

## **Technosols composés de terres excavées et déchets de construction: de la caractérisation à la revalorisation agronomique de friches**

**Présenté par Lucas Demierbe**

Promoteurs: Prof. Bruno Delvaux (UCL/ELI/ELIE)  
Ir. David Lamy (Tradecowall s.c.r.l)

Lecteurs: Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)  
Prof. Henri Halen (UCL/ELI/ELIE)  
Ir. Jean-Marc Aldric (Cabinet du Ministre wallon de l'Environnement)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention  
du diplôme de **Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement**



## Remerciements

Je tiens à adresser de chaleureux remerciements à mes promoteurs, le professeur Bruno Delvaux et l'ingénieur David Lamy. Bruno Delvaux, pour les nombreux conseils et ce regard expert de pédologue dont j'ai pu bénéficier tout au long de ce travail ainsi que pour sa patience vis-à-vis d'un mémorant à la plume parfois trop facile. David Lamy, à l'origine de la découverte des sites étudiés et qui, malgré ses occupations bien loin de Louvain-la-Neuve, a accepté le rôle de co-promoteur et a fréquemment été là pour réinsuffler des idées nouvelles dans mon mémoire.

Je tiens également à remercier très sincèrement les assistantes de laboratoire, Anne Iserentant et Claudine Givron pour leur présence et le travail titanesque qu'elles mènent au quotidien pour accompagner, voire même sauver à l'occasion, les mémorants en laboratoire.

J'exprime ensuite toute ma gratitude à l'équipe de Tradecowall s.c.r.l qui m'a initié au secteur de la gestion des terres excavées et m'a accepté en son sein pour un stage en hiver.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui, à travers leurs conseils, avis ou présence, m'ont permis d'avancer dans le rite initiatique que représente un mémoire. Je pense particulièrement à André Lannoye, Briec Hardy, Anne-Laure Jacquemart, Adrien Dockx, Jérôme Braibant, Thibault Mariage, Robin Chapelle, Florence Hauser, et ma maman, Brigitte Jacobs.

Enfin, je tenais à remercier et dédier ce mémoire à mon grand-père, Henri Jacobs, qui à travers les années n'a jamais arrêté de m'insuffler le goût de la science et l'envie d'apprendre.



## Liste des abréviations

AGW – Arrêté du Gouvernement wallon

ANC – Acid Neutralizing Capacity

BS – Base saturation

CEC – Capacité d'échange cationique

$CEC_A$  – Capacité d'échange cationique sur argile

CET – Centre d'enfouissement technique

CG – Chaumont-Gistoux

CIVE – Culture intermédiaire à vocation énergétique

$C_{org}$  – Carbone organique

$C_{tot}$  – Carbone total

DGARNE – Direction Générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement

DGRNE – Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement

ET – Elements trace

ETP – Evapotranspiration

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FC – Field capacity

FL – Fleurus

GL – Grand-Leez

HAC – High-activity clay

ICP – Inductively coupled plasma spectroscopy

IUSS – International Union of Soil Sciences

$K_s$  – Conductivité hydraulique à saturation

MO – Matière organique

MS – Matière sèche

$N_{tot}$  – Azote total

P – Précipitations (ou Phosphore)

PGDA – Programme de Gestion Durable de l'Azote

PWP – Permanent wilting point

REU – Réserve en eau utile

SBE – Somme des bases échangeables

SPGE – Société Publique de la Gestion de l'Eau

STEP – Station d'épuration

TCD – Thermal Conductivity Detector

TRB – Total reserve in basis

UE – Union Européenne

USDA – United States Department of Agriculture

WHC – Water holding capacity

WRB – World Reference Base

XRD – X-ray diffraction

## Table des figures

Figure 1: Interdépendance des différentes propriétés édaphiques (Gobat et al., 2010).....	3
Figure 2: Triangle textural (White, 2016) .....	3
Figure 3: Courbe de rétention exprimant la relation teneur en eau/succion (Javaux, 2016).....	6
Figure 4: Courbe de rétention exprimant la relation teneur en eau/succion pour différentes textures de sol (Javaux, 2016).....	6
Figure 5: Développement du sol au sein du matériau parental en parallèle de l'évolution du contenu en minéraux altérables.....	10
Figure 6: Carte de la Wallonie indiquant les 3 sites étudiés dans le cadre de ce mémoire .....	20
Figure 7: Prise de vue aérienne du site de Grand-Leez (Source: Tradecowall).....	22
Figure 8: Prise de vue aérienne du site de Grand-Leez avec représentation des 5 points d'échantillonnage.....	22
Figure 9: Prise de vue aérienne du site de Fleurus (Source: Tradecowall) .....	24
Figure 10: Prise de vue aérienne du site de Fleurus avec représentation des 5 points d'échantillonnage.....	24
Figure 11: Prise de vue aérienne du site de Chaumont-Gistoux avec représentation des 6 points d'échantillonnage.....	25
Figure 12: Prises de vue aériennes du site de la Ferme de Lauzelle (Source: UCL) .....	26
Figure 13: Extraction d'une carotte de sol à l'aide d'une sonde Geoprobe 540U (photo de gauche) et mesure des coordonnées géographiques à l'aide d'un récepteur GPS Leica (photo de droite).....	28
Figure 14: Echantillonnage (6 horizons) sur une carotte non-perturbée correspondant à un profil de sol de 1,2m. ....	28

Figure 15: Pré-traitement par broyage au pilon, compression par la technique de la bouteille et passage au tamis de 2mm.....	30
Figure 16: Infiltromètre pour la mesure du débit d'eau dans un sol saturé en fonction du temps .....	32
Figure 17: Milieu d'analyse respirométrique (Système clos contenant le sol réhumidifié et un flacon ouvert contenant une solution de NaOH) .....	35
Figure 18: Evolution de la charge caillouteuse moyenne en fonction de la profondeur pour les 3 sites étudiés .....	37
Figure 19: Terre fine et charge caillouteuse pour le site de GL. De gauche à droite: GL4 85-105; GL5 85-105; GL6 15-30.....	38
Figure 20: Composition granulométrique moyenne des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés sur base d'échantillons de terre fine après tamisage à 2mm. ....	38
Figure 21: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 4 .	39
Figure 22: Densité apparente sèche de 9 horizons de surface (Horizon 0 - 15 cm) pour les sites étudiés (3 analyses par site) .....	40
Figure 23: Densité apparente sèche moyenne des horizons de surface (0 - 15 cm) pour les sites étudiés .....	40
Figure 24: Evolution moyenne du pH pour l'ensemble des profils des 3 sites étudiés .....	41
Figure 25: Evolution de la CEC en fonction de la profondeur pour l'ensemble des profils du site de Fleurus .....	42
Figure 26: Evolution de la CEC en fonction de la profondeur pour l'ensemble des profils du site de Grand-Leez .....	42
Figure 27: Teneur en matière organique des horizons 0 - 15 et 0 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site) .....	43
Figure 28: Rapport C: N des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site). La barre orange représente la valeur seuil (C/N=20) au-delà de laquelle la minéralisation de la matière organique par la biomasse microbienne ne se fait que	

très lentement. La barre verte représente la valeur optimale du rapport C/N (10). .....	43
Figure 29: Teneurs moyennes en carbone (vert) et en azote (rouge) des horizons 0-15 et 15-30 cm pour les 3 sites étudiés.....	43
Figure 30: Teneurs moyennes en azote des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site).....	44
Figure 31: Teneurs moyennes en carbonates des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site). ....	44
Figure 32: Emission de CO <sub>2</sub> par gramme de sol en fonction du temps dans l'horizon 1 (0 - 15cm) pour les 3 sites étudiés.....	45
Figure 33: Emission de CO <sub>2</sub> par gramme de carbone organique en fonction du temps dans l'horizon 1 (0 - 15cm) pour les 3 sites étudiés .....	45
Figure 34: Peuplement végétal du site de Fleurus.....	46
Figure 35: Peuplement végétal du site de Grand – Leez .....	47
Figure 36: Comparaison de quelques propriétés du sol (horizon de surface) entre un sol cultivé de référence et FL (a), GL (b) et CG (c), entre les 3 sites FL, GL et GC (d).....	48
Figure 37: Fissuration du sol sous tension par le glissement d'une lame sous l'horizon de surface (Spoor, 2003).....	60
Figure 38: Epierreuse de type «Kongskilde Stonebear» (Source: Kongskilde (Site Web)) .....	61
Figure 39: Cultivateur lourd à dents fines de type "Terrix" (Source: Farmet (Site Web)).....	61
Figure 40 : Modèle pédogénétique illustrant le déplacement du front d'altération et l'augmentation de la fraction argileuse (minéraux secondaires) (Delvaux, 2017)....	77
Figure 41 : Courbe de titration fictive d'un matériau pédologique (adaptée de van Breemen et al., 1983), élaborée pour des sols formés dans diverses conditions climatiques. ....	78
Figure 42 : Illustration du couple matériau (roche + sol) versus biomasse (vivante et morte) en termes de bilans de protons (adapté de Schnoor & Stumm).....	78

Figure 43: Evolution de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pour les 6 profils étudiés du site de Chaumont-Gistoux .....	97
Figure 44: Evolution de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pour les 5 profils étudiés du site de Fleurus.....	97
Figure 45: Evolution de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pour les 5 profils étudiés du site de Grand - Leez.....	97
Figure 46: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Fleurus 1.....	98
Figure 47: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Fleurus 5.....	98
Figure 48: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 2 .	99
Figure 49: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 4 .	99
Figure 50: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 6	100
Figure 51 Outils de fissuration du sol en vue de la décompaction de l'horizon de surface (Spoor, 2003) .....	101

## Liste des tableaux

Tableau 1: Valeurs-type de porosité de sol en fonction de la texture (Gregory et al., 2013).....	4
Tableau 2: Valeurs-type de densité apparente sèche en fonction de la texture du sol (Biielders, 2016) .....	5
Tableau 3: Valeurs-type de conductivité hydraulique en fonction de la texture du sol (Biielders, 2016) .....	5
Tableau 4: Ensemble des caractéristiques communes à la majorité des technosols (Lehmann et Stahr, 2007) .....	19
Tableau 5: Plan général de l'ensemble des analyses ayant été effectuées dans le cadre de ce mémoire .....	29
Tableau 6: Analyse granulométrique des horizons 0-15 et 15-30cm pour les 3 sites étudiés sur base d'échantillons de terre fine après tamisage à 2mm. ....	38
Tableau 7: Porosité moyenne des horizons de surface (0 - 15 cm) pour les sites étudiés .....	40
Tableau 8: Taxons recensés par relevés phytosociologiques sur les 3 sites étudiés.....	46
Tableau 9: Recouvrement et dominances au sein de la végétation suite aux relevés phytosociologiques sur les 3 sites étudiés .....	46
Tableau 10: Tableau comparatif des principales caractéristiques des sols des 3 sites étudiés et d'un sol de référence .....	49
Tableau 11: Valeurs seuils limites des terres non contaminées en Wallonie, en Flandre et aux Pays-Bas pour les dix paramètres souvent contraignants en Wallonie .....	95
Tableau 12: Paramètres statistiques de la charge caillouteuse pour les 3 sites étudiés .....	97
Tableau 13: Paramètres statistiques du pH pour les 3 sites étudiés.....	100
Tableau 14: Paramètres statistiques de la CEC pour les 3 sites étudiés .....	100
Tableau 15: Paramètres statistiques de la SBE pour les 3 sites étudiés.....	101

Tableau 16: Teneurs maximales admissibles et teneurs de sécurité prévues par l'annexe 1 de l'AGW du 30/11/1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait des travaux de dragage ou de curage ..	102
Tableau 17 : Nombre d'espèces hyperaccumulatrices connues et familles les plus représentées pour différents métaux (Dubourguier et al., 2001) .....	103
Tableau 18: Description du profil de sol Fleurus 2 (FL2) .....	111
Tableau 19: Description du profil de sol Fleurus 3 (FL3) .....	112
Tableau 20: Description du profil de sol Fleurus 4 (FL4) .....	113
Tableau 21: Description du profil de sol Fleurus 5 (FL5) .....	114
Tableau 22: Description du profil de sol Grand-Leez 2 (GL2) .....	115
Tableau 23: Description du profil de sol Grand-Leez 3 (GL3) .....	116
Tableau 24: Description du profil de sol Grand-Leez 4 (GL4) .....	117
Tableau 25: Description du profil de sol Grand-Leez 5 (GL5) .....	118
Tableau 26: Description du profil de sol Grand-Leez 6 (GL6) .....	119
Tableau 27: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 1 (CG1) .....	120
Tableau 28: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 2 (CG2) .....	121
Tableau 29: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 3 (CG3) .....	122
Tableau 30: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 4 (CG4) .....	123
Tableau 31: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 5 (CG5) .....	124
Tableau 32: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 6 (CG6) .....	125

---

# Table des matières

---

<b>1. Introduction et objectifs de l'étude .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte global .....	1
1.2 Objectifs .....	1
<b>2. Etat de l'art .....</b>	<b>2</b>
2.1 Définition et rôles d'un sol .....	2
2.1.1 Définition d'un technosol .....	2
2.2 Caractéristiques d'un sol .....	3
2.2.1 Propriétés physiques .....	3
2.2.1.1 Granulométrie .....	3
2.2.1.2 Porosité et densité .....	4
2.2.1.3 Propriétés hydriques et hydrodynamiques .....	5
2.2.2 Propriété physico-chimiques .....	6
2.2.2.1 pH et acidité .....	6
2.2.2.2 CEC et cations échangeables .....	7
2.2.2.3 Matière organique .....	7
2.2.2.4 Rapport C/N .....	8
2.2.2.5 Carbonates .....	8
2.2.3 Propriétés biologiques .....	9
2.2.3.1 Respiration microbienne .....	9
2.2.3.2 Phytosociologie .....	9
2.3 Evolution d'un sol .....	10
2.4 Evolution d'un technosol .....	11
2.5 Interactions de la biosphère avec le sol .....	12
2.6 Le cadre législatif et la problématique des terres excavées .....	13
2.7 La gestion actuelle des déchets et sous-produits de construction et terrassment .....	16
2.8 La formation de sols fertiles à partir de matériaux recyclés urbains .....	16
2.8.1 Caractérisation d'un sol urbain ou formé à partir de déchets inertes urbains .....	18
<b>3. Matériel et méthode .....</b>	<b>20</b>
3.1 Matériel .....	20
3.1.1 Avant-propos .....	20
3.1.2 Technosols étudiés .....	20
3.1.2.1 Avant-propos: Tradecowall .....	21
3.1.2.2 Site de Grand-Leez .....	22
3.1.2.3 Site de Fleurus .....	24
3.1.2.4 Site de Chaumont-Gistoux .....	25
3.1.3 Sol de référence: la ferme de Lauzelle .....	26
3.2 Méthodologie .....	27

3.2.1	Protocole d'échantillonnage .....	27
3.2.2	Plan d'analyse .....	28
3.2.3	Protocole de prétraitement .....	29
3.2.4	Mesure des propriétés physiques.....	30
3.2.4.1	Mesure de la granulométrie .....	30
3.2.4.2	Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X .....	31
3.2.4.3	Mesure de la densité apparente et de la porosité .....	31
3.2.4.4	Mesure des propriétés hydriques et hydrodynamiques .....	32
3.2.5	Mesure des propriétés physico-chimiques .....	32
3.2.5.1	Mesure du pH.....	32
3.2.5.2	Mesure des bases échangeables.....	33
3.2.5.3	Mesure de la CEC .....	33
3.2.5.4	Mesure du carbone et de la matière organiques .....	33
3.2.5.5	Mesure du carbone total et de l'azote total.....	34
3.2.5.6	Mesure des carbonates.....	34
3.2.6	Mesure des propriétés biologiques.....	35
3.2.6.1	Mesure de la respiration microbienne.....	35
3.2.6.2	Analyse phytosociologique.....	36
<b>4.</b>	<b>Résultats.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Les technosols étudiés .....</b>	<b>37</b>
4.1.1	Propriétés physiques .....	37
4.1.1.1	Charge caillouteuse .....	37
4.1.1.2	Granulométrie .....	38
4.1.1.3	Minéralogie.....	39
4.1.1.4	Porosité et densité.....	40
4.1.1.5	Propriétés hydriques et hydrodynamiques .....	40
4.1.2	Propriétés physico-chimiques.....	41
4.1.2.1	pH-H <sub>2</sub> O.....	41
4.1.2.2	CEC et bases échangeables .....	42
4.1.2.3	Matière organique.....	43
4.1.2.4	Carbone et Azote totaux.....	43
4.1.2.5	Carbonates .....	44
4.1.3	Propriétés biologiques.....	45
4.1.3.1	Respiration microbienne.....	45
4.1.3.2	Analyse phytosociologique.....	46
<b>4.2</b>	<b>Comparaison des diagnostics édaphiques avec un sol de référence .....</b>	<b>48</b>
<b>5.</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1</b>	<b>Qualité générale des sites étudiés.....</b>	<b>50</b>
5.1.1	Pierrosité, densité et granulométrie .....	50
5.1.2	Propriétés hydrodynamiques .....	51
5.1.3	pH, carbonates, CEC et bases échangeables.....	51
5.1.4	Carbone, azote et matière organique .....	53

5.1.5	Propriétés biologiques .....	54
5.1.6	Peuplement végétal.....	55
5.2	<b>Risques liés à l'exploitation des sites.....</b>	<b>56</b>
5.2.1	Evaluation de l'innocuité pour la santé et l'environnement .....	56
<b>6.</b>	<b>Approfondissement: Optimiser l'évolution des technosols en vue de construire des sols à usage agronomique .....</b>	<b>58</b>
6.1	<b>Introduction .....</b>	<b>58</b>
6.2	<b>Travail mécanique des technosols .....</b>	<b>59</b>
6.2.1	Décompactation .....	59
6.2.2	Diminution de la charge caillouteuse.....	60
6.2.3	Approche générale .....	62
6.3	<b>Gestion des amendements .....</b>	<b>62</b>
6.3.1	Déchets verts broyés.....	64
6.3.2	Boues de station d'épuration .....	64
6.3.3	Boues de dragage et curage .....	66
6.3.4	Digestat, sous-produit de la biométhanisation.....	67
6.3.5	Fumier .....	69
6.3.6	Argile expansée.....	69
6.3.7	Estimation des coûts.....	70
6.3.8	Approche générale .....	70
6.4	<b>Végétalisation des technosols .....</b>	<b>72</b>
6.4.1	Plantes pionnières.....	72
6.4.2	Phytomanagement .....	73
6.4.2.1	Phytoaccumulation.....	73
6.4.2.2	Phytoremédiation .....	73
6.4.2.3	Approche générale .....	74
6.4.3	Production de bioénergie .....	74
6.4.3.1	Plantation de miscanthus.....	74
6.4.4	Végétalisation à haute valeur écologique.....	75
6.4.4.1	Mélange de fleurs .....	75
6.4.4.2	Prairies fleuries.....	75
6.4.4.3	Mise en place d'une prairie fleurie.....	76
6.4.4.4	Estimation des coûts .....	76
6.5	<b>Discussion.....</b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>Discussion générale.....</b>	<b>77</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>80</b>
<b>9.</b>	<b>Références.....</b>	<b>81</b>
<b>10.</b>	<b>Annexes .....</b>	<b>91</b>



---

# 1. Introduction et objectifs de l'étude

---

## 1.1 Contexte global

Depuis le Néolithique, l'économie de notre société est fondée sur un modèle de production en perpétuelle croissance, ce modèle impliquant l'accès à des ressources inépuisables et peu coûteuses. L'amplification de l'érosion des sols agricoles, la perte de terres fertiles, la dégradation de la qualité des sols, la contamination des eaux de surface et souterraines et la perte de biodiversité révèlent, entre autres, que ce modèle de production n'est pas viable. Le développement d'une économie circulaire, réparatrice et basée sur la durabilité est essentiel. Limitant la consommation et le gaspillage des matières premières, cette économie prône que le déchet d'une filière soit recyclé en matière première d'un autre processus de production. Les déchets de construction (dont les terres excavées), représentant à eux seuls un tiers de l'ensemble des déchets produits par l'UE apparaissent comme les principaux matériaux à revaloriser. En Wallonie, 10 millions de tonnes de terres sont excavées chaque année. Stockés sur des sites sans contrôle agréé jusqu'en 2001, ces matériaux n'étaient pas soumis à une législation ad hoc et n'étaient que peu valorisés. Leur gestion actuelle est pourtant primordiale au regard des objectifs du développement durable, source de plus-values économique, environnementale et sociale. La dégradation de la qualité des sols de nos régions, la perte en surfaces agricoles, ainsi que l'importance des flux de terres excavées et déchets de construction en Belgique ont été les moteurs du présent travail. Ces matériaux proviennent de milieux extrêmement variés et peuvent donc être caractérisés par des propriétés pédologiques variées à prendre en compte pour leur valorisation. Les sites accueillant ces matériaux sont très divers: carrières et mines épuisées, anciens CET, etc. Ils influencent également l'évolution des sols. Les technosols, résultats du stockage de ces matériaux au sein de ces sites particuliers, sont des sols anthropogènes aux caractéristiques singulières, chacun d'eux constituant donc un cas unique et complexe. Dès lors, leur caractérisation, leur évolution et leur gestion sont des sujets quasi inexplorés à ce jour. Ce travail vise à contribuer à combler ce vide.

## 1.2 Objectifs

Les trois objectifs principaux de ce mémoire sont les suivants:

- 1) Caractériser les principales propriétés de trois technosols élaborés à des époques différentes dans trois environnements différents à partir d'un même type de matériaux.
- 2) Estimer l'évolution de technosols composés de ces matériaux technogéniques à partir des connaissances acquises et de la caractérisation de trois technosols d'âges différents.
- 3) Approfondir les techniques d'amélioration de la fertilité des technosols.

Par ailleurs, l'approche du présent travail s'inscrit dans le cadre de la législation wallonne relative à la gestion des sols, des déchets et des terres excavées.



---

## 2. Etat de l'art

---

### 2.1 Définition et rôles d'un sol

Les déclinaisons de la définition du sol sont nombreuses. Le United States Department of Agriculture (USDA) le définit comme «*un corps naturel composé de solides (minéraux ou organiques), liquides et gaz présent à la surface terrestre, occupant de l'espace et se caractérisant par l'une ou l'autre des situations suivantes: horizons ou couches, qui se distinguent du matériel initial en raison d'ajouts, de pertes, de transferts et/ou de transformations d'énergie et de matière ou par la capacité à supporter l'enracinement de plantes dans un environnement naturel*» (USDA, 1975). Le sol a également été défini par l'IUSS (International Union of Soil Sciences) comme «*tout matériau situé dans les 2 premiers mètres de la surface terrestre qui est en contact avec l'atmosphère, à l'exception des organismes vivants, des surfaces entièrement gelées non couvertes par d'autres matériaux et des surfaces recouvertes d'eau*» (IUSS, 2006).

Le sol fournit une large gamme de services écosystémiques intimement liés (Daily, 1997):

- support physique pour les plantes;
- rétention et mise à disposition de nutriments aux plantes;
- renouvellement de la fertilité du sol;
- régulation des cycles d'éléments majeurs et du cycle hydrologique.

#### 2.1.1 Définition d'un technosol

Les technosols (du grec *technikos*, habilement fabriqué) forment un nouveau groupe de sols de référence dans le système de classification international du World Reference Base (WRB) de la FAO. Cette classification comprend les «*sols dont les propriétés et la pédogénèse sont régies par leur origine technique. Ils contiennent une quantité significative d'artefacts (tout élément produit ou extrait de la terre par l'Homme) et/ou sont composés de matériaux créés par l'Homme et possédant des propriétés différentes de la roche naturelle. Ils comprennent, entre autres, les sols formés de déchets (remblais, décharges, boues, cendres, déchets miniers, etc.) et les sols construits à partir de matériaux fabriqués par l'Homme. Le matériau parental peut être très varié et comprend tout type de matériau fabriqué ou exposé à une activité humaine et qui, à l'état naturel, ne devrait pas se retrouver à la surface de la Terre. On les retrouve pour la plupart dans des zones urbaines ou industrielles, et ils peuvent être mélangés de manière relativement complexe avec d'autres types de sol*» (FAO, 2014).

D'autres systèmes de classification nomment différemment les sols formés par des terres excavées. Le référentiel pédologique français désigne par «anthrosol transformé» les sols d'origine naturelle tellement transformés par des processus anthropogéniques que le sol

originel n'est plus reconnaissable ou a acquis de nouvelles propriétés qui ne permettent plus son rattachement à d'autres références (*Baize et Rossignol, 1995*).

## 2.2 Caractéristiques d'un sol

### 2.2.1 Propriétés physiques

#### 2.2.1.1 Granulométrie

La détermination des teneurs en éléments texturaux, effectuée en fonction de la taille des particules du sol, donne une indication du degré d'altération de celui-ci. Au cours du développement d'un sol, les minéraux primaires sont altérés et transformés en minéraux secondaires. L'altération tend d'une part à diminuer la moyenne de distribution statistique des tailles des particules et d'autre part à augmenter la surface spécifique des minéraux.

Les particules du sol sont classées en fonction de leur taille: sable (2mm-50µm), limon (50µm-2µm) et argile (<2µm). Les particules d'un diamètre supérieur à 2mm représentent la charge caillouteuse.

La granulométrie d'un sol est une caractéristique importante à prendre en considération dans l'analyse d'un sol car de nombreuses propriétés du sol en découlent (Figures 1 et 2) (*Gobat et al., 2010*).

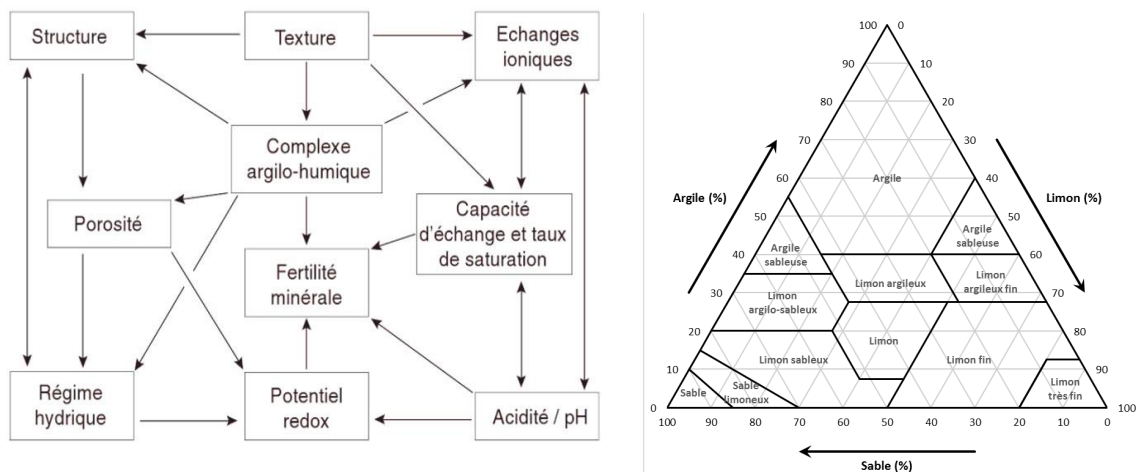


Figure 1: Interdépendance des différentes propriétés édaphiques (*Gobat et al., 2010*)

Figure 2: Triangle textural (*White, 2016*)

La quantité d'éléments grossiers (charge caillouteuse), dès lors qu'elle est significative, est à prendre en compte car elle génère des effets agronomiques considérables:

- obstacle au développement racinaire;
- obstacle à la mécanisation;
- diminution de la réserve en eau utile;
- protection contre le tassement;
- drainage;
- etc.

### 2.2.1.2 Porosité et densité

Les particules élémentaires ou constituants (minéraux et organiques) du sol se lient les uns aux autres pour former des agrégats (*Danielson et al., 1986*). L'agrégation est l'un des indicateurs de la fertilité du sol car elle intègre les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. Elle permet de différencier les sols «formés» des non-sols, ensembles de matériaux étrangers au site et non-altérés (*Young & Crawford 2004*). Agrégation et espace poral sont des notions indissociables, l'agrégation de deux particules entraînant la formation d'un vide. L'espace poral, plutôt que les particules de sol qu'il sépare, donne une grande quantité d'informations concernant la caractérisation du sol à des fins agronomiques.

La structure du sol est en lien avec de nombreuses propriétés physiques importantes du sol, en particulier celles relatives à la rétention et au transport des fluides.

Au sein du sol, il existe une grande diversité de cavités qui varient en quantité, taille, forme, tortuosité et continuité. La caractérisation précise de chaque forme est relativement impossible, mais la caractérisation de l'espace poral total peut être aisément faite, à la fois sur le terrain et en laboratoire (*Danielson et al., 1986*).

La porosité d'un sol est définie comme étant le rapport entre le volume poral  $V_p$  sur le volume total  $V_t$ , selon:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_t}$$

Elle peut également être définie avec les valeurs de densité apparente  $\rho_d$  et réelle  $\rho_s$ , selon:

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

La densité réelle d'un sol  $\rho_s$  est empiriquement équivalente à la densité du quartz ( $2,65\text{g/cm}^3$ ).

Le Tableau 1 donne des valeurs de porosité pour 3 textures de sol différentes.

Texture	Porosité [-]
Sable	0,39
Limon	0,52
Argile	0,58

Tableau 1: Valeurs-type de porosité de sol en fonction de la texture (*Gregory et al., 2013*)`

La densité apparente d'un sol  $\rho_d$  est le rapport de la masse sèche du sol sur  $V_t$ , selon:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$$

Le volume total inclut d'une part le volume des solides présents dans l'échantillon et d'autre part l'espace poral.

La densité apparente n'est pas une constante pour un type de sol donné, elle varie avec les conditions structurales du sol, principalement celles liées au phénomène de compaction. Elle peut également varier avec la teneur en eau si le sol est gonflant. Des valeurs de densité apparente «repères» pour différents sols sont données dans le Tableau 2.

Sols	Densité [g/cm <sup>3</sup> ]
Sableux	1,50 – 1,80
Limoneux	1,30 – 1,50
Argileux	1,10 – 1,30

Tableau 2: Valeurs-type de densité apparente sèche en fonction de la texture du sol (Biielders, 2016)

### 2.2.1.3 Propriétés hydriques et hydrodynamiques

L'eau du sol joue un rôle considérable dans les phénomènes biologiques, physiques et chimiques du sol. Ces molécules interagissent avec les constituants dans l'agrégation. Dans le sol, l'eau est retenue dans les pores ou par interaction avec les particules d'argile. Sa rétention varie dans le temps et l'espace et est fonction de différents facteurs: la composition et la structure du sol, ainsi que les conditions climatiques (température, humidité, etc.) (Bruand et al., 1996).

Modéliser l'écoulement de l'eau dans le sol requiert la mesure de la conductivité hydraulique et de la rétention en eau. Ces deux paramètres régissent ainsi les transferts de solutés vers les nappes aquifères (Javaux et Biielders, 2016).

La conductivité hydraulique caractérise la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Elle est directement liée à la porosité et, principalement, à la répartition des pores selon leur taille. Le Tableau 3 propose des valeurs «repères» de conductivité en fonction de la texture du sol.

Texture	Conductivité hydraulique [mm/h]
Sable	50 – 200
Limon	10 – 30
Argile	0 – 10

Tableau 3: Valeurs-type de conductivité hydraulique en fonction de la texture du sol (Biielders, 2016)

La rétention en eau est la capacité du sol à retenir une partie de l'eau infiltrée. Elle dépend de propriétés physiques (texture, porosité, etc.) et physico-chimiques (caractère hydrophile des particules, etc.). Elle est déterminée par une relation de type Q-I (Quantité-Intensité) reliant la teneur en eau  $\Theta$  au potentiel matriciel  $\Psi$  exprimé en  $\log_{10}$  de la hauteur d'eau en cm.. Cette relation, illustrée à la Figure 3, met en évidence trois types de porosité à fonctionnalités distinctes:

- macropores: l'eau est mobile dans le champ gravitaire
- mésopores: l'eau est retenue et est mobile selon le gradient du potentiel matriciel (eau disponible pour la plante)
- micropores: eau hygroscopique, adsorbée sur les surfaces colloïdales.

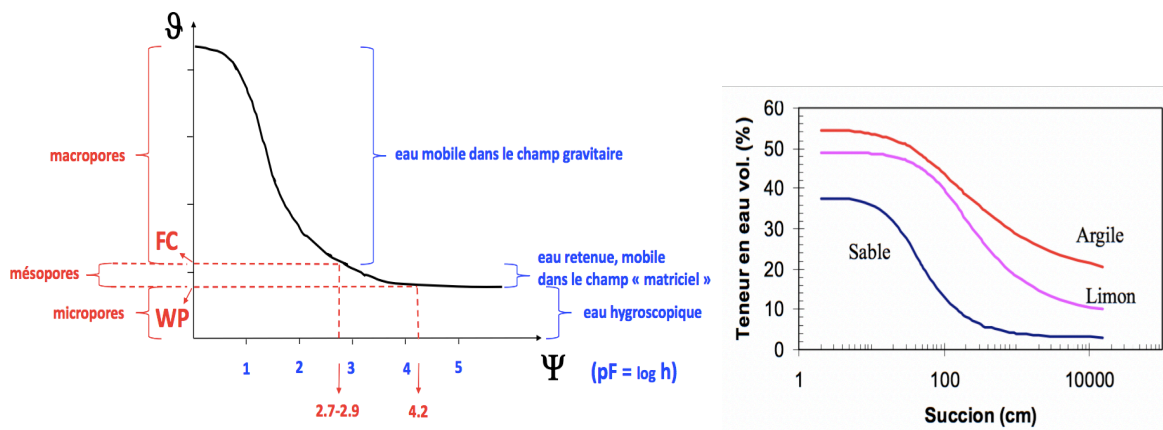


Figure 3: Courbe de rétention exprimant la relation teneur en eau/succion (Javaux, 2016)

Figure 4: Courbe de rétention exprimant la relation teneur en eau/succion pour différentes textures de sol (Javaux, 2016)

La Figure 4 illustre la relation  $\Theta$ - $\Psi$  pour des sols de textures contrastées.

L'eau utile est dite disponible pour les plantes. Elle est calculée par la différence entre deux teneurs en eau « critiques » mesurées respectivement à la capacité au champ (FC, *Field Capacity*) et au point de fanaison (WP, *Wilting Point*):  $\Theta_{FC} - \Theta_{WP}$ .  $\Theta_{FC}$  est mesurée après ressuyage (48h) d'un sol saturé.  $\Theta_{WP}$  est mesurée à  $pF=4.2$ , potentiel considéré comme correspondant au flétrissement irréversible (Biielders et Javaux, 2016).

## 2.2.2 Propriété physico-chimiques

### 2.2.2.1 pH et acidité

Le pH du sol est la valeur du  $\log_{10}$  de l'activité en ions  $H^+$  mesurée dans une suspension sol-eau et/ou sol-solution saline. Il fournit donc une indication sur le degré d'acidité du sol. Au-delà, il peut être source d'informations supplémentaires, par exemple à propos de la disponibilité des nutriments, de la toxicité ou déficience de certains éléments minéraux, voire et très indirectement de l'agrégation des particules du sol.

Les sols peuvent, en fonction de leur environnement (matériau parental, topographie, climat, végétation) et de l'action humaine montrer des valeurs de pH très diverses. On peut grossièrement considérer que les valeurs de pH de la majeure partie de la couverture pédologique globale sont bornées par deux systèmes tampons: les carbonates (pH  $\sim 8$ ) et les phyllosilicates secondaires libérant Al (pH  $\sim 4$ ) (van Breemen et al., 1983). Au-delà de pH  $\sim 8$ , d'autres sels plus solubles précipitent (environnements arides); en-deçà de pH  $\sim 4$ , après dissolution des phyllosilicates, le quartz et la matière organique s'accumulent (podzolisation) dans des environnements à drainage climatique positif ( $P > ETP$ ). Dans les sols à pH élevé, les carbonates constituent les consommateurs de protons privilégiés. Cela handicape la libération de nutriments. Un excès de calcaire signifie que le chaulage est inutile, l'acidité n'étant pas un problème. En revanche, plusieurs oligoéléments (Cu, Zn, Fe, Mn...) poseront problème

(réduction de leur biodisponibilité suite à leur précipitation sous forme de carbonates). Comme évoqué plus haut, il en est de même pour certains éléments majeurs, par exemple P et K.

#### 2.2.2.2 CEC et cations échangeables

La Capacité d'Echange Cationique (CEC) exprime quantitativement la charge négative du sol par unité de masse d'un sol, dans des conditions opératoires précises de force ionique, valence du cation compensateur et pH.

La CEC exprime la réactivité physico-chimique d'un sol et constitue l'un des indicateurs de sa fertilité.

Les minéraux argileux (ou phyllosilicates) et la matière organique sont les deux constituants majeurs contribuant à la CEC. Les constituants organiques possèdent des groupements carboxyliques (-COOH) et phénoliques (-OH) susceptibles de se déprotonner et de générer une charge électrique négative contribuant à la capacité d'échange des cations du sol. Les différents types de phyllosilicates (kaolinite, smectite, illite, vermiculite...) étant caractérisés par des CEC différentes, à la fois la teneur en argile et leur nature minéralogique sont importantes afin d'estimer la CEC d'un sol.

La faible fertilité des technosols pourrait ainsi être améliorée par l'amendement organique afin d'augmenter leur CEC.

Les principaux cations majeurs pouvant occuper les sites d'échanges sont  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  et  $\text{Al}^{3+}$ , ces deux derniers étant considérés comme des cations « acides ». La CEC et le taux d'occupation des cations sur les sites d'échanges dépendent notamment du pH. Sur sol calcaire, la somme des cations ( $\sum\{\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{K}^+\}$ ) adsorbés est égale à la CEC car le moindre déficit en cations sur les sites d'échange est directement comblé par des cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) libérés par la dissolution des carbonates. Le taux de saturation en « bases » est alors égal à 100 dans ces sols (White, 2006). Ce paramètre (BS, Base Saturation %) s'exprime comme suit:

$$BS = \frac{\sum\{\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{K}^+\}}{CEC} \times 100$$

Pour un bulletin d'analyses d'un profil de sol calcaire, toute valeur de BS supérieure à 100% est un artefact de laboratoire dû aux conditions de mesures (pH 7).

#### 2.2.2.3 Matière organique

La matière organique joue un rôle central dans les propriétés biologiques et physico-chimiques d'un sol et dans les services écosystémiques qu'il fournit. Elle améliore la capacité de rétention en eau et l'aération du sol, elle contribue à la capacité d'échange en cation et améliore la structure du sol, rendant celui-ci plus favorable à sa colonisation par plantes et organismes.

D'un point de vue agronomique, la teneur en matière organique reflète l'équilibre entre le gain de carbone venant des résidus végétaux et des excréments animaux et la perte de carbone par décomposition via les différents organismes du sol (*White, 2006*). La décomposition microbienne est essentiellement fonction du pH, de la température, de la teneur en eau du sol et de la biomasse microbienne présente (*Stevenson, 1994; Sollins et al., 2006*).

#### 2.2.2.4 Rapport C/N

La détermination des teneurs en carbone et azote permet une caractérisation de la matière organique et de son évolution à travers le rapport C/N. Ce rapport établit le degré de dégradation de la matière organique par les microorganismes du sol. Les composés organiques ont des rapports C/N très variables.

Si le rapport dans le sol est inférieur à 20, la décomposition de la matière organique, la minéralisation et la mise à disposition pour les plantes d'éléments comme l'azote seront favorisées. Dans le sol, le rapport C/N est optimal à une valeur de 10 et la production d'azote et la vitesse de décomposition y sont maximales. Si le rapport est supérieur à 20, cela signifie que la quantité d'azote présent n'est pas suffisante pour permettre la décomposition de la matière organique: la minéralisation sera trop lente en raison du manque d'azote pour les microorganismes. Cela peut entraîner l'augmentation de la biomasse microbienne et l'immobilisation nette de l'azote qui sera dès lors moins disponible pour les plantes (*White, 2006*). Il est cependant prouvé que des plantes nitrophiles peuvent se développer sur un substrat pauvre en azote et un rapport C/N supérieur à 50, prouvant que l'azote n'est pas dans tous les cas un facteur limitant (*Jocteur-Monrozier, 1973*).

#### 2.2.2.5 Carbonates

Les matériaux les plus souvent retrouvés dans les technosols (briques, résidus de béton, etc.) sont de nature alcaline et fortement carbonatée (*Nehls et al., 2012*). Ces matériaux se retrouvent mélangés avec des matériaux parentaux naturels (terre « indigène », terre de remblais), générant une forte hétérogénéité spatiale dans les technosols (*Morel et al., 2005*). La présence de carbonates dans un sol, à l'instar de la matière organique ou des oxydes de fer, est un facteur important dans la stabilité structurale de ce sol (*Biielders, 2017*).

La présence, à fortiori la prédominance de carbonates constitue un frein aux processus d'altération et de libération de nutriments via, d'une part, les carbonates constituant des puits de protons privilégiés (ménageant de ce fait les réserves en autres minéraux altérables) et, d'autre part, la précipitation de carbonates de Fe, Mn, Cu, Zn, etc (*Dutil, 1994*).

## 2.2.3 Propriétés biologiques

### 2.2.3.1 *Respiration microbienne*

La respiration aérobie du sol est gouvernée par la biomasse microbienne. Elle implique d'une part la dégradation de molécules carbonées complexes et la consommation d'oxygène et d'autre part la production d'eau, de CO<sub>2</sub> et d'énergie utilisée pour la croissance cellulaire des microorganismes (*White, 2006*).

La respiration microbienne est stimulée par la température et par les techniques culturales telles que le travail du sol, la fertilisation, le chaulage, l'irrigation, l'apport d'amendements organiques, etc (*Currie, 1970*). Le taux de respiration est régulé par les teneurs en matière organique (et par la qualité de cette dernière), en oxygène et en eau. La structure du sol influence l'aération et le drainage et, par conséquent, impacte directement la respiration microbienne. Elle dépend de la texture, de la teneur en matière organique, l'usage du sol, des techniques culturales, etc (*White, 2006*).

### 2.2.3.2 *Phytosociologie*

La végétation assure plusieurs fonctions lors du traitement des friches et sites de dépôt de déchets et terres de déblais (*Brown et al., 1983; Walton et Edwards, 1986; Simmons, 1988*):

- protection du sol (diminution de la battance et de l'influence éolienne);
- apport de matière organique (amélioration de la rétention d'eau et de cations, de l'aération, du drainage, de la structure, etc.);
- augmentation de la flore microbienne et réintroduction des macro-organismes (ingénieurs de l'écosystème, *cf* Section 2.5);
- diminution du lessivage vers le sous-sol et les nappes aquifères;
- translocation des micropolluants du sol à la plante (stockage et/ou phytodégradation);
- amélioration de la stabilité structurale du sol par les racines;
- plus-value paysagère;

Cependant, dans le cas de sites potentiellement pollués, la végétation peut représenter plusieurs désavantages et freins à la réhabilitation du site (*Brown et al., 1983*):

- des plantes stockant les micropolluants sans les dégrader, dès lors qu'elles ne sont pas extraites du site par l'homme, maintiendraient dans le sol des substances toxiques;
- le couvert végétal limitant l'impact sur le sol des rayons UV, la décomposition photocatalytique des polluants organiques de l'horizon de surface, plus important processus de dégradation abiotique, est diminuée (*Wangl et al. 1995*).

## 2.3 Evolution d'un sol

Résultat d'une part de l'altération du matériau parental et d'autre part de la décomposition de matière organique fraîche, le sol est un milieu particulièrement réactif et dynamique.

La pédogénèse est le processus de formation des sols à partir de l'altération de la roche-mère. Premièrement la roche-mère est altérée physiquement et chimiquement, se transformant en matériau parental. L'altération est accélérée par l'apparition de plantes pionnières. Ces plantes (lichens, mousses, etc.) peuvent stocker l'énergie solaire en énergie chimique dans les produits de la photosynthèse. Certaines de ces plantes sont également capables de fixer l'azote atmosphérique et de l'incorporer dans des protéines végétales, ou encore de prélever des éléments minéraux du sol, de son matériau parental et de sa roche-mère. À la mort de chaque génération de ces plantes pionnières, les éléments minéraux et les matières sont déposées à la surface du sol et fournissent un substrat colonisé par les microorganismes. L'apparition de plantes plus grandes (arbustes, arbres, etc.) dotées de racines plus profondes, contribue à déplacer le front d'altération en profondeur. Des horizons distincts se forment (*White, 2006*), comme illustré schématiquement à la Figure 5 (*Delvaux, 2017*).

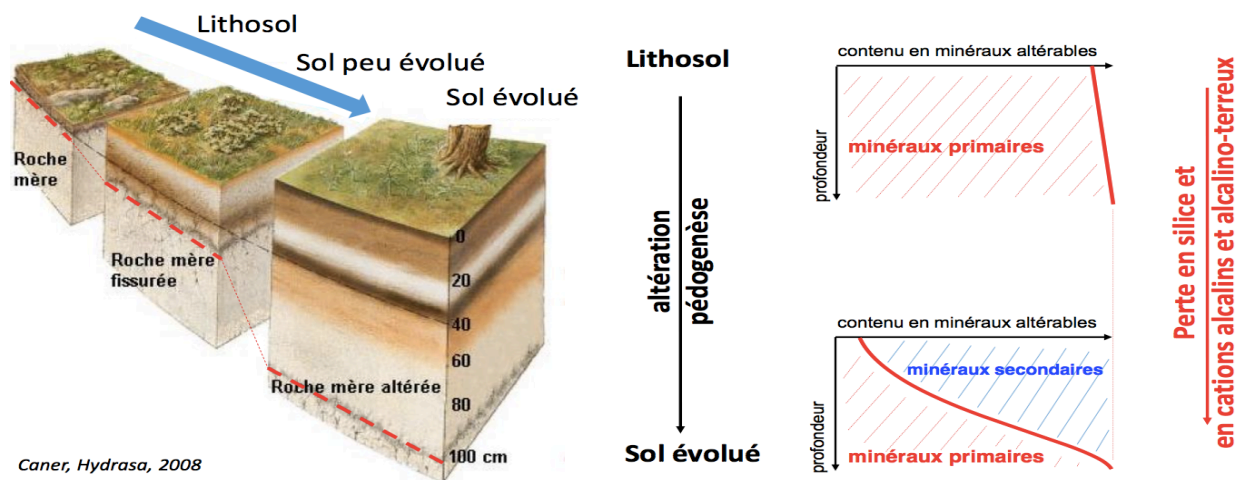


Figure 5: Développement du sol au sein du matériau parental en parallèle de l'évolution du contenu en minéraux altérables

La pédogénèse s'accompagne d'une acidification lorsque la précipitation annuelle moyenne excède l'évapotranspiration annuelle moyenne.

Différents processus sont à l'origine de la libération de protons dans le sol: la nitrification, l'ammonification, la respiration, la dissolution de CO<sub>2</sub> atmosphérique, l'extrusion de protons ainsi que l'oxydation de divers éléments (Fe, Mn, etc.) (*van Breemen et al 1983*).

La formation du sol est influencée par plusieurs facteurs (*Jenny, 1941*): le matériau parental, le climat, la végétation (plus largement le facteur biotique), la topographie et le temps.

## 2.4 Evolution d'un technosol

La formation de sols est de vitesse variable: de quelques siècles (*Cornelis et al 2014*) à plusieurs milliers d'années (*Scalenghe et Ferraris, 2008*).

Bien que la formation et l'évolution d'un technosol se distingue de la pédogénèse de sols naturels (*Lehmann and Stahr, 2007*), de nombreux processus pédogénétiques leur sont communs, telles l'agrégation et la décarbonatation (*Séré et al., 2010; Jangorzo et al., 2014*).

Dans un technosol, la formation de macro-agrégats s'opère dès lors que deux matériaux technogéniques (se rapportant à un processus ou à une substance créée ou modifiée par la technologie humaine) sont mélangés. Cette formation est déterminée par 2 facteurs:

- le facteur anthropique lié au choix de la composition des mélanges amendés (nombre, nature et proportions des déchets ou sous-produits) et à la technique de mélange;
- le facteur biologique lié à l'action de la faune et de la flore du sol.

De plus, la nature des matières organique et minérale composant le ou les matériaux parentaux utilisés joue également un rôle important dans l'agrégation. Le degré d'évolution de la matière organique est très important. Il peut être caractérisé par la valeur du rapport C/N. Par exemple, les mélanges de déchets caractérisés par un rapport C/N modéré à élevé (10-20) présentent une biomasse microbienne et une proportion d'agréats stables plus importantes.

Au niveau de l'évolution des caractéristiques physiques du technosol, la densité apparente des premiers centimètres de sol tendra à augmenter, en raison tassement progressif du sol au cours du temps. Cette évolution n'est cependant pas irréversible, la colonisation par la végétation ou l'action mécanique pouvant fortement impacter le sol.

Au niveau chimique, si le mélange des matériaux technogéniques contient du matériel organique, le phénomène de minéralisation sera également retrouvé (*Damas et Coulon, 2016*).

La plupart des technosols composés de déchets de construction sont riches en carbonate de calcium. La décarbonatation y est un processus répandu (*Damas et Coulon, 2016*). Ces sols se caractérisent donc généralement par des pH élevés, supérieurs à 8.

Le terme technosol brassant une très large variété de sols aux caractéristiques différentes, proposer une évolution générique de ce type de sol est peu pertinent, l'évolution de ce type de sol dépendant essentiellement des matériaux technogéniques qui le composent et des actions d'origine anthropique qui y sont menées.

## 2.5 Interactions de la biosphère avec le sol

La biosphère est l'ensemble des organismes vivants. Elle est présente dans tous les écosystèmes et à tout type d'échelle. Bien que le vivant soit omniprésent dans le sol, la quantité d'organismes vivants et l'impact sur le sol qui en résulte varient fortement en fonction de la profondeur considérée, les conditions variant également. De la litière aux horizons profonds, on observe généralement d'une part une diminution de la porosité, de la lumière, de la circulation des gaz, de la matière organique ainsi que du nombre d'espèces vivantes présentes, et d'autre part une augmentation de la teneur en eau, de la concentration en CO<sub>2</sub> et de la constance de la température (*Declerck, 2017*).

Les organismes capables de modifier physiquement leur environnement en créant, détruisant ou modifiant des niches écologiques sont appelés «ingénieurs de l'écosystème» (*Jones et al., 1994*). Ils peuvent contribuer à restaurer ou initier des écosystèmes (*Byers et al., 2006*). Deux espèces sont à relever en Belgique : Les lombrics et les fourmis.

Les lombrics, acteurs majeurs dans la structuration des sols, ont de multiples rôles : ils favorisent la décomposition de la matière organique par une action physique et chimique, l'aération et le drainage du, la redistribution de matière organique entre les horizons par bioturbation (déplacement physique de particules de sol par des organismes), etc. L'impact des lombrics sur les propriétés hydrostructurelles ont d'importantes conséquences pour la croissance végétale (*Van Groenigen et al., 2014*).

Les fourmis jouent quant à elle un rôle significatif dans la décomposition mécanique des débris organiques, produisant ainsi un substrat plus facile à transformer par les microorganismes du sol (*Declerck, 2017*).

Microorganismes et plantes jouent un rôle considérable sur l'agrégation et la stabilité du sol, parfois plus significatif que le rôle joué par les lombrics. Les racines des végétaux, en pénétrant dans le sol, créent des macropores garantissant l'aération du sol. En fragilisant un sol dense et compact elles fragmentent la terre et forment des agrégats, dont la formation est renforcée par la capacité des racines à dessécher de manière cyclique la rhizosphère par absorption de l'eau par la plante (*Angers et Caron, 1998*). De plus, les débris végétaux représentent une source alimentaire pour la faune et les microorganismes, contribuant ainsi à la formation et à la stabilisation du sol, ces derniers en retour favorisent la croissance de la plante en modifiant l'environnement physique de la racine (*Dorioz et al., 1993*), notamment par modification du pH et augmentation de la disponibilité des minéraux par exsudation d'acides organiques (*Declerck et al., 2017*).

De plus, dans le cas de sols non-naturels, à l'instar d'une décharge ou d'un site de remblais, il a été démontré que les plantes pionnières jouent un rôle considérable dans l'initiation du développement d'un sol. En rompant les lames denses des dépôts de déchets, les racines

initient un écoulement d'eau préférentiel à travers les canaux radiculaires, stimulant les activités biologiques et améliorant donc l'accumulation de matière organique dans le sol.

Ces études ont mis en avant l'importance d'un amendement des déchets et remblais avec des matières organiques afin de stimuler l'activité biologique en vue d'accélérer la formation de microstructures dans le sol, pierres angulaires d'écosystèmes productifs (*Arocena et al., 2010*). Les interactions entre organismes vivants et matériau parental influencent positivement l'acquisition par les technosols de propriétés (hydro-)structurelles (*Deeb et al., 2016*). La prise en considération de la biosphère, majoritairement des organismes vivants du sol, lors de la construction d'un technosol s'avère donc primordiale afin d'optimiser la formation d'un sol fertile (*Deeb et al., 2016*). Les aménagements nécessaires à l'installation pérenne d'ingénieurs de l'écosystème (amendement de matière organique, implantation de peuplements végétaux, aération du sol, etc.) sont donc essentiels à la genèse des technosols.

## 2.6 Le cadre législatif et la problématique des terres excavées

A l'heure actuelle, la gestion des terres excavées implique la prise en compte d'une directive et de deux décrets:

- directive Cadre Déchets n°2008/98 UE;
- décret «Déchets»;
- décret «Sols».

L'annexe III de la **Directive Cadre Déchets n°2008/98 UE** distingue les déchets classés dangereux, présentant une ou plusieurs des 15 propriétés de danger énumérées (ecotoxique, cancérogène, mutagène, etc.) des déchets non-dangereux. Les terres dangereuses et non-dangereuses sont définies respectivement par les codes 17.05.03 et 17.05.04 (Annexe 1).

Le **décret «Déchets»** du 27 juin 1996 a pour objectif général de protéger l'environnement et la santé de l'homme de toute influence dommageable causée par les déchets. Ce décret définit les «déchets» comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». Les terres de remblais sont considérées comme des déchets par ce décret.

Néanmoins, aux termes de l'AGW<sup>1</sup> du 14 juin 2001 relatif à la valorisation de certains déchets, les terres excavées et évacuées peuvent faire l'objet d'une revalorisation. Cet arrêté définit les valorisations possibles pour différents types de déchets. Les terres de remblais définies non-dangereuses (code 17.05.04) sont classées en 2 catégories : terres contaminées et

---

<sup>1</sup> Arrêté du Gouvernement wallon

terres non-contaminées. Une série de paramètres (substances organiques, métaux lourds, etc.) déterminent si un lot de terre appartient à l'une ou l'autre catégorie en fonction de ses concentrations de ces différents éléments par rapport aux valeurs seuils fixées par l'AGW. Les terres non-contaminées (définies par les valeurs seuils de l'AGW, Annexe 2, point 1) peuvent être réutilisées directement sur site ou déplacées vers un autre site sans devoir être encodées.

Les terres contaminées peuvent passer sous la dénomination terres décontaminées dès lors qu'elles passent par un centre de traitement autorisé et qu'elles sont reconnues comme telles (sur la base de la définition des valeurs seuils de l'AGW, Annexe 2, point 2) ou qu'elles sont sujettes à la procédure administrative définie par l'article 13 de l'arrêté du Gouvernement wallon (valorisation d'autres déchets non dangereux que ceux définis par l'arrêté du Gouvernement wallon). Les terres ne répondant pas à l'un ou l'autre de ces critères gardent leur dénomination «terres contaminées».

La revalorisation des terres décontaminées s'effectue presque exclusivement sur des terrains industriels (Type V).

Les terres contaminées (dont les concentrations en divers éléments sont supérieures aux valeurs seuils de l'AGW, Annexe 2, point 2) sont interdites de toute valorisation et doivent être traitées par un centre de traitement agréé. Elles pourront subir des traitements physico-chimiques, biologiques ou thermiques ou encore être stockées dans des centres d'enfouissement technique de classe 1 ou 2.

Un schéma explicatif de l'ensemble des possibilités existantes figure à l'Annexe 2.

Le décret «Déchets» est considéré à ce jour comme très contraignant par de nombreux acteurs issus des domaines de la construction et/ou de la gestion des terres excavées. En effet, sur la base des critères de non-contamination de l'annexe 2 de l'AGW, 70% des terres seraient contaminées et devraient être traitées comme telles. A titre de comparaison, seules 40% des terres excavées seraient contaminées sur la base de la législation flamande. Une comparaison des valeurs seuils limites des terres non contaminées concernant dix des paramètres les plus contraignants pour la Wallonie, la Flandre et les Pays-Bas figure en Annexe 3. Les normes environnementales fixées en Wallonie sont peu cohérentes avec une valorisation raisonnée des terres, dans la mesure où elles imposent par exemple d'évacuer des terres très peu polluées vers des centres de traitement uniquement afin d'attester de leur qualité, sans procéder à aucun traitement. Même si les valeurs seuils reposent sur une première base scientifique, les valeurs résultent également de choix purement conventionnels, comme par exemple celui que toutes les normes soient calculées pour un sol dont la teneur en MO est fixée à 2,3%. Dès lors, une application rigoriste de ces normes s'avère un non-sens extrêmement contre-productif pour une revalorisation de déblais. Cet arrêté établit donc un cadre peu favorable à l'évolution du secteur de la valorisation des terres, à son inscription dans un principe d'économie circulaire et

à l'épanouissement économique des acteurs qui le constituent, plus particulièrement au niveau de la gestion des terres non-contaminées (*Confédération Construction Wallonne, 2013*). Outre cette contrainte, l'absence dans l'arrêté d'un cadre réglementaire établissant les protocoles d'échantillonnage est également soulignée par ces mêmes acteurs.

Le **décret «Sols»** du 5 décembre 2008 relatif à la gestion des sols propose une série de normes définissant la qualité d'un sol à travers de valeurs de référence, de valeurs seuils et de valeurs d'intervention de différents éléments déterminant la présence d'un risque grave, le besoin d'une caractérisation ou encore la nécessité d'un assainissement.

Ce décret «Sols» impacte également la gestion des terres de remblais et leur stockage en imposant la compatibilité des concentrations en plusieurs éléments avec les valeurs seuils imposées par le site d'accueil.

Le décret «Sols» distingue 5 types d'usage de terrain caractérisés par des valeurs seuils et des valeurs d'intervention différentes :

- Type I : «Naturel»
- Type II : «Agricole»
- Type III : «Résidentiel ou mixte»
- Type IV : «Récréatif»
- Type V : «Industriel»

Du type I au type V, la sensibilité de l'environnement est décroissante et les valeurs seuils et valeurs d'intervention croissantes. Cette distinction dans le décret des types d'occupation d'un sol vise une gestion raisonnée des pollutions des sites et des risques associés.

Pour rappel, une valeur de référence est définie comme une valeur indicative des bruits de fond naturels «normaux», c'est l'objectif de l'assainissement. Une valeur seuil est une valeur de screening, sous laquelle le terrain peut être traité comme un terrain non pollué, et dont le dépassement implique une étude de caractérisation et une étude des risques, ainsi qu'un assainissement. Une valeur d'intervention est une concentration au-delà de laquelle une action est nécessaire, sous forme d'un assainissement, de l'imposition de mesures de sécurité et/ou de mesures de suivi (*Halen, 2016*).

Cette prise en compte des terres de remblais par les deux décrets mentionnés implique une double vérification analytique. Les procédures compliquées imposées par la considération de cet AGW et ce décret font l'objet d'une révision en vue de l'élaboration d'un arrêté spécialement consacré aux terres de remblais pour simplifier leur revalorisation grâce à l'homogénéisation des méthodologies et à la simplification administrative des démarches à mener par les acteurs de la gestion des terres excavées. Cet arrêté, le « Décret relatif à la gestion et à l'assainissement des sols », a été signé par le parlement wallon le 1<sup>er</sup> mars 2018 et entrera en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2019, abrogeant et remplaçant le décret «Sols» du 5 décembre

2008. Un des huit axes principaux de ce décret est la gestion différenciée des terres excavées par le biais d'une harmonisation des valeurs seuils et d'une conformité plus adéquate des terres excavées avec les sites récepteurs (notamment en fonction du type d'usage). L'objectif final de l'assouplissement des contraintes environnementales vise également à ne pas pénaliser l'économie wallonne, tout en assurant une cohérence des valeurs seuils d'un point de vue sanitaire et environnemental.

## **2.7 La gestion actuelle des déchets et sous-produits de construction et terrassement**

Selon les chiffres de la Commission européenne, les déchets de construction et de démolition représentent 25 à 30% de tous les déchets produits au sein de l'UE, soit une masse de 800 millions de tonnes par an, ce chiffre variant d'une année à l'autre (*Fischer et al., 2016*). La liste officielle des déchets de construction et de démolition (y compris déblais) et leur code associé figure à l'Annexe 1.

Des enquêtes ont permis d'estimer que 10 à 15% des matériaux utilisés dans tout chantier de construction d'un bâtiment sont destinés à devenir des déchets (*Skoyles et al., 1987*). Le devenir des déchets de construction est donc un point important à prendre en considération dans la gestion globale des déchets.

Il existe 2 grands types de gestion des déchets: la valorisation et l'élimination. Alors que la valorisation prône le recyclage et la valorisation énergétique, l'élimination implique soit l'incinération sans récupération d'énergie soit la mise en centre d'enfouissement technique.

Compte tenu de la croissance de la population mondiale et de l'évolution des modes de consommation, l'accumulation exponentielle des déchets urbains entraîne des risques sanitaires et environnementaux considérables (*Marshall et Farahbakhsh, 2013*). Par conséquent, la gestion et la valorisation de ces matériaux, plutôt que leur élimination, constituent des priorités.

Dans la mesure où elle offre une seconde vie à ces déchets en les utilisant pour améliorer les services écosystémiques urbains (*Moret et al., 2015*), la formation de technosols prône la gestion des déchets de construction et de terrassement en circuit fermé et la réduction de l'impact environnemental des zones urbanisées en recyclant davantage de matériaux.

## **2.8 La formation de sols fertiles à partir de matériaux recyclés urbains**

Aujourd'hui, pour former ou reconstituer des sols fertiles, il est généralement nécessaire d'utiliser des terres issues du décapage de terres agricoles et des granulats de carrière.

La formation de technosols végétalisables à partir de déchets urbains aurait comme objectif principal de remplacer la terre issue du décapage et des granulats de carrière par différents matériaux extraits des zones urbanisées, dont les déchets de construction, bien que cette catégorie de matériaux comprenne de nombreux autres types de déchets (déchets verts, boues issues de STEP, terres excavées, etc.), afin de construire des sols fertiles destinés à différentes occupations (réserve naturelle, production de biomasse, etc.) (*Damas et Coulon, 2016*).

Reformer des sols fertiles à partir de déchets permet de:

- bénéficier en zone urbanisée des services écosystémiques assurés par le sol
- économiser les ressources naturelles classiquement utilisées
- développer des filières de recyclage des déchets produits par les zones urbanisées
- contribuer activement à l'économie circulaire
- réduire les impacts environnementaux collatéraux
- fournir une réponse aux enjeux du développement de villes durables
- maîtriser les risques de contamination

Des expériences antérieures menées sur des sites de stockage de déchets miniers et visant à l'élaboration de stratégies de restauration du sol d'aires minières se révèlent intéressantes dans le cadre de ce mémoire, les deux projets se basant sur des sites ayant été occupés à des fins distinctes bien que très similaires mais ayant un objectif commun, à savoir la valorisation de déchets en vue de leur végétalisation.

Ces études ont mis en avant que l'ajout de matière organique sur les technosols à partir de la mise en place de plantes pionnières représente une des premières étapes dans la formation d'un sol (*Ottenhof et al., 2007*). En leur offrant le temps nécessaire, les chercheurs de ce projet rendent possible la formation d'un horizon Ah (horizon mixte, composé d'éléments minéraux et de matière organique) bien développé à la surface des matériaux miniers.

La formation d'un horizon de surface agrégé et riche en matière organique peut potentiellement transformer tout déchet inerte en un écosystème fonctionnel caractérisé par un sol sain capable de soutenir l'apparition de population d'organismes (*Arocena et al., 2010*).

Ces études ont également conclu que la croissance de plantes pionnières initie le développement des sols composés de déchets miniers par l'accumulation de matière organique et la promotion de l'activité biologique du sol. Ces plantes peuvent modifier leur environnement anthropisé et le rendre plus adapté pour les espèces de plantes qui s'installeront par la suite. Dans ce sens, la plantation d'une association d'espèces herbacées, de légumineuses et d'espèces locales peut permettre la restauration de la fertilité du sol et accélérer la succession écologique des espèces (*Wong, 2003*). Ces espèces doivent donc être incluses dans les stratégies de restauration des sols. Cependant, ces espèces doivent être choisies en fonction des paramètres du technosol et de son environnement (pH, propriétés

hydrodynamiques, profondeur du sol, climat, etc.). Dès lors, une première caractérisation des propriétés des sols étudiés est nécessaire.

Au delà de l'implantation d'espèce pionnières, des applications physiques peuvent être mises en place afin de promouvoir le développement du sol, notamment par le fractionnement mécanique des structures laminaires du sol, provoquant l'apparition de circuits d'écoulement préférentiel de l'eau, ce qui peut mener à une augmentation de l'activité biologique, comme démontré dans l'étude. L'amendement direct de matière organique sur des sites de déchets améliore également l'activité biologique du sol et peut mener à la formation d'une structure granulaire du sol (*Arocena et al., 2010*). Il tend également à faciliter l'établissement et la colonisation des plantes pionnières mentionnées précédemment (*Wong, 2003*).

En conclusion, différentes stratégies existent (plantation d'espèces pionnières, amendement de matière organique, travail mécanique du sol etc.) et peuvent être combinées. Toutes ces techniques ont comme principal objectif la formation d'un sol caractérisé par une structure granulaire, cette caractéristique entraînant de nombreuses retombées positives sur les propriétés biologiques et physico-chimiques du sol. Cependant, la stratégie optimale doit être choisie en fonction du technosol considéré et nécessite donc une première phase de caractérisation de ce sol avant de remettre en état un couvert pédologique.

### **2.8.1 Caractérisation d'un sol urbain ou formé à partir de déchets inertes urbains**

A travers les années, les sols urbains ont subi de fréquentes modifications d'occupation en fonction de l'évolution historique des villes.

Aujourd'hui en Europe, les deux tiers des sols urbanisés sont des sols imperméabilisés, et près de la moitié de ces surfaces artificialisées sont destinées à l'habitation et 16% aux réseaux routiers (*Fontes-Rousseau et Jean, 2015*). Cette artificialisation affecte principalement des sols fertiles. Lorsqu'ils ne sont pas imperméabilisés, les sols urbains se caractérisent par une évolution rapide de leurs propriétés physico-chimiques et biologiques. Cette particularité s'explique par le déséquilibre considérable avec leur environnement (*Séré et al, 2010*). Les sites en milieu urbain sont donc généralement caractérisés par des sols présentant une importante hétérogénéité spatiale, à la fois verticale et horizontale, de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (*Moret et al., 2005*).

D'un point de vue physique, les sols urbains présentent également souvent des masses volumiques apparentes élevées dues à la compaction mécanique, relativement fréquente dans ce milieu (passages fréquents de bulldozers et tractopelles) (*Damas et Coulon, 2016*). De plus, les sols urbains étant des sols fortement remaniés et en contact direct avec des matériaux de construction dont beaucoup sont constitués de sable, il est fréquent d'y retrouver une

dominance de la fraction sableuse.

Comme dit précédemment, au niveau chimique les sols urbains ou comprenant des déchets urbains se caractérisent également par des pH globalement basiques dus à la présence de matériaux carbonatés (*Moret et al., 2005*).

Les sols urbains issus de déchets de construction présentent généralement un déficit en éléments majeurs tels que N, P et K (*Bradshaw, 1983*). Ce phénomène est amplifié généralement par de faibles teneurs en MO et en argile.

Un résumé de l'ensemble des caractéristiques se retrouvant fréquemment ou non dans des technosols figure au Tableau 4.

Caractéristiques	Fréquent dans les technosols	Rare dans les technosols
<b>pH</b>	<b>Alcalin</b> Dans les sols contenant des résidus tels que du plâtre, des briques, ou du béton	<b>Acide</b> Dans les sols contenant du soufre provenant de charbon ou d'une production d'acide sulfurique
<b>C<sub>org</sub> et nutriments</b>	<b>Forte présence de C<sub>org</sub> et de nutriments</b> Dans les sols affectés par l'accumulation de MO, de poussière ou de résidus de combustion Dans les sols dont les sous-sols étaient autrefois des horizons de surface	<b>Faible présence de C<sub>org</sub></b> Dans les sols où toute végétation naissante est systématiquement éliminée <b>Faible présence de nutriments</b> Dans les sols caractérisés par un matériau parental pauvre en nutriments
<b>Densité apparente</b>	<b>Forte densité</b> Sur tout le profil : dominance de la fraction sableuse Dans les horizons de surface: sols impactés par la force mécanique en surface Dans les horizons inférieurs: sols impactés par la compaction par le biais d'activités de construction	<b>Faible densité</b> Dans les sols sujets à la décompaction mécanique Dans les sols caractérisés par une forte teneur en matière organique Dans les sols contenant une importante quantité de cendres
<b>Humidité du sol</b>	<b>Faible humidité</b> Dans les sols affectés par le drainage, principalement en vue de la construction	<b>Forte humidité</b> Dans les sols affectés par l'irrigation, les fuites et le drainage sous des surfaces imperméables, et par tout type de flux d'eau
<b>Âge</b>	<b>Jeune</b> Sols affectés par des déplacements dus à la construction	<b>Vieux</b> Sols dans des zones protégées en milieu urbain
<b>Développement</b>	<b>Développement ex-situ important</b> Sols originaires d'une matrice de sol déplacée et déjà fortement développée, remplacée en couches	<b>Développement in-situ important</b> Sols ne contenant pas de matrice de sol déplacée et déjà fortement développée
<b>Artefacts</b>	<b>Nombreux</b> Dans des sols contenant des déchets de construction et autres artefacts volumineux Dans des sols avec une surface ou un sous-sol scellé	<b>Aucun</b> Dans des sols formés de boues et/ou de cendres

Tableau 4: Ensemble des caractéristiques communes à la majorité des technosols (*Lehmann et Stahr, 2007*)

---

## 3. Matériel et méthode

---

### 3.1 Matériel

#### 3.1.1 Avant-propos

Dès lors que ce mémoire porte sur la caractérisation des sols artificiels composés de terres de remblais, les trois sols étudiés à travers les analyses effectuées sont des sites ou anciens sites de stockage de terres de remblais. Néanmoins, la comparaison avec un sol de référence provenant de la même région et exempt de tout remblais a semblé judicieuse. Le site de la ferme de Lauzelle a été choisi comme site de référence au niveau agronomique. A noter qu'un site de référence n'est pas à considérer comme un site idéal. En effet, ce site est sensible à l'érosion, sujet à la battance, etc. La présentation et les résultats liés à la ferme de Lauzelle sont issus de mémoires antérieurs au présent travail (*Calay 2017; Delvaux 1978*).

#### 3.1.2 Technosols étudiés

Trois sites ont été échantillonnés et analysés : **Le site de Grand-Leez** qui fut autrefois occupé successivement par une sablière, un centre d'enfouissement technique et un centre de protection de la biodiversité ; **le site de Fleurus** qui fut tout d'abord une mine de barytine, très vite utilisé comme CET pour finalement servir de site de stockage de remblais ; et enfin **le site de Chaumont-Gistoux** qui fut d'abord un site de remblais, converti ensuite pour la culture de luzerne. Les deux premiers sites sont gérés par l'entreprise Tradecowall s.c.r.l, et le troisième appartient à la société Hoslet s.a. Les trois sites sont indiqués à la Figure 6.

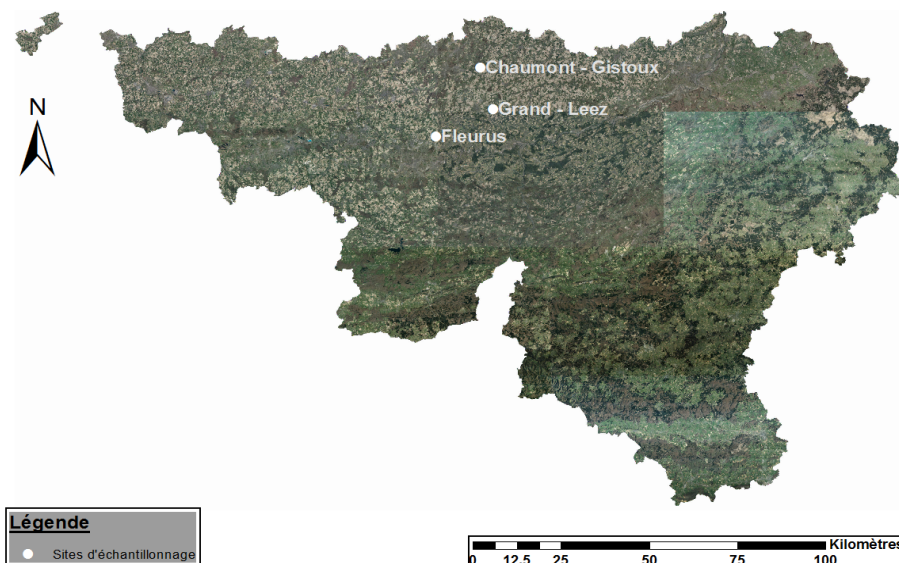


Figure 6: Carte de la Wallonie indiquant les 3 sites étudiés dans le cadre de ce mémoire

### 3.1.2.1 *Avant-propos: Tradecowall*

Basée à Fernelmont (Belgique), la société Tradecowall s.c.r.l (TRAitement des DEchets de COnstruction en WALLonie) a été fondée en 1991 dans le but de mettre en œuvre:

- des politiques de gestion des déchets de construction et de démolition produits en Région wallonne.
- des solutions pratiques et fiables pour l'élimination des déchets inertes et des terres de déblai excédentaires provenant de chantiers de construction et de démolition.
- des procédés et filières de valorisation de ces déchets.

Tradecowall est le fruit d'un partenariat entre la Confédération de la Construction Wallonne (CCW), la Région Wallonne (via la SPAQuE), le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), le Centre de Recherches Routières (CRR), et 160 entreprises du secteur de la construction de toutes spécialités et de toutes tailles à travers la Wallonie. En accord avec les objectifs du Plan wallon des déchets, Tradecowall privilégie la valorisation de ceux-ci (*cfr* « AGW du 14.06.2001 » à la Section 2.6) plutôt que leur élimination. Les flux de terres de déblai et autres matériaux valorisables sont orientés vers des projets d'aménagement du territoire ou de réhabilitation de sites industriels désaffectés. Tous les projets soutenus visent une valeur ajoutée tant pour les autorités locales que pour les riverains.

Les terres acceptées par Tradecowall pour être stockées sur leur site doivent répondre aux caractéristiques physico-chimiques définies dans l'AGW du 14 juin 2001 pour les terres non-contaminées et décontaminées (60 à 70% des terres réceptionnées par Tradecowall). Les terres admises au versage doivent également être pelletables et ne peuvent contenir:

- plus de 5% de matériaux pierreux, débris de construction, de matériaux organiques tels que bois, restes végétaux;
- plus de 1% de matériaux non pierreux tels que plâtre, caoutchouc, matériaux d'isolation, matériaux de recouvrement de toiture;
- de l'amiante ciment-lié.

### 3.1.2.2 Site de Grand-Leez



Figure 7: Prise de vue aérienne du site de Grand-Leez (Source: Tradecowall)

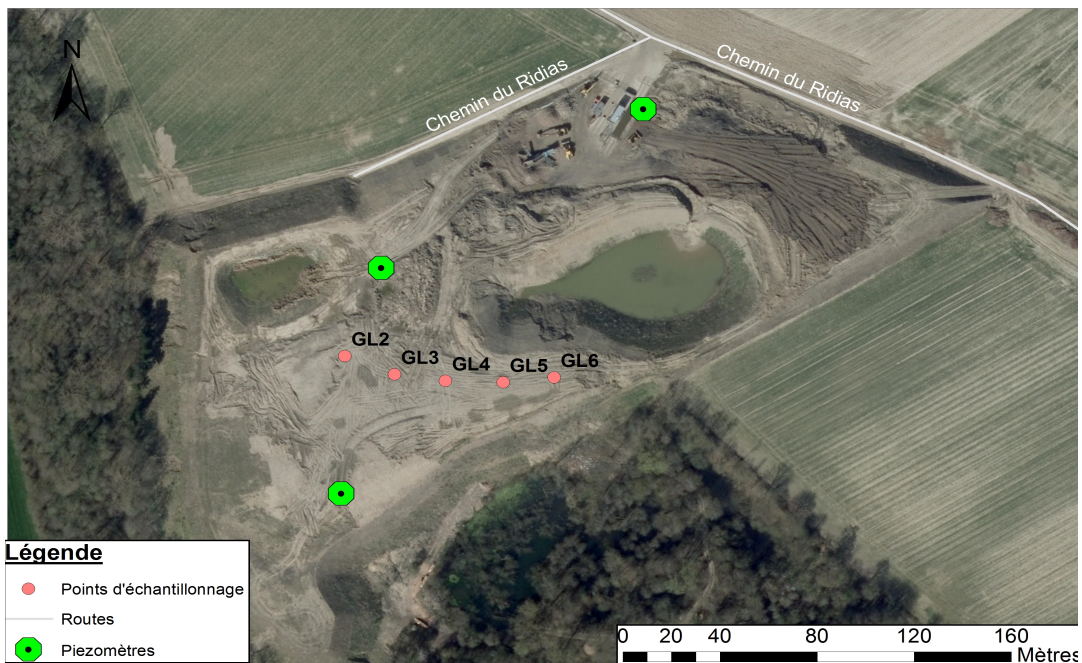


Figure 8: Prise de vue aérienne du site de Grand-Leez avec représentation des 5 points d'échantillonnage

Le premier site étudié est localisé dans le bourg de Grand-Leez, appartenant à la ville de Gembloux, dans la province de Namur (Figure 6). Ce site est longé au sud et à l'ouest par le ruisseau du Tri qui rejoint par la suite le ruisseau de Beaufau afin de former le ruisseau de Lonzée à environ 350m à l'ouest du site. Le ruisseau de Lonzée se jette ensuite dans le ruisseau de l'Orneau, affluent de la Sambre (*Monjoie, 1988*).

La température et les précipitations moyennes annuelles sont respectivement de 9,6°C et 830mm. Le mois de juillet est le mois le plus chaud avec une température moyenne de 17,1°C, tandis que le mois de janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de 1,4°C. Les mois les plus secs et les plus humides sont avril et novembre avec des précipitations respectives de 55 et 77mm (*Climate-data, 2017*).

Bien que la région soit caractérisée par un relief essentiellement plat avec une altitude moyenne de 146m, le site étudié se présente sous la forme d'un important tumulus suite aux diverses occupations dont il a été l'objet.

La première occupation connue du site était une sablière. A l'époque de l'extraction du sable, la couche de limon éolien a été enlevée puis les sables bruxelliens ont été exploités jusqu'à une profondeur maximale correspondant au niveau de la nappe souterraine (*Monjoie, 1988*). Une fois l'exploitation du site achevée celui-ci a été peu-à-peu transformé en centre d'enfouissement technique, lequel, lorsque la capacité de stockage a été atteinte, a été recouvert d'un complexe étanche en polyéthylène, polymère connu pour son étanchéité et son inertie chimique. Dès lors que le CET a été étanchéifié et fermé, le site de Grand-Leez a servi au stockage et à la valorisation de terres non-contaminées et décontaminées par la société Tradecowall. La société a également accepté une demande de partenariat avec la commune de Gembloux et l'ASBL Natagora afin de mener un projet visant à favoriser la biodiversité du site. En effet, localisé dans une région de grande culture, très appauvrie sur le plan biologique, le site présentait l'intérêt biologique de pouvoir constituer un refuge de biodiversité importante. Une fois la capacité de stockage de reblais du site atteinte, Tradecowall a mis en place en concertation avec Natagora une série de mesures visant à générer une plus-value écologique sur le site : présence de monticules caillouteux servant d'abris aux amphibiens, buttes de diverses tailles au sommet du tumulus de nature à favoriser la présence d'oiseaux migrateurs, plantation d'espèces indigènes d'arbres, etc. L'historique administratif complet du site dès 1972 figure à l'Annexe 4.

La végétation naturelle présente sur le site est herbacée et essentiellement calcicole, le reste étant un essai de plantation d'arbustes mis en place par la société Tradecowall afin de favoriser la biodiversité du site (*Acer campestre, Corylus sp., Crataegus sp.*). La présence de renouée du Japon (*Fallopia japonica*) a également été remarquée et constitue un problème du fait de sa capacité d'expansion et de libération de toxines empêchant l'établissement optimal d'autres végétaux (*Beerling et al., 1994*). Des mesures sont prises sur le site afin d'éradiquer ou du moins limiter l'expansion de l'espèce.

Enfin, trois piézomètres ont été implantés sur le site de la décharge afin de déterminer d'une part, l'épaisseur, la nature et les caractéristiques chimiques des déchets et d'autre part, les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du site (*Monjoie, 1988*).

Le dernier versage de terre a été effectué en 2015. Les 50 derniers centimètres versés, suite à un criblage, étaient caractérisés par une granulométrie variant de 0 à 40 mm.

### 3.1.2.3 Site de Fleurus



Figure 9: Prise de vue aérienne du site de Fleurus (Source: Tradecowall)

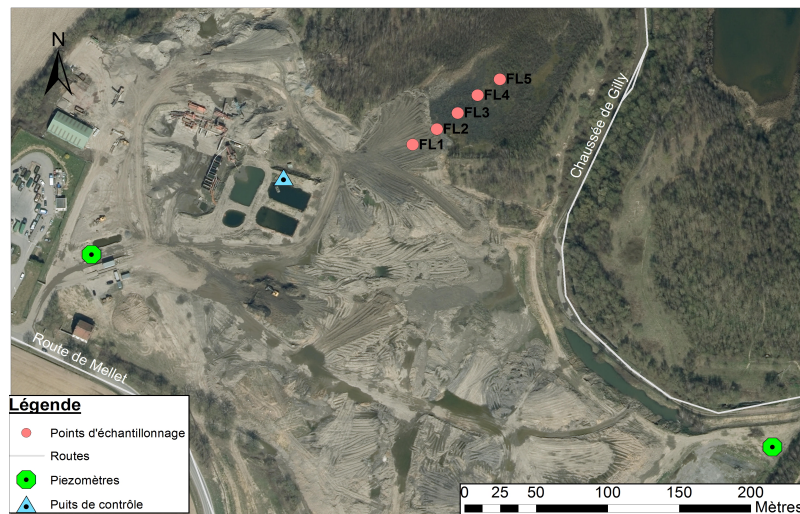


Figure 10: Prise de vue aérienne du site de Fleurus avec représentation des 5 points d'échantillonnage

Le second site étudié est localisé au Nord-Ouest de Fleurus, dans la province de Hainaut, le long de la route de Mellet qui lie Fleurus à Mellet, au lieu-dit «Berlaimont». (Figure 10). Le site se situe dans le bassin hydrographique de la Meuse (vallée de la Sambre). Le ruisseau de Berlaimont traversait par le passé le site mais a été détourné afin de permettre l'exploitation du gisement de baryte mentionnée ci-dessous (Chapelle, 2007). Le site fait partie intégrante du Bas-plateau limoneux brabançon.

Température et précipitations sont relativement similaires au site de Grand-Leez, avec néanmoins des précipitations annuelles légèrement supérieures (856mm) (Climate-data, 2017).

Le relief de la région est relativement plat et caractérisé par une altitude moyenne de 159m. Cependant, dès lors que le site est encore partiellement en cours d'aménagement et que sa capacité de stockage de remblais n'est pas encore atteinte, la géomorphologie du site est encore variable et relativement irrégulière. L'altitude exacte du site varie donc encore en fonction de l'avancée des remblais.

Pour l'essentiel, la région est recouverte par les sables du Bruxellien, en discordance sur les formations du Carbonifère qui sont visibles dans les sillons formés par les cours d'eau.

La première occupation connue du site était une mine de barytine (sulfate de baryum  $BaSO_4$ )

avec des traces de Sr, Ca et Pb). Elle a été exploitée durant la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle de manière souterraine et puis à ciel ouvert jusqu'en 1991. La profondeur de la carrière atteignait alors près de 25 mètres. Suite à l'exploitation du gisement de baryte, il ne reste plus en place que les calcaires viséens, le principal aquifère de la région. Le gisement n'ayant pas été totalement exploité, il est possible d'observer une présence de sulfates à proximité de la surface (*Chapelle, 2007*). Lorsque l'exploitation du baryum s'est terminée, en 1992, le site a été transformé en CET de type 3 (déchets inertes de type «remblais»), comblant la dépression laissée par l'exploitation. Aujourd'hui une partie du site est occupée par une réserve naturelle. La végétation naturelle présente sur le site est herbacée et essentiellement calcicole. Enfin, deux piézomètres et un puits ont été implantés sur le site de Fleurus afin d'une part d'enregistrer l'évolution du niveau de la nappe locale et d'autre part de mesurer la concentration de certains polluants (*Chapelle, 2007*).

Le dernier versage de terre a été effectué en 2013 au niveau de la zone échantillonnée.

La réhabilitation de ce site vise des fins agricoles. L'objectif final de Tradecowall est de pouvoir y cultiver des espèces (maïs ou taillis à courte rotation) pouvant servir de sources d'énergie pour un biométhaniseur.

#### 3.1.2.4 Site de Chaumont-Gistoux

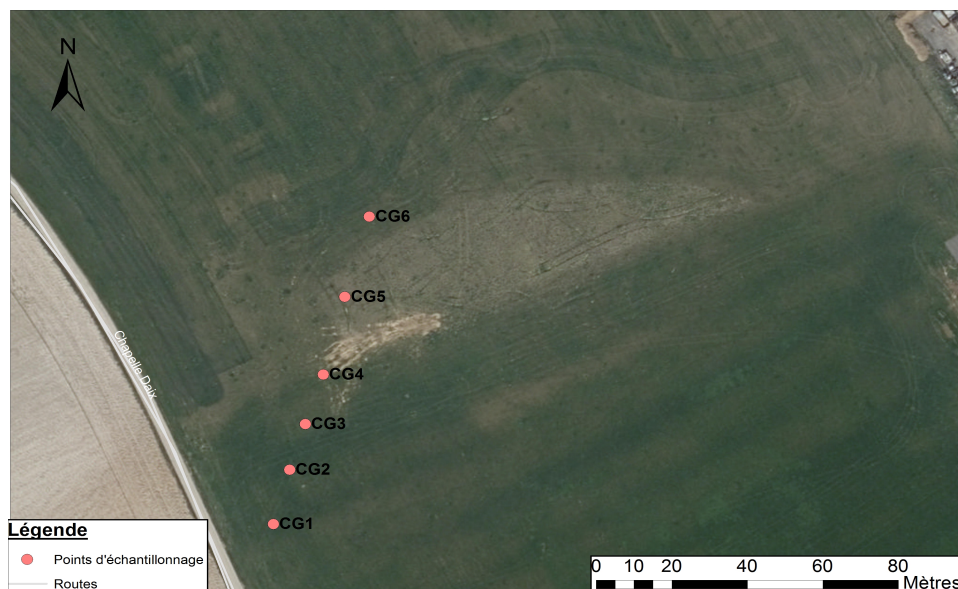


Figure 11: Prise de vue aérienne du site de Chaumont-Gistoux avec représentation des 6 points d'échantillonnage

Le troisième site étudié est localisé à Chaumont-Gistoux, dans la province du Brabant-Wallon (Figure 6).

La température et les précipitations moyennes annuelles sont respectivement de 9,9°C et 804mm. Les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds avec une température moyenne de , et janvier est le mois le plus froid de l'année avec une température moyenne de

1,3°C. Les mois les plus secs et les plus humides sont avril et juin avec des précipitations respectives de 53 et 75mm (*Climate-data.org, 2017*).

La région est caractérisée par un relief plat avec une altitude moyenne de 86m.

On dispose de très peu d'informations sur le passé de ce terrain. La première occupation connue date de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Le site servait de dépôt illégal puis légal de terres de remblais. La gestion du site de stockage a été reprise par la société Hoslet s.a. à la fin du siècle. Le site de remblais a atteint sa capacité de stockage maximale en 1997. Il a été confié à Monsieur André Lannoye au début du 21<sup>ème</sup> siècle afin que celui-ci y cultive de la luzerne qu'il utilise comme fourrage pour ses chevaux.

Au cours de l'année 2017, deux récoltes de luzerne ont eu lieu sur cette parcelle d'un hectare: la première de 27 ballots de 300 à 350 kg chacun en mai et la seconde en août pour un total de 21 ballots.

Bien que nous manquions d'informations sur l'historique précis et sur le type et la quantité de terres de remblais qui ont pu être déposées, il a été convenu d'effectuer diverses analyses sur ce site pour plusieurs raisons:

- ce site permettra, dans les limites du possible, une comparaison entre un site sous culture et les deux autres sites qui n'ont jamais été travaillés à des fins agronomiques
- ce site étant le plus vieux des trois sites à avoir reçu son dernier versage de terres de remblais, des pistes d'idées quant à l'évolution probable des terres de remblais sous de mêmes conditions climatiques peuvent à priori être émises.

Cependant, le manque d'informations force le scientifique à la prudence quant aux chiffres qu'il manipule et aux informations qu'il en tire. Cette vision est à prendre en compte en abordant les résultats et la discussion de ce sujet de mémoire.

### 3.1.3 Sol de référence: la ferme de Lauzelle



Figure 12: Prises de vue aériennes du site de la Ferme de Lauzelle (Source: UCL)

La ferme de Lauzelle, localisée au Nord de Louvain-la-Neuve, dans la province du Brabant Wallon, aurait été construite entre 1089 et 1122.

Elle aurait été acquise et exploitée par l'abbaye d'Affligem en 1104. Ces terres furent prêtées à des fermiers à partir de 1357 (*Martin, 1969*). L'Université Catholique de Louvain a racheté les 115 hectares de la ferme en 1968. Suite à un accord, la famille d'agriculteurs qui travaillait ces terres à l'époque, la famille Braibant, a pu y rester. L'accord UCL-Braibant est toujours d'actualité (*Calay, 2017*). Depuis 2007, la terre est aux mains de Nicolas Braibant Junior. Ce dernier a instauré une série de techniques agricoles simplifiées : non-labour, rotation des parcelles passant de 3 à 5 ans, semis d'engrais vert après la récolte d'hiver, optimisation de l'épandage de fumier, micro-pulvérisation des produits phyto-sanitaires, amélioration de la mécanisation en vue de limiter le compactage, etc. (*Calay, 2017*)

Les terres du Brabant wallon sont des terres limoneuses de plateau, propices aux cultures céréalières (froment, seigle, avoine, etc.). Ces sols se sont développés à partir d'un matériau loessien d'apport nivéo-éolien.

Le sol de Lauzelle est un luvisol limoneux caractérisé par un profil Aba (sol limoneux caractérisé par un drainage favorable et un horizon b textural). Ce site est un large plateau (pente faible à nulle) d'une altitude de 137m (*Delvaux, 1978; Delvaux, 2016*).

## 3.2 Méthodologie

### 3.2.1 Protocole d'échantillonnage

La zone traversée par le transect analysé a été déterminée en fonction de sa représentativité. En effet, sur le site de Fleurus une partie du terrain est encore à ce jour sujette à un stockage de terres de remblais. Dès lors, le choix et l'analyse d'une zone toujours en activité ne semblaient pas pertinents. L'élaboration du technosol de Grand-Leez étant aboutie, seul le choix d'un transect avec tous les points sur le même plateau a guidé nos choix. Enfin, le site de Chaumont-Gistoux étant un site de culture et l'ensemble de la parcelle semblant homogène, seule une vision pratique et limitant les potentiels dégâts au site dus à l'utilisation d'un engin mécanique a guidé nos choix.

Chaque transect était constitué de 5 à 6 points de profil, ces derniers étant répartis grossièrement à équidistance les uns des autres en raison de l'irrégularité du terrain et des contraintes mécaniques de la carotteuse.

L'appareil utilisé pour extraire les échantillons était une sonde Geoprobe 540U de l'entreprise Gefotech (Figure 13), spécialisée en échantillonnage des sols. Les matières prélevées étaient des carottes non-perturbées allant jusqu'à une profondeur de 1,2m (Figure 14).

Des prélèvements de mottes fraîches ont également été effectués à l'aide d'une bêche aux mêmes emplacements que pour les carottes.

Les coordonnées géographiques des points ont été mesurées à l'aide d'un récepteur GPS Leica 1200 (Figure 13).



Figure 13: Extraction d'une carotte de sol à l'aide d'une sonde Geoprobe 540U (photo de gauche) et mesure des coordonnées géographiques à l'aide d'un récepteur GPS Leica (photo de droite)



Figure 14: Echantillonnage (6 horizons) sur une carotte non-perturbée correspondant à un profil de sol de 1,2m.

### 3.2.2 Plan d'analyse

Le Tableau 5 reprend l'ensemble des analyses effectuées sur les échantillons provenant des 3 sites étudiés.

Certains chiffres peuvent sembler irréguliers. Ceci peut être dû d'une part au fait que le carottage pour des raisons mécaniques (charge caillouteuse importante) n'a pas permis d'extraire certains horizons en profondeur sur un profil et d'autre part au fait que pour éviter la redondance de certaines manipulations il a été convenu entre mémorant et promoteur de ne pas effectuer toutes les manipulations sur tous les profils.

De plus, le site de Chaumont-Gistoux étant un site fort différent des deux autres et du fait que trop peu d'informations sur son historique ont pu être récoltées, le travail de ce mémoire s'est essentiellement articulé autour des sites de Fleurus et Grand-Leez.

	Fleurus	Grand Leez	Chaumont Gistoux	Total
<b>Granulométrie</b>	9	10	12	<b>31</b>
<b>Charge caillouteuse</b>	30	30	33	<b>93</b>
<b>Minéralogie (DRX)</b>	2	3	0	<b>5</b>
<b>C<sub>tot</sub></b>	10	10	12	<b>32</b>
<b>Carbonates</b>	10	10	12	<b>32</b>
<b>C<sub>org</sub></b>	10	10	12	<b>32</b>
<b>N<sub>tot</sub></b>	10	10	12	<b>32</b>
<b>pH</b>	30	30	33	<b>93</b>
<b>CEC</b>	30	30	0	<b>60</b>
<b>Cations échangeables</b>	30	30	0	<b>60</b>
<b>Densité</b>	3	3	3	<b>9</b>
<b>Infiltration</b>	2	2	2	<b>6</b>
<b>Respirométrie</b>	3	3	3	<b>9</b>
<b>Analyse phytosociologique</b>	5	5	5	<b>15</b>
<b>Total</b>	<b>184</b>	<b>186</b>	<b>139</b>	<b>509</b>

Tableau 5: Plan général de l'ensemble des analyses ayant été effectuées dans le cadre de ce mémoire

### 3.2.3 Protocole de prétraitement

Les échantillons de sols prélevés présentant une charge caillouteuse ( $\emptyset > 2\text{mm}$ ) contraignante pour diverses manipulations, il a fallu procéder à une séparation préalable en amont des analyses effectuées au cours de ce mémoire.

Après un séchage de plusieurs journées et une succession de phases de broyage et de tamisage à 2 mm (Figure 16), charge caillouteuse et terre fine sèche ont pu être séparées. Mise à part pour la mesure de densité et la respirométrie, c'est cette terre fine sèche qui a fait l'objet de toutes les analyses en laboratoire expliquées ci-dessous.

Certaines analyses ( $N_{\text{tot}}$ ,  $C_{\text{tot}}$ , carbonates,  $C_{\text{org}}$ ) nécessitant des particules de sol très fines ( $\emptyset < 20\mu\text{m}$ ), la terre fine sèche a été broyée par un passage dans un broyeur électrique.

La mesure de la densité a quant à elle été faite à partir de mottes fraîches conservées en chambre froide.



Figure 15: Pré-traitement par broyage au pilon, compression par la technique de la bouteille et passage au tamis de 2mm.

### 3.2.4 Mesure des propriétés physiques

#### 3.2.4.1 Mesure de la granulométrie

La mesure de la granulométrie consiste en la détermination de la distribution des différentes classes de tailles de particules de la fraction minérale du sol. Cette manipulation sépare les échantillons de sol en fractions sableuse, limoneuse et argileuse.

12 grammes de sol ( $\varnothing < 2\text{mm}$ ) sont pesés pour chaque échantillon. Le prétraitement de ces sols consiste d'une part en l'élimination de la matière organique des sols, cette dernière n'appartenant pas à la fraction minérale du sol, et d'autre part en l'élimination des carbonates des sols étudiés. La présence de ces derniers peut altérer les résultats des mesures en raison d'une augmentation conséquente de la masse de la classe granulométrique leur correspondant, entraînant une surestimation de cette fraction. Cette élimination de la MO et des carbonates se fait respectivement par une attaque à l'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) et par une attaque à l'acide fort. La solution obtenue est passée aux ultrasons afin de disperser les agrégats et séparer chaque particule de sol. La solution obtenue est passée par un tamis de  $50\ \mu\text{m}$  afin de séparer la fraction sableuse ( $50\ \mu\text{m} < \varnothing < 2\text{mm}$ ) du reste. Le liquide restant est placé dans un cylindre jaugé d'un litre auquel on rajoute 10 millilitres d'hexamétophosphate, un agent dispersant.

La solution doit à ce stade être très fortement agitée. La fin de l'agitation marque le temps  $t_0$ . En  $t_0$ , un prélèvement de 10 millilitres est effectué au milieu de la colonne. Ce prélèvement comprend la fraction argileuse et la fraction limoneuse (limons fins et limons grossiers). En  $t_{4\text{min}48\text{s}}$ , un second prélèvement est effectué à 10 centimètres de la surface de la solution. Ce prélèvement, suivant la loi de sédimentation de Stokes, comprend la fraction argileuse et les limons fins. Enfin, un dernier prélèvement de 10 millilitres en  $t_{24\text{h}}$  est effectué, comprenant uniquement la fraction argileuse.

Ces 4 prélèvements (3 prélèvements la séparation des sables au tamis), permettent d'établir les proportions respectives des classes granulométriques dans chacun des sols étudiés.

Cette campagne de mesure a été effectuée sur l'ensemble des sites étudiés et sur tous les profils de ces sites (5 à 6 par site), et ce uniquement pour les deux premiers horizons (0-15 et 15-30cm), pour un total de 32 échantillons.

### 3.2.4.2 Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X

L'identification des minéraux a été effectuée par diffraction des rayons X (XRD). La technique de diffractométrie est une méthode non destructive permettant l'identification des minéraux grâce à leur structure cristalline (*Moore and Reynolds, 1989*) Les spectres sont obtenus sur échantillon non orienté.

Les analyses ont été effectuées sur des échantillons de sol sec correspondant à respectivement deux et trois horizons de surface des sites de Fleurus et Grand-Leez.

### 3.2.4.3 Mesure de la densité apparente et de la porosité

La densité apparente des sols étudiés est mesurée par immersion des échantillons dans du pétrole lampant suivant la méthode de Blavet et Fardoux (*Blavet et Fardoux, 1993*).

Les échantillons utilisés lors de cette campagne de mesure sont des agrégats frais non-perturbés extraits de l'horizon de surface et d'un volume de 25 à 50 cm<sup>3</sup>. Ces agrégats ont été immergés progressivement dans du pétrole suffisamment longtemps afin que la porosité libre à l'air se sature en pétrole (24 heures). Après cette immersion, le pétrole à la surface de ces agrégats est essuyé. Chaque agrégat est dès lors placé dans un dispositif de mesure composé d'une balance de précision, d'un béccher de pétrole, ainsi que d'une nacelle suspendue à un statif permettant de maintenir l'agrégat au sein du volume de pétrole. La pression hydrostatique exercée par le pétrole sur l'échantillon peut dès lors être mesurée. Une fois les mesures effectuées, les agrégats sont placés à l'étuve pendant 24 heures.

Au total, 3 mesures sont effectuées au cours des opérations:

- mesure du poids frais avant la première immersion dans du pétrole
- mesure de la masse de volume de fluide déplacé (poussée d'Archimède)
- mesure du poids sec après passage à l'étuve

Le volume de l'agrégat est donné par :

$$\text{Volume de l'agrégat (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Poussée d'Archimède}}{\text{Densité du pétrole}}$$

3 paramètres peuvent être déduits de l'acquisition de ces données:

$$\text{Teneur en eau pondérale (\%)} = \frac{\text{Poids frais}}{\text{Poids sec}} \times 100$$

$$\text{Densité apparente humide (g.cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Poids humide}}{\text{Volume de l'agrégat}}$$

$$\text{Densité apparente sèche (g.cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Poids sec}}{\text{Volume de l'agrégat}}$$

### 3.2.4.4 Mesure des propriétés hydriques et hydrodynamiques

La caractérisation des propriétés de conductivité hydraulique d'un sol se fait par la mesure du débit d'eau dans un sol saturé en fonction du temps, et ce à l'aide d'un infiltromètre à charge constante.

La méthode se base sur l'application d'une charge hydrostatique constante sur une surface connue de sol grâce à un anneau et un tube ajustable (Figure 17) (*Reynolds & Elrick, 1990*).

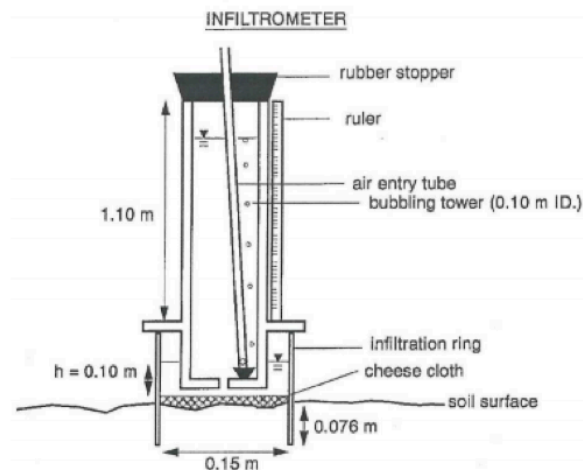


Figure 16: Infiltromètre pour la mesure du débit d'eau dans un sol saturé en fonction du temps

La conductivité hydraulique à saturation  $K_s$  [m/s] est calculée sur base de l'équation suivante (*Reynolds & Elrick, 1990*):

$$K_s = \frac{GQ}{aH + \pi a^2 G + \frac{a}{\alpha}}$$

G est un paramètre de forme sans dimension, Q est le débit d'eau qui s'écoule dans le sol [m<sup>3</sup>/s] depuis l'anneau, H est la charge hydrostatique [m], c'est-à-dire la hauteur d'eau dans l'anneau, a est le rayon de l'anneau d'infiltration [m] et  $\alpha$  [m<sup>-1</sup>] est le paramètre de l'équation de Gardner qui décrit la conductivité hydraulique K du sol:

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h)$$

Avec h: l'état de succion du sol [m].

## 3.2.5 Mesure des propriétés physico-chimiques

### 3.2.5.1 Mesure du pH

Le pH a été mesuré sur les sols en solution à l'aide d'un pH-mètre électronique étalonné avant la campagne de mesure. Les solutions analysées étaient constituées de 5 grammes de sol brut ( $\phi < 2\text{mm}$ ) dans 25 millilitres d'eau déminéralisée.

### 3.2.5.2 *Mesure des bases échangeables*

La mesure de la teneur en bases échangeables est directement liée à la mesure de la CEC, ces deux procédures utilisant les mêmes colonnes d'analyses.

Les échantillons de sol ( $\emptyset < 2\text{mm}$ ) sont placés dans des colonnes avec du sable brut sur un lit d'ouate. Une solution  $\text{NH}_4\text{OAc}$  (Acétate d'ammonium) 1N à pH 7 est percolée au minimum cinq fois à travers les colonnes de sol. La solution récupérée suite à la percolation est mise à niveau avec de l'eau déminéralisée et mélangée. Cette étape désorbe et déplace l'ensemble des cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) adsorbés à la surface des particules de sol et les remplace par de l'ammonium sur les sites d'échange. La solution percolée est par la suite analysée par absorption atomique afin de mesurer les teneurs en cations échangeables (Analyse ICP).

### 3.2.5.3 *Mesure de la CEC*

La mesure de la CEC nécessite au préalable que les étapes de la mesure de la teneur en cations échangeable aient correctement été effectuées. Les colonnes de sol saturées en ammonium vont être lavée par le biais d'une percolation d'éthanol 99% permettant d'évacuer l'ammonium en excès et d'uniqueement garder celui adsorbé sur les complexes des sites d'échange des particules de sol.

A l'instar de la mesure en cations échangeables, une solution, de KCl à 10% et pH 3 cette fois, est percolée au minimum cinq fois à travers les colonnes de sol. La solution récupérée suite à la percolation du KCl est mise à niveau avec de l'eau déminéralisée et mélangée. Cette étape désorbe tout l'ammonium qui occupait les sites d'échange.

Etant donné que tous les sites d'échange étaient occupés par de l'ammonium et que ce dernier n'était plus en excès, il est possible de connaître la quantité de charges négatives du sol et, de ce fait, la CEC.

### 3.2.5.4 *Mesure du carbone et de la matière organiques*

La mesure du carbone organique a été effectuée selon la procédure de Walkley et Black (*Walkley, 1947*). La méthode se base sur une oxydation du carbone oxydable du sol (carbone organique) par voie humide dans une solution d'acide dichromatique.

0,5 gramme de sol est pesé pour chaque échantillon. Ce sol est mélangé à 10 millilitres d'une solution de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  1N. 20 millilitres de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  sont rajoutés à la solution et l'ensemble est mélangé. Après 30 minutes de repos, un titrage au  $\text{FeSO}_4$  0,25M est effectué après l'ajout de  $\text{BaCl}_2$ , de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  concentré et de diphénylamine (indicateur). Afin de prendre en compte une réaction d'oxydation incomplète et la communauté scientifique s'accordant empiriquement à

admettre que la réaction s'arrête à 76%, les résultats du titrage sont multipliés par un facteur empirique de 1,32 (*Walkley & Black, 1934*).

Afin de passer de la teneur en carbone organique à la teneur en matière organique, une multiplication par un facteur empirique peut être appliquée. Ce facteur varie selon les écoles (1,72; 1,78; 2) et la valeur de 1,72 est privilégiée à l'UCL (*Delvaux, 2017*).

Cette campagne de mesure n'a été effectuée que sur les deux premiers horizons (0-15; 15-30cm) sur les 16 profils étudiés (6 profils pour CG, 5 pour FL et GL).

#### 3.2.5.5 *Mesure du carbone total et de l'azote total*

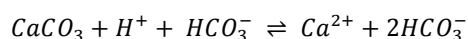
Le carbone et l'azote totaux ont été quantifiés par l'analyseur Vario Macro Cube Elementar.

Cet appareil fonctionne sur le principe d'une combustion catalytique sèche et est capable de mesurer la teneur en carbone, azote, hydrogène et soufre des sols. Seuls les deux premiers éléments ont été analysés par cet instrument de mesure dans le cadre de ce mémoire.

L'échantillon à analyser est inséré dans une cavité à soupape afin d'en extraire les gaz restants à l'aide d'hélium. L'échantillon est ensuite introduit dans un four et chauffé à environ 1100°C (900-1200°C) afin d'entraîner sa combustion. A la sortie de ce four, le produit de la combustion est gazeux et le carbone total se présente sous forme de CO<sub>2</sub> tandis que l'azote est sous forme de NO<sub>x</sub>. Le produit gazeux traverse après coup le tube de réduction à 850°C. Les oxydes d'azote, catalysés par du tungstène, y sont réduits en diazote au contact du cuivre. Le diazote atteint au final l'analyseur, un détecteur thermo-conductif (Thermal Conductivity Detector, TCD), qui déterminera sa quantité. Les autres produits de la combustion (gaz carbonique, SO<sub>2</sub> et eau), insensibles au passage à travers le tube de réduction, traversent différentes colonnes, chacune ayant une affinité propre à un élément. Les colonnes sont traitées une par une et chaque élément, une fois désorbé de sa colonne, est transmis au détecteur TCD. Le détecteur TCD mesure la variation de la conductivité thermique de chaque colonne de gaz. Le signal obtenu à partir de cette variation est traduit en une concentration de chaque élément reconnu dans l'échantillon de sol (*Elementar, 2016*).

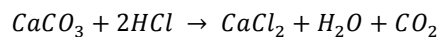
#### 3.2.5.6 *Mesure des carbonates*

Les sols étudiés étant caractérisés par un pH élevé (>7,5) et celui de la réaction de précipitation du carbonate de calcium ci-dessous étant considéré généralement à 8, la mesure de la teneur en carbonates sur les sols étudiés s'avère non négligeable en vue de leur caractérisation.



La teneur en carbone inorganique, comprenant à la fois CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub>, a été mesurée par

la méthode du calcimètre à pression modifiée sur sols tamisés à 200  $\mu\text{m}$  (Sherrod et al., 2002). Cette méthode se base sur la réaction d'acide (HCl) sur les sols carbonatés disposés ensemble et mélangés dans des flacons clos à valve élastique. Cette réaction (voir ci-dessous) entraîne une production de  $\text{CO}_2$  proportionnelle à la quantité de carbonates présents dans le système.



Le système étant clos, l'augmentation de  $\text{CO}_2$  entraîne une augmentation de la pression. Cette pression est mesurée par un système électronique composé d'un voltmètre qui traduit l'effet de la pression au niveau de la valve élastique en un voltage.

Suite à l'établissement d'une courbe de calibration «voltage/teneur en carbonates» à partir de solutions standard à concentrations connues, la mesure du voltage généré par la réaction d'acide sur les sols étudiés permet d'évaluer la teneur en carbonates de ces derniers.

### 3.2.6 Mesure des propriétés biologiques

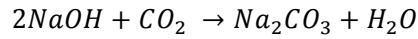
#### 3.2.6.1 Mesure de la respiration microbienne

La mesure de la respiration microbienne permet d'évaluer l'activité biologique des micro-organismes présents dans le sol. La respiration est directement liée à la production de  $\text{CO}_2$  par les organismes vivants. Ces mesures ont été effectuées à l'horizon de surface sur 9 profils. Cette mesure se fait habituellement sur sol frais. Suite à des conditions imposées par les sols mis à disposition, les mesures ont ici été faites sur des échantillons de 40 grammes de sol sec tamisés à 2 millimètres, placés dans des conditions humides extrêmes afin de simuler des conditions de capacité au champ. Chaque sol a ensuite été placé dans un flacon clos.



Figure 17: Milieu d'analyse respirométrique (Système clos contenant le sol réhumidifié et un flacon ouvert contenant une solution de NaOH)

Afin de suivre l'évolution de la production de  $\text{CO}_2$  à travers le temps, un récipient ouvert contenant 25 millilitres de NaOH 0,5M a été placé dans chaque flacon clos. Chaque molécule de  $\text{CO}_2$  réagit avec 2 molécules de NaOH suivant la réaction suivante:



La conductivité électrique du NaOH diminue linéairement avec la quantité de CO<sub>2</sub> produit par respiration et ayant réagi avec la solution. La conductivité électrique a dès lors été mesurée afin de déterminer la quantité de CO<sub>2</sub> produit. Le calcul du CO<sub>2</sub> ayant réagi est le suivant:

$$CO_2 \text{ absorbé } (t) = V \times M \times 44 \times 0,5 \times \frac{C_1 - C_x(t)}{C_1 - C_2}$$

Avec:

- $CO_2 \text{ absorbé } (t)$ : Masse de CO<sub>2</sub> ayant réagi avec la solution de NaOH [mg]
- V: Volume de la solution de NaOH [ml]
- M: Concentration molaire initiale de la solution de NaOH [mol/l]
- 44: Masse molaire du CO<sub>2</sub> [g/mol]
- 0,5: Rapport du nombre de moles de CO<sub>2</sub> réagissant avec 1 mole de NaOH
- C<sub>1</sub>: Conductivité électrique d'une solution de NaOH 0,5M
- C<sub>x</sub>(t): Conductivité électrique de la solution mesurée à l'instant t
- C<sub>2</sub>: Conductivité électrique d'une solution de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0,25M

La conductivité électrique a été mesurée après 0, 2, 5, 7, 13, 15, 20, 22, 26, 30, 33 et 35 jours.

Les mesures ont été arrêtées à partir du moment où les émissions de CO<sub>2</sub> de chaque échantillon avaient atteint un taux constant.

### 3.2.6.2 Analyse phytosociologique

Afin d'améliorer la connaissance de la nature et de mettre au point un catalogue des types de végétation ayant une propension à s'installer sur des technosols composés de déchets de construction et terres de remblais, des relevés phytosociologiques ont été effectués.

Ces relevés s'opèrent en deux étapes:

- 1) dresser la liste exhaustive des taxons.
- 2) noter la surface du relevé, son recouvrement et la hauteur de la végétation.

Les relevés phytosociologiques ont été effectués à cinq reprises sur les trois sites, le long des mêmes transects mis au point lors de la campagne d'échantillonnage de sol. Ces mesures ont été faites le jeudi 10 mai 2018.

Chaque relevé s'effectuait suite au placement d'un cadre de deux mètres sur deux mètres sur un point présent le long du transect et choisi de manière aléatoire. Ce cadre délimite la zone d'analyse du recensement de la végétation.



---

## 4. Résultats

---

### Méthode de présentation des résultats

L'ensemble des mesures précédemment décrites aboutit à 509 résultats analytiques. Ces résultats correspondent à :

- 3 sites d'étude: Fleurus (**FL**), Grand-Leez (**GL**) et Chaumont-Gistoux (**CG**);
- 16 forages: 5 pour FL, 5 pour GL et 6 pour CG;
- 6 échantillons en vrac par forage aux profondeurs respectives: 00-15 cm; 15-30 cm; 35-55 cm; 65-75 cm; 85-105 cm; 110-120cm;
- 16 prélèvements de mottes fraîches en surface à la bêche: 5 pour FL, 5 pour GL et 6 pour CG.

Les 16 bulletins d'analyse complets correspondant aux 16 «profils» (forages) de sol analysés figurent en annexe (Annexes 18 à 33).

Il est également à noter que sur les graphiques, la profondeur correspondant à chaque horizon est la valeur moyenne de la profondeur de cet horizon (ex: 0 – 15cm → 7,5cm).

### 4.1 Les technosols étudiés

#### 4.1.1 Propriétés physiques

##### 4.1.1.1 Charge caillouteuse

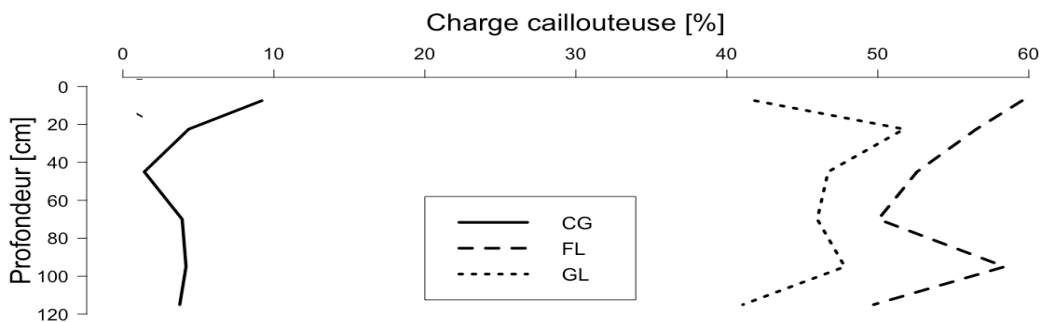


Figure 18: Evolution de la charge caillouteuse moyenne en fonction de la profondeur pour les 3 sites étudiés

Les valeurs de la charge caillouteuse ( $\varnothing > 2\text{mm}$ ) varient de 0 à 16% pour Chaumont-Gistoux (moyenne: 4%), de 36 à 78% pour Fleurus (54%) et de 19 à 81% pour Grand-Leez (46%).

CG est caractérisé par la dominance d'éléments fins et une pierrosité faible sur l'ensemble des horizons comparativement aux sites FL et GL où la charge caillouteuse représente près de la moitié des constituants du sol et où la répartition des éléments grossiers est très hétérogène sur l'ensemble des horizons.

Selon la classification du Geppa (1981), les sols de CG contiennent peu d'éléments grossiers (<5%), et ceux FL et GL une charge caillouteuse très élevée (>40%).

Les évolutions de la teneur en charge caillouteuse pour chacun des 16 profils, ainsi que les paramètres statistiques de ces derniers figurent aux Annexes 5 et 6.



Figure 19: Terre fine et charge caillouteuse pour le site de GL. De gauche à droite: GL4 85-105; GL5 85-105; GL6 15-30.

#### 4.1.1.2 Granulométrie

Grand - Leez			
Profondeur	Sable	Limon	Argile
[cm]	[%]	[%]	[%]
0 - 15	51	41	8
15 - 30	54	38	8
Fleurus			
0 - 15	41	47	12
15 - 30	40	47	13
Chaumont - Gistoux			
0 - 15	17	71	12
15 - 30	22	59	19

Tableau 6: Analyse granulométrique des horizons 0-15 et 15-30cm pour les 3 sites étudiés sur base d'échantillons de terre fine après tamisage à 2mm.

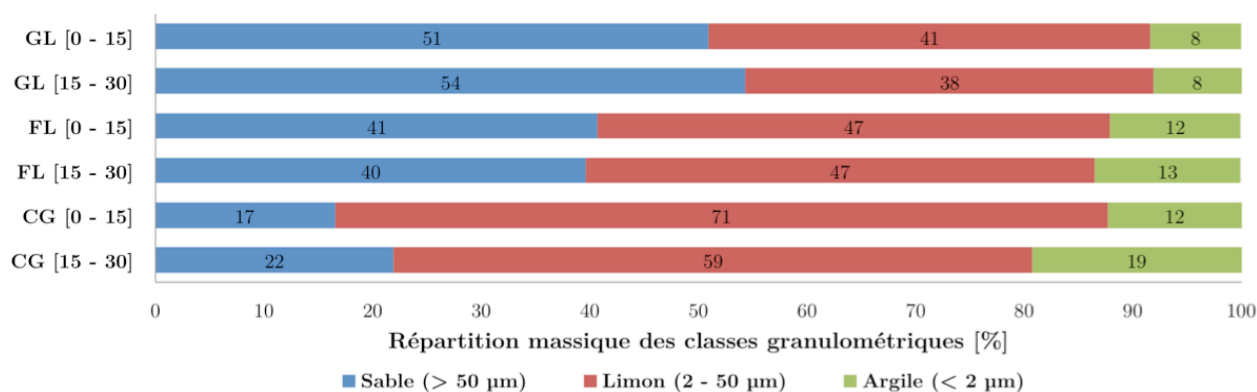


Figure 20: Composition granulométrique moyenne des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés sur base d'échantillons de terre fine après tamisage à 2mm.

La teneur en argile des horizons superficiels est faible sur les 3 sites étudiés: 12–19% à Chaumont-Gistoux, 8% à Grand-Leez, 12-13% à Fleurus.

Nous observons une transition d'une dominance de la fraction sableuse à la fraction limoneuse selon la séquence d'évolution GL>FL>CG.

#### 4.1.1.3 Minéralogie

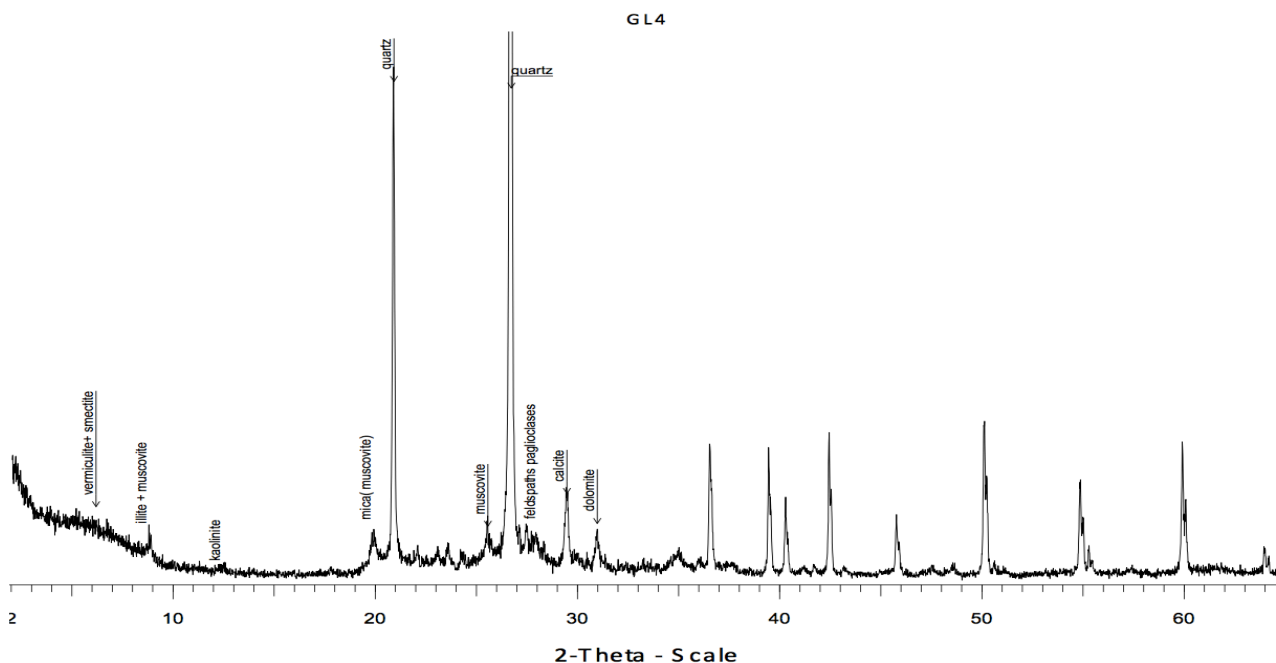


Figure 21: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 4

Les spectres de diffraction aux rayons X (DRX) figurent à l'Annexe 7, un résultat type est donné à la Figure 21.

Ces spectres montrent des caractéristiques similaires: tous les échantillons contiennent les minéraux suivants: quartz (réflexions DRX très intenses), calcite, dolomite, muscovite, feldspath et plagioclase. La forte intensité correspondant au quartz confirme les résultats de la granulométrie, ce minéral correspondant à la fraction sableuse qui est prédominante dans l'ensemble des sols étudiés. Cette dominance du quartz indique qu'une grande majorité des minéraux du sol sont des minéraux résiduels ne pouvant être affectés par l'altération. Dans le domaine des réflexions DRX aux petits angles, plusieurs phyllosilicates sont identifiés dans tous les échantillons: kaolinite, illite, smectite et vermiculite. Toutefois, les spectres DRX diffèrent ici en termes d'intensité des réflexions, celles observées pour les échantillons FL1B et FL5 étant plus intenses que celles observées pour les échantillons GL2B, GL4 et GL6B, en particulier pour la smectite. Ces réflexions sont particulièrement intenses sur le spectre DRX obtenu pour l'échantillon FL5.

#### 4.1.1.4 Porosité et densité

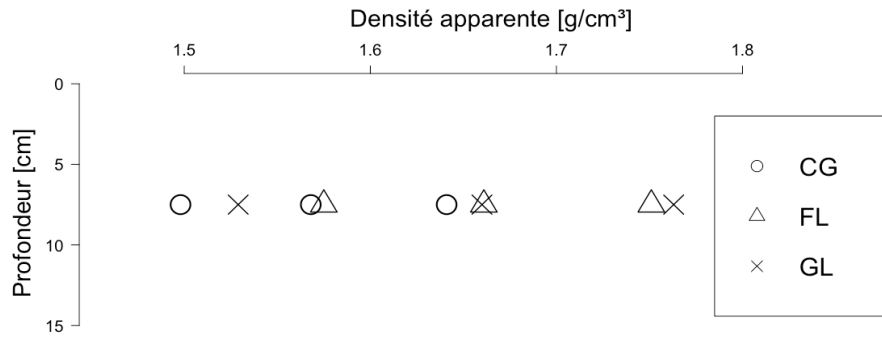


Figure 22: Densité apparente sèche de 9 horizons de surface (Horizon 0 - 15 cm) pour les sites étudiés (3 analyses par site)

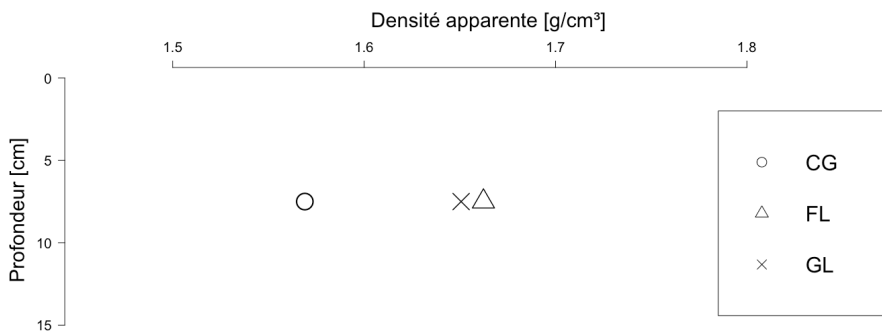


Figure 23: Densité apparente sèche moyenne des horizons de surface (0 - 15 cm) pour les sites étudiés

Les valeurs de la densité apparente sèche sont les plus élevées à GL et FL (1,66 - 1,65 g/cm<sup>3</sup>). CG se distingue par un sol moins compact ( 1,57 g/cm<sup>3</sup>).

Ces densités relativement importantes attribuent un comportement propre aux sols sableux (1,50 – 1,80 g/cm<sup>3</sup>) à ces 3 sols.

Les valeurs de porosité totale sont reprises au Tableau 7.

Porosité		
Grand - Leez	Fleurus	Chaumont - Gistoux
0,38	0,37	0,41

Tableau 7: Porosité moyenne des horizons de surface (0 - 15 cm) pour les sites étudiés

#### 4.1.1.5 Propriétés hydriques et hydrodynamiques

La mesure de la conductivité à saturation in-situ a rencontré de nombreuses contraintes:

- charge caillouteuse importante pour les sites de Grand-Leez et Fleurus, rendant contraignante l'insertion de l'infiltromètre dans le sol;
- couverture végétale très dense sur la parcelle de Chaumont-Gistoux, empêchant la mise à nu parfaite du sol;
- Croûte très compacte sur les sites de Grand-Leez et Fleurus.

Les mesures effectuées sur les sites de Grand-Leez et Fleurus n'ont donné aucun résultat, malgré les multiples essais avec des charges constantes différentes.

Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation sur le site de Chaumont-Gistoux est de 66 mm/h. Cette valeur est caractéristique d'un sol limon-sableux (Tableau 3), confirmant les résultats de l'analyse granulométrique (71% de limon, 17% de sable).

Malgré l'absence de résultats in-situ pour les sites de Grand-Leez et Chaumont-Gistoux, l'utilisation de plusieurs modèles basés sur des fonctions de pédotransfert nous porte à croire que ces deux technosols se comportent comme des sols sablo-limoneux à sableux en l'absence d'une croûte de battance. En effet, ces modèles, qui se basent sur la teneur en argile, en matière organique, ainsi que sur la densité apparente, résultent tous en des conductivités hydrauliques importantes.

Néanmoins, ces fonctions de pédotransfert étant très complexes à extrapoler d'une région à l'autre et les modèles ne prenant pas en compte les sols anthropogéniques, les résultats ne peuvent servir davantage de base pour ce travail et sont cités ici uniquement afin de montrer les grandes tendances dans le comportement hydrodynamique des technosols étudiés.

## 4.1.2 Propriétés physico-chimiques

### 4.1.2.1 $pH-H_2O$

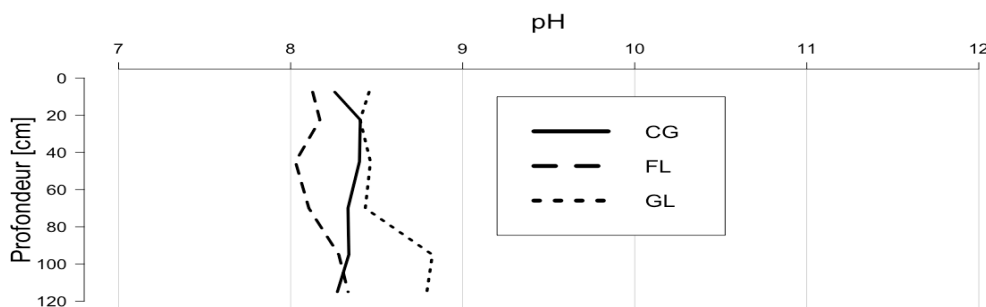


Figure 24: Evolution moyenne du pH pour l'ensemble des profils des 3 sites étudiés

Les valeurs moyennes du pH-eau sont élevées dans les 3 sites: 8,56 (GL), 8,17 (FL), 8,33 (CG), tous horizons confondus. Elles varient très peu d'un horizon à l'autre (Annexe 8). Ces valeurs révèlent le caractère calcaire de ces sols (*cfr* section 2.8.1).

#### 4.1.2.2 CEC et bases échangeables

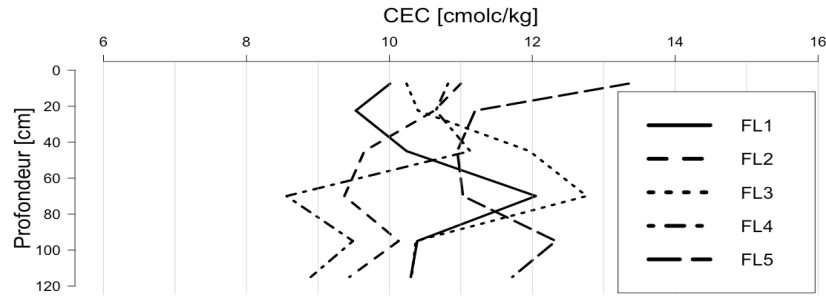


Figure 25: Evolution de la CEC en fonction de la profondeur pour l'ensemble des profils du site de Fleurus

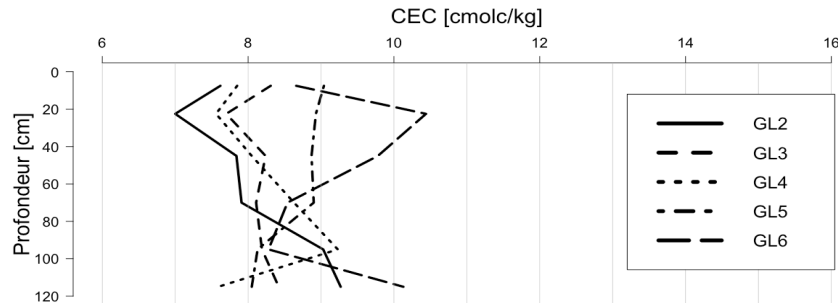


Figure 26: Evolution de la CEC en fonction de la profondeur pour l'ensemble des profils du site de Grand-Leez

Les valeurs moyennes de la CEC (cmolc/kg) sont 8,48 (GL) et 10,63 (FL), tous horizons confondus. Ces valeurs ne révèlent aucune évolution régulière en fonction de la profondeur.

En prenant en compte les valeurs moyennes des teneurs en argile et matière organique et de la CEC, la CEC de la fraction argileuse peut être calculée (cmolc/kg<sub>argile</sub>): 67 (FL) et 77 (GL).

Ces valeurs de CEC<sub>A</sub>, supérieures à 24 cmolc/kg<sub>argile</sub>, confirment la présence de *High-Activity Clay* (HAC), vraisemblablement d'un mélange de minéraux 2:1 (*cfr* section 4.1.1.3): illite, vermiculite, smectite.

Les valeurs moyennes de la somme des bases échangeables (SBE) varient de 20 à 36 cmol<sub>c</sub>/kg 28 (GL), 33 (FL), tous horizons confondus. SBE augmente avec la profondeur à FL (31,8 à 39,5 cmolc/kg) et de manière plus modérée à CG (26 à 28,4 cmolc/kg).

Le taux de saturation en bases (BS = SBE/CEC x100) est largement supérieur à 100% pour tous les profils analysés en raison de la dissolution des carbonates sous l'action de l'acétate d'ammonium tamponné à pH7.

Les teneurs en cations échangeables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) varient en fonction de l'élément considéré [cmolc/kg]: Ca<sup>2+</sup> est dominant à GL (26,41) et à FL (31,42). Ces teneurs élevées appuient l'interprétation, bien connue, d'une dissolution des carbonates à pH7. Les teneurs des 3 autres cations (cmolc/kg) sont faibles pour Mg<sup>2+</sup>(~1 à GL et FL), relativement normales pour K<sup>+</sup> (0,59 à GL, 0,46 à FL) et relativement élevées pour Na<sup>+</sup> (0,4 à GL, 0,5 à FL), par rapport aux sols agricoles de la région.

Les paramètres statistiques de l'évolution de la CEC et de SBE figurent respectivement aux Annexes 9 et 10.

#### 4.1.2.3 Matière organique

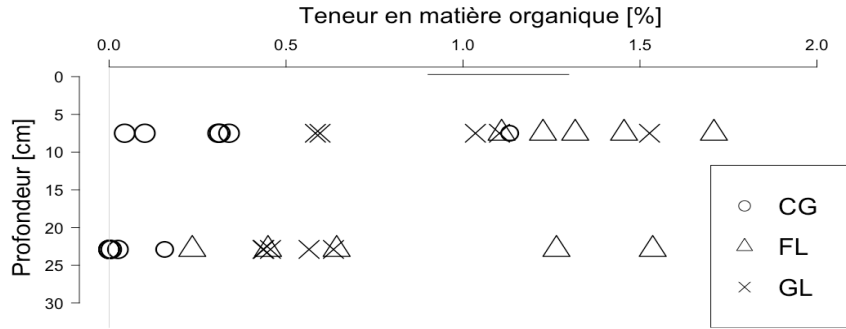


Figure 27: Teneur en matière organique des horizons 0 - 15 et 0 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site)

Bien que faible pour les sols des 3 sites, la teneur en matière organique (MO) à Fleurus excède largement celle mesurée à Chaumont-Gistoux, et dans une moindre mesure à Grand-Leez.

La faible teneur en MO est attendue si toute végétation est systématiquement éliminée (*cfr* 2.8.1). A Grand-Leez et Fleurus, l'«élimination» est due à l'apport répété de nouveaux remblais. A Chaumont-Gistoux, seul site actuellement cultivé, la très faible teneur en MO est due à l'exportation de la biomasse épigée par la récolte.

#### 4.1.2.4 Carbone et Azote totaux

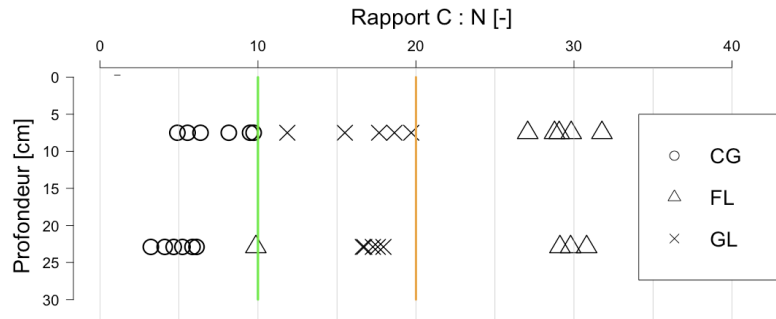


Figure 28: Rapport C : N des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site). La barre orange représente la valeur seuil ( $C/N=20$ ) au-delà de laquelle la minéralisation de la matière organique par la biomasse microbienne ne se fait que très lentement. La barre verte représente la valeur optimale du rapport C/N (10).

Le rapport C/N à Fleurus ( $>20$ ) est largement supérieur à celui mesuré à CG ( $\sim 8$ ) et GL ( $\sim 16$ ). La valeur du rapport C/N varie moins en profondeur.

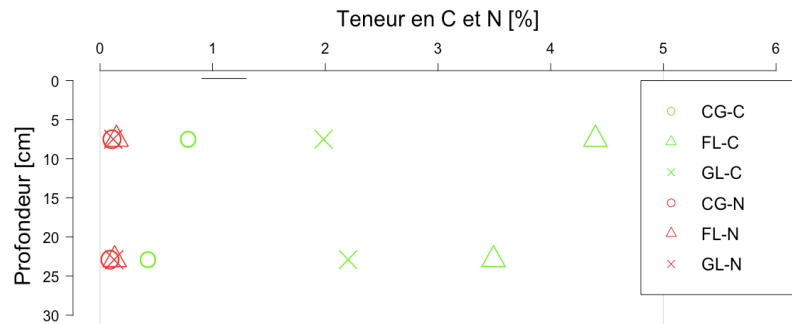


Figure 29: Teneurs moyennes en carbone (vert) et en azote (rouge) des horizons 0-15 et 15-30 cm pour les 3 sites étudiés.

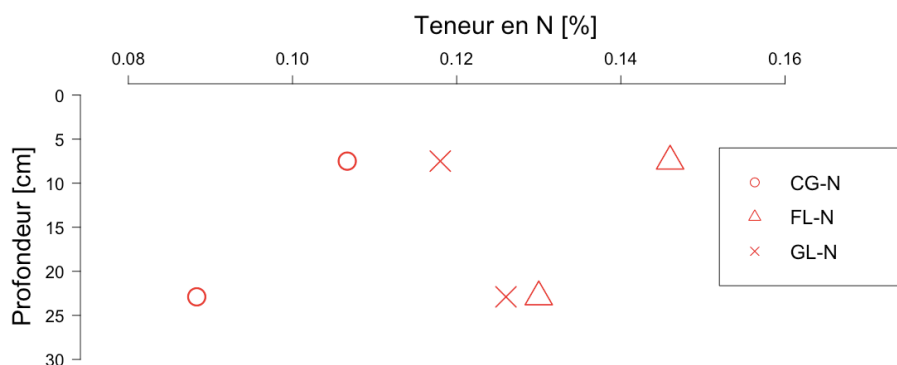


Figure 30: Teneurs moyennes en azote des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site).

#### 4.1.2.5 Carbonates

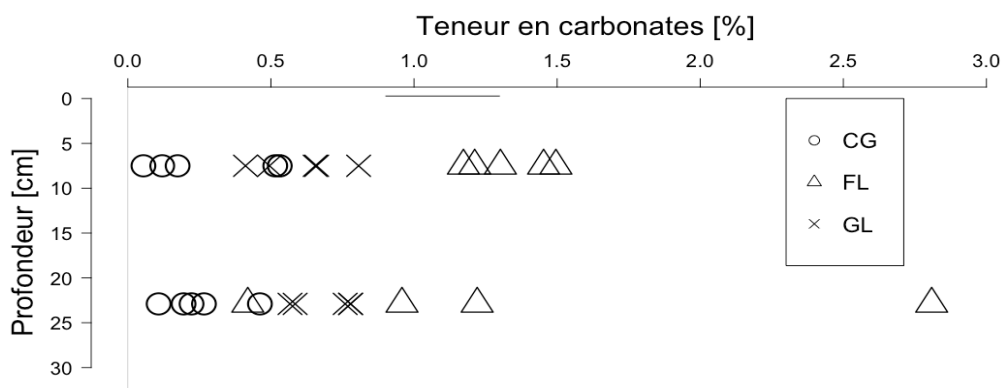


Figure 31: Teneurs moyennes en carbonates des horizons 0 - 15 et 15 - 30 cm pour les 3 sites étudiés (3 profils par site).

La teneur en carbonates est largement supérieure à Fleurus qu'à CG et dans une moindre à GL. Cette teneur varie moins en profondeur.

La présence de carbonates confirme le caractère calcaire des 3 sols ainsi que le contrôle du pH par la présence de  $\text{CaCO}_3$ .

Il est à noter que la somme des carbonates et du carbone organique ne correspond pas à la teneur en carbone total. Ceci est dû à une estimation biaisée des carbonates générée par une application imparfaite du protocole de mesure des carbonates proposé par Sherrod.

### 4.1.3 Propriétés biologiques

#### 4.1.3.1 Respiration microbienne

##### 4.1.3.1.1 Emission de $CO_2$ par gramme de sol en fonction du temps

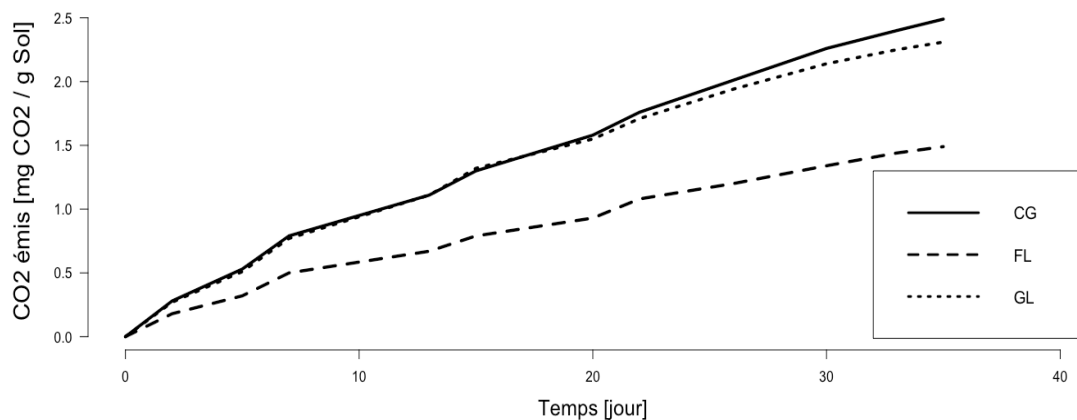


Figure 32: Emission de  $CO_2$  par gramme de sol en fonction du temps dans l'horizon 1 (0 - 15cm) pour les 3 sites étudiés

Les échantillons de sol CG et GL ont émis, après 35 jours, 1,6 fois plus de gaz carbonique par gramme de sol que celui de FL, CG et GL étant très proches (Figure 32).

L'émission de  $CO_2$  évolue linéairement quasiment dès le début de la mesure respirométrique (0–2 jours).

##### 4.1.3.1.2 Emission de $CO_2$ par gramme de carbone organique en fonction du temps

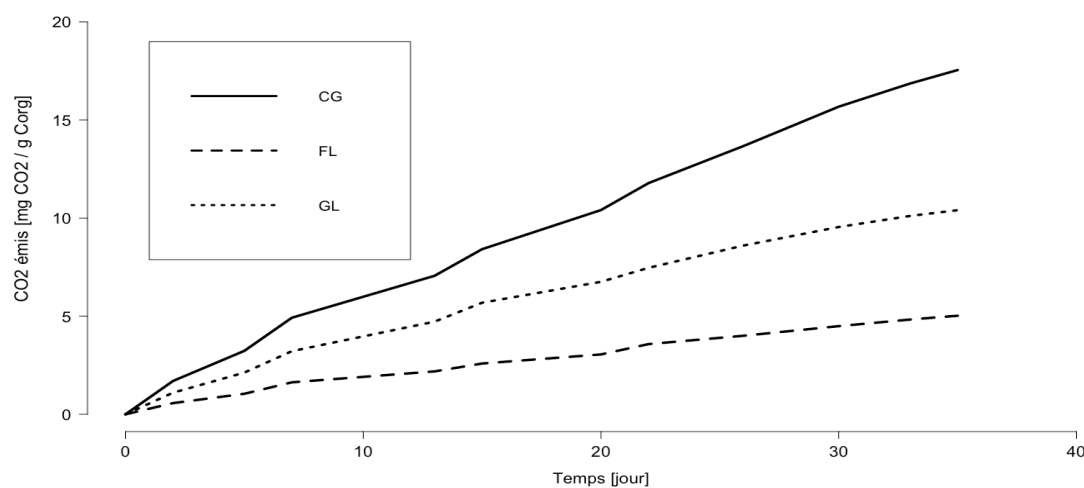


Figure 33: Emission de  $CO_2$  par gramme de carbone organique en fonction du temps dans l'horizon 1 (0 - 15cm) pour les 3 sites étudiés

Exprimée par gramme de  $C_{org}$  (Figure 33), l'émission de  $CO_2$  révèle la même séquence:  $CG > GL > FL$ . Toutefois, elle est nettement plus élevée sous culture (CG) que dans la réserve (GL).

#### 4.1.3.2 Analyse phytosociologique

Taxons recensés		
Grand - Leez	Fleurus	Chaumont - Gistoux
<i>Adonis sp.</i>	<i>Adonis sp.</i>	<i>Adonis sp.</i>
<i>Aira caryophylla</i>	<i>Brassica rapa</i>	<i>Bromus hordeaceus</i>
<i>Bellis perennis</i>	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	<i>Geranium robertianum</i>
<i>Cytisus sp.</i>	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Medicago sativa</i>
<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Ranunculus repens</i>	<i>Mercurialis annua</i>
<i>Geranium sanguineum</i>	<i>Senecio vulgaris</i>	<i>Poa trivialis</i>
<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Trifolium dubium</i>	<i>Ranunculus repens</i>
<i>Ranunculus repens</i>	<i>Veronica hederifolia</i>	<i>Rumex sanguineus</i>
<i>Rumex sanguineus</i>		<i>Taraxacum officinale</i>
<i>Taraxacum officinale</i>		
<i>Trifolium pratense</i>		

Tableau 8: Taxons recensés par relevés phytosociologiques sur les 3 sites étudiés

	Grand - Leez	Fleurus	Chaumont - Gistoux
<b>Recouvrement total</b>	85 - 90%	20%	100%
<b>Recouvrement des bryophytes</b>	80%	15%	15 - 20%
<b>Recouvrement des herbacées</b>	70%	5 - 10%	100%
<b>Espèce(s) dominante(s)</b>	Ranunculus repens (bouton d'or); Trifolium pratense (trèfle des prés)	Pas de dominance	Medicago sativa (luzerne cultivée)

Tableau 9: Recouvrement et dominances au sein de la végétation suite aux relevés phytosociologiques sur les 3 sites étudiés



Figure 34: Peuplement végétal du site de Fleurus



Figure 35: Peuplement végétal du site de Grand - Leez

A travers les relevés phytosociologiques (Tableau 8), on remarque que la très grande majorité des espèces en présence est caractérisée par un ou plusieurs caractère(s) indicateur(s) commun(s) (*Jacquemart et al., 2018 ; Rameau et al., 1989*):

- prédilection pour les sites rudéralisés<sup>2</sup>;
- espèce pionnière;
- espèce héliophile<sup>3</sup>;
- favorable aux sols compacts;
- favorable au pH neutre à basique ;
- espèce neutrocalcicole<sup>4</sup>;
- prédilection pour des substrats de type graviers et/ou cailloux calcaires et/ou limons.

De plus, il est à noter à titre informatif que sur le site de Grand-Leez des plantations d'arbres ont été effectuées en bord de plateau et sur les versants de la butte. Les espèces introduites sont le résultat d'un travail de recherche en amont et correspondent aux espèces calcicoles de la région. Ces peuplements d'arbres rencontrent néanmoins divers problèmes:

- flétrissement des plants ;
- mort de plants;
- dégâts suite à des glissements de terrain sur les versants.

---

<sup>2</sup> Rudéralisé : se dit d'un site fortement désorganisé par une activité humaine (décombres, terrains vagues, etc.)

<sup>3</sup> Héliophile : se dit d'une plante croissant de préférence en pleine lumière

<sup>4</sup> Espèce neutrocalcicole : Espèce prospérant sur des sols riches en cations échangeables (pas seulement en calcium); leur abondance est forte sur les sols carbonatés

## 4.2 Comparaison des diagnostics édaphiques avec un sol de référence

Le manque de résultats à comparer pour Chaumont-Gistoux pour certains paramètres est un choix personnel. Pour rappel, le travail de ce mémoire s'est essentiellement articulé autour des sites de Fleurus et Grand-Leez, pour deux raisons:

- le site de Chaumont-Gistoux est un site fort différent des deux autres et trop peu d'informations sur son historique sont connues, limitant la pertinence des comparaisons.
- la charge de travail en laboratoire et sur le terrain étant déjà considérable, comme l'atteste le plan d'analyse (*cfr* section 3.2.2), des limites ont dû être posées afin de rendre possible la réalisation de ce travail en une année.

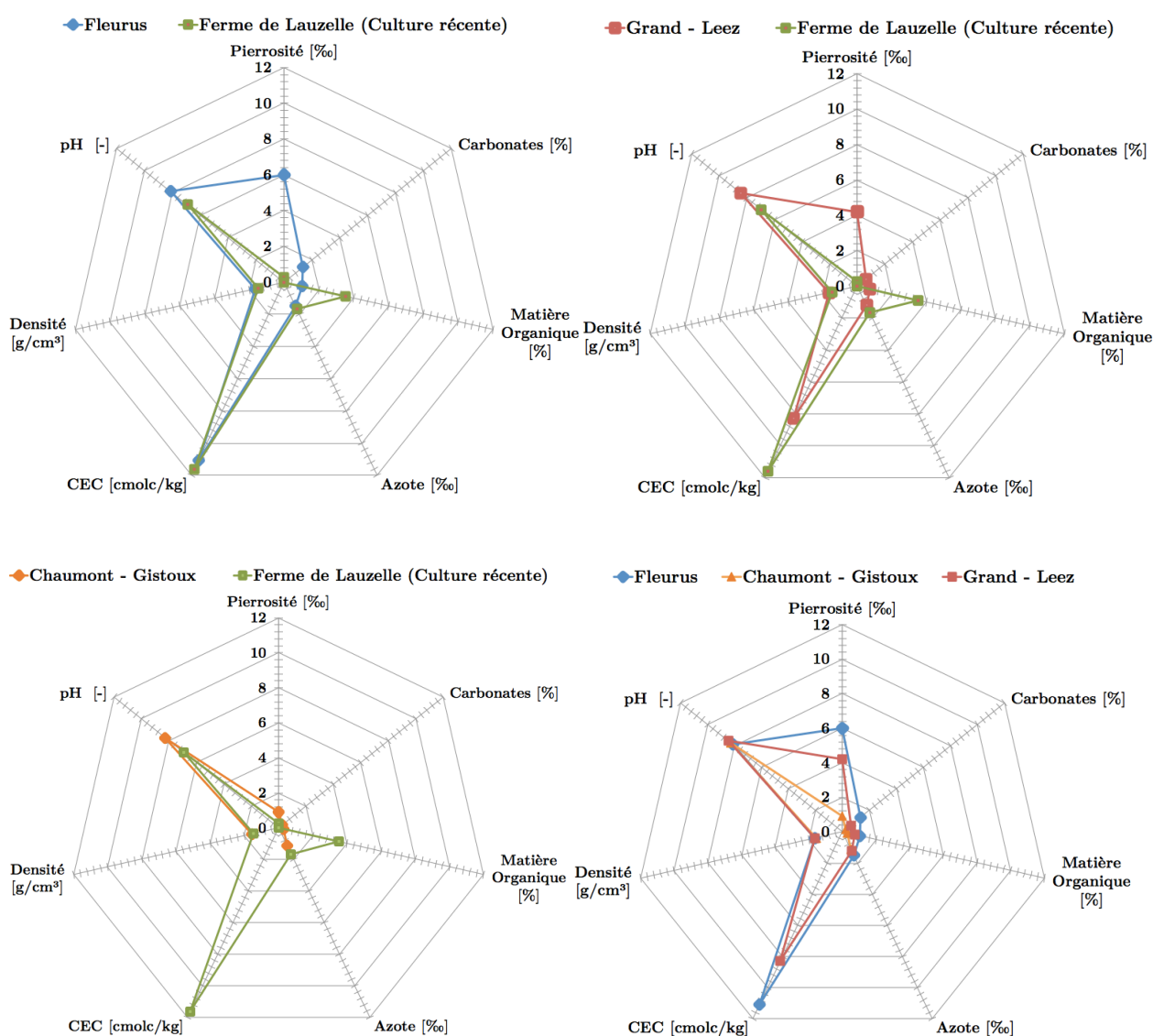


Figure 36: Comparaison de quelques propriétés du sol (horizon de surface) entre un sol cultivé de référence et FL (a), GL (b) et CG (c), entre les 3 sites FL, GL et GC (d).

Paramètres		Grand - Leez	Fleurus	Chaumont-Gistoux	Ferme de Lauzelle
Occupation actuelle	/	Réserve naturelle	Remblais	Cultures	Cultures
Ancien site de remblais	/	Oui	Oui	Oui	Non
Date du dernier remblayage	/	2015	2013	1997	/
Position topographique	/	Plateau sur butte	Pente nulle	Pente faible à nulle	Sommet de plateau; pente faible à nulle
Charge caillouteuse	[%]	46	54	4	0
Granulométrie	/	Sablo-limoneux	Limo-sableux	Limoneux	Limoneux
Porosité	[-]	0,38	0,37	0,41	0,37 - 0,49
Densité app. sèche	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,66	1,65	1,35 - 1,67
Conductivité hydraulique à saturation $K_{sat}$	[mm/h]	/	/	66	
pH <sub>H2O</sub>	[-]	8,52	8,17	8,33	5,84 - 7,55
CEC	[cmole/kg]	7 - 10,44	8,56 - 13,35	/	≈ 11,7
BS	[%]	100	100	100	100
Bases échangeables	/	Faible teneur en Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> et Na <sup>+</sup> Abondance de Ca <sup>2+</sup>	Faible teneur en Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> et Na <sup>+</sup> Abondance de Ca <sup>2+</sup>	Faible teneur en Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> et Na <sup>+</sup> Abondance de Ca <sup>2+</sup>	/
Matière organique	[%]	0,44 - 1,53	0,24 - 1,71	0 - 1,13	2,15 - 7,95
Teneur en C <sub>total</sub>	[%]	1,66 - 3,05	1,48 - 5,24	0,29 - 1,07	0,80 - 3,90
Teneur en N <sub>total</sub>	[%]	0,10 - 0,17	0,08 - 0,18	0,09 - 0,13	0,10 - 0,42
Rapport C/N	[-]	11,9 - 19,7	9,87 - 31,8	3,22 - 9,73	8,00 - 9,10
Teneur en carbonates	[%]	0,41 - 0,81	0,42 - 2,81	0,06 - 0,53	Aucun ou teneur faible

Tableau 10: Tableau comparatif des principales caractéristiques des sols des 3 sites étudiés et d'un sol de référence



---

## 5. Discussion

---

### 5.1 Qualité générale des sites étudiés

#### 5.1.1 Pierrosité, densité et granulométrie

La charge caillouteuse des sols à Fleurus et Grand-Leez s'élève jusqu'à 78 et 81% . Une telle charge limite la réserve hydrique des sols, rendant la végétation en place plus vulnérable aux périodes sèches. Outre son impact négatif sur les propriétés hydriques du sol, une telle charge caillouteuse entrave la mécanisation, constitue un obstacle à l'exploration racinaire, et, dès lors, une contrainte majeure à la production de biomasse.

Les valeurs de la densité apparente des 3 sites étudiés, comparativement à celles de la Ferme de Lauzelle, sont très élevées. La compacité des sols est vraisemblablement due au tassement mécanique lors de la mise en remblais. La densité apparente est similaire à FL et GL. CG est caractérisé par une densité plus faible et donc une porosité plus élevée. Cela s'explique par la mise en remblais récente, la très faible couverture végétale et l'absence de pratiques culturales à FL et GL.

D'un point de vue agronomique, les sols de textures fines (sols argileux, argilo-limoneux et limono-argileux) sont préférés aux sols de textures grossières pour leur capacité de rétention en eau (eau utile) et nutriments (CEC) supérieure (*White, 2006*). A cet égard, GL et FL se distinguent très nettement de CG dans la mesure où ils présentent un niveau de contraintes physiques particulièrement sévères. De plus, caractérisés par de faibles teneurs en argile et MO, une fraction limoneuse abondante, une densité apparente élevée, et sujets au climat tempéré océanique de la Belgique, les sols étudiés sont sensibles au phénomène de battance, et donc à l'encroûtement et au ruissellement (*Biielders, 2017*).

Par pure hypothèse, il est suggéré que l'initiation du processus de décarbonatation puisse favoriser l'augmentation de la teneur en argile en profondeur. Le fait que le gradient de teneur en argile entre les deux premiers horizons de surface évolue dans le sens  $CG > FL > GL$  appuie cette hypothèse et met en évidence l'impact du facteur temps (*White, 2006*).

Manifestement, les sols des trois sites CG, GL et FL sont des sols très jeunes. Les processus d'altération et de pédogenèse prendront un temps considérable, particulièrement à GL et FL, compte tenu de la nature des matériaux. La stimulation de la production de biomasse par des techniques culturales ad hoc favorisant l'acidification nette du sol sont à rechercher.

Au regard des propriétés en l'état, l'usage agricole de ces sols est grevé par des contraintes physiques très sévères : compacité, faible rétention en eau, vulnérabilité aux aléas climatiques. La charge caillouteuse extrêmement élevée des sites de Fleurus et Grand-Leez est la contrainte dominante à la production de biomasse à des fins agricoles.

La charge caillouteuse d'un point de vue pédologique et en construction n'ayant pas les mêmes connotations, une courbe granulométrique de la fraction supérieure à 2mm aurait été judicieuse pour établir qualitativement la présence d'éléments grossiers.

### 5.1.2 Propriétés hydrodynamiques

Les mesures sur les sites GL et FL n'ont donné aucun résultat. Par pure hypothèse, il est suggéré que cette absence d'infiltration soit due à un phénomène d'encroûtement. Cette croûte se forme à la surface du sol sous l'action d'épisodes pluvieux importants suivis par une période sèche. Cet encroûtement est favorisé par de fortes teneurs en limon et sable. La croûte de battance empêche, entre autres, l'infiltration de l'eau mais également celle de l'air et limite l'enracinement en profondeur.

La granulométrie des trois technosols, dominée par la fraction sableuse et la fraction limoneuse, ainsi que les très faibles teneurs en matière organique entraînent une infiltration et une capacité de rétention en eau respectivement très forte et très mauvaise. Ce bilan hydrique défavorable au développement végétal est complété par des risques d'encroûtement importants bloquant l'infiltration de l'eau et de l'air, freinant le développement racinaire, et entraînant des risques accrus de ruissellement et d'érosion.

Face à de telles contraintes, la revalorisation des technosols par le biais de plantations est complexe et nécessite de modifier les propriétés édaphiques afin de favoriser la bonne acclimatation de la végétation. Les deux objectifs principaux sont l'augmentation de la teneur en matière organique afin de favoriser la rétention et de diminuer les risques de battance et la décompaction ou la déstructuration des croûtes de battance en surface.

### 5.1.3 pH, carbonates, CEC et bases échangeables

Les valeurs élevées du pH confirment le caractère calcarifère des technosols, évidemment dû à la présence de carbonates. Le caractère ténu du couvert végétal par nature acidifiant (*Van Breemen et al., 1983*) freine aussi les processus de dissolution des minéraux non carbonatés présents dans le sol. Deux obstacles apparaissent donc à la pédogenèse : le caractère calcarifère et la quasi absence de végétation.

L'acidification nette étant un processus pédogénétique naturel, les valeurs de pH des 3 sites sont vouées à baisser dès lors qu'aucun amendement influençant la basicité du sol n'est apporté.

Les valeurs de la CEC sur argile indiquent la présence de minéraux phyllosilicatés 2:1 similaires sur les sites GL et FL. Ces valeurs suggèrent la présence d'une fraction argileuse dominée par la smectite dans les horizons superficiels (0-15 et 15-30 cm).

Le degré de saturation en bases (BS, %) est maximal dans tous les échantillons, la garniture cationique étant largement dominée par l'ion  $\text{Ca}^{2+}$ . Cette dominance est révélatrice de la dissolution des minéraux carbonatés présents dans le matériau technogénique parental.

Dans ces conditions ( $\text{pH} > 8$ ), les ions  $\text{Ca}^{2+}$  jouent leur rôle en tant qu'excellents agents flocculants. Ces derniers favorisent l'agrégation des argiles (*White, 2006*). Flocculée, l'argile n'est pas dispersable et n'est pas transportée par drainage.

La vitesse de l'altération d'une roche carbonatée, liée à la vitesse d'évacuation des produits issus de cette altération, conditionne les teneurs en carbonates des sols et en  $\text{Ca}^{2+}$  de la solution des sols et, corrélativement, leur degré d'évolution (*Lamouroux, 1972*). Les propriétés hydrodynamiques et les conditions climatiques impactent donc directement la dissolution des carbonates et l'altération des technosols.

L'évolution d'un technosol est caractérisée par un faible niveau d'altération dû à l'abondance de carbonates dont la dissolution «tamponne» fortement le pH et préserve les autres minéraux altérables (*Leguédais et al., 2016*), les carbonates constituant les puits de protons privilégiés dans le processus d'acidification nette (*Van Breemen et al 1983*). La cinétique du processus de décarbonatation des matériaux technogéniques rend l'évolution des technosols relativement limitée pendant une période de plusieurs décennies (*Damas et Coulon, 2016*).

Le degré de saturation en bases (BS, %) atteint des valeurs supérieures à 100% dans tous les échantillons. Il s'agit d'un artefact attribué à la méthode d'extraction des cations échangeables. Celle-ci est pratiquée à l'aide d'une solution de  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  1M tamponnée à pH7. A cette valeur de pH, de surcroît maintenue constante par le tampon, la dissolution des carbonates pendant l'extraction libère des ions  $\text{Ca}^{2+}$  initialement piégés dans les carbonates. Il ne s'agit donc pas de cations échangeables. Il en découle une surestimation des concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$  d'échange. Il n'en demeure pas moins que l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  est le cation échangeable largement dominant en conditions édaphiques naturelles.

Au regard des propriétés physico-chimiques, l'utilisation de ces sols à des fins agronomiques semble relativement contraignante et ce pour plusieurs raisons:

- la faible CEC entraîne une faible rétention des cations et un lessivage de ceux-ci sous l'action du drainage et, dès lors, une faible biodisponibilité;
- le caractère calcarifère du sol et la nature des matériaux technogéniques entraînent une dominance presque absolue du calcium sur le complexe d'échange. Les sols des sites étudiés sont dès lors relativement appauvris en  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$ . L'apport d'éléments fertilisants est donc à prévoir dans l'objectif de production de biomasse.

Néanmoins, des avantages quant à la nature physico-chimique de ces sols sont à mentionner:

- la présence de calcium est bénéfique, dictant les processus de floculation des argiles. L'agrégation entraîne une meilleure rétention en eau, une protection de la matière organique vis-à-vis de la minéralisation, et une structuration du sol;
- un pH supérieur à 5,5 élimine tout risque de toxicité aluminique ou manganique dommageable à la végétation mise en place;
- un pH élevé favorise la dégradation de la matière organique, la nodulation et la fixation de diazote par les légumineuses, et la disponibilité en molybdène et calcium;
- la CEC sur argile étant très élevée, le sol étant jeune et son altération devant entraîner l'augmentation de la fraction argileuse, la capacité de rétention des cations du sol croîtra sous l'action du facteur temps.

#### 5.1.4 Carbone, azote et matière organique

Sur l'ensemble des sites, l'accumulation de MO n'est pas possible car les apports en matériel végétal mort ne sont qu'infimes avec pour seul apport, dans le cas de Grand-Leez et Fleurus, la décomposition de la végétation herbacée extrêmement éparse, et, pour Chaumont-Gistoux, la décomposition du peu de luzerne laissée sur site après récolte.

De plus, les conditions de minéralisation étant, d'un point de vue chimique (Rapport C : N, pH, etc.), optimales à CG et favorables à GL, le peu de matière organique présente dans le sol est rapidement décomposée par l'activité microbienne, selon la séquence  $CG > GL > FL$ .

Ces résultats respirométriques sont corroborés par le fait que les sols F conservent une teneur en MO plus élevée que celles de GL et CG, malgré la mise en culture de ce dernier site depuis plusieurs décennies.

Outre le rapport C/N favorable à la minéralisation des composés organiques, la faible teneur en matière organique au sein des profils de **CG** peut être expliquée par l'usage agricole des sols, et les pratiques associées, notamment:

- le travail du sol qui favorise l'incorporation de la matière organique et l'aération du sol, accélérant la décomposition de la MO;
- l'exportation de la biomasse épigée par la récolte;
- l'apport des engrais et amendements qui favorisent la biodégradation de la MO en stimulant l'activité microbienne (*Solomon et al., 2000*) (*Celik, 2005*).

Un gradient de diminution de la teneur en matière organique en profondeur est également commun à l'ensemble des sites étudiés.

On peut s'essayer à prévoir les dynamiques suivantes, par hypothèse. Le site GL, en réserve naturelle, devrait voir croître régulièrement la teneur en MO de ses sols sous réserve d'une augmentation de la biomasse. En revanche, une telle dynamique n'aurait pas lieu à CG en

raison de l'application d'un itinéraire technique typique des grandes cultures. Si l'on se risque à assimiler l'usage du site GL à celui d'une prairie naturelle, l'augmentation de MO au cours des prochaines années est plausible. Plusieurs études affirment que les prairies non-travaillées comportent davantage de MO que les sites sous culture (*Celik, 2005*) (*Huggins, 1998*).

D'un point de vue agronomique, les faibles teneurs en MO mesurées actuellement présentent des désavantages majeurs (*Kononova, 1961*) (*Allison, 1973*):

- absence de structuration du sol et absence de complexes argilo-humiques;
- faible réserve en eau utile;
- faibles valeurs de la CEC;
- manque de substrat pour le réseau trophique détritivore;
- manque de sources de nutriments.

L'évaluation, élément par élément, de la teneur en  $C_{org}$  et en N suit la même séquence que l'évaluation de la décomposition microbienne mentionnée précédemment (CG > GL > FL). La décomposition de la MO (minéralisation) étant la principale source d'azote dans le sol, il est cohérent de suivre le même comportement au sein des profils entre les teneurs en N et en MO.

Au regard des teneurs en MO, C et N, la principale contrainte à la fertilité des sols étudiés semble être la trop faible teneur en MO au sein des sols étudiés. Celle-ci et la dominance de la fraction limoneuse mènent à une très faible stabilité structurale et rendent les sols sujets à la battance et l'encroûtement. La faible teneur en MO impacte donc directement les propriétés physiques et biologiques.

### 5.1.5 Propriétés biologiques

La mise en parallèle de l'évaluation du rapport C/N, de la teneur en MO, de la respiration microbienne, et de la vitesse de minéralisation met en évidence des propriétés biologiques distinctes entre les 3 sites. Chaque évaluation offre la même séquence d'évolution graduelle des propriétés:

- *respiration microbienne (par gramme de sol):* CG > GL >> FL;
- *respiration microbienne (par gramme de  $C_{org}$ ):* CG > GL > FL;
- *vitesse de minéralisation:* CG > GL > FL;
- *rapport C/N:* CG < GL < FL<sup>5</sup>;
- *teneur en MO:* CG < GL < FL.

---

<sup>5</sup> Avec pour CG et GL des valeurs favorables à la décomposition de la matière organique

Divers facteurs influencent la respiration microbienne, et donc la minéralisation de la MO: usage du sol et présence de cultures (*Currie, 1970*), rapport C/N, teneurs en eau et MO, structure du sol, etc.

Le sol sous culture (CG) et le sol sous couvert végétal modéré (GL) émettent plus de CO<sub>2</sub> que le sol FL. Ces deux sols plus émetteurs sont caractérisés par un rapport C/N favorable (voire optimal) et, dans le cas de CG, par un usage agricole. Ces caractéristiques sont les raisons d'une respiration plus importante. L'analyse de l'émission de CO<sub>2</sub> par unité de masse de C<sub>org</sub> rend l'évolution de la respiration indépendante du stock initial en MO. Cette analyse suggère que la teneur en MO plus importante pour le site FL n'avantage pas la respiration dans ce cas, dès lors que ce site est caractérisé par un rapport C/N défavorable (>20).

Outre un rapport C/N favorable, l'activité microbienne plus importante à CG peut également être due aux actions anthropiques, notamment le travail du sol et les apports d'amendements et d'engrais. Comme déjà souligné, ces pratiques favorisent l'activité biologique dans les sols (*Buysse and Aubinet, 2010*).

Nos résultats et leur interprétation sont à considérer avec précaution car les mesures en laboratoire s'éloignent des conditions in-situ, ce qui s'explique notamment par:

- le séchage, broyage, tamisage stockage pendant plus de 7 mois et la réhumidification des échantillons;
- l'ouverture des bouches respirométriques lors de chaque mesure, qui pourrait modifier les pressions partielles en O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>, et donc impacter le piégeage du CO<sub>2</sub> par la solution de NaOH;

Cela étant, tant le conditionnement des échantillons que les protocoles appliqués garantissent, et c'est extrêmement précieux, des conditions standards de mesure. Celles-ci permettent de comparer les résultats entre sols et sites dans des conditions expérimentales rigoureuses et identiques. A cet égard, il convient de souligner la forte cohérence entre les diverses mesures.

### 5.1.6 Peuplement végétal

L'analyse phytosociologique a démontré l'existence d'espèces pionnières capables de coloniser des technosols formés de terres excavées et déchets de construction. Cette colonisation est la première étape d'une succession écologique.

Les espèces en place répondent presque toutes à des critères communs, elles sont neutrocalcicoles avec une prédilection pour les sites rudéralisés et/ou les sols compacts.

Des relevés fréquents, dès la première année suivant l'élaboration d'un technosol de ce type, auraient pu permettre de distinguer les espèces pionnières des post-pionnières, ces dernières

s'installant au sein d'une zone écologique donnée sans forme de vie antérieure seulement si des espèces pionnières, auxquelles elles se substituent, les ont précédées.

Les mauvais résultats de l'implantation d'arbres sur le technosol de Grand-Leez suggèrent l'importance d'initier la colonisation végétale par l'introduction d'espèces végétales de petites dimensions, à l'instar des bryophytes et des herbacées. En effet, l'enracinement d'espèces ligneuses demande une structure déjà existante au sein du sol. Or, celle-ci est naturellement absente des technosols néoformés. De plus, d'autres contraintes majeures sont rencontrées pour le développement d'espèces ligneuses: Faible teneur en matière organique, mauvais bilan hydrique, etc.

Précéder la mise en culture ou la plantation d'espèces ligneuses par l'implantation d'herbacées favoriserait les conditions édaphiques essentiellement en apportant de la matière organique, diminuant le lessivage et améliorant la stabilité structurale du sol. Ceci est d'autant plus vrai pour les espèces ligneuses implantées sur les versants de la butte de Grand-Leez, celles-ci étant davantage sujettes à l'érosion et aux glissements de terrain.

## 5.2 Risques liés à l'exploitation des sites

### 5.2.1 Evaluation de l'innocuité pour la santé et l'environnement

Dans une optique d'évaluation des risques, ces derniers doivent être étudiés dans la perspective de l'environnement et de l'homme. Les valeurs seuils définissant les risques sont imposées par l'AGW du 14/06/2001 pour les risques d'écotoxicité des terres excavées.

L'évaluation et la gestion des risques passent par trois points (*Damas et Coulon, 2016*):

- le contrôle de la qualité du site;
- le contrôle de la qualité des matériaux entrants;
- la procédure de traçabilité du plan d'assurance qualité.

*Contrôle de la qualité du site.* Dans le cadre de la gestion des terres excavées et des sites de remblais, la société Tradecowall a mené un travail d'analyses et de recherches historiques substantiel et complet en amont du stockage des terres in-situ.

*Contrôle de la qualité des matériaux entrants.* Un problème important de la politique de gestion des terres excavées en Wallonie actuellement est que, contrairement à la région flamande, aucune stratégie d'échantillonnage officielle n'est imposée dans la procédure d'acceptation des terres. De ce fait, toute analyse d'échantillons de sol correspondant aux critères de l'AGW du 14 juin 2001 et déterminant le lot de terres comme non-contaminé ou contaminé peut s'avérer non-représentatif de l'ensemble du lot de terres. Le sol étant un milieu hétérogène et par nature complexe, la probabilité d'une non-représentativité de

l'échantillonnage de terres excavées et de l'émergence de risques environnementaux ou sanitaires s'avère réelle. La possibilité d'une pollution des technosols est à envisager et à prendre en compte dans la gestion intégrée de ce type de sol.

*Procédure de traçabilité du plan d'assurance qualité.* La société Tradecowall a toujours travaillé avec une approche professionnelle quant à l'acquisition d'informations sur l'origine et la gestion des terres excavées. De manière générale, afin de minimiser les risques d'une pollution potentielle, des recommandations sont de mise en amont du stockage des terres:

- procéder à une recherche approfondie de toutes les données environnementales disponibles sur le site concerné (historique du site et des remblais, études réalisées, etc.);
- procéder à un échantillonnage dans le respect des recommandations d'échantillonnage actuellement disponibles (Code Wallon de Bonnes Pratiques, Compendium Wallon des Méthodes d'Echantillonnage et d'Analyse, etc.);
- faire appel à un prestataire agréé par la Wallonie (laboratoire, bureau d'études) pour la caractérisation du sol et des terres excavées ;
- tenir un registre regroupant l'ensemble des informations permettant d'assurer la traçabilité du plan d'assurance qualité. Ce registre doit contenir:
  1. un bordereau de suivi, d'identification et de classement des matériaux et mélanges placés au sein du technosol (coordonnées des producteurs du matériau/déchet, synthèse des analyses, etc.);
  2. une fiche technique d'usage des technosols (procédure de construction des technosols, composition des horizons de sol « construits », etc.);
  3. une base de données des acteurs et lots de terres en amont de l'acceptation des terres in-situ.

Au niveau des sites de Grand-Leez et Fleurus, en prenant en compte les défauts et faiblesses des protocoles d'échantillonnage et d'analyse des matériaux entrants et l'hétérogénéité de ceux-ci, il paraît judicieux à l'heure actuelle d'effectuer, à partir d'une campagne d'échantillonnage méthodique et rigoureuse, une analyse totale des sols.

Les matériaux utilisés dans la construction des technosols, bien qu'hétérogènes en amont, sont mélangés et disposés de manière plus homogène sur les sites étudiés. Dès lors, toute campagne d'échantillonnage s'avérerait plus représentative que celles effectuées auparavant sur les terres excavées. La campagne d'analyse en résultant donnera potentiellement des concentrations en polluants (hydrocarbures, métaux lourds, etc.) plus cohérentes avec la réalité de terrain que la base de données que possède la société Tradecowall.

Suite à cette caractérisation de la composition des technosols, des aménagements précis et cohérents avec la législation wallonne pourront être proposés: phytoremédiation, culture, etc.

---

## 6. Approfondissement:

# Optimiser l'évolution des technosols en vue de construire des sols à usage agronomique

---

### 6.1 Introduction

La caractérisation des technosols composés de terres de remblais et de sous-produits de construction a démontré que ces sols rencontraient de nombreuses contraintes à la production de biomasse. Néanmoins, afin de réellement revaloriser ces déchets de construction et sous-produits de terrassement, il est nécessaire de transformer ces technosols infertiles en sols végétalisables pouvant générer une plus-value environnementale et/ou économique.

Afin de répondre à ces objectifs, les sols construits doivent être aptes à assurer des fonctions essentielles (*Damas et Coulon, 2016*):

- favoriser la circulation et la rétention de l'eau;
- permettre la rétention des éléments minéraux;
- maintenir leur stabilité physique;
- assurer le support des activités humaines;
- constituer un support fertile pour la végétation.

Le processus de construction de sol fait intervenir différentes compétences spécifiques essentielles à la mise en place du génie pédologique (*Damas et Coulon, 2016*):

- programmation du projet (définition du budget et formulation du besoin);
- conception du sol;
- gestion des matériaux (collecte, traitement, valorisation);
- conception des mélanges de matériaux technogéniques;
- travaux de mise en place et de réalisation des espaces végétalisés et plantation.

Cependant, les jeunes technosols étudiés ici (GL, FL), sont soit élaborés (GL), soit déjà partiellement construits (FL). Dès lors, les actions pouvant être menées afin de rendre ces sols végétalisables sont limitées, leur conception n'ayant pas eu lieu en amont de la construction des sols.

Néanmoins, dans le cas du site FL, des actions en vue d'optimiser la fertilité du technosol en construction restent réalisables. Ces actions passent par 3 grands axes:

- travail mécanique du sol;
- gestion des amendements;
- gestion des peuplements végétaux.

L'engagement dans ces 3 grands axes de travail nécessite de prendre en compte la possibilité d'un risque de pollution du technosol et de proposer des aménagements à mettre en place en vue d'anticiper, de limiter ou de remédier à une pollution potentielle.

## 6.2 Travail mécanique des technosols

D'un point de vue physique, les contraintes des technosols étudiés sont essentiellement la charge caillouteuse extrêmement élevée sur l'ensemble des profils et la densité apparente importante rendant les sols très compacts. Face à ces obstacles à la production de biomasse, deux grandes actions sont possibles: L'ajout d'un nouvel horizon aux propriétés physiques différentes ou le travail mécanique de l'horizon de surface déjà mis en place. La première option évite la gêne due à la charge caillouteuse mais implique néanmoins le travail de l'horizon de surface déjà mis en place afin d'éviter la formation d'une semelle imperméable sous le nouvel horizon rajouté et le risque d'engorgement et d'apparition de conditions anaérobies gleyfiantes au niveau de ce dernier.

### 6.2.1 Décompaction

La densité apparente d'un sol naturel fertile se situe généralement dans une gamme de valeurs allant de 1,1 à 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Des densités supérieures limitent la profondeur d'enracinement et donc la colonisation et l'altération du sol par des végétaux au développement racinaire important.

Bien que la colonisation progressive du technosol par des végétaux et l'altération naturelle mènent, entre autres, à la décompaction naturelle du sol, ces processus peuvent être trop lents (*Spoor, 2003*). Dès lors, un travail mécanique du sol peut être entrepris. Le but de cette action mécanique, est d'améliorer les conditions édaphiques tout en limitant l'impact sur la fonction de support du sol et en laissant les processus biologiques et physico-chimiques naturels compléter la décompaction et stabiliser les conditions entraînées par le travail mécanique.

L'objectif principal de la décompaction est de créer des fissures à travers la zone compactée en surface en vue d'instaurer ou de restaurer les processus de drainage et d'enracinement, mais en minimisant les perturbations sur l'ensemble de la parcelle, afin de fissurer sans déstructurer l'intégralité de la matrice du sol et impacter sa capacité de portance (*Spoor, 2003*).

La tension entraînant la fissure du sol peut être provoquée par un soulèvement du sol à l'aide du passage d'une lame souterraine. Cette lame glissant sous les horizons de surface compacts va bomber l'horizon supérieur vers la surface, l'action de flexion plaçant le sol sous tension et créant les fissures (Figure 37).

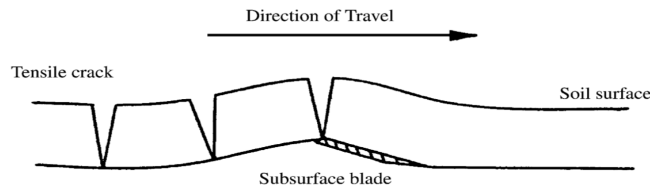


Figure 37: Fissuration du sol sous tension par le glissement d'une lame sous l'horizon de surface (Spoor, 2003)

Les différents outils appropriés pour la fissuration du sol sont repris à l'Annexe 11.

Idéalement, l'opération de fissuration du sol doit être effectuée aussi tard que possible dans le projet de construction ou de réaménagement du technosol, de préférence juste avant ou après l'ensemencement, afin de réduire le risque de recompaction.

La réussite de l'opération de décompaction est directement corrélée à la cohésion du sol et à sa teneur en eau quand le travail est effectué. Afin d'être optimal, le travail doit être mené quand le sol est relativement fragile et sec. Si réussie, cette opération entraînera la formation de macropores dans les sols compactés, proposant des conditions favorables à l'action des organismes vivants et du climat pour poursuivre la décompaction.

Concernant les sols étudiés dans ce mémoire, la lame tractée étant relativement fine et positionnée parfaitement à l'horizontale, la charge caillouteuse ne devrait pas être une gêne au passage de l'engin, les pierres pouvant être déviées.

## 6.2.2 Diminution de la charge caillouteuse

La pierrosité devient une contrainte au travail du sol et une gêne au passage d'outils aratoires dès lors que la charge caillouteuse atteint un seuil supérieur à 50% de volume (*GEPPA, 1981*) (*Bruckert, 1981*). Bien que la charge caillouteuse mesurée dans le cadre de ce mémoire soit une teneur massique, il est légitime de s'attendre, au vu de l'aspect quantitatif et qualitatif des refus ( $\emptyset > 2\text{mm}$ ), à ce que ce seuil soit dépassé pour les sols des sites de Fleurus et Grand-Leez.

Les pierres présentes dans un sol utilisé à des fins agricoles sont relativement complexes à extraire du sol. Deux optiques de travail visant à diminuer la charge caillouteuse existent : l'extraction des pierres en surface sur les premiers centimètres de sol ou l'extraction de l'ensemble des pierres sur les 30 premiers centimètres de sol. Ces deux optiques diffèrent par leur efficacité, leur impact sur le système du sol, et leur rendu.

L'extraction des pierres en surface se fait à l'aide d'une «épierreuse» (Figure 38). L'épierreuse est conçue pour déterrer et ramasser les pierres ( $\emptyset > 2\text{-}3\text{cm}$ ) en surface des champs cultivés et des friches (profondeur de travail maximale de 7 à 10 cm). L'extraction se fait en une seule opération, ne déstructure pas les horizons sous 10 centimètres et n'impacte que très peu l'horizon de surface (peu d'impact sur la teneur en MO, l'activité microbienne, les teneurs en  $C_{\text{total}}$  et  $N_{\text{total}}$ , etc.) et a un coût nettement inférieur à celui de l'extraction totale sur 30

centimètres. Son principal défaut est qu'elle n'a aucun impact sur la charge caillouteuse en profondeur et, bien qu'elle favorise l'enracinement des plantes par la diminution de la charge en surface, le problème du travail aratoire en profondeur reste présent.



Figure 38: Epierreuse de type «Kongskilde Stonebear» (Source: Kongskilde (Site Web))

L'extraction totale de la charge caillouteuse se base sur la même méthode et le même engin, mais demande davantage d'étapes. Après le premier passage de l'épierreuse et l'extraction des pierres des 7-10 premiers centimètres, le passage d'un vibroculteur ou d'un cultivateur lourd muni de dents fines (Figure 39) est nécessaire afin de travailler le sol sur 20 à 30 centimètres et de faire remonter les pierres et divers artefacts en surface. Après cette étape, l'épierreuse effectue un second passage. Ces deux étapes sont répétées jusqu'à atteindre une pierrosité satisfaisante.

Le choix du vibroculteur ou du cultivateur lourd est fonction de la profondeur de travail souhaitée, le vibroculteur possédant des dents plus fragiles et susceptibles de casser en profondeur.



Figure 39: Cultivateur lourd à dents fines de type "Terrix" (Source: Farnet (Site Web))

L'extraction ne sera cependant jamais totale à moins de répéter cette succession d'étapes chaque année pendant plusieurs années. Afin d'éviter cette lourdeur de travail, une alternative est d'arrêter d'épierrer et de travailler le sol une fois la charge caillouteuse diminuée et d'opter pour des techniques comme le semis direct ou le semis direct sous couvert. L'épierrage complet pouvant s'avérer fastidieux, consommateur en carburant et très coûteux, les agriculteurs de nos régions possédant des terres caillouteuses ont tendance à opter pour cette alternative. Les engins utilisés pour épierrer étant relativement massifs, le passage d'un fissurateur afin de décompacter et d'ameublir les sols est recommandé à la fin du dernier passage de l'épierreuse.

### 6.2.3 Approche générale

Afin d'éviter d'empirer la situation suite à un décompactage ou à la réduction de la charge caillouteuse, il existe des règles professionnelles pour la mise en place de sols reconstitués (*Unep et al., 2012*). Ces règles portent sur deux grands points : la gestion des engins sur chantier et les conditions édaphiques lors du travail du sol.

Afin d'éviter la compaction, les engins doivent appliquer la plus faible charge possible par unité de surface de sol. Les petits modèles et les machines sur chenilles ou équipées de pneus à basse pression sont à privilégier. Le déplacement de machines sur des sols nouvellement construits est également à éviter. De plus, un plan de circulation des engins sur chantier doit être défini et respecté, toute entrave pouvant avoir des conséquences dramatiques sur les conditions édaphiques. Enfin, les points de passage fréquent des engins doivent être décompactés à la fin de l'élaboration du technosol (*Damas et Coulon, 2016*).

La teneur en eau du sol est déterminante pour la réussite de la construction ou du travail d'un technosol. Cette teneur doit se situer sous la limite de plasticité du sol (*Vanpeene-Bruhier, 2002*). Cette valeur-seuil peut être mesurée en laboratoire ou de manière plus empirique sur le terrain (un matériau non-plastique s'effrite entre le pouce et l'index) (*Biielders, 2016*). Le travail d'un sol trop humide entraîne sa compaction et sa prise importante en masse. De ce fait, le travail en conditions pluvieuses n'est pas recommandé. Il est conseillé d'attendre le ressuyage complet du sol (*Damas et Coulon, 2016*).

## 6.3 Gestion des amendements

La caractérisation des 3 technosols étudiés a montré que ces sols étaient définis par une faible fertilité chimique et des contraintes physiques. L'apport de MO est indispensable, améliorant la capacité de rétention en eau, la structure et l'aération du sol, contribuant à accroître la CEC, et favorisant sa colonisation par les plantes et micro-organismes (*Stevenson, 1994; Sollins et al., 2006*).

L'apport anthropique de matériaux autres que les terres de remblais jusqu'ici utilisées est donc un des trois grands axes de travail suivis pour rendre ces sols «végétalisables». Ces matériaux doivent être dotés de plusieurs qualités, d'une part au niveau de leurs propriétés agronomiques (en améliorant la fertilité chimique et physique du milieu, en favorisant la croissance végétale, etc.) et, d'autre part, au niveau de leur innocuité sanitaire et environnementale. Pour s'assurer de cette dernière, les matériaux doivent respecter les différentes lois en vigueur et généralement propre à chaque type de matériau (boues, engrais, etc.)

Avant d'imaginer le(s) matériau(x) à apporter, il est important d'établir la construction de quel horizon du technosol est effectuée. Damas et Coulon (*2016*) ont établi les propriétés idéales pour les 3 grands types d'horizon à «construire» pour former un technosol végétalisable:

1. L'horizon de surface: Il doit fournir les conditions de croissance optimale pour le développement racinaire des végétaux.

Propriétés idéales:

1. épaisseur de 30 – 40 cm;
2. fertilité élevée;
3. drainage moyen;
4. REU élevée;
5. indice de risque sanitaire très faible.

2. L'horizon technique: il joue un rôle de rétention de l'eau, d'ancrage et de drainage.

Propriétés idéales:

1. épaisseur de 40 – 50 cm;
2. fertilité faible;
3. REU moyenne;
4. indice de risque sanitaire moyen.

3. L'horizon squelette joue un rôle de résistance face aux contraintes mécaniques appliquées à la surface du sol.

Propriétés idéales:

1. épaisseur de 120 – 150 cm;
2. caractéristiques mécaniques exigeantes;
3. densité apparente important (proche de l'Optimum Proctor);
4. perméabilité forte;
5. REU faible;
6. indice de risque sanitaire moyen.

La construction des technosols étudiés étant partiellement ou complètement aboutie, seul l'horizon de surface est potentiellement modifiable/constructible. La suite de ce mémoire ne se basera donc que sur l'optimisation par amendement de cet horizon. Il est cependant à noter qu'à l'avenir, il serait intéressant de construire les technosols avec une approche intégrée, prenant en compte le type d'horizon à créer et les matériaux fertilisants/structurants à y insérer. En effet, l'apport de matériaux susceptibles de rendre les technosols végétalisables est plus simple et pertinent en amont qu'en aval de la procédure de construction.

Le choix des matériaux à rajouter aux terres excavées peut se faire sur bases de 4 options:

- matériaux considérés comme déchets ou comme produits d'une filière;
- matériaux minéraux/inertes ou matériaux organiques/organo-minéraux.

Aucun matériau ne répondant seul à toutes les caractéristiques d'une terre naturelle fertile, la formulation d'un mélange est nécessaire. Le choix d'un matériau est fonction de son coût, de sa facilité d'acquisition, de l'objectif final d'utilisation du technosol, ainsi que des opportunités locales d'obtention du matériau.

Les matériaux potentiels étant variés et leur origine davantage, les propositions de mélanges qui suivront sont à considérer à titre hypothétique et doivent être réévaluées en fonction des objectifs du propriétaire du site.

L'azote étant un élément majeur de la croissance végétale, le choix d'un amendement organique fortement azoté (digestat, etc.) est privilégié.

### 6.3.1 Déchets verts broyés

Les déchets verts représentent un matériau composé de résidus végétaux ligneux, de résidus foliaires et de résidus de résineux (*Damas et Coulon, 2016*).

L'utilisation d'un compost dans des sols dégradés ou non fertiles peut être une solution efficace à la restauration d'une teneur en MO conséquente dans les technosols (*Gigliotti et al., 1996*). Les amendements organiques de type compost améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols appauvris en fournissant des composants organiques et peuvent être utilisés dans la restauration des sols (*Karaca, 2004; Iovierno et al., 2009*).

Des apports annuels de déchets verts (paille d'orge et luzerne) répétés jusqu'à 4 années de suite sur des sols californiens sablo-limoneux grossiers et pauvres en éléments nutritifs ont permis d'augmenter la teneur en matière organique, l'agrégation, l'activité microbienne ainsi que la réserve en eau utile et également d'abaisser la densité apparente du sol (*Martens and Frankenberger 1992; Turner et al. 1994; Zebarth et al., 1999*).

### 6.3.2 Boues de station d'épuration

Les boues de station d'épuration (STEP) sont des résidus du traitement des effluents liquides par des stations d'épuration. Ces stations peuvent être publiques et raccordées au réseau d'assainissement des agglomérations ou privées et traitant les effluents industriels principalement dans le secteur de l'alimentaire, de l'agro-alimentaire et de la production papetière.

Les boues peuvent être de nature très diverse (solides, liquides, chaulées, sèches, etc.). Les boues de STEP déshydratées se retrouvent sous la forme d'agrégats de tailles variées et de particules fines issues de la fragmentation de ces mêmes agrégats (*Damas et Coulon, 2016*). On estime la production wallonne de boues de STEP à 55000 t<sub>MS</sub>/an selon la SPGE.

La valorisation des boues de STEP est régie par deux arrêtés:

- l'AGW du 12 janvier 1995 «*Arrêté du Gouvernement wallon portant réglementation de l'utilisation sur ou dans les sols des boues d'épuration ou de boues issues de centres de traitement de gadoues de fosses septiques*». Cet arrêté a transposé en droit wallon les prescriptions de la Directive Européenne 86/278/CEE du 12 juin 1986 en matière d'utilisation des boues d'épuration en agriculture. Il établit que les boues ne

peuvent être revalorisées qu'à partir du moment où elles respectent certaines conditions: non-dangereuses et non-toxiques, présentant des concentrations en métaux lourds inférieures aux valeurs limites des annexes de l'AGW, caractérisées par un pH supérieur à 6, en quantités limitées, etc. De plus, le propriétaire du terrain recueillant les boues se doit de prendre en compte la présence de puits, forages et cours d'eau à proximité, des autres amendements effectués ou à effectuer, et est responsable d'une analyse de ses sols au minimum tous les dix ans.

- l'AR du 28 janvier 2013 relatif à la commercialisation et l'utilisation des engrais, des amendements de sol et des substrats de culture. Cet arrêté stipule que les boues d'épuration provenant d'installations d'épuration urbaines ou industrielles peuvent être valorisées dans l'agriculture moyennant certaines conditions. Les entreprises qui veulent valoriser leurs boues d'épuration en agriculture doivent demander au préalable une autorisation.

La filière de gestion des boues de STEP est également soumise au Programme de Gestion durable de l'Azote en Agriculture.

Pour être épandues en Wallonie, les boues d'épuration doivent disposer d'un certificat d'utilisation régional et d'une autorisation fédérale de commercialisation délivrés par la Direction Protection des Sols (DPS) et le SPF «Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement».

Les boues des stations d'épuration sont constituées de (*Dudkowski, 2000*):

- particules minérales (argiles, carbonates, silicates, phosphates...);
- débris organiques grossiers (fibres textiles, résidus végétaux, matières plastiques);
- biomasse morte (résidus de cellules bactériennes, résidus d'algues...);
- polymères organiques issus de l'activité de la biomasse (polysaccharides, protéines);
- constituants minéraux et organiques solubles.

Les boues de STEP pouvant également contenir des microorganismes parfois pathogènes et des micropolluants (hydrocarbures, métaux lourds, etc.), le respect du cadre législatif autour de leur gestion est primordial.

L'application de boues d'épuration en vue de la restauration de sols a démontré son efficacité dans de nombreuses études antérieures. Le fait que ces boues contiennent de grandes concentrations de matière organique, d'azote, de phosphore, et de micronutriments rend l'application de ce déchet/matériau bénéfique pour réhabiliter des sols dégradés (*Page et Chang, 1994*). Les boues d'épuration peuvent accélérer le redéveloppement d'un écosystème fragilisé, généralement plus efficacement que la succession naturelle (*Bradshaw, 1997*). Un des autres avantages principaux de l'application de ces boues sur un sol est qu'elles augmentent la stabilité structurale des sols amendés en augmentant la formation de micro- et macro-agrégats (*Sort et Alcaniz, 1999*).

Les technosols étudiés étant particulièrement peu stables structurellement en raison d'une faible teneur en matière organique et d'une dominance de la fraction limoneuse, l'ajout de ce type de matériau aux sols n'est que bénéfique dès lors que les normes environnementales sont respectées.

Afin de rendre les boues de STEP utilisables pour l'épandage sur des parcelles, l'usine de traitement des eaux usées doit mettre les boues d'épuration sous une forme « biosolide ». Six types de biosolides différents existent: déshydraté, séché à l'air, traité par un traitement alcalin, composté et séché à la chaleur, etc (*Walker, 1994*).

Le site de Fleurus, caractérisé par le seul technosol étudié encore en construction, est à proximité de 6 stations d'épuration urbaines dans un rayon de 20 km, dont IGRETEC est le principal gestionnaire. . Le catalogue recensant l'ensemble des STEP de Belgique est disponible auprès de la SPGE (Société Publique de Gestion de l'Eau). En Wallonie, différents acteurs servent de contacts entre les gestionnaires de STEP et les acheteurs de boues: SEDE Benelux, Suez Environnement (ancien SITA), etc.

### 6.3.3 Boues de dragage et curage

Le réseau navigable wallon est doté de très nombreuses voies d'eau. Parmi celles-ci, les voies navigables nécessitent un entretien fréquent afin de pouvoir assurer la régulation des crues et la circulation des bateaux de commerce.

Les boues de dragage (ou de curage) sont le produit de l'entretien des canaux ou des chenaux estuariens ou portuaires. Les canaux étant fréquemment l'exutoire de nombreux fertilisants et polluants d'origines agricole, ménagère ou industrielle, ces éléments sédimentent et s'accablent dans les boues. Ces boues sont donc fortement impactées par des substances organiques et minérales parfois polluantes et doivent être considérées comme des déchets lors de leur extraction. Le traitement de ces «déchets» requiert donc une gestion et une attention particulières. Cette gestion est encore plus complexe d'une part en raison de la nature des boues extraites et de la diversité de l'environnement d'où elles proviennent et d'autre part en raison des nombreuses et variées influences anthropiques auxquelles elles sont sujettes (*De Clock, 2003*).

Au niveau législatif, , la gestion et la revalorisation des boues de dragage et de curage sont dictées par l'AGW du 30 novembre 1995 modifié le 10 juin 1999, le 04 juillet 2002, le 27 février 2003 et le 03 avril 2003, relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait des travaux de dragage ou de curage. Les valorisations pour ce type de matériau sont définies dans l'AGW du 14/06/01 favorisant la valorisation de certains déchets.

L'AGW du 30 novembre 1995, à l'instar de la distinction entre terres non-contaminées ou non, classe les boues issues de procédés de curage ou dragage en catégories. On parle ainsi de

«catégorie A» pour les boues peu ou pas contaminées et de "catégorie B" pour les autres sans faire référence à la classification habituelle des déchets. La catégorie A correspond à l'ensemble des boues ne dépassant pas les teneurs maximales admissibles (TMA) pour les composés inorganiques et organiques, et la catégorie B aux boues dépassant les teneurs de sécurité (TS) (Annexe 12). Des teneurs entre la TMA et la TS sont sujettes à des tests de lixiviations qui permettent, en fonction des valeurs obtenues, de reclasser des boues en type A ou pas. Il est possible, après traitement et pour autant que les normes soient respectées, de requalifier des boues A en B.

Suite à leur caractérisation, de nombreuses méthodes de revalorisation des boues existent, les plus courantes étant définies ci-après (*DGRNE, 2007*).

Pour les boues de catégorie A:

- la mise en remblai le long des cours d'eau non navigables ou dans le lit de ceux-ci, conformément à la loi du 28 décembre 1967 sur les cours d'eau non navigables;
- leur acheminement vers une installation de prétraitement dans l'attente d'une valorisation ou d'une élimination ultérieure;
- leur valorisation conformément à l'annexe 1 de l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets;
- leur élimination en CET.

Pour les boues de catégorie B:

- leur orientation vers une installation de prétraitement en vue d'un reclassement en catégorie A à l'issue du traitement ou vers une installation de regroupement ad hoc en vue de leur valorisation ou élimination ultérieure;
- leur valorisation conformément à l'article 13 de l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets;
- leur élimination en CET.

Cet arrêté intègre également les boues des bassins d'orage à l'appellation « boue de dragage/curage ».

### 6.3.4 Digestat, sous-produit de la biométhanisation

Les activités agricoles et agro-industrielles génèrent des quantités importantes de déchets et sous-produits agricoles, généralement riches en matière organique. Ces déchets peuvent être recyclés et revalorisés par des procédés biotechnologiques. Un de ces procédés est la biométhanisation, consistant en une dégradation en condition anaérobie de la matière organique en un mélange de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) appelé biogaz (*Saidi et Abada, 2007*). Cette filière permet donc de prévenir la pollution, de produire de l'énergie et d'offrir une seconde vie aux déchets. Cette technologie devient essentielle dans le

processus de réduction des déchets ainsi que dans celui de production de bioénergie et s'inscrit parfaitement dans les grands axes de l'économie circulaire.

La biométhanisation s'effectue à partir de différents substrats (*Goux et Delfosse, 2003*):

- effluents d'élevage: fumier et lisier;
- déchets organiques: déchets d'espaces verts, déchets d'industries agro-alimentaires;
- co-produits/produits agricoles: pailles issues de céréale, racines de chicon, feuilles de betterave, maïs, etc.;
- CIVE: culture intermédiaire à vocation énergétique (ray-grass, sorgho, etc.).

Un sous-produit, ou co-produit en fonction du regard porté, de la biométhanisation est le digestat. Ce matériau est composé de matière organique non biodégradable (lignine), de matières minérales (azote, phosphore) et d'eau.

La valeur agronomique et la phase du digestat sont dépendantes des produits entrants dans le biométhaniseur. Le taux matière sèche maximum des matières entrantes est généralement de l'ordre de 15%. Cette teneur diminue habituellement de moitié au cours de la biométhanisation (impliquant l'épandage du digestat sous forme liquide par le biais d'un épandeur à lisier par exemple). Le digestat contient moins de matière sèche (MS) et une plus faible teneur en carbone que le substrat en amont. Cependant, la teneur en azote du digestat est généralement augmentée et cet élément est davantage disponible pour les plantes que l'azote du substrat originel. En effet, dans la MO non-perturbée, l'azote est généralement lié aux protéines et difficilement biodisponible. Pendant la biométhanisation, une partie de cet azote lié est réduit par désamination et plus facilement accessible que l'azote du substrat d'origine. Un défaut du digestat d'un point de vue agronomique est sa faible teneur en P, nécessitant un épandage en engrais phosphaté en parallèle du digestat (*Mignon, 2009*).

Globalement, l'utilisation d'un digestat de qualité comme fertilisant ne représente que des avantages pour le sol. Une contrainte à l'amendement du digestat existe cependant concernant son innocuité sanitaire et environnementale. En effet, les digestats peuvent contenir des traces de métaux lourds et des micropolluants organiques à l'instar des hydrocarbures. Très peu d'études ayant été menées sur cette pollution potentielle, on ne peut exclure l'existence d'effets négatifs à l'heure actuelle. Ce risque est cependant minime en Région Wallonne étant donné que la biométhanisation à la ferme utilise essentiellement comme substrats du procédé les co-produits (effluents d'élevage, résidus de culture, ...) issus de cette même filière agricole (*Mignon, 2009*). De plus, les sociétés wallonnes possédant des unités de biométhanisation et produisant du digestat s'appliquent à proposer un digestat accepté par les cahiers des charges de l'agriculture biologique.

Concernant le cadre légal autour de l'épandage du digestat obtenu à partir de produits d'une exploitation agricole, si celui-ci est limité aux parcelles de la seule exploitation agricole qui a

fourni les intrants pour la biométhanisation, il ne faut pas de certificat d'utilisation pour la valorisation du digestat.

Si par contre l'épandage du digestat a lieu également sur des parcelles d'autres exploitations agricoles que celle qui a fourni les intrants pour la biométhanisation, sa valorisation nécessite l'obtention d'un certificat d'utilisation selon l'AGW du 14/06/2001 favorisant la valorisation de certains déchets.

L'épandage d'un digestat produit à partir de déchets de l'industrie agro-alimentaire nécessite l'obtention du certificat.

L'épandage du digestat doit également respecter le décret sur la gestion durable de l'azote en agriculture, le «PGDA-2» (Programme de Gestion durable de l'Azote en Agriculture), héritier de la directive Nitrate 91/676/CE. Ce décret prend en compte le stockage des fertilisants organiques sur site, le taux de liaison du sol, les contrats d'épandage mis en place et le potentiel de lixiviation de l'azote (*Mignon, 2009*).

A l'heure actuelle, il existe plus de 50 unités de biométhanisation opérationnelles en Wallonie, dont la société Cinergie s.c.r.l., située à proximité du technosol de Fleurus.

### 6.3.5 Fumier

Les déjections produites par les élevages de tous types (porcs, bovins, volailles, chevaux, etc.) sont à l'heure actuelle toutes utilisées comme amendements pour cultures et prairies. De tous les matériaux cités précédemment et définis comme déchets, sous-produits ou co-produits d'une filière, le fumier est l'amendement le plus populaire en Belgique. Il ne suit aucun AGW relatif à la gestion des déchets.

Son utilisation comme amendement à épandre est essentiellement dictée par le Programme de Gestion Durable de l'Azote qui fixe, entre autres, les règles de gestion des fertilisants organiques.

### 6.3.6 Argile expansée

L'argile expansée (ou LECA pour Lightweight Expanded Clay Aggregate) est un matériau granulaire léger et disponible en grandes quantités sur le marché. Ce matériau est utilisé en horticulture et en maraîchage afin d'améliorer les conditions édaphiques des sols, améliorant largement les caractéristiques physiques du sol.

L'amendement en surface d'argile expansée améliore le drainage, la rétention d'eau en période de sécheresse (WHC: 1.1 g<sub>H2O</sub>/g), la rétention de nutriments (CEC de 30 meq/100g), la présence de nutriments (forte teneur en P et K), protège les racines du gel, influence le pH (pH<sub>argile expansée</sub>: 4.1) favorise l'aération des sols compacts. Ces effets entraînent une amélioration

de la germination et de l'enracinement des graines et une optimisation de la colonisation végétale et du développement des espèces sur des sites pauvres et/ou contaminés.

Diverses expériences antérieures ont suggéré que la proportion optimale d'argile expansée par rapport au substrat total était de 10 – 20% (*Figge et al., 1995*).

### 6.3.7 Estimation des coûts

La filière de construction de sols à partir de terres excavées et de sous-produits de la construction n'est viable qu'à partir du moment où l'approvisionnement en ces matériaux est viable économiquement. La construction d'un technosol à végétaliser est fonction de trois types de coûts (*Damas et Coulon, 2016*):

- les coûts d'achat des matériaux;
- les coûts de transport;
- les coûts de mélange, de stockage et d'analyse.

Les coûts d'achat dépendent largement des types de matériaux choisis, les ressources «déchets» (boues de STEP, etc.) étant nettement moins coûteuses que des produits de filière (fumier, biochar, etc.). Les coûts de transport sont quant à eux liés à la localisation des gisements de matériaux. L'engagement de la filière dans une optique d'économie circulaire et locale promeut la réutilisation de ressources régionales et dès lors limite fortement ce type de coût. Le dernier type de coût est lui très variable, le volume de matériaux influençant les prix de stockage et les coûts des installations de mélange. Pour leur part, les coûts des analyses sont généralement pris en charge par la filière productrice du matériau, limitant les frais pour la société construisant le technosol.

De plus, la terre végétale étant aujourd'hui une ressource dont le coût financier augmente, la valorisation des terres pauvres et des sous-produits de construction s'avère être une alternative économique pérenne.

### 6.3.8 Approche générale

Le choix final de la formulation du mélange (composition et proportions) de matériaux technogéniques est fonction de plusieurs paramètres:

- budget alloué à la création du technosol;
- localisation des gisements et/ou sites de production du matériau;
- disponibilité du matériau et/ou capacité de stockage du matériau;
- nature du sol « d'accueil »;
- occupation finale du site (fins récréatives, industrielles, agronomiques, etc.).

Une fois la formulation faite, un cycle logistique de préparation du mélange est établi (*Damas et Coulon, 2016*):

- réception et contrôle des matériaux;
- stockage des matériaux;
- prétraitement éventuel;
- dosage, malaxage, mélange;
- éventuel stockage et maturation;
- contrôle et caractérisation de conformité du mélange avant mise en place;
- mise en place des horizons;

Le prétraitement peut se dérouler en trois étapes différentes: la fragmentation (broyage et concassage), le criblage et la correction de la teneur en eau.

Le mélange peut se faire selon différentes techniques en fonction de la quantité de matériaux à travailler (à l'aide d'un chargeur équipé d'un godet peseur, d'un retourneur d'andain enjambeur ou via une centrale de malaxage respectivement pour des quantités faibles, intermédiaires et importantes).

La phase de maturation peut être instaurée afin de générer les processus pédogénétiques précoces et d'entraîner la formation des premiers agrégats.

Enfin, il est à rappeler que la «construction» ou reconstitution de l'horizon minéral et de l'horizon humifère en surface doit être effectuée avec le même soin que celui qui est apporté lors du passage d'engins liés au travail mécanique du sol. Afin d'éviter toute recompaction, le sol ne doit être travaillé qu'en conditions ressuyées, voire sèches (sous la limite de plasticité) (*Vanpeene-Bruhier, 2002*).

## 6.4 Végétalisation des technosols

La valorisation de sols issus du dépôt de terres excavées et de déchets de construction et la réhabilitation de sites à usage industriel peuvent être effectuées par un processus de végétalisation des sites. Ceci se fait, par exemple, en utilisant des plantations afin d'extraire les micropolluants potentiels du sol, en intégrant une plus-value économique par le biais de la biomasse produite, en se servant de la végétation afin d'immobiliser les polluants du sol et éviter leur lessivage vers des nappes aquifères sous l'action de l'eau, etc. La colonisation végétale d'un site non-végétalisé confère à celui-ci une plus-value environnementale, économique et paysagère (*Dubourguier et al., 2001*).

Afin d'initier cette colonisation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du sol et son aptitude à recevoir un semis ou une plantation. Suite à la caractérisation effectuée au cours de ce mémoire, il s'est avéré que les conditions édaphiques sont peu propices à la végétalisation. Dès lors, deux axes de travail sont envisageables et combinables: sélectionner les rares espèces végétales intéressantes et adaptées à ce type de sol et/ou traiter le sol afin de rendre les conditions édaphiques plus acceptables.

La sélection d'espèces adéquates se fait par la prise en compte des particularités des technosols, à savoir:

- pH extrême (un pH optimal pour l'agriculture s'approche de 6.5);
- absence de nutriments;
- faible taux de matière organique (considéré comme le facteur le plus limitant à la colonisation végétale d'une friche (*Simmons, 1988*));
- texture grossière du sol (risque important de stress hydrique);
- compaction.

Cette sélection s'opère également en fonction des objectifs visés : Initiation de la colonisation par le biais de plantes pionnières, phytoaccumulation de micropolluants potentiellement présents, phytoremédiation, production de bioénergie, etc.

Phytoaccumulation et phytoremédiation ne seront utilisées que si les sols sont caractérisés par des concentrations en polluants supérieures aux valeurs limite fixées par le décret «Sols»..

### 6.4.1 Plantes pionnières

Les technosols de Grand-Leez et Fleurus étant caractérisés par des conditions peu favorables à l'acclimatation de nombreuses espèces, l'initiation de la colonisation par le biais de plantes pionnières est nécessaire pour améliorer les conditions pédologiques des sites.

A l'instar des plantes ayant déjà partiellement colonisé ces sites (*cf* Section 4.1.3.2), les plantes pionnières à planter doivent pouvoir se développer en zone rudéralisée, caractérisée par des sols compacts, neutres à basiques, et aux textures grossières. Outre ces

caractéristiques, le choix doit porter sur des plantes produisant une importante biomasse afin d'accélérer l'évolution et l'amélioration des conditions du sol. De plus, la sélection doit également se porter autant que possible sur des espèces à biomasse racinaire importante afin d'optimiser la structuration du sol. Enfin, pour favoriser l'accumulation ou la disponibilité de nutriments, les espèces servant d'engrais verts sont à privilégier (Fabacées, Brassicacées, etc.). Parmi celles-ci, une association d'espèces comprenant des légumineuses (Fabacées) est conseillée. Ces espèces sont fixatrices d'azote et la fin de leur cycle de vie résulte en une fertilisation azotée «naturelle», l'azote étant un élément majeur de la croissance végétale.

Quelques plantes utilisables comme engrais verts sont connues pour bien pousser sur un sol calcaire (*Pousset, 2002*): le sainfoin, la luzerne, la minette, l'orge, etc. Suite à l'analyse phytosociologique, plusieurs engrais verts ont été retrouvés sur les sites et confirment la possibilité de leur introduction : *Brassica sp.*, *Medicago sativa*, *Trifolium pratense*.

## 6.4.2 Phytomanagement

Le phytomanagement englobe les techniques de génie végétal consacrées à la protection et la dépollution des sols (et des eaux) (*Charnet, 2009*). De nombreuses techniques consacrées à la gestion des sols ont été étudiées, les principales étant décrites dans cette section.

### 6.4.2.1 Phytoaccumulation

Dans des conditions de pollution du sol par les métaux, certaines espèces végétales, dites métallobytophytes, peuvent prospérer. Outre leur capacité à survivre à leur absorption, certaines de ces espèces peuvent également les accumuler en fortes concentrations. En fonction de l'espèce considérée et du métal en présence, les concentrations les plus élevées peuvent se retrouver dans la partie racinaire ou dans la partie aérienne du matériel végétal. Ces dernières sont définies comme plantes hyperaccumulatrices (*Brooks et al., 1977*).

Les végétaux accumulateurs peuvent soit métaboliser les polluants en éléments non toxiques, soit les incorporer dans un composant cellulaire stable tel que la lignine (*Dubourguier et al., 2001*). Un tableau recensant les familles comprenant le plus d'espèces hyperaccumulatrices vis-à-vis de divers éléments est repris en Annexe 12.

### 6.4.2.2 Phytoremédiation

Outre leur simple séquestration par phytoaccumulation, l'utilisation de peuplements végétaux et de leurs microbiotes peut également servir à diminuer les risques environnementaux et à éliminer ou diminuer la charge en éléments polluants du sol (*Ernst, 1988; Salt et al., 1995*).

#### 6.4.2.2.1 Phytostabilisation

La technique de phytostabilisation promeut l'utilisation de peuplements végétaux pour réduire la biodisponibilité des métaux lourds dans les sols. Les plantes accumulatrices implantées y jouent un rôle de réduction des risques environnementaux et sanitaires en stabilisant les

polluants dans les horizons superficiels, en réduisant leur dissémination par diminution de leur lessivage ou dissipation dans l'air. La charge en polluants sur le site reste cependant constante (*Dubourguier et al., 2001*).

#### 6.4.2.2.2 *Phytoextraction*

La technique de phytoextraction promeut l'utilisation de plantes pour transporter et concentrer les polluants dans les parties aériennes et les parties des racines récoltables. Cette méthode est un procédé lent, demandant des espèces végétales qui génèrent une importante biomasse et à croissance rapide. A ces fins, le choix d'utiliser la famille des Brassicacées (moutarde, colza, etc.) est optimal (*Kumar et al., 1995*).

#### 6.4.2.2.3 *Phytodégradation et rhizodégradation*

La technique de phytodégradation se base sur l'installation d'un système racinaire dans le sol permettant le développement d'un écosystème important dans la rhizosphère et favorisant la biodégradation des polluants organiques du sol par le biais d'enzymes de dégradation, de bactéries, de champignons symbiotiques, etc.

Des expériences menées dans le Hainaut sur d'anciens sites de dépôt de charbon et produits pétroliers ont suggéré que le mélange végétal optimal pour permettre le meilleur potentiel de rhizodégradation serait constitué de 85% de graminées et de 15% de fleurs (*Valbiom, 2018*).

#### 6.4.2.3 *Approche générale*

Une fois la sélection d'espèces végétales opérée, la mise en place des peuplements doit être effectuée. Dans cette optique, le semis sera privilégié à la plantation étant donné la faible fertilité des sols limitant la pérennité de végétaux plantés à maturité.

La technique de semis la plus courante pour la réhabilitation de friches est le semis à la volée suivi d'un hersage et éventuellement d'un paillis (*Richards et al., 1993*) tout en limitant ou remédiant à la compaction mécanique générée (*Dubourguier et al., 2001*).

### 6.4.3 Production de bioénergie

Outre la remédiation de l'éventuelle pollution des technosols afin de s'assurer de leur innocuité, des plantations dans un but économique semblent pertinentes afin d'ancrer davantage la création des technosols dans une logique d'économie circulaire. A ces fins, la production de bioénergie à partir de la biomasse produite est un axe de travail intéressant. Cette production de biomasse à vocation non alimentaire permettrait à la fois de valoriser pleinement les superficies de sites dégradés mais également d'économiser des surfaces agricoles pour la production de bioénergie (*Séré et al., 2008*).

#### 6.4.3.1 *Plantation de miscanthus*

La plantation de miscanthus en qualité d'espèce productrice de bioénergie a déjà été expérimentée à travers différents tests de réhabilitation de friches industrielles polluées en Wallonie par la SPAQuE. Etant donné la mauvaise qualité de ces sols, très peu d'espèces

fortement productrices sont aptes à se développer sur de tels sites et seule cette espèce assure un bon développement dans l'ensemble des expériences menées. Le miscanthus présente de nombreux avantages. Améliorant la fonction paysagère des friches et sites de remblais, il nécessite peu de maintenance et son coût de production est faible (3000 à 4000€ par hectare planté). Cette espèce une fois récoltée peut être transformée et utilisée en tant que paillage ou en tant que combustible (*Valbiom, 2018*). Les premières expériences menées à ce sujet ont par ailleurs mis en évidence les importantes différences de développement en fonction de la nature du technosol et des amendements apportés (*Séré, 2007*).

#### 6.4.4 Végétalisation à haute valeur écologique

Leur mise en culture s'avérant complexe au vu des nombreuses contraintes pédologiques, la création de prairies semi-naturelles peut représenter une alternative moins coûteuse qu'une culture et offrant une importante plus-value écologique et paysagère. Au vu du caractère alcalin des technosols étudiés, la formation de prairies calcicoles sur ces sites semble réalisable. Les pelouses calcicoles, également appelées « pelouses calcaires », sont des formations végétales herbacées se développant sur des sols relativement superficiels et drainants, généralement riches en bases mais pauvres en éléments nutritifs, en situation ensoleillée. Ces pelouses représentent un des milieux de vie les plus riches en espèces (*DGARNE/DNF, 2018*). Les semis utilisés afin d'initier la mise en place d'une prairie sont des mélanges composés de fleurs sauvages indigènes à haute valeur écologique et patrimoniale. Ces mélanges peuvent être complétés avec une céréale afin d'assurer un intérêt écologique supplémentaire en servant de source de nourriture pour les oiseaux granivores (*Ecawal ASBL, 2015*). Deux grands types de mélanges peuvent être mis au point : les mélanges de fleurs et les mélanges « prairies fleuries ».

##### 6.4.4.1 Mélange de fleurs

Les mélanges de fleurs sont composés, en proportions très variées, d'espèces annuelles, bisannuelles et de vivaces. La floraison évolue les premières années, dominée par les espèces annuelles l'année du semis et par les bisannuelles et les vivaces dès la seconde. Au fil des années, les vivaces vont dominer le site et des espèces graminées vont naturellement coloniser le site. Ce type de mélange de fleurs offre une pérennité de l'ordre de 3 à 5 ans. Au delà de ces 5 ans un équilibre entre graminées et vivaces s'installera et le sol fleuri évoluera en une prairie fleurie qui pourra être pérenne de nombreuses années après la disparition des premières plantes fleuries du mélange de fleurs. Cet équilibre fleurs/graminées sera d'autant plus marqué sur les sols plus pauvres où les graminées ne seront pas en trop forte concurrence par rapport aux plantes issues du semis (*Ecawal ASBL, 2015*).

##### 6.4.4.2 Prairies fleuries

La composition d'un mélange en vue de former directement une prairie fleurie est également envisageable, celui-ci se basant uniquement sur une forte proportion d'espèces graminées et de

plusieurs plantes vivaces (*Ecawal ASBL, 2015*). Ce mélange permet l'apparition d'une prairie plus rapidement qu'un mélange de fleurs comme présenté précédemment mais limite la végétalisation des deux premières années et l'intérêt paysager. De plus, l'absence de plantes annuelles prive les espèces graminées et vivaces d'un sol déjà structuré par une première génération de plantes et peut donc mener à un taux de germination plus faible.

#### 6.4.4.3 *Mise en place d'une prairie fleurie*

L'implantation d'une prairie fleurie s'opère en plusieurs étapes (*Ecawal ASBL, 2015*):

- Préparation du sol : les 3 à 5 premiers centimètres de sol doivent être décompactés et les agrégats superficiels décomposés afin de faciliter la germination des graines. Ce travail peut s'opérer par divers engins : tracteur muni d'une fraise, enfouisseur ou extracteur de pierres, herse rotative, etc.
- Préparation du mélange : la densité de semis des mélanges de graines étant relativement faible, il est recommandé de mélanger les semences à du sable de rivière sec afin d'optimiser la répartition homogène des semences sur le sol.
- Semis : le semis se réalise en surface sans enfouissement des graines. Il est recommandé de passer un rouleau en surface afin d'optimiser le contact sol/graine.
- Fauche : le fauchage optimal d'une prairie vise à préserver sa plus-value écologique sur toute l'année. Pour ce faire, la technique du fauchage « en mosaïque » est à privilégier, suggérant de faucher un tiers de la prairie en juin à hauteur de 8 cm et le reste de la prairie fin octobre. Cette technique crée un gradient de végétation et instaure une dynamique de végétalisation toute l'année. Afin d'optimiser la plus-value écologique, une zone de la prairie peut rester en place en hiver, servant d'abri écologique pour la faune (insectes, oiseaux granivores, etc.) en hiver.

#### 6.4.4.4 *Estimation des coûts*

Les semences de prairie fleurie coûtent de 45 à 115€/kg selon le mélange choisi (avec une application moyenne de 50kg/ha) et la mise en place de 0,85 à 2€/m<sup>2</sup> (8500 à 20000€/ha) selon le matériel utilisé (*Ecawal ASBL, 2015*).

## 6.5 Discussion

Les actions à mener pour revaloriser au mieux les technosols sont nombreuses et variées. Chaque technosol constituant un cas unique et complexe, il n'existe pas une solution générique répliquable dans chaque situation. Dès lors, des cahiers des charges d'essai de revalorisation propres aux sites de Grand-Leez et Fleurus se trouvent aux Annexes 15, 16 et 17. Ces cahiers reprennent des protocoles extrêmement succincts qui, afin d'être améliorés, nécessitent que davantage de facteurs soient connus (objectif(s), pollution du site, budget et temps alloués, etc.). Il est bon de rappeler que les technosols de Grand-Leez et Fleurus étant quasiment aboutis, peu d'actions sont encore envisageables (*cfr* Section 6.1).



## 7. Discussion générale

Les technosols étudiés étant particulièrement jeunes (3-20 ans), il est nécessaire d'appréhender leur évolution à court et long terme pour parvenir à des utilisations pertinentes de ces sols. En raison de leurs nombreuses similarités en termes de constitution, la pédogénèse des technosols peut être estimée sur base du modèle pédogénétique des sols naturels tel qu'illustré à la Figure 40 (cfr Section 2.3).

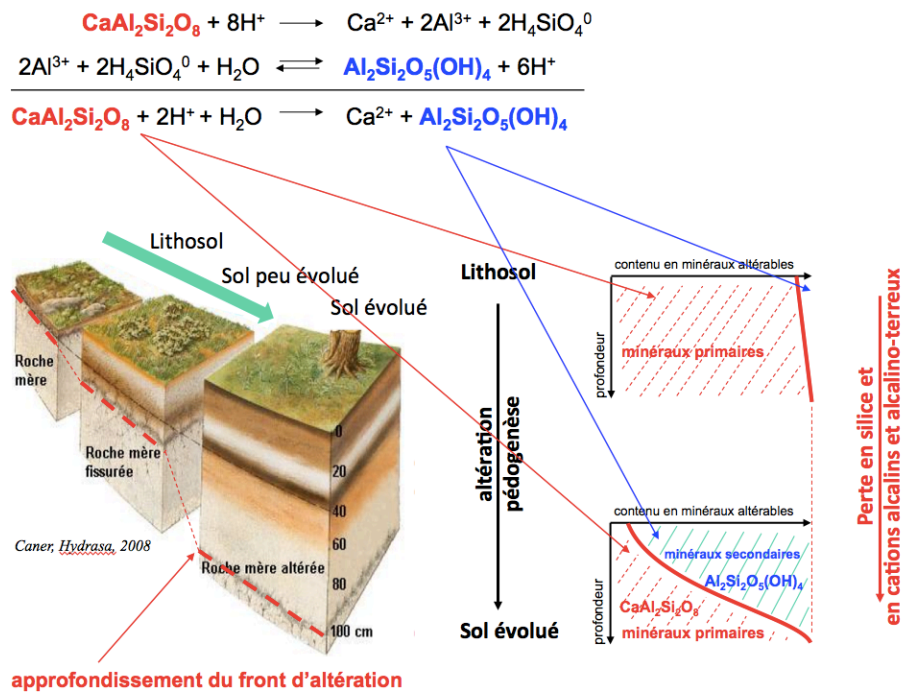


Figure 40 : Modèle pédogénétique illustrant le déplacement du front d'altération et l'augmentation de la fraction argileuse (minéraux secondaires) (Delvaux, 2017)

La vitesse de formation d'un sol naturel est extrêmement variable: de quelques siècles (Cornelis et al 2014) à plusieurs millénaires. Afin de prédire celle de technosols, deux questions majeures sont à poser:

- Quel est l'objectif en termes d'utilisation des technosols : friche, réserve, mise en culture ou en pâture ?
- Quelle est la nature du matériau parental technogénique ?

Dans nos climats tempérés atlantiques, le drainage climatique est positif ( $P > \text{ETP}$ ) et le processus naturel d'évolution du matériau parental est une acidification nette, c'est-à-dire une diminution annuelle constante de la capacité du matériau à neutraliser l'acidité incidente (Acid Neutralizing Capacity - ANC) (van Breemen et al., 1983).

La Figure 41 illustre une courbe de titration fictive d'un matériau pédologique contenant des sels (dont les carbonates), des minéraux silicatés et des oxydes (hérités ou néoformés).

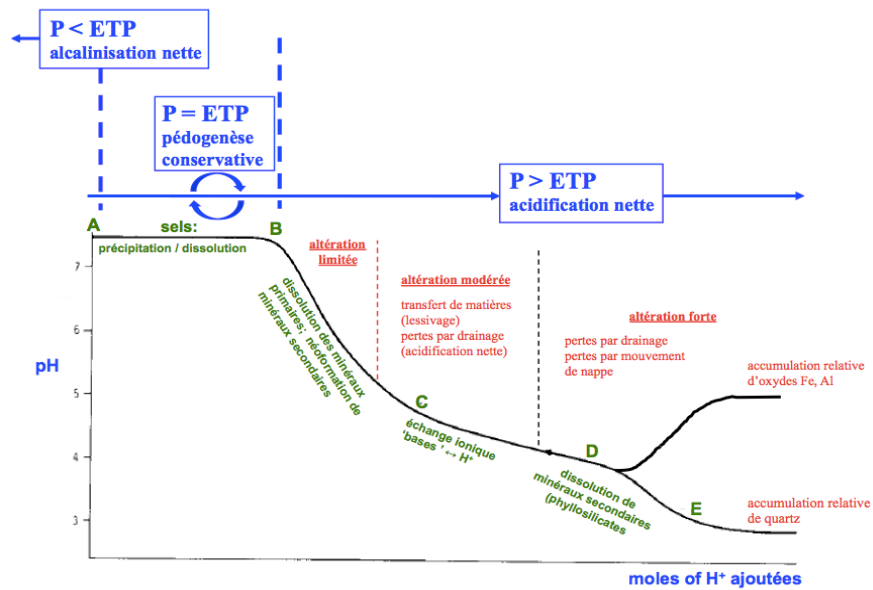


Figure 41 : Courbe de titration fictive d'un matériau pédologique (adaptée de van Breemen et al., 1983), élaborée pour des sols formés dans diverses conditions climatiques.

Au vu des résultats obtenus à travers ce mémoire, nous nous situons au point B de la courbe : la dissolution des carbonates est en cours ( $P > ETP$ ), mais le pH demeure très élevé, ce processus de dissolution jouant le rôle « tampon ». A ce stade, les carbonates constituent les puits de protons privilégiés et leur dissolution préserve les autres minéraux (*cfr* Section 2.2.2.5). En d'autres termes, l'acidification nette, processus naturel, n'entraîne aucune diminution de pH tant que la réserve en carbonates n'est pas totalement dissoute. Il apparaît donc judicieux de favoriser ce processus en multipliant autant que possible les sources de protons et en favorisant l'évacuation des produits de la dissolution des carbonates, notamment par drainage, stimulation de la végétation et apport de biomasse, l'oxydation de la MO étant elle-même source de protons. A cet égard, la Figure 42 ne manque pas d'intérêt. En effet, elle illustre parfaitement le fait que le matériau parental soit consommateur de protons et la végétation active et la biomasse morte sources de protons.

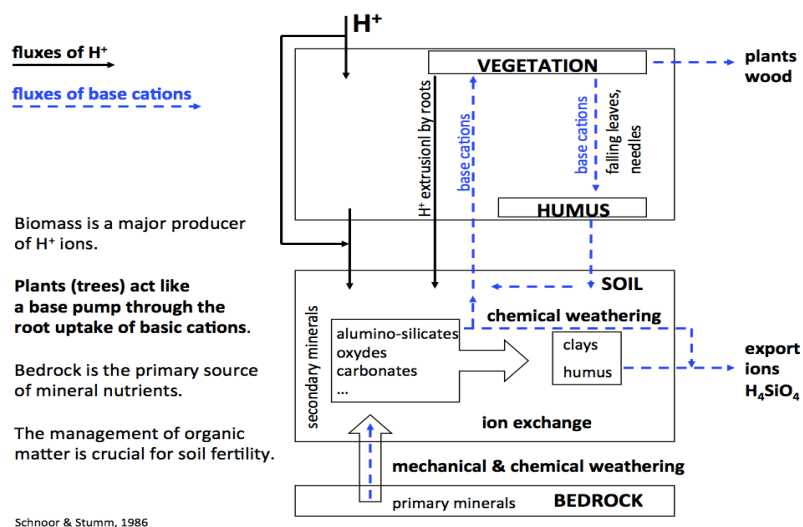


Figure 42 : Illustration du couple matériau (roche + sol) versus biomasse (vivante et morte) en termes de bilans de protons (adapté de Schnoor & Stumm, 1986).

Un modèle plus complet illustrant les sources et puits majeurs de protons dans le système sol-plante est repris en Annexe 14.

Dans nos conditions climatiques, les facteurs favorables à la formation du sol technogénique sont les suivantes:

- altérabilité du matériau, directement liée à celle des minéraux;
- granulométrie des matériaux technogéniques;
- conductivité hydraulique;
- installation d'un peuplement végétal;
- apport de matières organiques (dont par exemple le lisier);
- apport de boues résiduaires;
- fertilisation azotée;
- biostimulation de la végétation (p.ex. via la mycorrhization);
- zonation du dépôt des «terres» remblayées en privilégiant le dépôt des matériaux grossiers en profondeur (horizon squelette) et des matériaux fins en surface (horizons de surface et technique);
- etc.

Les recommandations qui découlent de ce travail et les dispositions légales actuelles sont de nature à aboutir à l'élaboration de cahiers des charges distincts en amont de la procédure de remblais et en aval de celle-ci. En amont, il demeure possible de jouer sur les premiers critères (altérabilité et taille, voire conductivité). En aval, on disposerait d'itinéraires techniques types pour accroître l'aptitude des technosols pour des usages de type mise en réserve naturelle ou exploitation agricole. Les technosols de Grand-Leez et Fleurus étant quasiment aboutis, il reste très peu de liberté d'action (*cfr* Section 6). La principale stratégie à mener serait de promouvoir l'installation d'une végétation dense, à forte production de biomasse et naturellement acidifiante, et ce à l'aide d'amendements riches en matière organique.

Les discussions portant sur les actions à mener sur les sites GL et FL sont sous réserve d'analyses totales écartant tout risque de pollution par des éléments traces (ET), métalliques ou non. Outre cette analyse des ET, une mesure de la biodisponibilité de ces éléments et leur interprétation au regard des valeurs-seuils imposées par le cadre législatif (*cfr* Section 2..6) est recommandée lors de recherches postérieures à ce travail.



---

## 8. Conclusion

---

En vue de dégager des perspectives de revalorisation des technosols formés à partir de terres excavées et de déchets de construction, une caractérisation des propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques a été effectuée sur seize profils correspondant à trois sites différents.

Ces technosols ont été construits à partir d'un même matériau parental (terres de déblais et matériaux inertes de nature calcaire) et occupent dans le paysage des positions topographiques semblables (pente faible à nulle) sous des conditions climatiques identiques ( $P > ETP$ ).

Les trois technosols, l'un de 20 ans sous culture de luzerne (CG), le second de 5 ans encore en construction (FL) et le troisième de 3 ans converti en réserve naturelle (GL) ont été comparés entre eux et vis-à-vis d'un sol sous culture (Ferme de Lauzelle) en termes de référence. Il ressort de cette étude que la valorisation agronomique rencontre de nombreuses contraintes :

- au regard des propriétés physiques: charge caillouteuse très élevée, forte compacité, faible rétention en eau, vulnérabilité aux aléas climatiques;
- au regard des propriétés physico-chimiques: forte alcalinité des sols, faible rétention des cations, faible biodisponibilité des nutriments, dominance en  $Ca^{2+}$  et faible présence en  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  et  $Na^+$  sur les sites d'échange;
- au regard des propriétés biologiques: très faible teneur en MO, colonisation faible à modérée d'espèces herbacées, échec de la colonisation par des espèces ligneuses.

Sous l'influence d'un drainage climatique positif et du processus naturel d'acidification nette, les jeunes technosols sont sujets à une forte altération et à l'évolution de leurs propriétés et des contraintes qui en découlent. A la dissolution des carbonates du sol succéderont une diminution du pH, une dissolution des minéraux primaires et la néoformation de minéraux secondaires. Cette altération mènera naturellement à des sols aux propriétés édaphiques plus favorables au développement de peuplements végétaux.

Cette évolution des technosols peut être optimisée par de multiples actions anthropiques : le travail mécanique des sols en vue d'améliorer les propriétés physiques, l'apport d'amendements afin d'augmenter la teneur en matière organique et nutriments et l'introduction de peuplements végétaux dans le but d'améliorer l'altération et la structuration des sols, etc.

La gestion des sols, ainsi que celle des terres excavées sont régies par un cadre législatif wallon strict. Au vu du potentiel de revalorisation des technosols formés à partir de ces matériaux et des enjeux environnementaux et économiques, une réévaluation et un assouplissement des contraintes environnementales liées à ces matériaux sont nécessaires, et ce afin de redynamiser le secteur de la gestion des terres excavées et de ne pas pénaliser l'économie wallonne, tout en assurant une cohérence des valeurs seuils d'un point de vue sanitaire et environnemental.



---

## 9. Références

---

- AGW du 30 novembre 1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit des berges, des cours et plans d'eau du fait de travaux de dragage ou de curage. (Moniteur Belge, 1995).
- AGW du 10 juillet 1997 établissant un catalogue des déchets (Moniteur Belge, 30 juillet 1997).
- AGW du 10 juin 1999 modifiant l'AGW du 30 novembre 1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit des berges, des cours et plans d'eau du fait de travaux de dragage ou de curage (Moniteur Belge, 9 septembre 1999).
- AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets (Moniteur Belge, 10 juillet 2001).
- Allison, F. E. (1973). Soil organic matter and its role in crop production (Vol. 3). Elsevier.
- Arocena, J. M., Van Mourik, J. M., Schilder, M. L., & Faz Cano, A. (2010). Initial soil development under pioneer plant species in metal mine waste deposits. *Restoration ecology*, 18(s2), 244-252.
- Angers, D. A. and Caron, J. (1998). Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks, *Biogeochemistry*, 42, 55–72.
- Baize D. et Rossignol J.P. (1995). Anthroposols, *Référentiel Pédologique*, INRA, 332 p
- Beerling, D. J., Bailey, J. P., & Conolly, A. P. (1994). *Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decraene. *Journal of Ecology*, 82(4), 959-979.
- Bielders, C. (2017). Soil erosion and conservation. Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- Blavet, D., Fardoux, J., (1993). Méthode densimétrique simplifiée pour l'estimation sur mottes de terre de la porosité totale et de caractéristiques associées (masse volumique apparente, masse volumique pseudo réelle sèche: protocole: évaluation des biais et des incertitudes.
- Bradshaw, A. D. (1983). The reconstruction of ecosystems. *Journal of applied ecology*, 20(1), 1-17.
- Bradshaw, A. D. (1997). The importance of soil ecology in restoration science. *Restoration ecology and sustainable development*, 33-64.
- Brooks, R. R., Lee, J., Reeves, R. D., & Jaffré, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 7, 49-57.

- Brown, K. W., Evans, G. B., & Frentrup, B. D. (1983). Hazardous waste land treatment.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., (1996). Variabilité de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude en gestion des sols*, 3(1): 27-40
- Bruckert, S. (1989). Désignation et classement des sols agricoles d'après des critères de situation et d'organisation: application aux terres franc-comtoises du domaine climatique tempéré semi-continentale. *Agronomie*, 9(4), 353-361.
- Buyse, P., & Aubinet, M. (2010). La respiration hétérotrophe dans les sols agricoles: description des facteurs importants et comparaison de modèles semi-mécanistes existants. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 14(4), 707.
- Byers, J. E., Cuddington, K., Jones, C. G., Talley, T. S., Hastings, A., Lambrinos, J. G., Crooks, J. A., and Wilson, W. G. (2006). Using ecosystem engineers to restore ecological systems, *Trends Ecol. Evol.*, 21, 493–500.
- Calay, V. (2017). Transition prairie-culture: un essai sur la mémoire du sol en région limoneuse brabançonne (Mémoire de fin d'études inédit). Université Catholique de Louvain.
- Caron, J., Espindola, C. R., and Angers, D. A. (1996). Soil structural stability during Rapid Wetting: Influence of land use on some aggregate Properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 901–908.
- Commission des Communautés Européennes (CCE) (2002). Catalogue européen des déchets (CED).
- Cornelis, J.-T., Weis D., Lavkulich L., Vermeire ML., Delvaux B. & Barling J. (2014) Silicon isotopes record dissolution and re-precipitation of pedogenic clay minerals in a podzolic chronosequence. *Geoderma*, 235–236, 19–29
- Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 270-277.
- Chapelle R. (2017). « Contexte géologique et hydrogéologique de l'ancienne carrière de baryte à Fleurus », Département « Qualité Sécurité Environnement » de la société Tradecowall, Fernelmont, 6p.
- Charnet, F. (2009). Le phytomanagement, protection et dépollution des eaux et des sols: un état des connaissances et des pratiques en France.
- Confédération Construction Wallonne (CCW). (2013, février). La gestion des terres excavées en Wallonie: Enjeux et perspectives. Communication présentée à la

- colloque: « Les déchets de construction et de démolition: De la législation à la pratique des entreprises actives dans les travaux du bâtiment », Namur.
- Coutadeur, C., Cousin, I., & Nicoullaud, B. (2000). Role of rock fragment on the available water in soils; a case study from " Petite Beauce", France. *Etude et Gestion des Sols* (France).
- Currie, J. A. (1970). Movement of gases in soil respiration. « Sorption and Transport Processes in Soils ». *Monogr. Soc. Chem. Ind.*, (37), 152-171.
- Daily, G. (Ed.). (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press.
- Damas O., Coulon A. (2016). *Créer des sols fertiles: Du déchet à la végétalisation urbaine*, Paris, Le Moniteur Editions, 335p.
- Danielson, R. E., & Sutherland, P. L. (1986). *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 443-461.
- De Clock, L. (2003). *Etude de phytotoxicité des boues de dragage* (Doctoral dissertation, Université Libre de Bruxelles).
- Declerck, S. (2017). *Gestion intégrée du système sol-plante* (Partie S. Declerck). Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- Delvaux, B. (1978). *De l'influence du facteur anthropique sur les propriétés pédologiques des Udalfs (gray brown podzolic soils) en région limoneuse brabançonne* (Mémoire de fin d'études inédit). Université Catholique de Louvain.
- Delvaux, B. (2016). *Sciences du sol* (Partie B. Delvaux). Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- Delvaux, B. (2017). *Pédologie appliquée*. Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- Delvaux B. (2018). *Gestion et aménagement des sols en régions chaudes* (Partie B. Delvaux). Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- DGARNE/DNF. (2018). *Catalogue des espèces et habitats des sites Natura 2000 de la Région wallonne. Pelouses calcicoles et calcareo-siliceuses*. Fiche rédigée sur base des dossiers scientifiques réalisés par le DEMNA, FUSAGx, UCL, ULG, Natagora. 3p
- DGRNE. (2007). *Boues de dragage: Synthèse de la situation environnementale en Région Wallone*. Rapports et Publications DGRNE. 7p.

- Dubourguier, H. C., Petit, D., Deram, A., & Logeay, C. (2001). Le phytomanagement, Eléments de synthèse. Pôle de compétence sites et sédiments pollués, Lille, 53p.
- Duchaufour, P. (1977). Pedology. 1. Pedogenesis and classification. Masson SA.
- Dubourguier, H. C., Petit, D., Deram, A., & Logeay, C. (2001). Le phytomanagement, Eléments de synthèse. Pôle de compétence sites et sédiments pollués, Lille, 53p.
- Dudkowski, A. (2000). L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. Le Courrier de l'environnement de l'INRA, (41), 134-135.
- Ecowal ASBL. (2015). Fiche technique de mise en place et de gestion d'une prairie fleurie. 16p.
- Elementar. (2016). Technical Note, Advanced Purge and Trap (APT) Technology. Langensfeld, Germany
- Ernst, W. H. O. (1988). Decontamination of mine sites by plants: An analysis of the efficiency. In Proceedings of the Conference on Environmental Contamination, Venice (pp. 305-310).
- Figge, D. A. H., Hetrick, B. A. D., & Wilson, G. W. T. (1995). Role of expanded clay and porous ceramic amendments on plant establishment in minespoils. Environmental Pollution, 88(2), 161-165.
- Fischer, C., Werge, M., & Reichel, A. (2009). EU as a Recycling Society. European Topic Centre on Resource Waste Management, Working Paper 2/2009.
- Fontes-Rousseau, C., & Jean, R. (2015). L'utilisation du territoire en 2014: Teruti-Lucas.
- Geppa (Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée) (1981). Synthèse des Travaux de la Commission de Cartographie, pp. 1-20
- Gigliotti, G., Businelli, D., & Giusquiani, P. L. (1996). Trace metals uptake and distribution in corn plants grown on a 6-year urban waste compost amended soil. Agriculture, ecosystems & environment, 58(2-3), 199-206.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. (2010). *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*, Presses polytechniques et universitaires romandes. 519p.
- Goux, X., & Delfosse, P. (2013). Valorisation énergétique des co-produits agricoles et des cultures intermédiaires (séminaire: « Les midis de la biomasse, Gembloux, le 22 février 2013 »).
- Gregory, P.J., Nortcliff, S., (2013). Soil Conditions and plant Growth., Wiley-Blackwell.

- Halen, H. (2016). Evaluation de la qualité des eaux et des sols (Partie H. Halen). Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- Houghton, R.A. (2007). Balancing the Global Carbon Budget. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci* 35, 313–47.
- Huggins, D.R., Buyanovsky, G.A., Wagner, G.H., Brown, J.R., Darmody, R.G., Peck, T.R., Lesoing, G.W., Vanotti, M.B., Bundy, L.G. (1998). Soil organic C in the tallgrass prairie- derived region of the corn belt: effects of long-term crop management. *Soil Tillage Res.*47, 219–234.
- Iovieno, P., Morra, L., Leone, A., Pagano, L., & Alfani, A. (2009). Effect of organic and mineral fertilizers on soil respiration and enzyme activities of two Mediterranean horticultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 45(5), 555-561.
- IUSS. (2006). World reference base for soil resource, FAO, 132p
- IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Jacquemart, A. L., Descamps, C., Quinet, M. (2018). Flore écologique de Belgique suivant la classification APG IV.
- Jangorzo, N. S., Watteau, F., Hajos, D., and Schwart, C. (2014) Nondestructive monitoring of the effect of biological activity on the pedogenesis of a Technosol, *J. Soils Sediments*, 15, 1705–1715.
- Javaux, M., Bielders, C. (2016). Physique du sol appliquée à l'agronomie et l'environnement. Unpublished document, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Louvain-la-Neuve.
- Jenny, H. (1941) *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, NY
- Jocteur Monrozier, L. (1973). Etude de la pédogenèse sur matériaux résiduaire des industries de la soude, Univeristé de Nancy, 110 p
- Jones, C. G., Lawton, J. H., and Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers, in: *Ecosystem Management*, edited by: Samson, F. B. and Knopf, F. L., Springer, New York, 130–147.
- Joseph, S., & Lehmann, J. (2015). Biochar for environmental management: an introduction. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 33-46). Routledge.

- Karaca, A. (2004). Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. *Geoderma*, 122(2-4), 297-303.
- Kononova, M. M. (1961). Soil organic matter, its nature, its role in soil formation and in soil fertility. Pergamonn Press.
- Kumar, P. N., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental science & technology*, 29(5), 1232-1238.
- Lamouroux, M. (1972). Étude de sols formés sur roches carbonatées: pédogenèse fersiallitique au Liban (Doctoral dissertation, Orstom).
- Leguédois S., Séré G., Auclerc A., et al. (2016). Modelling pedogenesis of technosols. *Geoderma*, vol. 262, p. 199-212.
- Lehmann, A. and Stahr, K. (2007). Nature and significance of anthropogenic urban soils, *J. Soils Sediments*, 7, 247–260.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
- M. Deeb, Lerch, T. Z. (2016). Interactions between organisms and parent materials of a constructed Technosol shape its hydrostructural properties. *Soil*, 2(2), 163.
- Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4), 988-1003.
- Martens, D. A., & Frankenberger, W. T. (1992). Modification of infiltration rates in an organic-amended irrigated. *Agronomy Journal*, 84(4), 707-717.
- Martin, J. (1969). La ferme et le domaine de Lauzelle. *Wavriensia Bull. Cercle Hist. Archéologique Wavre Région Tome XVIII*.
- Mignon, C. (2009). Biométhanisation: Utilisation du digestat comme fertilisant en agriculture. CRA. Valbiom.
- Monjoie. (1988). « Etude géologique spécifique au site de la décharge des Sept Voleurs », travail mené dans le cadre d'une demande du Bureau Economique de la Province de Namur, Liège, Laboratoires de géologie de l'ingénieur, d'hydrogéologie et de prospection géophysique de l'Université de Liège, 6p.
- Moore, D. M., & Reynolds, R. C. (1989). X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals (Vol. 332). New York: Oxford university press.
- Morel, J. L., Chenu, C., & 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.

- Morel, J.L., Schwartz, C. & Florentin, L. (2005). Urban soils. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, p.202-208.
- Nehls, T. et al. (2012). Contribution of bricks to urban soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 13(3), p.575-584.
- Ottenhof, C. J. M., A´ . Faz Cano, J. M. Arocena, G. J. Nierop, J. M. Ver- straten, and K. J. M. van Mourik. (2007). Soil organic matter from pioneer species and its implications to phytostabilization of mined sites in the Sierra de Cartagena (Spain). *Chemosphere* 69:1341–1350.
- Page, A. L., & Chang, A. C. (1994). Overview of the past 25 years: Technical perspective. *Sewage sludge: Land utilization and the environment*, (sewagesludgelaan), 3-6.
- Pousset, J. (2002). *Engrais verts et fertilité des sols*. France Agricole Editions.
- Rameau, J. C., Mansion, D., Dumé, G., Timbal, J., Lecointe, A., Dupont, P., & Keller, R. (1989). *Flore forestière française, guide écologique illustré*. 1. Plaines et collines. Institut pour le développement forestier, Paris, France.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1990). Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5), 1233-1241.
- Richards, I. G., Palmer, J. P., & Barratt, P. A. (1993). *The reclamation of former coal mines and steelworks* (Vol. 56). Elsevier.
- Saidi, A., & Abada, B. (2007). La biométhanisation: une solution pour un développement durable. *Rev. Energ. Ren.: CER*, 7, 31-35.
- Salt, D. E., Blaylock, M., Kumar, N. P., Dushenkov, V., Ensley, B. D., Chet, I., & Raskin, I. (1995). Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Nature biotechnology*, 13(5), 468.
- Scalenghe, R., & Ferraris, S. (2009). The first forty years of a Technosol. *Pedosphere*, 19(1), 40-52.
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.
- Schnoor J.L. & Stumm W. (1986) The Role of Chemical Weathering in the Neutralization of Acicic Deposition. *Swiss Journal of Hydrology*, 48(2): 171-195.

- Séré, G. (2007). *Fonctionnement et évolution pédogénétiques de Technosols issus d'un procédé de construction de sol* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
- Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J. C., Watteau, F., and Morel, J. L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols, *J. Soils Sediments*, 10, 1246–1254.
- Séré, G., Schwartz, C., Renat, J. C., & Morel, J. L. (2008). Procédé de valorisation de déchets et sous-produits en construction de sol pour la réhabilitation de sites dégradé. *Déchets sciences & techniques*, (50), 13-17.
- Simard, R. R. (1993). Ammonium acetate-extractable elements. *Soil sampling and methods of analysis*, 1, 39-42.
- Simmons, E. (1988). Cultivation and seeding techniques used in reclaiming land. *Land Rec'99 Conference Proceedings* (Durham) edited by D. Williamson, 189 – 194.
- Sherrod, L. A., Dunn, G., Peterson, G. A., & Kolberg, R. L. (2002). Inorganic carbon analysis by modified pressure-calciometer method. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 299-305.
- Skoyles, E. R., & Skoyles, J. R. (1987). *Waste prevention on site*. BT Batsford Limited.
- Sollins, P., C. Swanston, M. Kleber, T. Filley, M. Kramere, S. Crow, B. A. Caldwell, K. Lajtha, and R. Bowden. (2006). Organic C and N stabilization in a forest soil: evidence from sequential density fractionation. *Soil Biology and Biochemistry* 38:3313–3324.
- Solomon, D., Lehmann, J., & Zech, W. (2000). Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78(3), 203-213.
- Sort, X., & Alcañiz, J. M. (1999). Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation & Development*, 10(1), 3-12.
- Spoor, G., Tijink, F. G. J., & Weiskopf, P. (2003). Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil and tillage research*, 73(1-2), 175-182.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd edition. Wiley, New York.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and Soil Acidity. In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, editors, *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*, SSSA Book Ser. 5.3. SSSA, ASA, Madison, WI. p. 475-490.

- Turner, M. S., Clark, G. A., Stanley, C. D., & Smajstrla, A. G. (1994). Physical characteristics of a sandy soil amended with municipal solid waste compost. Soil and Crop Science Society of Florida (USA).
- Unep, AITF, FFP, HORTIS. (2012). Travaux des sols, supports de paysage: caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution, règles professionnelles. P.C.1-R0.
- United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. (1975). Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (No. 436). US Department of Agriculture.
- Valbiom. (21/02/2018). Saint-Ghislain: le sol d'une ancienne station-service devient le terreau d'une plantation énergétique. ValBioMag. Lu le 18 mars 2018, 2018, de <http://www.valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/saint-ghislain-le-sol-dune-ancienne-station-service-devient-le-terreau-dune-plantation>
- Van Breemen, N., Mulder, J. & Driscoll, C.T. (1983) Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75, 283-308
- Van Groenigen, J. W., Lubbers, I. M., Vos, H. M., Brown, G. G., De Deyn, G. B., & Van Groenigen, K. J. (2014). Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Scientific reports*, 4, 6365.
- Vanpeene-Bruhier, S. (2002). Réaménagement agricole des carrières de granulats. Editions Quae.
- Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15(1), 1-19.
- Walker, J. M. (1994). Production, use, and creative design of sewage sludge biosolids. *Sewage sludge: Land utilization and the environment, (sewagesludgelan)*, 67-74.
- Walkley, A., Black, I.A.. (1934). An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29–38.
- Walkley, A.. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils – effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63, 251–264.
- Walton, B. T., & Edwards, N. T. (1986). Accumulation of organic waste constituents in terrestrial biota.
- Wangl, C. X., Yediler, A., Peng, A., & Kettrup, A. (1995). Photodegradation of phenanthrene in the presence of humic substances and hydrogen peroxide. *Chemosphere*, 30(3), 501-510.

- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms. *Plant and soil*, 300(1-2), 9-20.
- White, R. E. (2006). *Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource* (4th Edition). John Wiley & Sons.
- Wong, M. H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50(6), 775-780.
- Young, I. M., and Crawford, J. W. (2004). Interactions and self-organization in the soil-microbe complex. *Science* 304:1634–1637.
- Zebarth, B. J., Neilsen, G. H., Hogue, E., & Neilsen, D. (1999). Influence of organic waste amendments on selected soil physical and chemical properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(3), 501-504.

## **Sites Web visités**

Climate-data.org:

- Climat Chaumont-Gistoux: Diagramme climatique, Courbe de température, Table climatique pour Chaumont-Gistoux. (2017). Consulté depuis <https://fr.climate-data.org/location/29742/>
- Climat Fleurus: Diagramme climatique, Courbe de température, Table climatique pour Fleurus. (2017). Consulté depuis <https://fr.climate-data.org/location/13710/>
- Climat Grand-Leez: Diagramme climatique, Courbe de température, Table climatique pour Grand-Leez. (2017). Consulté depuis <https://fr.climate-data.org/location/447018/>

---

## 10. Annexes

---

<b>Annexe 1.</b> Section du catalogue européen des déchets listant les déchets de construction et de démolition (y compris déblais) et leur code de référence ( <i>CCE, 2002</i> ).....	93
<b>Annexe 2.</b> Schéma recensant les mesures à prendre dans la gestion des terres excavées non-dangereuses (Code 17.05.04) ( <i>Confédération Construction Wallonne, 2013</i> ).....	95
<b>Annexe 3.</b> Valeurs seuils limites des terres non contaminées en Wallonie, en Flandre et aux Pays-Bas pour les dix paramètres souvent contraignants en Wallonie.....	95
<b>Annexe 4.</b> Historique administratif du site de Grand-Leez.....	96
<b>Annexe 5.</b> Evolution de la teneur en charge caillouteuse pour l'ensemble des 16 profils des 3 sites étudiés.....	97
<b>Annexe 6.</b> Paramètres statistiques de la charge caillouteuse pour les 3 sites étudiés.....	97
<b>Annexe 7.</b> Résultats de l'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X pour les profils FL1, FL5, GL2, GL4 et GL6.....	98
<b>Annexe 8.</b> Paramètres statistiques du pH pour les 3 sites étudiés.....	100
<b>Annexe 9.</b> Paramètres statistiques de la CEC pour les 3 sites étudiés.....	100
<b>Annexe 10.</b> Paramètres statistiques de la SBE pour les 3 sites étudiés. ....	101
<b>Annexe 11.</b> Outils de fissuration du sol en vue de la décompaction de l'horizon de surface	101
<b>Annexe 12.</b> Teneurs maximales admissibles et teneurs de sécurité prévues par l'annexe 1 de l'AGW du 30/11/1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait des travaux de dragage ou de curage...	102
<b>Annexe 13.</b> Nombre d'espèces hyperaccumulatrices connues et familles les plus représentées pour différents métaux (Dubourguier et al., 2001) .....	103
<b>Annexe 14.</b> Modélisation des sources et puits principaux de protons dans le système sol-plante.....	103
<b>Annexe 15.</b> Cahier des charges n°1 d'essai de revalorisation du site de Fleurus.....	104
<b>Annexe 16.</b> Cahier des charges n°2 d'essai de revalorisation du site de Fleurus.....	106
<b>Annexe 17.</b> Cahier des charges n°3 d'essai de revalorisation du site de Grand-Leez.....	107

<b>Annexe 18.</b> Description du profil de sol Fleurus 1 (FL1).....	110
<b>Annexe 19.</b> Description du profil de sol Fleurus 2 (FL2).....	111
<b>Annexe 20.</b> Description du profil de sol Fleurus 3 (FL3).....	112
<b>Annexe 21.</b> Description du profil de sol Fleurus 4 (FL4).....	113
<b>Annexe 22.</b> Description du profil de sol Fleurus 5 (FL5).....	114
<b>Annexe 23.</b> Description du profil de sol Grand-Leez 2 (GL2).....	115
<b>Annexe 24.</b> Description du profil de sol Grand-Leez 3 (GL3).....	116
<b>Annexe 25.</b> Description du profil de sol Grand-Leez 4 (GL4).....	117
<b>Annexe 26.</b> Description du profil de sol Grand-Leez 5 (GL5).....	118
<b>Annexe 27.</b> Description du profil de sol Grand-Leez 6 (GL6).....	119
<b>Annexe 28.</b> Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 1 (CG1).....	120
<b>Annexe 29.</b> Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 2 (CG2).....	121
<b>Annexe 30.</b> Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 3 (CG3).....	122
<b>Annexe 31.</b> Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 4 (CG4).....	123
<b>Annexe 32.</b> Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 5 (CG5).....	124
<b>Annexe 33.</b> Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 6 (CG6).....	125

**Annexe 1.** Section du catalogue européen des déchets listant les déchets de construction et de démolition (y compris déblais) et leur code de référence (*CCE, 2002*).

**17**

**Déchets de construction et de démolition  
(y compris déblais provenant de sites contaminés)**

---

**17 01 Béton, briques, tuiles et céramiques**

---

17 01 01 Béton

17 01 02 Briques

17 01 03 Tuiles et céramiques

17 01 06\* Mélanges ou fractions séparées de béton, briques, tuiles et céramiques  
contenant des substances dangereuses

17 01 07 Mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques autres que ceux visés à la rubrique 17 01 06

**17 02 Bois, verre et matières plastiques**

---

17 02 01 Bois

17 02 02 Verre

17 02 03 Matières plastiques

17 02 04\* Bois, verre et matières plastiques contenant des substances dangereuses ou contaminés  
par de telles substances

**17 03 Mélanges bitumineux, goudron et produits goudronnés**

---

17 03 01\* Mélanges bitumineux contenant du goudron

17 03 02 Mélanges bitumineux autres que ceux visés à la rubrique 17 03 01

17 03 03\* Goudron et produits goudronnés

**17 04 Métaux (y compris leurs alliages)**

---

17 04 01 Cuivre, bronze, laiton

17 04 02 Aluminium

17 04 03 Plomb

17 04 04 Zinc

17 04 05 Fer et acier

17 04 06 Étain

17 04 07 Métaux en mélange

17 04 09\* Déchets métalliques contaminés par des substances dangereuses

17 04 10\* Câbles contenant des hydrocarbures, du goudron ou d'autres substances dangereuses

17 04 11 Câbles autres que ceux visés à la rubrique 17 04 10

---

**17 05 Terres (y compris déblais provenant de sites contaminés), cailloux et boues de dragage**

---

17 05 03\* Terres et cailloux contenant des substances dangereuses

17 05 04 *Terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 17 05 03*

17 05 05\* Boues de dragage contenant des substances dangereuses

17 05 06 Boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17 05 05

17 05 07\* Ballast de voie contenant des substances dangereuses

17 05 08 Ballast de voie autre que celui visé à la rubrique 17 05 07

---

**17 06 Matériaux d'isolation et matériaux de construction contenant de l'amiante**

---

17 06 01\* Matériaux d'isolation contenant de l'amiante

17 06 03\* Autres matériaux d'isolation à base de ou contenant des substances dangereuses

17 06 04 Matériaux d'isolation autres que ceux visés aux rubriques 17 06 01 et 17 06 03

17 06 05\* Matériaux de construction contenant de l'amiante

---

**17 08 Matériaux de construction à base de gypse**

---

17 08 01\* Matériaux de construction à base de gypse contaminés par des substances dangereuses

17 08 02 Matériaux de construction à base de gypse autres que ceux visés à la rubrique 17 08 01

---

**17 09 Autres déchets de construction et de démolition**

---

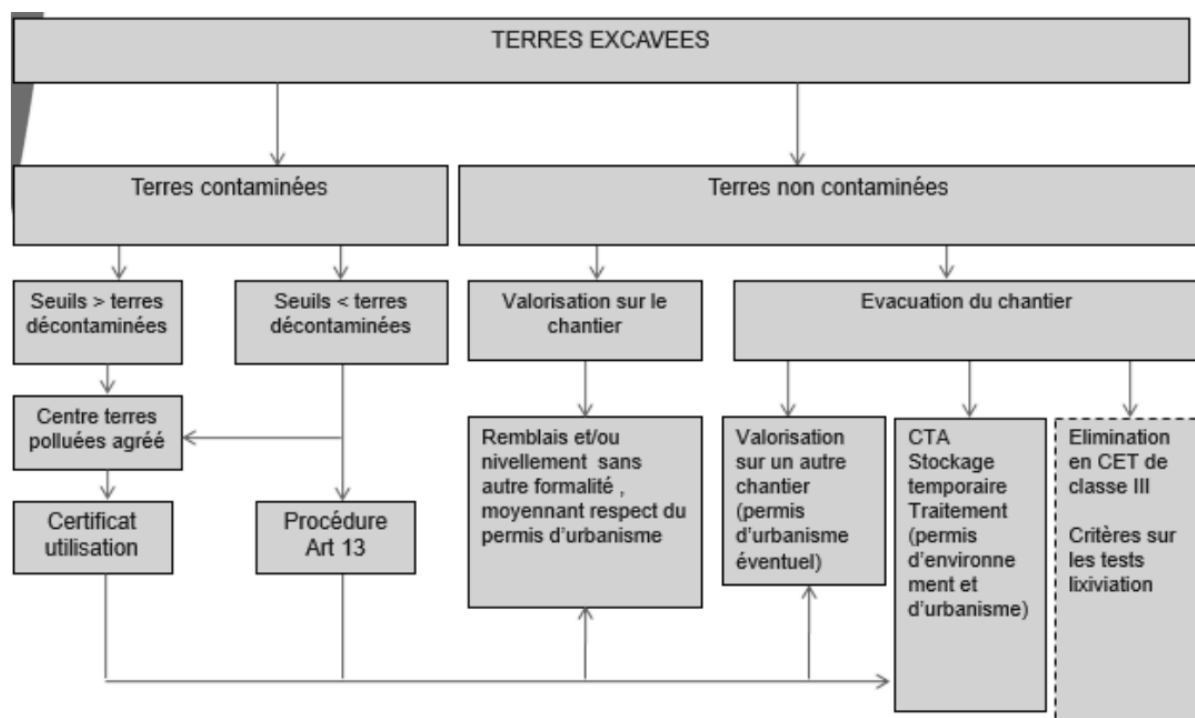
17 09 01\* Déchets de construction et de démolition contenant du mercure

17 09 02\* Déchets de construction et de démolition contenant des PCB

17 09 03\* Autres déchets de construction et de démolition (y compris en mélange)  
contenant des substances dangereuses

17 09 04 Déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés  
aux rubriques 17 09 01, 17 09 02 et 17 09 03

**Annexe 2.** Schéma recensant les mesures à prendre dans la gestion des terres excavées non-dangereuses (Code 17.05.04) (*Confédération Construction Wallonne, 2013*)



**Annexe 3.** Valeurs seuils limites des terres non contaminées en Wallonie, en Flandre et aux Pays-Bas pour les dix paramètres souvent contraignants en Wallonie (*Source: Centre de recherche routière*)

Paramètres	Unité	Arrêté du 14/06/01 Terres non contaminées	VLAREBO 2008	Pays-Bas Soil quality decree 2008
Cuivre		50	72	
Nickel		40	56	
Plomb		70	120	
Zinc		150	200	
Phénanthrène	[mg.kg <sub>ms</sub> <sup>-1</sup> ]	0,2	30	20
Benzo[a]pyène		0,2	0,3	10
Chrysène		1	5,1	10
Fluoranthène		1,2	10,1	35
Benzo[b]fluoranthène		0,5	1,1	
Indéno[1,2,3-cd]pyrène		0,2	0,55	40

Tableau 11: Valeurs seuils limites des terres non contaminées en Wallonie, en Flandre et aux Pays-Bas pour les dix paramètres souvent contraignants en Wallonie

#### Annexe 4. Historique administratif du site de Grand-Leez.

<b>Période</b>	<b>Evénement</b>
1972 – 1988	Exploitation en sablière (2 exploitants)
28/08/1979	La commune de Gembloux introduit une demande et obtient une autorisation d'exploiter un dépôt d'objets encombrants et de déblais de démolition (Validité: 28/06/1982)
17/09/1982	L'autorisation obtenue est prolongée jusqu'au 17/09/1984
21/04/1987	Contrôle du site par la cellule déchets de la Région Wallonne et ordre de fermeture de la décharge adressé à la commune de Gembloux.
02/08/1988	Décision de fermeture de la décharge prise par la commune de Gembloux.
1995	La commune commande une étude de réhabilitation du site au Bureau d'Etude agréé IRCO.
2006	La commune confie à Tradecowall la mission de réactualiser le dossier et de rédiger un plan de réhabilitation en conformité avec les techniques actuelles.

**Annexe 5.** Evolution de la teneur en charge caillouteuse pour l'ensemble des 16 profils des 3 sites étudiés.

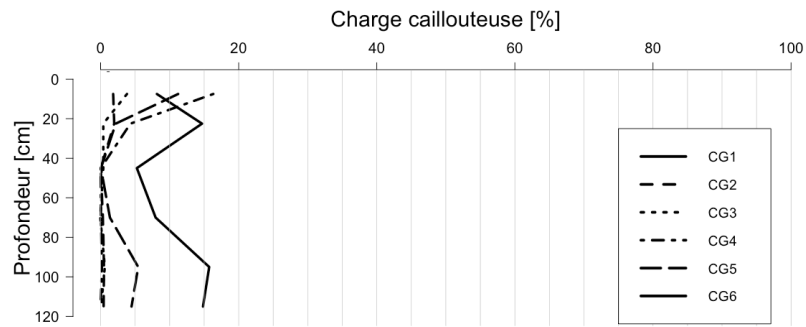


Figure 43: Evolution de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pour les 6 profils étudiés du site de Chaumont-Gistoux

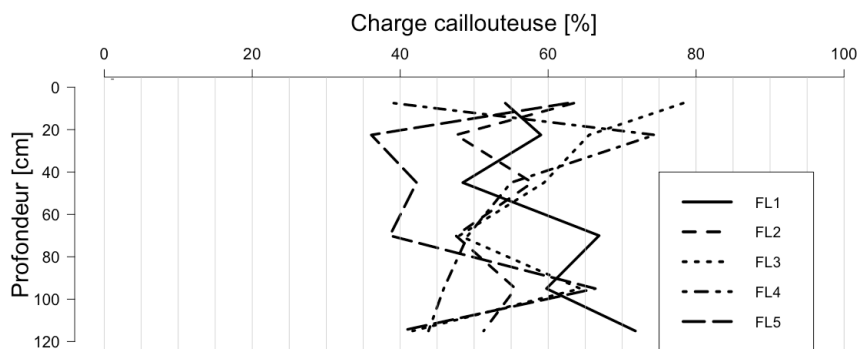


Figure 44: Evolution de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pour les 5 profils étudiés du site de Fleurus

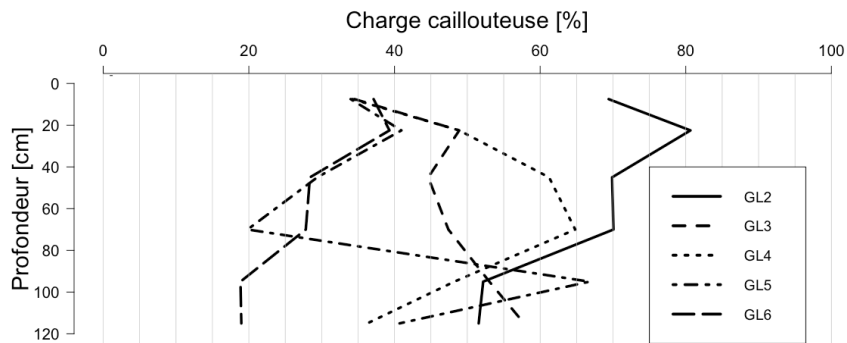


Figure 45: Evolution de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pour les 5 profils étudiés du site de Grand - Leez

**Annexe 6.** Paramètres statistiques de la charge caillouteuse pour les 3 sites étudiés

Charge caillouteuse [%]			
Paramètres	Grand - Leez	Fleurus	Chaumont - Gistoux
Moyenne	45,9%	54,5%	4,3%
Minimum	18,8%	36,1%	0,0%
Maximum	80,6%	78,3%	16,3%
Variance	2,7%	1,4%	0,3%
Ecart- Type	16,6%	21,2%	5,4%

Tableau 12: Paramètres statistiques de la charge caillouteuse pour les 3 sites étudiés

**Annexe 7.** Résultats de l'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X pour les profils FL1, FL5, GL2, GL4 et GL6. Analyse effectuée avec le diffractomètre D8 Advance de Bruker (CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 0.15418$  nm , 40KV, 30mA et 2 theta= 1°/min)

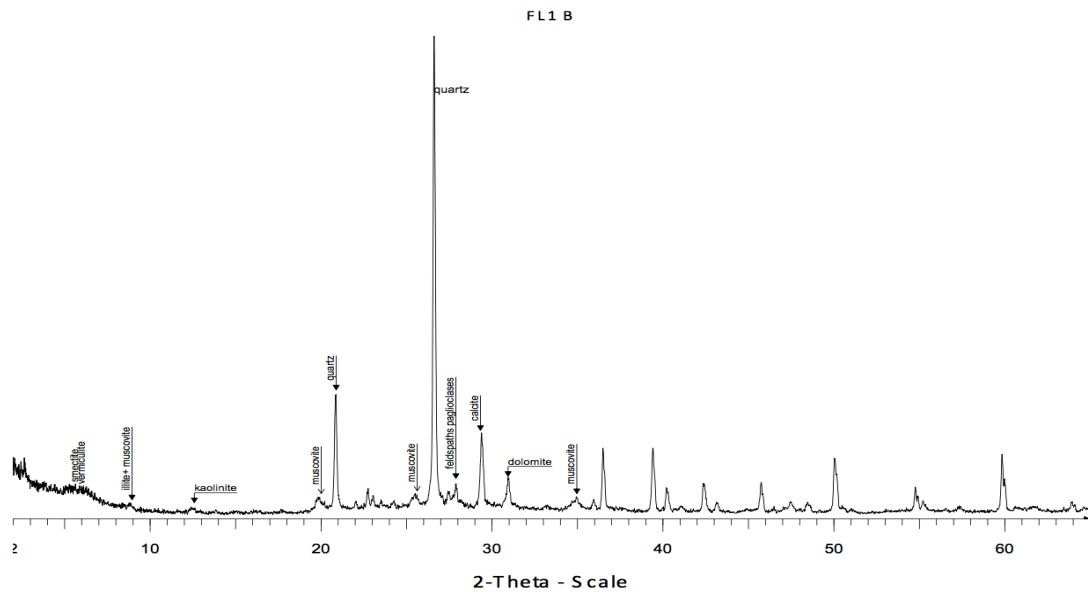


Figure 46: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Fleurus 1

Le spectre DRX montre les réflexions très intenses du quartz, ainsi que la présence de calcite, dolomite, muscovite, feldspath et plagioclase; en ce qui concerne les phyllosilicates: kaolinite, illite, smectite et vermiculite.

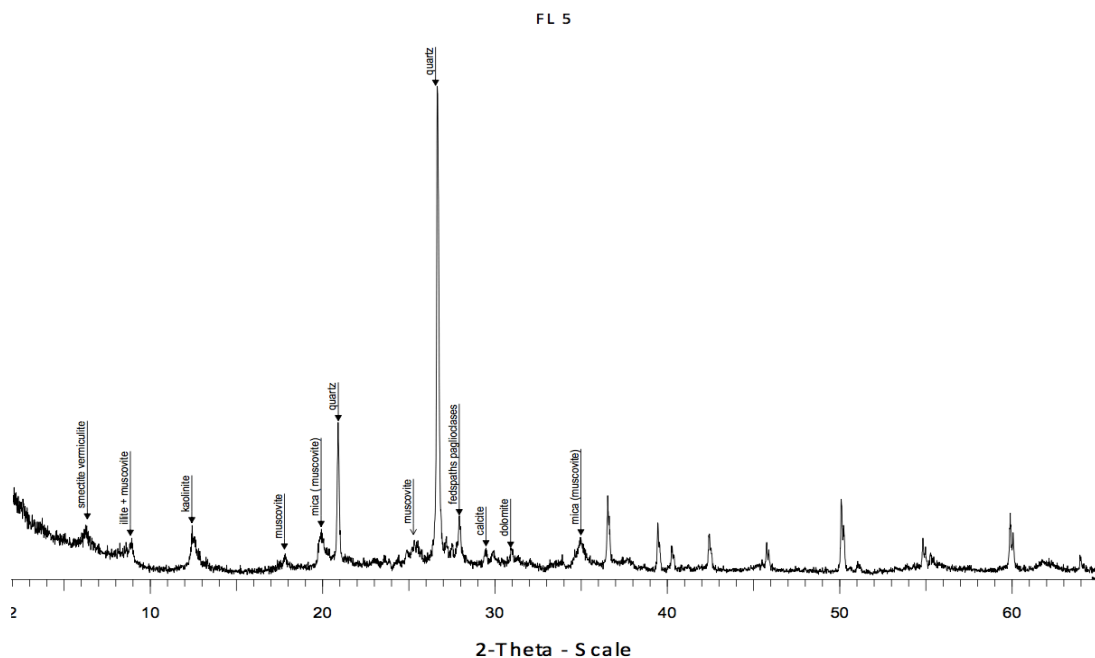


Figure 47: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Fleurus 5

Le spectre DRX montre les réflexions très intenses du quartz, ainsi que la présence de calcite, dolomite, muscovite, feldspath et plagioclase; en ce qui concerne les phyllosilicates: kaolinite, illite, smectite et vermiculite, mais ici les réflexions sont plus intenses que sur le spectre FL1B.

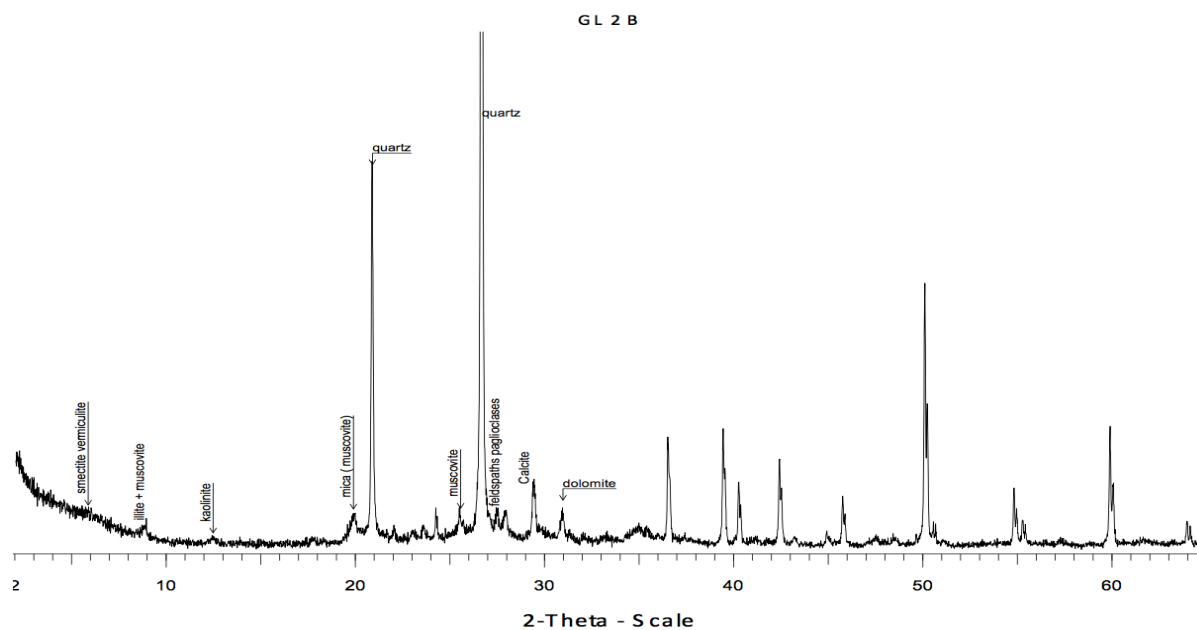


Figure 48: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 2

Le spectre DRX montre les réflexions très intenses du quartz, ainsi que la présence de calcite, dolomite, muscovite, feldspath et plagioclase; en ce qui concerne les phyllosilicates: kaolinite, illite, smectite et vermiculite, mais ici, les réflexions sont moins intenses (particulièrement pour la smectite) que sur le spectre FL1B.

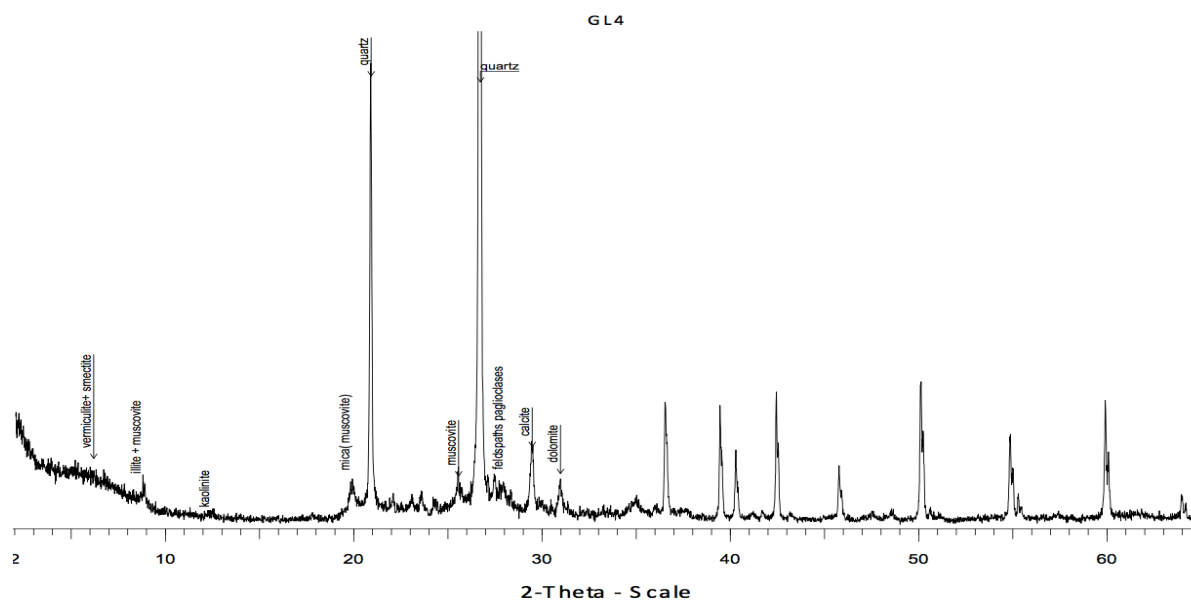


Figure 49: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 4

Le spectre DRX montre les réflexions très intenses du quartz, ainsi que la présence de calcite, dolomite, muscovite, feldspath et plagioclase; en ce qui concerne les phyllosilicates: kaolinite, illite, smectite et vermiculite, mais ici, les réflexions sont moins intenses (particulièrement pour la smectite) que sur le spectre FL1B.

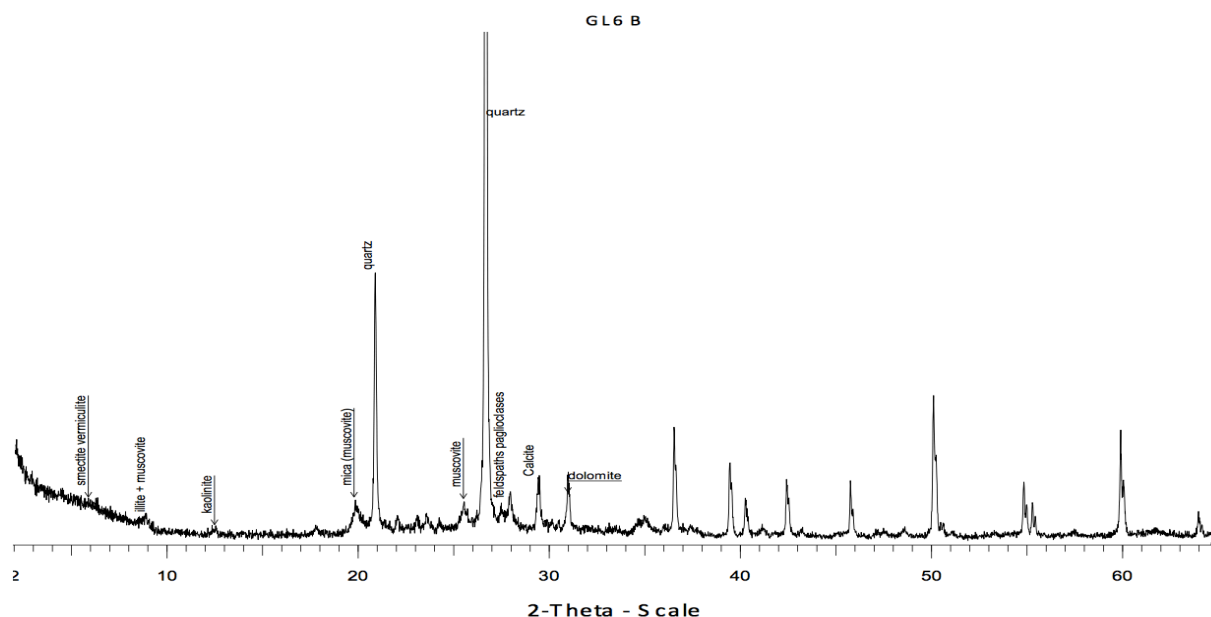


Figure 50: Diffractogramme de la minéralogie de l'échantillon de sol du profil Grand-Leez 6

Le spectre DRX montre les réflexions très intenses du quartz, ainsi que la présence de calcite, dolomite, muscovite, feldspath et plagioclase; en ce qui concerne les phyllosilicates: kaolinite, illite, smectite et vermiculite, mais ici, les réflexions sont moins intenses (particulièrement pour la smectite) que sur le spectre FL1B.

#### Annexe 8. Paramètres statistiques du pH pour les 3 sites étudiés

Paramètres	pH [-]		
	Grand - Leez	Fleurus	Chaumont - Gistoux
Moyenne	8,52	8,17	8,33
Minimum	8,29	7,80	7,95
Maximum	9,22	8,59	8,59
Variance	0,05	0,03	0,02
Ecart- Type	0,23	0,17	0,15

Tableau 13: Paramètres statistiques du pH pour les 3 sites étudiés

#### Annexe 9. Paramètres statistiques de la CEC pour les 3 sites étudiés

Paramètres	CEC [cmolc/kg]	
	Grand - Leez	Fleurus
Moyenne	8,48	10,63
Minimum	7,00	8,56
Maximum	10,44	13,35
Variance	0,61	1,28
Ecart- Type	0,78	1,20

Tableau 14: Paramètres statistiques de la CEC pour les 3 sites étudiés

**Annexe 10.** Paramètres statistiques de la SBE pour les 3 sites étudiés.

Somme des bases échangeables [cmolc/kg]		
Paramètres	Grand - Leez	Fleurus
Moyenne	28,46	33,48
Minimum	19,90	18,56
Maximum	35,97	44,87
Variance	11,06	30,30
Ecart- Type	3,33	5,62

Tableau 15: Paramètres statistiques de la SBE pour les 3 sites étudiés

**Annexe 11.** Outils de fissuration du sol en vue de la décompaction de l'horizon de surface

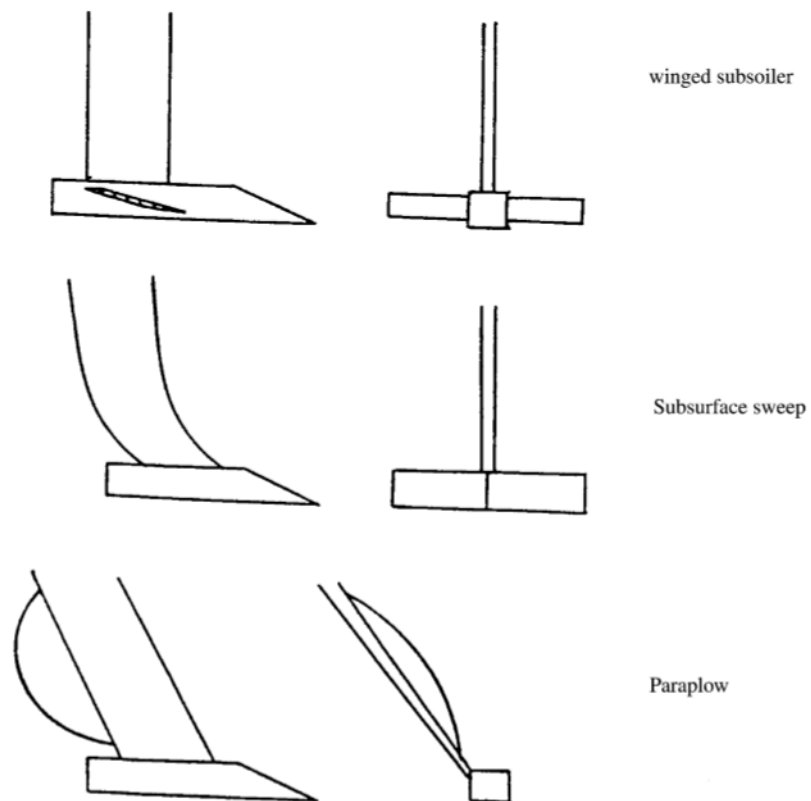


Figure 51 Outils de fissuration du sol en vue de la décompaction de l'horizon de surface (Spor, 2003)

**Annexe 12.** Teneurs maximales admissibles et teneurs de sécurité prévues par l'annexe 1 de l'AGW du 30/11/1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait des travaux de dragage ou de curage.

Paramètres	Teneurs max. admissibles [mg/kg <sub>MS</sub> ]	Teneurs de sécurité [mg/kg <sub>MS</sub> ]
As	50	100
Cd	6	30
Cr	200	460
Cu	150	420
Co	25	100
Hg	1,5	15
Ni	75	300
Pb	250	1500
Zn	1200	2400
F -	250	500
CN -	5	25
<b>Hydrocarbures apolaires</b>	1500	4500
<b>Hydrocarbures aromatiques monocycliques</b>	10	75
<b>Solvants halogénés</b>	1	5
<b>Hydrocarbures aromatiques polycycliques</b>	9	45
<b>Polychlorobiphényles</b>	0,25	0,75
<b>Pesticides organochlorés totaux</b>	0,25	0,5

Tableau 16: Teneurs maximales admissibles et teneurs de sécurité prévues par l'annexe 1 de l'AGW du 30/11/1995 relatif à la gestion des matières enlevées du lit et des berges des cours et plans d'eau du fait des travaux de dragage ou de curage

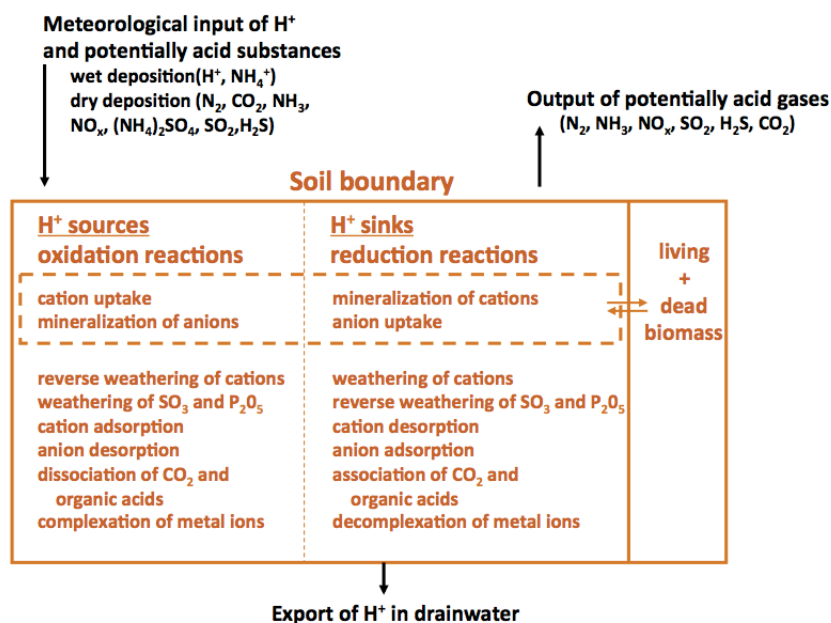
**Annexe 13.** Nombre d'espèces hyperaccumulatrices connues et familles les plus représentées pour différents métaux (Dubourguier et al., 2001)

Eléments	Nombre d'espèces	Familles les plus représentées
Cadmium	2	Brassicaceae
Cobalt	26	Lamiaceae, Scophulariaceae
Cuivre	24	Brassicaceae, Cyperaceae, Lamiaceae, Poaceae, Scophulariaceae
Manganèse	11	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
Nickel	290	Brassicaceae, Cunoniaceae, Euphorbiaceae, Flacourtiaceae, Violaceae
Sélénium	19	Fabaceae
Thallium	1	Brassicaceae
Zinc	16	Brassicaceae, Violaceae

Tableau 17 : Nombre d'espèces hyperaccumulatrices connues et familles les plus représentées pour différents métaux (Dubourguier et al., 2001)

**Annexe 14.** Modélisation des sources et puits principaux de protons dans le système sol-plante (Van Breemen et al., 1983)

**Modèle conceptuel de bilan de protons**



van Breemen et al. (1983) Acidification and alkalinization of soils. *Plant and Soil*, 75, 283-308

## Annexe 15. Cahier des charges n°1 d'essai de revalorisation du site de Fleurus

Objectif: Valoriser le technosol du site de Fleurus et augmenter sa plus-value écologique et paysagère par l'installation d'une prairie fleurie.

Protocole:

1. **Amendement:** Epanchage de digestat solide originaire de l'unité de biométhanisation de la coopérative « Cinergie » à Fleurus (4,9km du site étudié). Epanchage à raison de 30m<sup>3</sup> par hectare à effectuer par le biais d'un épandeur à hérissons verticaux ou à table.
2. **Préparation du sol:** Préparation du lit de semence par le passage du herse rotative tractée par un tracteur et brisant les agrégats compacts de façon à ameublir la terre.
3. **Semis:** Semis à l'aide d'un semoir agricole tracté par un tracteur. Mélange composé pour 50% de semences de prairie fleurie (pour milieux secs) en proportion 70/30 (graminées/fleurs) et pour 50% de sable de rivière. Mélange à semer en fonction d'une concentration en semences de 5g/m<sup>2</sup>
4. **Fauchage** en mosaïque: Fauchage à l'aide d'une faucheuse tractée par un tracteur. Premier fauchage en juin (premier tiers de la prairie); Second passage fin octobre.

Budget prévisionnel:

- Prix du digestat: 8€/m<sup>3</sup>; 240€/hectare (30m<sup>3</sup>/hectare)
- Location d'un épandeur: Prix non-défini
- Location d'un tracteur: Prix non-défini
- Location d'une herse rotative: Prix non-défini
- Prix des semences de prairie fleurie 70/30 (50kg): 95€/kg; 4750€/hectare (5g/m<sup>2</sup>)
- Prix du sable de rivière (50kg): 3€
- Location d'un semoir et semis: 8500 à 20000€/hectare
- Location d'une faucheuse: Prix non-défini

Commentaire(s):

- Mélange "Prairie fleurie" 70/30 type proposé par l'ASBL Ecowal (et vendu par sa filiale Ecosem) (*Ecowal ASBL, 2015*): *Festuca ovina*, *Festuca rubra commutata*, *Poa pratensis*, *Rhinanthus minor*, *Anthyllis vulneraria*, *Onobrychis viciifolia*, *Achillea millefolium*, *Agrimonia eupatoria*, *Centaurea scabiosa*, *Centaurea thuillieri*, *Clinopodium vulgare*, *Daucus carota*, *Echinops sphaerocapulus*, *Echium vulgare*,

*Galium verum, Hypericum perforatum, Leontodon hispidus, Leucanthemum vulgare, Malva moschata, Origanum vulgare, Reseda luteola, Sanguisorba minor, Saponaria officinalis, Silene latifolia alba, Silene vulgare, Stachys officinalis, Verbascum nigrum, Agrostemma githago, Centaurea cyanus, Dianthus armeria, Papaver rhoeas.*

- Possibilité de revalorisation in-situ et ex-situ du matériel végétal fauché (amendement après broyage des tiges, biométhanisation, etc.). Dans le cadre d'une revalorisation par la biométhanisation de la biomasse produite, si le digestat produit est réinjecté sur le site de Fleurus, son épandage ne nécessitera pas l'obtention d'un certificat d'utilisation (*cfr* Section 6.3.5)
- La première étape d'amendement n'est pas absolument nécessaire, les espèces propres aux prairies fleuries se développant sur des sites relativement pauvres. Néanmoins, les risques d'encroutement et de ruissellement pouvant rendre le développement de la prairie contraignant, un amendement organique minimum est recommandé pour la première année.

## **Annexe 16.** Cahier des charges n°2 d'essai de revalorisation du site de Fleurus

Objectif: Valoriser le technosol du site de Fleurus et augmenter sa plus-value économique par la mise sous culture du site et l'utilisation des produits de culture pour la production de bioénergie.

### Protocole:

1. **Amendement:** Epandage de digestat solide originaire de l'unité de biométhanisation de la coopérative « Cinergie » à Fleurus (4,9km du site étudié). Epandage à raison de 30m<sup>3</sup> par hectare à effectuer par le biais d'un épandeur à hérissons verticaux ou à table.
2. **Préparation du sol:** Préparation du lit de semence par le passage d'une épierreuse (passage unique) tractée par un tracteur suivi du passage d'un cultivateur lourd à dents fines tracté par un tracteur et servant à briser les agrégats compacts et la croûte de surface de façon à ameublir la terre.
3. **Plantation:** Plantation de mars à mai à l'aide d'une planteuse maraîchère. Rhizomes à planter en fonction d'une concentration 15 000 à 20 000 rhizomes/hectare

### Budget estimé:

- Prix du digestat: 8€/m<sup>3</sup>; 240€/hectare (30m<sup>3</sup>/hectare)
- Location d'un épandeur: Prix non-défini
- Location d'un tracteur: Prix non-défini
- Location d'une épierreuse: Prix non-défini
- Location d'un cultivateur lourd à dents fines: Prix non-défini
- Prix des rhizome de Miscanthus géant (*Miscanthus x giganteus*): 3000 à 3500€/hectare (15000 à 20000 rhizomes/hectare)
- Location d'une planteuse maraîchère: Prix non-défini

### Commentaire(s):

- La biomasse produite peut servir de source de bioénergie pour le biométhaniseur de Cinergie. Dans le cadre d'une revalorisation par la biométhanisation de la biomasse produite, si le digestat produit est réinjecté sur le site de Fleurus, son épandage ne nécessitera pas l'obtention d'un certificat d'utilisation (*cfr* Section 6.3.5)

## Annexe 17. Cahier des charges n°3 d'essai de revalorisation du site de Grand-Leez

Objectif: Valoriser le technosol du site de Grand-Leez (actuellement réserve naturelle pour la biodiversité) et améliorer sa plus-value écologique et paysagère par l'installation d'une prairie fleurie.

Protocole:

**Remarque:** Le technosol de Grand-Leez étant déjà partiellement colonisé par une végétation (davantage que le site de Fleurus), des aménagements rendant le déplacement d'engins agricoles complexe étant déjà mis en place (mares, abris à amphibiens, tumulus pour oiseaux migrateurs, etc.), et le site étant au sommet d'une butte et dès lors plus difficilement accessible à des engins agricoles lourds, des distinctions par rapport au cahier des charges n°1 de Fleurus sont nécessaires:

- L'entièreté du site ne doit pas être impactée par la revalorisation. Seules les zones du plateau n'étant pas colonisées par la végétation (anciennes zones compactées par le passage fréquent d'engins de chantier, etc.) doivent être revalorisées. Les zones déjà colonisées bénéficieront directement de la revalorisation des zones non-colonisées par la promotion de la pollinisation par le biais de l'apparition d'une prairie permanente.
- Le site étant plus difficilement accessible et la zone à « travailler » couvrant une nettement plus petite surface que le site de Fleurus, l'utilisation d'engins agricoles de petites à moyennes dimensions est à privilégier comparativement aux engins lourds utilisés sur le site de Fleurus.
- Les caractéristiques pédologiques du site étant plus favorables à la croissance de plantes que celles du site de Fleurus, l'amendement n'est pas nécessaire.
- Le site de Grand-Leez devant être à terme une réserve naturelle, la mise en place d'un peuplement végétal ne demandant aucun entretien est à privilégier.

1. **Préparation du sol:** Préparation du lit de semence par le passage du herse rotative non-tractée et brisant les agrégats compact de façon à ameublir la terre.
2. **Semis:** Semis à l'aide d'un semoir agricole léger. Mélange composé pour 50% de semences de prairie fleurie (pour milieux secs) en proportion 85/15 (graminées/fleurs) et pour 50% de sable de rivière. Mélange à semer en fonction d'une concentration en semences 5g/m<sup>2</sup>

### Budget prévisionnel:

- Location d'une herse rotative légère: Prix non-défini
- Prix des semences de « prairie fleurie » 85/15 (50kg): 49,5€/kg; 2475€/hectare (5g/m<sup>2</sup>)
- Prix du sable de rivière (50kg): 3€
- Location d'un semoir et semis: 8500€/hectare

### Commentaire(s):

- Mélange "Prairie fleurie" 85/15 type proposé par l'ASBL Ecowal (et vendu par sa filiale Ecosem) (*Ecowal ASBL, 2015*): *Festuca ovina*, *Festuca rubra commutata*, *Poa pratensis*, *Rhinanthus minor*, *Anthyllis vulneraria*, *Onobrychis viciifolia*, *Achillea millefolium*, *Agrimonia eupatoria*, *Centaurea scabiosa*, *Centaurea thuillieri*, *Clinopodium vulgare*, *Daucus carota*, *Echinops sphaerocapitatus*, *Echium vulgare*, *Galium verum*, *Hypericum perforatum*, *Leontodon hispidus*, *Leucanthemum vulgare*, *Malva moschata*, *Origanum vulgare*, *Primula veris*, *Reseda luteola*, *Sanguisorba minor*, *Saponaria officinalis*, *Silene latifolia alba*, *Silene vulgare*, *Stachys officinalis*, *Verbascum nigrum*, *Agrostemma githago*, *Centaurea cyanus*, *Dianthus armeria*, *Papaver rhoeas*.

Il est à noter que les mélanges 85/15 et 70/30 ne sont pas caractérisés par les mêmes espèces.



Annexe 18. Description du profil de sol Fleurus 1 (FL1)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limons	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	44%	46%	10%	54%	4,13	1,21	0,77	1,36	0,13	31,77
2	15-30				59%	4,17	2,81	0,73	1,31	0,14	29,79
3	35-55				48%						
4	65-75				67%						
5	85-105				60%						
6	110-120				72%						

## Profil 1: Fleurus 1

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H2O	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[-]	[-]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]			[molec.kg <sup>-1</sup> ]			[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]	
1	8,51	10,01	29,45	0,86	0,38	0,49	31,18	3,11	1,58	/	
2	8,46	9,53	33,80	1,03	0,41	0,51	35,75	3,75			
3	7,66	10,24	25,61	1,34	0,31	0,34	27,60	2,69			
4	8,07	12,05	34,91	1,21	0,40	0,45	36,96	3,07			
5	8,59	10,39	35,99	0,53	0,53	0,61	37,65	3,62			
6	8,42	10,30	36,25	0,60	0,45	0,51	37,82	3,67			

Tableau 18: Description du profil de sol Fleurus 1 (FL1)

Annexe 19. Description du profil de sol Fleurus 2 (FL2)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limons	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm<Ø<2mm	2µm<Ø<50 µm	2 µm<Ø	Ø>2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	41%	50%	9%	63%	5,07	1,45	0,99	1,77	0,17	29,82
2	15-30	41%	49%	10%	48%	5,24	1,22	0,89	1,59	0,18	29,11
3	35-55				58%						
4	65-75				48%						
5	85-105				56%						
6	110-120				51%						

Profil 2: Fleurus 2

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[-]	[-]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,12	11,00	26,45	1,03	0,41	0,41	28,29	2,57		/	
2	8,13	10,63	31,02	1,21	0,41	0,46	33,09	3,11			
3	8,37	9,65	31,21	0,81	0,41	0,49	32,91	3,41			
4	8,14	9,37	30,51	1,05	0,60	0,58	32,74	3,49			
5	8,05	10,13	39,43	0,75	0,61	0,80	41,59	4,10			
6	8,38	9,44	37,28	0,72	0,66	0,68	39,34	4,17			

Tableau 18: Description du profil de sol Fleurus 2 (FL2)

Annexe 20. Description du profil de sol Fleurus 3 (FL3)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm<Ø<2mm	2µm<Ø<50 µm	2 µm<Ø	Ø>2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	43%	43%	14%	78%	3,74	1,17	0,71	1,27	0,13	28,77
2	15-30	38%	46%	16%	66%	3,08	0,96	0,26	0,46	0,1	30,80
3	35-55				59%						
4	65-75				48%						
5	85-105				64%						
6	110-120				42%						

Profil 3: Fleurus 3

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[-]	[-]	[cmole.kg <sup>-1</sup> ]	[cmole.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,18	10,24	30,46	1,08	0,42	0,33	32,30	3,15	1,75	/	
2	8,17	10,40	31,28	1,49	0,35	0,24	33,37	3,21			
3	8,15	11,96	24,69	1,59	0,35	0,26	26,89	2,25			
4	8,09	12,76	27,48	1,59	0,35	0,27	29,69	2,33			
5	8,33	10,37	32,46	0,88	0,46	0,51	34,32	3,31			
6	8,27	10,31	34,14	0,61	0,99	0,87	36,61	3,55			

Tableau 19: Description du profil de sol Fleurus 3 (FL3)

Annexe 21. Description du profil de sol Fleurus 4 (FL4)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	
Horizon	Profondeur	Sable	Limons	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N	
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique						
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]	
1	0-15	36%	48%	16%	39%	3,79	1,30	0,64	1,15	0,14	27,07	
2	15-30	39%	47%	14%	74%	(8,35)	6,86	0,14	0,24	0,08	(104,38)	
3	35-55				55%							
4	65-75				49%							
5	85-105				46%							
6	110-120				44%							
<b>Profil 4: Fleurus 4</b>												
[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]		
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration		
N°	pH H2O	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7			
[-]	[-]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]	
1	7,95	10,82	31,93	1,48	0,72	0,27	34,39	3,18			/	
2	8,29	10,65	16,81	1,39	0,22	0,15	18,56	1,74				
3	7,94	11,13	26,90	1,48	0,32	0,28	28,98	2,61				
4	8,11	8,56	31,56	0,92	0,63	0,48	33,58	3,93				
5	8,19	9,49	29,22	0,90	0,97	0,68	31,78	3,35				
6	8,18	8,90	36,55	0,84	0,75	0,57	38,71	4,35				

Tableau 20: Description du profil de sol Fleurus 4 (FL4)



Annexe 23. Description du profil de sol Grand-Leez 2 (GL2)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière $\Phi > 2\text{mm}$	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50 $\mu\text{m} < \Phi < 2\text{mm}$	2 $\mu\text{m} < \Phi < 50 \mu\text{m}$	2 $\mu\text{m} < \Phi$	$\Phi > 2\text{mm}$	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	56%	37%	7%	69%	2,12	0,81	0,34	0,60	0,12	17,67
2	15-30	59%	34%	7%	81%	2,11	0,76	0,33	0,58	0,12	17,58
3	35-55				70%						
4	65-75				70%						
5	85-105				52%						
6	110-120				52%						

Profil 6: Grand - Leez 2

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[-]	[-]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,45	7,62	26,52	1,11	0,31	0,67	28,61	3,76	1,66	/	
2	8,46	7,00	25,25	1,25	0,33	0,60	27,43	3,92			
3	8,46	7,84	26,31	1,07	0,30	0,46	28,15	3,59			
4	8,42	7,91	25,36	1,33	0,23	0,42	27,35	3,46			
5	9,22	9,03	33,47	0,45	0,40	0,61	34,92	3,87			
6	9,16	9,27	31,26	0,45	0,44	0,74	32,90	3,55			

Tableau 22: Description du profil de sol Grand-Leez 2 (GL2)

Annexe 24. Description du profil de sol Grand-Leez 3 (GL3)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière $\varnothing > 2\text{mm}$	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50 $\mu\text{m} < \varnothing < 2\text{mm}$	2 $\mu\text{m} < \varnothing < 50 \mu\text{m}$	2 $\mu\text{m} < \varnothing$	$\varnothing > 2\text{mm}$	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	47%	39%	14%	35%	2,05	0,65	0,35	0,62	0,11	18,64
2	15-30	52%	38%	10%	49%	1,9	0,78	0,25	0,45	0,11	17,27
3	35-55				45%						
4	65-75				47%						
5	85-105				53%						
6	110-120				58%						

**Profil 7: Grand - Leez 3**

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[-]	[-]	[ <i>cmol.c.kg<sup>-1</sup></i> ]	[ <i>cmol.c.kg<sup>-1</sup></i> ]						%	[ <i>g.cm<sup>-3</sup></i> ]	[ <i>mm.h<sup>-1</sup></i> ]
1	8,37	8,31	27,30	1,04	0,34	0,70	29,38	3,54		/	
2	8,44	7,70	27,13	1,14	0,46	0,79	29,52	3,83			
3	8,52	8,24	27,03	1,15	0,41	0,72	29,31	3,56			
4	8,53	8,11	25,96	1,16	0,35	0,43	27,90	3,44			
5	8,4	8,19	24,51	1,11	0,37	0,46	26,44	3,23			
6	8,48	8,42	23,87	1,09	0,38	0,51	25,85	3,07			

Tableau 23: Description du profil de sol Grand-Leez 3 (GL3)

Annexe 25. Description du profil de sol Grand-Leez 4 (GL4)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[1]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[1]
1	0-15	49%	41%	10%	34%	1,66	0,41	0,64	1,14	0,14	11,86
2	15-30	52%	36%	12%	49%	1,84	0,57	0,27	0,47	0,11	16,73
3	35-55				61%						
4	65-75				65%						
5	85-105				48%						
6	110-120				36%						

Profil 8: Grand - Leez 4

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H2O	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[1]	[1]	[molec.kg l <sup>-1</sup> ]	[molec.kg l <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,46	7,85	18,20	0,91	0,15	0,64	19,90	2,54	1,53	/	
2	8,31	7,56	26,92	1,27	0,42	0,78	29,38	3,89			
3	8,59	8,05	28,39	1,14	0,41	0,52	30,47	3,79			
4	8,32	8,63	28,46	1,05	0,52	0,37	30,40	3,52			
5	8,6	9,23	28,90	1,01	0,51	0,59	31,00	3,36			
6	8,64	7,59	26,06	1,09	0,38	0,34	27,87	3,67			

Tableau 24: Description du profil de sol Grand-Leez 4 (GL4)

Annexe 26. Description du profil de sol Grand-Leez 5 (GL5)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière $\phi > 2\text{mm}$	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50 $\mu\text{m} < \phi < 2\text{mm}$	2 $\mu\text{m} < \phi < 50 \mu\text{m}$	2 $\mu\text{m} < \phi$	$\phi > 2\text{mm}$	% Massique					
[1]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[1]
1	0-15	55%	38%	7%	34%	1,86	0,50	0,60	1,07	0,12	15,50
2	15-30	60%	33%	7%	41%	1,83	0,58	0,25	0,45	0,11	16,64
3	35-55				29%						
4	65-75				20%						
5	85-105				67%						
6	110-120				41%						

Profil 9: Grand - Leez 5

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[1]	[1]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]	
1	8,36	9,04	24,18	1,07	0,28	0,87	26,40	2,92		/	
2	8,4	8,93	26,96	1,08	0,29	0,78	29,11	3,26			
3	8,34	8,87	29,29	1,21	0,51	0,50	31,51	3,55			
4	8,38	8,90	19,33	1,16	0,49	0,31	21,29	2,39			
5	9,01	8,13	34,29	0,95	0,30	0,43	35,97	4,43			
6	8,39	8,05	25,15	0,99	0,25	0,41	26,80	3,33			

Tableau 25: Description du profil de sol Grand-Leez 5 (GL5)

Annexe 27. Description du profil de sol Grand-Leez 6 (GL6)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limons	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[1]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[1]
1	0-15	47%	47%	6%	0,37	1,97	0,66	0,89	1,58	0,1	19,70
2	15-30	50%	45%	5%	0,39	3,05	0,78	0,37	0,66	0,17	17,94
3	35-55				0,28						
4	65-75				0,28						
5	85-105				0,19						
6	110-120				0,19						

Profil 10: Grand - Leez 6

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H2O	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[1]	[1]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,55	8,66	23,84	1,09	0,09	0,89	25,92	2,99	1,76	/	
2	8,35	10,44	27,41	1,26	0,21	1,02	29,89	2,86			
3	8,29	9,78	27,88	1,34	0,40	0,72	30,35	3,10			
4	8,48	8,54	24,44	1,01	0,83	0,49	26,77	3,13			
5	8,68	8,28	22,44	0,94	0,84	0,40	24,62	2,98			
6	8,52	10,13	26,18	1,10	0,68	0,51	28,47	2,81			

Tableau 26: Description du profil de sol Grand-Leez 6 (GL6)

Annexe 28. Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 1 (CG1)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	20%	70%	10%	8%	1,06	0,18	0,66	1,17	0,13	8,15
2	15-30	20%	65%	15%	15%	0,47	0,10	0,09	0,16	0,09	5,22
3	35-55				5%						
4	65-75				8%						
5	85-105				16%						
6	110-120				15%						

Profil 11: Chaumont - Gistoux 1

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4					pH 7		
[-]	[-]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]	[cmol.c.kg <sup>-1</sup> ]					%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,4								1,57	66
2	8,39									
3	8,3									
4	8,15									
5	8,39									
6	8,41									

Tableau 27: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 1 (CG1)

Annexe 29. Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 2 (CG2)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limons	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	16%	72%	13%	2%	0,7	0,12	0,18	0,32	0,11	6,36
2	15-30	30%	63%	7%	2%	0,41	0,22	0,01	0,03	0,07	5,86
3	35-55				0%						
4	65-75				0%						
5	85-105				0%						
6	110-120				0%						

Profil 12: Chaumont - Gistoux 2												
[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]		
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration		
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7			
[-]	[-]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]	
1	8,34										66	
2	8,41											
3	8,37											
4	8,3											
5	8,16											
6	8,05											

Tableau 28: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 2 (CG2)

Annexe 30. Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 3 (CG3)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	23%	64%	12%	4%	0,49	0,05	0,06	0,10	0,1	4,90
2	15-30	26%	59%	15%	0%	0,29	0,11	0,00	0,01	0,09	3,22
3	35-55				0%						
4	65-75				0%						
5	85-105				1%						
6	110-120				0%						

Profil 13: Chaumont - Gistoux 3

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4					pH 7		
[-]	[-]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]				[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,04								1,50	66
2	8,33									
3	8,25									
4	8,27									
5	8,08									
6	7,95									

Tableau 29: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 3 (CG3)

Annexe 31. Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 4 (CG4)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	15%	69%	16%	16%	0,61	0,17	0,20	0,35	0,11	5,55
2	15-30	19%	71%	10%	4%	0,42	0,27	0,00	0,00	0,09	4,67
3	35-55				0%						
4	65-75				0%						
5	85-105				0%						
6	110-120				0%						

Profil 14: Chaumont - Gistoux 4

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration
N°	pH H2O	pH 7	Extraction au AcNH4					pH 7		
[-]	[-]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]				[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,16									66
2	8,45									
3	8,59									
4	8,54									
5	8,49									
6	8,34									

Tableau 30: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 4 (CG4)

Annexe 32. Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 5 (CG5)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limon	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm<Ø<2mm	2µm<Ø<50 µm	2 µm<Ø	Ø>2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	14%	75%	11%	14%	0,76	0,53	0,03	0,05	0,08	9,50
2	15-30	19%	71%	10%	3%	0,55	0,46	0,00	0,00	0,09	6,11
3	35-55				3%						
4	65-75										
5	85-105										
6	110-120										

Profil 15: Chaumont - Gistoux 5

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4					pH 7		
[-]	[-]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]	[cmolc.kg <sup>-1</sup> ]					%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,27								1,64	66
2	8,43									
3	8,43									
4										
5										
6										

Tableau 31: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 5 (CG5)

Annexe 33. Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 6 (CG6)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Horizon	Profondeur	Sable	Limons	Argile	Fraction Grossière	C tot	Carbonates	Corg	MO	N total	C/N
N°		50µm < Ø < 2mm	2µm < Ø < 50 µm	2 µm < Ø	Ø > 2mm	% Massique					
[-]	[cm]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	[-]
1	0-15	11%	78%	11%	11%	1,07	0,52	0,18	0,32	0,11	9,73
2	15-30	28%	57%	15%	2%	0,41	0,19	0	0,00	0,1	4,10
3	35-55				0%						
4	65-75				1%						
5	85-105				5%						
6	110-120				4%						

Profil 16: Chaumont - Gistoux 6

[1]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	
Horizon	pH	CEC	Ca	Mg	Na	K	TRB	BS	Densité Apparente Sèche	Infiltration	
N°	pH H20	pH 7	Extraction au AcNH4						pH 7		
[-]	[-]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]	[molec.kg <sup>-1</sup> ]						%	[g.cm <sup>-3</sup> ]	[mm.h <sup>-1</sup> ]
1	8,33									66	
2	8,42										
3	8,46										
4	8,47										
5	8,48										
6	8,45										

Tableau 39: Description du profil de sol Chaumont-Gistoux 6 (CG6)

## **Technosols composés de terres excavées et déchets de construction: de la caractérisation à la revalorisation agronomique de friches**

**Présenté par Lucas Demierbe**

### **Résumé**

Ce mémoire porte sur les sols formés de terres excavées et de déchets de construction. Les objectifs de ce travail sont de caractériser les principales propriétés de trois technosols wallons élaborés à des époques différentes dans trois environnements différents à partir d'un même type de matériaux, d'estimer leur évolution sur base des connaissances acquises par la caractérisation, ainsi que d'approfondir les techniques d'amélioration de la fertilité de ces sols. Les technosols de Chaumont-Gistoux (culture de luzerne), Fleurus (en activité) et Grand-Leez (réserve naturelle) ont reçu leur dernier lot de terre respectivement en 1997, 2013 et 2015. La caractérisation physique, physico-chimique et biologique a permis de mettre en évidence que la valorisation agronomique de ces sols rencontre de nombreuses contraintes. Les contraintes physiques les plus récurrentes sont la forte compacité, la charge caillouteuse élevée, l'absence d'une structuration du sol, la mauvaise rétention en eau et la vulnérabilité aux aléas climatiques. Au niveau des propriétés physico-chimiques, les freins à la végétalisation de ces sites sont la forte alcalinité des sols, la faible CEC, la faible biodisponibilité des nutriments et la dominance de  $\text{Ca}^{2+}$ . Au niveau des propriétés biologiques, la quasi absence de matière organique est la contrainte majeure des technosols étudiés. L'analyse phytosociologique a mis en évidence une colonisation faible à modérée d'espèces herbacées et un échec de l'implantation d'espèces ligneuses.

La pédogénèse des technosols peut être estimée sur base du modèle pédogénétique des sols naturels. Le drainage climatique positif du climat tempéré de nos régions et le processus d'acidification naturelle du sol suggèrent que des technosols nouvellement construits subissent à leur genèse une dissolution de leurs sels, suivie d'une dissolution des minéraux primaires et d'une néoformation de minéraux secondaires en parallèle d'une diminution du pH. Après une altération forte, il est judicieux d'estimer que cette évolution du technosol aboutira en une accumulation de matériaux résiduels (quartz, oxydes, etc.). La réserve de carbonates (issue des matériaux de construction de nature carbonatée) d'un jeune technosol empêche la diminution du pH et l'altération des matériaux. Afin de favoriser le phénomène d'altération et l'augmentation de la fertilité, il est suggéré de favoriser le processus d'acidification en multipliant les sources de protons par le biais de différents facteurs: apport de matières organiques (déchets verts, boues, digestat, etc.), installation d'un peuplement végétal, etc. Un travail mécanique des sols est également suggéré afin de décompacter et d'aérer le sol ainsi qu'en vue de diminuer la charge caillouteuse en surface. Outre un travail en aval, l'élaboration de cahiers de charges en amont de la procédure de remblais est nécessaire afin de jouer sur différents facteurs favorables à la formation d'un sol technogénique: altérabilité du matériau, zonation du dépôt des terres après un tri granulométrique, etc.

La revalorisation agronomique des technosols en divers usages (prairie, culture, etc.) représente un potentiel environnemental et économique considérable pour la Wallonie. La gestion des matériaux composant ces sols est régie par un cadre législatif strict, sujet à de vastes améliorations par le biais du décret relatif à la gestion et à l'assainissement des sols, entrant en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2019.