground cover to 75% impervious surface, runoff coefficient increases more than 60%, compounded by poverty of vegetation. This is among the main factors of flooding, erosion and lowering of the water table.

A technosol will have two main functions: one is water retention, when there is little precipitation, and the other is to evacuate the water by infiltrating the excess amount during the period of high rainfall. It will be the first lever for managing runoff.

Technosol including an automatic watering device

Outlet device

Figure 2. Test site on infiltration in materials and technosol (Source: Eono D.)

This approach will allow for reuse of the excavated materials from tunnel-boring machines. From today to 2030 Grand Paris Express project is expected to generate 45 million tons of rock wastes.

A project in the municipality of Maule

On this project, we installed an infiltrating parking and a treatment of runoff water in a basin of 349 m³, as well as a valley of 41 m³ having a purifying function via a sandy mass coupled with plants that were selected for phytoremediation power (designed for a 20 years rainfall return period). Implementation of a technosol on all surfaces consisting of 70% cuttings, 25% sand and 5% humus (short chain compost), allows the transfer of sub-surface runoff. Coupling with vegetation then allows reduction of runoff to the plot by increasing the concentration time of flow.

Reservoir basin

Project

Figure 4 (Source: PLU Maule, Yvelines, France)

Conclusion

Using the rocks from subsoil as a sustainable resource through technosols will ensure ecological functions such as preserving biotopes and the reduction of heat islands in urban areas.

References

Béchet B, Le Bissonnais Y, Ruas A, et al. (2017). Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action. Rapport d'expertise scientifique collective, à la demande du MTEs, MAA, ADEME, IFSTTAR et INRA (France), 609 p.

Masero J, Fontes-Rousseau C, Cébron D (2014). Use of the territory in metropolitan France. *Agrésse Primeur*, 313, 8 p.

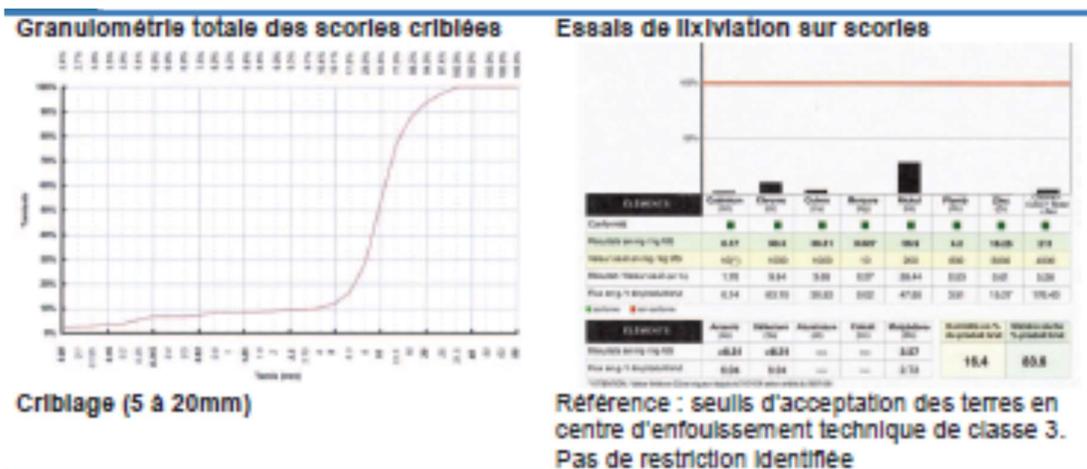
Morel J-L, Chenu C and Lorenz K (2015). Ecosystem Services Provided by Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining, and Military Areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15 (8): 1659-1666.

Ouvry J-F, et al. (2012). "Fascines and hedges. To reduce the effects of erosive runoff. Characterization of effectiveness and conditions of use". Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols (AREAS). <https://docplayer.fr/57649617-Fascines-haies-pour-reduire-les-effets-de-ruissellement-erosif-caracterisation-effectivness-et-conditions-d-utilisation.html>

Increasing human influence

Figure 3. The SUITMA group proposal for soil potential as a plantation support (Morel, Chenu & Lorenz, 2015).

Annexe 24. Fiche Scories 5/25 RICHARD



➔ Caractérisation agronomique de la terre de lavage de betteraves

Paramètre		
Caractérisation	pH eau	8,3
	Matière organique	% 4,3
	Calcaire total	% 13,1
	Conductivité	mS/cm 0,17
Granulométrie	Argile	% 7,4
	Limon fin	% 15,0
	Sable fin	% 15,4
	Sable grossier	% 7,8
Eléments fertilisants	Azote Total	% sec 0,08
	Rapport C/N	8,82
	Capacité d'échange Cationique	meq/100g brut 3,8
	Calcium échangeable	g/Kg 12,2
	Magnésium échangeable (MgO)	g/Kg 0,2
	Phosphore Olsen	ppm 127,8
	Sodium échangeable (Na ₂ O)	g/Kg 0,03
Potassium échangeable (K ₂ O)	g/Kg 0,2	

Annexe 25. Fiche Ballast 20/40 RICHARD

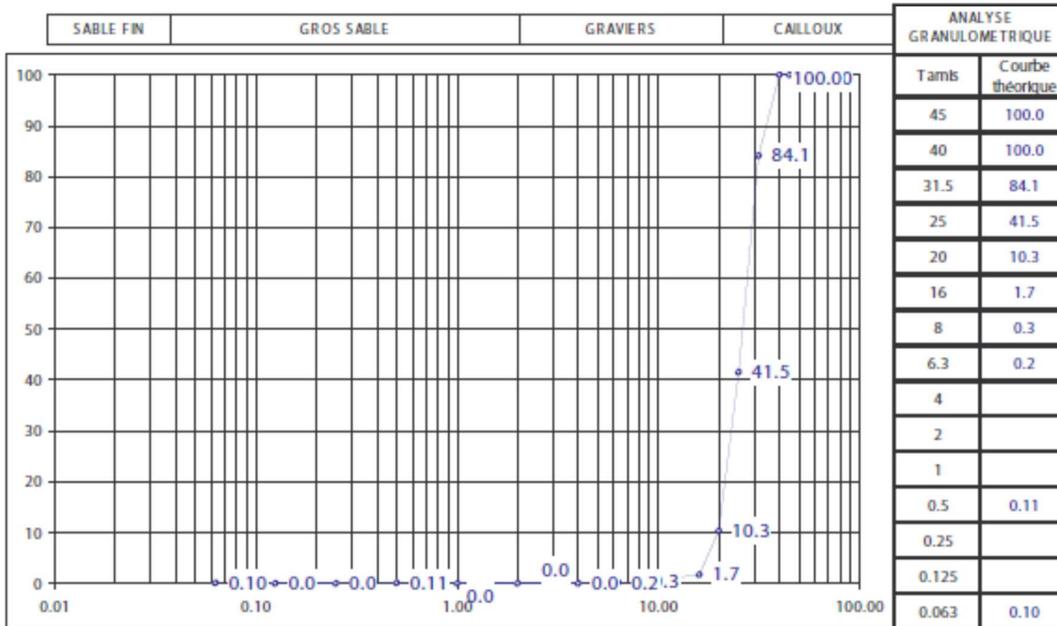


FICHE TECHNIQUE MATERIAUX BRUTS

DESIGNATION :
BALLAST 20/40 LAVE (DRAINAGE)

CODE CENTRALE :
BALDRAIN

CLASSIFICATION :				
NORME :				
CARACTERISTIQUES MECANQUES				
ESSAI PROCTOR	MODIFIE	NORMAL	TENEUR EN EAU :	0.2
MASSE VOLUMIQUE OPM :		g/cm ³		
TENEUR EN EAU OPM :		%		



Annexe 26. Données d'entrées pour le calcul des FPT

Désignation	Texture	ρ	A%	L%	Masse refus 2mm	S%	% MO	%CO	Rw	Rapport C/MO
Mélange Limons / Briques										
10 % / 90 %	Sa lo	1,69	0,01	0,30	0,84	0,61	0,02	0,01	0,50	0,69
20 % / 80 %	Sa lo	1,88	0,10	0,35	0,90	0,55	0,02	0,01	0,48	0,60
30 % / 70 %	Lo	2,07	0,12	0,40	0,82	0,50	0,02	0,01	0,40	0,52
40 % / 60 %	Lo	2,26	0,13	0,54	0,78	0,44	0,02	0,01	0,34	0,46
Mélange Limons / Scories										
10 % / 90 %	Sa	1,83	0,02	0,08	1,58	0,91	0,02	0,00	0,87	0,04
20 % / 80 %	Sa lo	2,20	0,04	0,15	1,69	0,81	0,02	0,00	0,77	0,07
30 % / 70 %	Sa lo	2,21	0,06	0,23	1,49	0,72	0,02	0,00	0,68	0,10
40 % / 60 %	Sa lo	2,40	0,08	0,30	1,39	0,62	0,02	0,00	0,58	0,13
Mélange Limons / Compost										
90 % / 10 %	SiLo	1,76	0,20	0,72	0,00	0,10	0,02	0,03	0,00	1,48
80 % / 20 %	SiLo	1,63	0,21	0,69	0,12	0,13	0,02	0,04	0,07	2,72
Mélange Limons / Ballast										
10 % / 90 %	Sa lo	1,49	0,09	0,29	0,67	0,62	0,01	0,02	0,45	1,17
20 % / 80 %	Sa lo	1,68	0,10	0,34	0,68	0,56	0,02	0,02	0,40	0,97
30 % / 70 %	Lo	1,80	0,12	0,39	0,64	0,50	0,02	0,02	0,36	0,85
40 % / 60 %	Lo	2,06	0,13	0,44	0,64	0,44	0,02	0,01	0,31	0,69
Mélange Limons / Compost / Briques										
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,74	0,01	0,31	0,81	0,58	0,02	0,03	0,47	1,70
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	1,93	0,12	0,36	0,80	0,52	0,02	0,03	0,42	1,51
10 % / 20 % / 70 %	Lo	1,80	0,13	0,33	0,78	0,54	0,02	0,05	0,44	2,64
20 % / 20 % / 60 %	Lo	1,99	0,14	0,38	0,76	0,48	0,02	0,05	0,38	2,36
Mélange Limons / Compost / Scories										
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,88	0,05	0,12	1,49	0,84	0,02	0,02	0,79	0,90
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	2,07	0,06	0,19	1,45	0,74	0,02	0,02	0,70	1,00
10 % / 20 % / 70 %	Sa lo	1,94	0,07	0,16	1,40	0,77	0,02	0,04	0,72	2,01
20 % / 20 % / 60 %	Sa lo	2,13	0,09	0,24	1,33	0,68	0,02	0,04	0,63	1,87
Mélange Limons / Compost / Ballast										
10 % / 10 % / 80 %	Sa lo	1,54	0,11	0,30	0,65	0,59	0,02	0,03	0,42	2,25
20 % / 10 % / 70 %	Sa lo	1,73	0,12	0,36	0,65	0,53	0,02	0,03	0,38	1,94
10 % / 20 % / 70 %	Lo	1,60	0,13	0,32	0,64	0,55	0,02	0,05	0,40	3,24
20 % / 20 % / 60 %	Lo	1,79	0,14	0,38	0,63	0,49	0,02	0,05	0,35	2,84

Annexe 27. Données d'entrées pour le calcul des FPT

Désignation	Torri	Manrique	Périé	Tomassella	Huntinton A	Huntinton B	Prevost	Vereecken	Campbell
Mélange Limons / Briques									
	BD _m	BD _{m0}	Ks (m/s)	Ks (m/s)					
10 % / 90 %	1,05	1,25	1,39	1,33	1,22	1,27	1,35	7,73E-04	2,70E-04
20 % / 80 %	1,09	1,26	1,36	1,27	1,22	1,28	1,33	6,10E-05	1,16E-04
30 % / 70 %	1,17	1,27	1,32	1,23	1,22	1,29	1,30	2,70E-05	8,90E-05
40 % / 60 %	1,22	1,27	1,29	1,15	1,22	1,29	1,28	1,80E-05	4,90E-05
Mélange Limons / Scories									
10 % / 90 %	-0,03	1,56	1,37	1,52	1,22	0,96	1,33	2,89E+00	
20 % / 80 %	0,47	1,51	1,30	1,46	1,22	1,19	1,29	2,09E-02	3,80E-04
30 % / 70 %	0,83	1,48	1,30	1,41	1,22	1,29	1,29	7,56E-04	2,52E-04
40 % / 60 %	1,07	1,45	1,27	1,35	1,22	1,34	1,27	8,00E-05	1,68E-04
Mélange Limons / Compost									
90 % / 10 %	1,05	1,05	1,38	0,92	1,22	1,03	1,34	1,43E-04	1,50E-05
80 % / 20 %	0,86	0,86	1,40	0,84	1,22	0,83	1,35	6,07E-04	1,60E-05
Mélange Limons / Ballast									
10 % / 90 %	1,03	1,16	1,43	1,28	1,21	1,16	1,37	1,13E-04	1,57E-04
20 % / 80 %	1,08	1,17	1,39	1,25	1,22	1,18	1,35	6,50E-05	1,20E-04
30 % / 70 %	1,13	1,19	1,37	1,22	1,22	1,20	1,33	4,20E-05	9,20E-05
40 % / 60 %	1,17	1,21	1,33	1,18	1,22	1,22	1,31		7,00E-05
Mélange Limons / Compost / Briques									
10 % / 10 % / 80 %	0,88	1,01	1,38	1,23	1,22	0,98	1,34	2,94E-03	2,50E-04
20 % / 10 % / 70 %	0,93	1,01	1,35	1,15	1,22	0,99	1,32	2,10E-04	9,60E-05
10 % / 20 % / 70 %	0,75	0,83	1,37	1,07	1,22	0,81	1,33	8,83E-04	1,04E-04
20 % / 20 % / 60 %	0,78	0,84	1,34	1,04	1,22	0,81	1,31	6,43E-04	8,00E-05
Mélange Limons / Compost / Scories									
10 % / 10 % / 80 %	0,28	1,17	1,36	1,40	1,22	1,17	1,33	9,43E-02	4,10E-04
20 % / 10 % / 70 %	0,56	1,11	1,32	1,33	1,22	1,11	1,30	6,43E-03	2,73E-04
10 % / 20 % / 70 %	0,41	0,91	1,35	1,24	1,22	0,88	1,32	2,20E-02	2,96E-04
20 % / 20 % / 60 %	0,60	0,90	1,32	1,19	1,22	0,87	1,30	3,64E-03	1,94E-04
Mélange Limons / Compost / Ballast									
10 % / 10 % / 80 %	0,87	0,95	1,42	1,16	1,21	0,92	1,36	3,89E-04	1,30E-04
20 % / 10 % / 70 %	0,90	0,96	1,38	1,13	1,22	0,94	1,34	2,62E-04	9,90E-05
10 % / 20 % / 70 %	0,74	0,79	1,41	1,05	1,22	0,77	1,36	1,04E-03	1,07E-04
20 % / 20 % / 60 %	0,76	0,80	1,37	1,02	1,22	0,77	1,36	1,03E-03	1,07E-04
	dL		dS						
dA (mm)	(mm)		(mm)						
0,00	0,02		1,03						

Réduire le coefficient de ruissellement du sol à l'échelle des projets urbains en construisant des technosols

Mémoire d'Ingénieur Cnam, Paris 2020

RÉSUMÉ

Le phénomène « d'imperméabilisation » a pour conséquence, lors d'épisodes pluvieux, de favoriser le ruissellement et les risques d'inondation. Nous déterminerons les paramètres physiques entrant dans l'évaluation du ruissellement puis nous proposerons une solution pour en réduire les conséquences en s'inscrivant dans une démarche durable et en travaillant sur les matériaux d'excavation issus des grands travaux Parisiens. Nous devons donc appréhender le sol par la pédologie, comprendre son évolution et les nombreuses interactions qui en font un milieu favorisant l'émergence de la vie, afin de tenter d'en reproduire les caractéristiques permettant d'aboutir à des sols techniques. Nous tenterons de caractériser ce qui est communément appelé « terre » ou « terre végétale » par les professionnels de l'aménagement urbain, au travers d'une base de données que nous avons constituée sur les principales analyses de terre distribuées en région Parisienne. L'analyse qui en découle fait ressortir un modèle servant de base comparative pour la création de sol. L'étude est complétée par une approche prédictive de constitution de technosols participant à la réduction du ruissellement par l'augmentation du temps de concentration. Ces technosols dotés de propriétés hydrologiques pourraient ainsi être une réponse au ruissellement dans les aménagements urbains.

Mots clés : ruissellement, temps de concentration, technosol, aménagement urbain, hydrologie.

SUMMARY

It is essential to better understand the phenomenon of "waterproofing" through its societal and environmental causes and to analyze it in the field, through its impacts and measurement tools to monitor its evolution. This phenomenon, which has always weighed heavily on our populations, has the consequence, during rainy episodes, of promoting runoff and flood risks. We will determine the physical parameters used to assess runoff and then propose a solution to reduce its consequences by adopting a sustainable approach and working on the excavation materials from major Parisian works. We must therefore apprehend the soil through pedology, understand its evolution and the many interactions that make it an environment that favors the emergence of life, in order to try to reproduce the characteristics that lead to technical soils. Through a database we have built up on the main soil analyses distributed in the Paris region, we will attempt to characterize what is commonly called "soil" or "topsoil" by urban planning professionals. The resulting analysis reveals a model serving as a comparative basis for soil creation. The study is complemented by a predictive approach for the creation of technosols that contributes to the reduction of runoff by increasing the concentration time. These technosols with hydrological properties could thus be a response to runoff in urban developments.

Key words: runoff, concentration time, technosol, urban development, hydrology