SOLS ARTIFICIELS

FAISABILITE ET UTILISATION LE LONG DES VOIES DE COMMUNICATION

TABLE DES MATIERES

RESUME		
IMPRESSUM		
CHAPITRE 1 :	CADRE DE L'ETUDE	1
CHAPITRE 2 :	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	13
CHAPITRE 3 :	RESULTATS	37
CHAPITRE 4 :	SYNTHESE ET CONCLUSIONS	87
CHAPITRE 5 :	UN EXEMPLE D'UTILISATION : HAUTERIVE - ST.-BLAISE	97
CHAPITRE 6 :	PROPOSITION DE NORME	105
LISTE DES FIGURES		111
LISTE DES TABLEAUX		113
BIBLIOGRAPHIE		115

SOLS ARTIFICIELS

FAISABILITE ET UTILISATION LE LONG DES VOIES DE COMMUNICATION

RESUME

Ce rapport contient sous une forme résumée les résultats des expériences réalisées entre 1986-1994 dans le cadre d'un mandat de l'Office fédéral des routes (OFR) et de l'Office de construction de la route nationale 5 (OCRN5) sur la création de sols artificiels. Il présente des informations à caractère académique et d'autres à caractère pratique. Ces dernières sont synthétisées dans le chapitre 6 "Proposition de norme". Dans le chapitre 5 figure un exemple d'utilisation en vraie grandeur de sols artificiels pour l'aménagement de la zone naturelle d'Hauterive - St.-Blaise (canton de Neuchâtel).

Le dispositif expérimental et les objectifs principaux des essais étaient de deux types :

- des parcelles élémentaires de 1 m^2 pour tester et mettre au point des compositions de sols adaptées au développement et au maintien de différents types de végétation;
- des parcelles de 40 à 100 m^2 pour définir les modalités techniques de mise en place de sols artificiels avec différents matériaux et pour tester leur potentiel d'utilisation pour des aménagements paysagers.

Le développement de la végétation, la structuration des sols et leur fertilité ont été suivis et décrits au champ et en laboratoire.

L'étude des parcelles montre qu'un apport de 90 à 120 l/m^2 de compost mélangé sur 30 cm de remblai minéral en place, soit 30% de compost, permet le développement et le maintien d'un gazon fréquemment tondu. Une quantité deux à trois fois plus faible suffit pour des prairies extensives. Les mesures effectuées montrent la bonne perméabilité de ce type de substrat, sa stabilisation rapide par la végétation et ses similitudes de fonctionnement avec des sols naturels.

Le suivi des sols montre qu'ils sont particulièrement adaptés au développement de prairies grasses sèches de grande valeur paysagère et écologique en milieu urbain ou dans des zones d'agriculture intensive. Les sols artificiels peuvent également être arborés, moyennant un entretien suivi des jeunes plants durant les deux premières années suivant leur mise en place.

L'utilisation de compost pour la création de sols artificiels est légalement admise si certaines exigences sont réunies. Ce sont en particulier celles qui visent à limiter les apports de métaux lourds dans les sols. Elles ont pour conséquence que le compost de boues d'épuration ne peut être utilisé qu'en quantité limitée (~5-10 % du volume total).

KÜNSTLICHE BÖDEN
MACHBARKEIT UND VERWENDUNG AN VERKEHRSWEGEN

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht enthält in einer gekürzten Fassung die Ergebnisse der Versuche, die zwischen 1986 und 1994 im Rahmen eines Auftrages des Bundesamtes für Strassenbau (ASB) und des Office de construction de la route nationale 5 (OCRN5) zur Schaffung künstlicher Böden durchgeführt wurden. Er gibt sowohl Informationen wissenschaftlicher Art als auch solche von praktischer Bedeutung wieder. Die letzteren sind im Kapitel 6 "Normvorschlag" zusammengefasst. Kapitel 5 enthält das konkrete Beispiel der Verwendung künstlicher Böden bei der Gestaltung der naturnahen Zone von Hauterive - St-Blaise im Kanton Neuenburg.

Die Versuchsanlage und die Hauptversuchsziele gingen in zwei Richtungen:

- Normparzellen von 1 m^2 für den Test und für die Festlegung der Zusammensetzung von Böden, die sich für das Anlegen und für die Aufrechterhaltung verschiedener Vegetationstypen eignen;
- Parzellen von 40 - 100 m^2 für die Entwicklung von Techniken zur Schaffung künstlicher Böden aus verschiedenen Materialien und zum Test ihrer Verwendungsmöglichkeiten für die Landschaftsgestaltung.

Die Entwicklung der Vegetation, die Struktur der Böden und ihre Fruchtbarkeit sind sowohl im Feld und als auch im Labor beobachtet und beschrieben worden.

Die Untersuchung der Parzellen zeigt, dass man einen häufig gemähten Rasen entwickeln und erhalten kann, wenn man 90 - 120 l Kompost pro Quadratmeter ausbringt und mit 30 cm mineralischem Schüttungsmaterial vermischt, also einen Kompostanteil von 30% herstellt. Für Extensivwiesen genügt die Hälfte bis ein Drittel. Mit diesen Massnahmen erreicht man bei diesem Substrattyp eine gute Durchlässigkeit, eine schnelle Stabilisierung durch Vegetation und Ähnlichkeiten im Verhalten mit natürlichen Böden.

Die Beobachtung der Böden zeigt, dass sie sich besonders eignen für das Anlegen von trockenen Fettwiesen, die im Siedlungsgebiet oder in intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten von grossem landschaftlichen und ökologischen Wert sind. Künstliche Böden kann man auch mit Bäumen bepflanzen, sofern die jungen Pflanzen in den ersten zwei Jahren ständig gepflegt werden.

Die Verwendung von Kompost zur Schaffung künstlicher Böden ist gesetzlich zulässig, wenn gewisse Bedingungen erfüllt sind. Dabei handelt es sich vor allem um Bestimmungen mit dem Ziel, den Eintrag von Schwermetallen in den Boden zu begrenzen. Deshalb kann Kompost aus Klärschlamm nur in beschränkter Menge (ca. 5 - 10% des Gesamtvolumens) verwendet werden.

IMPRESSUM

La direction et la coordination du mandat de création de sols artificiels ont été effectuées par le bureau biol conseils s.a. à Neuchâtel. De nombreux organismes, entreprises et laboratoires ont collaboré et pris part de manière active à la planification, à la mise en place et au suivi des essais. Les auteurs du présent rapport tiennent à remercier nommément :

- MM. Jean-Marc Besson, Toni Candinas et Heinz Häni de la station fédérale de recherches agronomiques de Liebefeld, ainsi que MM. Johanes Dettwiler, Jürg Zihler et Marc Chardonnens de l'Office fédéral de la protection de l'environnement pour leurs recommandations et leurs conseils dans l'utilisation des composts;
- M. Bernard Kübler du Laboratoire de minéralogie, de pétrographie et géochimie de l'Université de Neuchâtel pour ses conseils dans le choix des constituants minéraux;
- MM. Otto Weilenmann, Meinrad Müller et Louis Dubois de l'entreprise OH-Semences à SA à Orbe, Rafz et Biberist, M. Daniel Gindrat de la station de recherches agronomiques de Changins, ainsi que M. Walter Rosser de la Maison Eric Schweizer Semences SA à Thoune pour leurs conseils en matière de semis et d'entretien de la végétation;
- MM. Jean-Pascal Dubois et Jean-Claude Védy du Laboratoire de pédologie de l'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, M. François Toutain du centre de recherche de pédologie biologique de Vandoeuvres-les-Nancy, ainsi que MM. Romain Felber, Nicolas Maire et Mme Marianne Cand du bureau ABConseil et du laboratoire ORLAB à Orbe pour leur suivi pédologique et agronomique des essais;
- M. Jean-Michel Gobat du Laboratoire d'écologie végétale de l'Université de Neuchâtel pour son appréciation de l'évolution de la matière organique dans les sols artificiels;
- Monsieur Gérard Cuendet à Vauderens et MM. Alfred Wittwer et Alain Ducommun du bureau Insecta à Neuchâtel pour leur suivi de la colonisation et du développement de la faune dans les sols artificiels;
- M. Roland Stettler du Laboratoire des eaux de la Ville de Neuchâtel et M. Jean-Martin Ducommun du Laboratoire cantonal des eaux de Neuchâtel pour le contrôle de la qualité des eaux du lac devant les essais de sols artificiels.

Enfin ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'intérêt et le soutien financier de l'office de construction de la route nationale 5 (OCRN5) et de l'office fédéral des routes (OFR). Que MM. Jean-Jacques de Montmollin, Jean Brocard (OCRN5) et Willi Brenneisen (OFR) soient ici tout particulièrement remerciés.

CHAPITRE 1 : CADRE DE L'ETUDE

1.1. Introduction 3

1.2. Emprises des surfaces d'habitat et d'infrastructures 3

1.3. Surfaces de transport 3

1.4. Aménagements paysagers des surfaces de transport 5

1.4.1. Surfaces végétalisées 5

1.4.2. Objectifs des aménagements paysagers 5

1.4.3. Nature des aménagements 5

1.5. Etat des connaissances sur les sols artificiels 6

1.5.1. Essais en Suisse 6

1.5.2. Essais dans d'autres pays 7

1.6. Réglementations en vigueur 7

1.7. Objectifs et contexte des essais de création de sols 10

1.7.1. Cadre de l'étude 10

1.7.2. Objectifs de l'étude 12

1. CADRE DE L'ETUDE

1.1. Introduction

Ce premier chapitre est destiné à préciser le cadre technique, scientifique et réglementaire dans lequel s'insèrent les essais de sols artificiels.

1.2. Emprises des surfaces d'habitat et d'infrastructures

Les surfaces d'habitat et d'infrastructures couvrent en Suisse environ 6 % du territoire. Comme le montre la figure 1 ci-dessous, leur majeure partie est occupée par des bâtiments et leurs terrains attenants, ainsi que par des surfaces de transport. Le solde se répartit entre les aires industrielles, les surfaces d'infrastructures spéciales, les espaces verts et les lieux de détente.

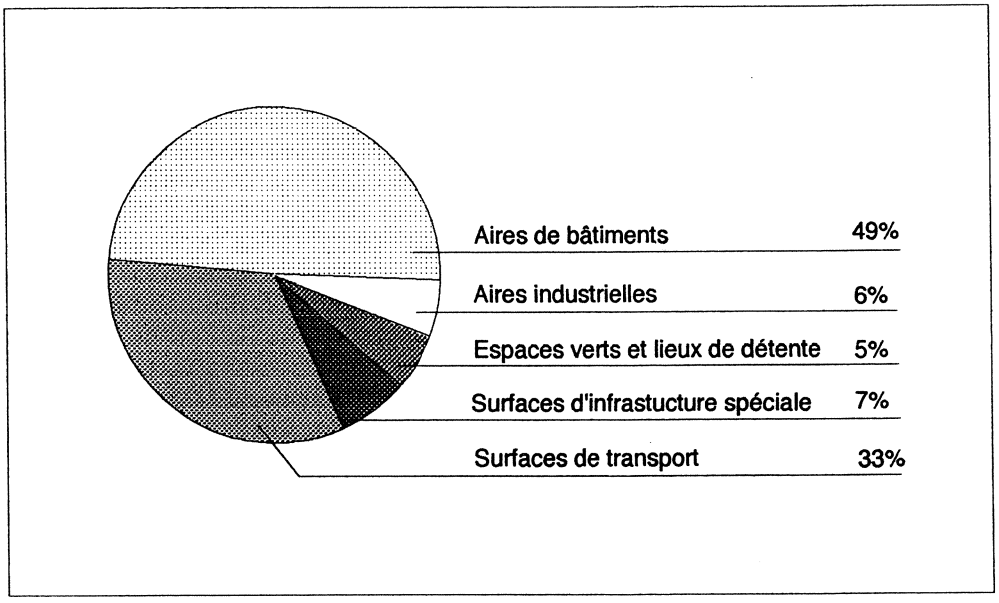


Figure 1 : Surface d'habitat et d'infrastructures en Suisse (OFS, 1979/1985)

1.3. Surfaces de transport

Selon les résultats de l'enquête exécutée en 1989 par l'Office fédéral de l'aménagement du territoire sur les surfaces de transport en Suisse (Hüsler et al., 1989), 86'700 ha du territoire sont occupés par les routes, les chemins de fer, les installations nécessaires au trafic aérien et leurs annexes[1]. Rapportée à la superficie totale du pays, cette surface n'en représente approximativement que les 2%. Elle varie toutefois de manière importante d'une région à l'autre, comme le montre la figure 2 de la page suivante.

1 Installations en relation avec le déroulement du trafic (stationnement) ou destinées aux besoins des usagers des tranports (restaurant, bâtiments de service, aires de repos, etc.).

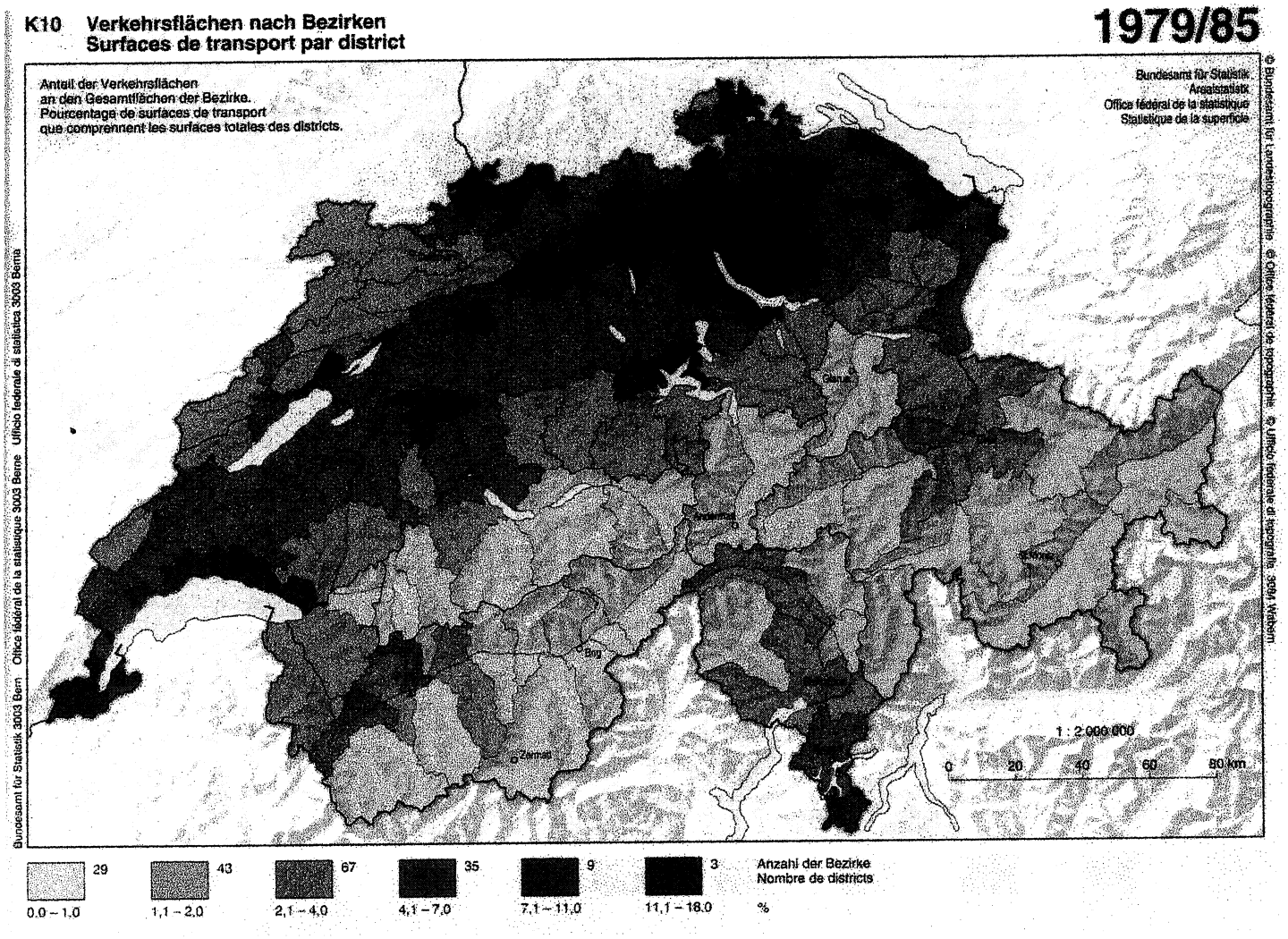


Figure 2 : Pourcentage de surfaces de transport par district en Suisse (OFS, 1979/1985)

Environ deux tiers des surfaces de transport se trouvent sur le Plateau suisse, un cinquième dans les Alpes et un huitième dans le Jura.

La répartition entre les différents modes de transport est illustrée par la figure 3 ci-dessous. A l'échelle suisse, les routes et leurs installations secondaires constituent plus de 80 % des surfaces de transport.

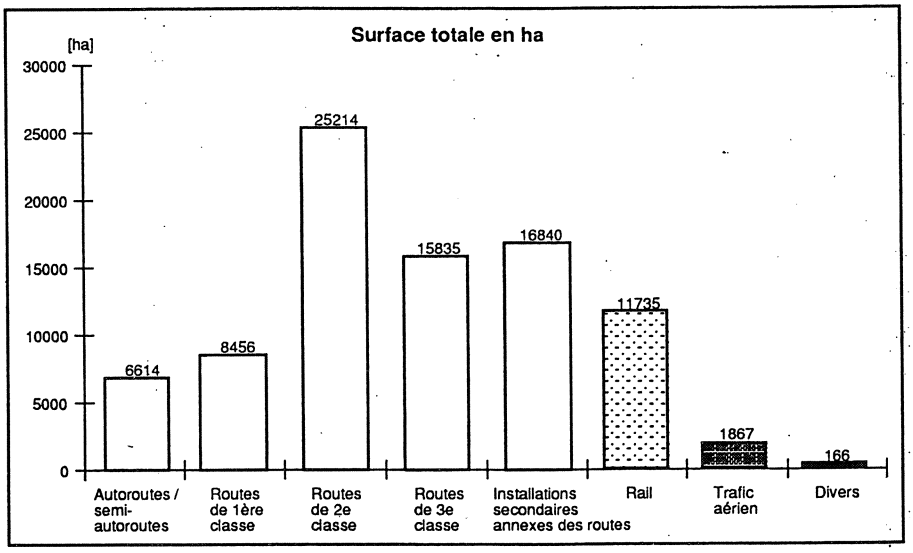


Figure 3 : Répartition des surfaces affectées aux différents modes de transport en Suisse (tiré de Hüsler et al., 1989)

1.4. Aménagements paysagers des surfaces de transport

1.4.1. Surfaces végétalisées

Selon l'étude de Hüsler et al. (1989), deux tiers de la surface totale affectée aux transports sont revêtus, à savoir 56'400 ha (principalement les surfaces de circulation, celles réservées aux cyclistes et aux piétons, les aires de stationnement et les installations de service). Le solde comprend des voies de circulation enherbées (trafic aérien par ex.) et des surfaces sans relation fonctionnelle avec le déroulement du trafic, mais situées à l'intérieur de l'aire des installations principales (bermes, ronds-points) ou liées topographiquement à elles (talus, banquettes). Ces surfaces, qualifiées de résiduelles, sont habituellement végétalisées. Selon l'OFS, elles occupaient, il y a une dizaine d'années, 7'672 ha du territoire suisse (1979/1985). Selon Hüsler[2], elles atteindraient en 1989, 15'773 ha et constitueraient jusqu'à 33 % de la surface des installations principales pour les autoroutes et les semi-autoroutes (35 % selon l'OFS), 44 % pour le trafic aérien (48 % selon l'OFS) et 48 % pour les chemins de fer (40 % selon l'OFS).

1.4.2. Objectifs des aménagements paysagers

L'aménagement de surfaces vertes le long des voies de circulation permet d'améliorer l'intégration paysagère des constructions et d'atténuer leurs impacts négatifs sur l'environnement (diffusion de polluants et de déchets, protection contre le bruit,...). Dans les secteurs d'agriculture intensive, ces surfaces peuvent également servir de refuges à de nombreuses espèces végétales et animales. De plus, elles contribuent à améliorer les échanges entre des écosystèmes isolés les uns des autres. Elles restent toutefois subordonnées aux exigences du trafic et doivent, localement tout au moins, remplir des fonctions de protection contre l'érosion, le vent et les congères, améliorer le guidage optique et protéger les usagers de la route de l'éblouissement par les phares des véhicules.

1.4.3. Nature des aménagements

Suivant l'espace disponible, les milieux environnants, leur localisation par rapport aux ouvrages construits, leurs fonctions dans la circulation et leurs possibilités d'entretien, les surfaces résiduelles sont laissées nues ou, au contraire, sont ensemencées ou plantées. Plusieurs normes, directives ou publications traitent des aspects techniques ou biologiques des semis et des plantations (les principales sont mentionnées dans la bibliographie en fin de rapport).

---

2 La différence s'explique en partie par une augmentation des surfaces de transport, mais vient aussi de la méthode de calcul utilisée.

En fonction de l'aménagement projeté, les sols suivants peuvent être envisagés [3] :

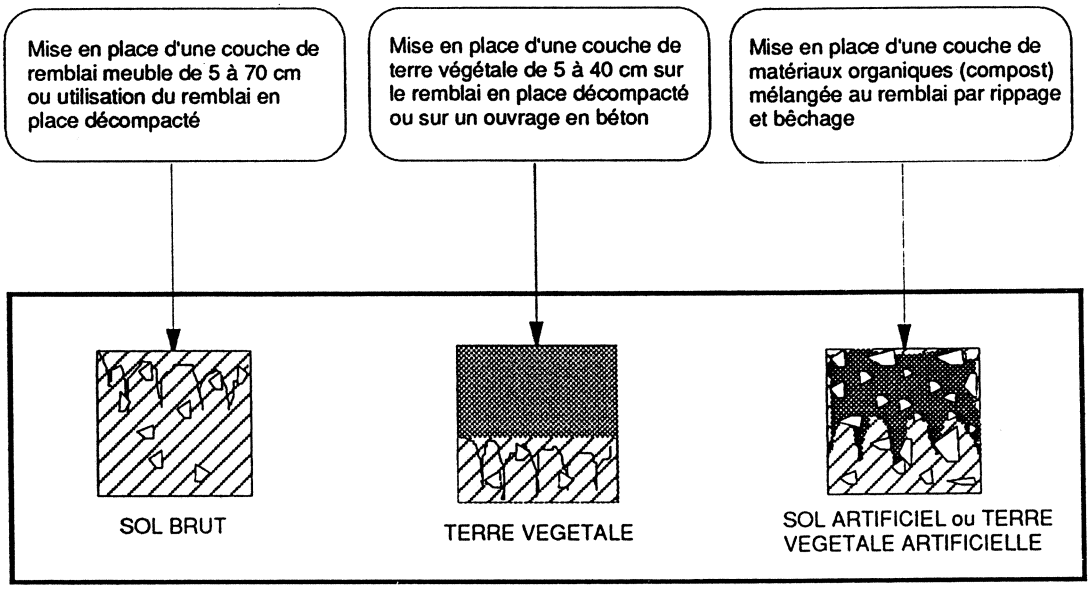


Figure 4 : Profils de sols mis en place le long des surfaces de transport

L'utilisation de remblai brut et la mise en place de terre végétale constituent actuellement les techniques les plus fréquemment utilisées. Elles bénéficient en effet d'expériences de longue date des professionnels suisses de la route et sont explicitées dans la norme SNV 640.581 (1975) de l'association suisse de normalisation : "Terre végétale, dépôt et mise en oeuvre". La création de sols artificiels relève en revanche d'une pratique récente, motivée par un souci d'économie de la terre végétale naturelle, cette dernière faisant parfois défaut dans les zones d'habitation ou étant réservée pour des réaménagements agricoles.

1.5. Etat des connaissances sur les sols artificiels

1.5.1. Essais en Suisse

Les connaissances sur la création et l'évolution de sols artificiels à base de déchets organiques et de déblais ou de roches sont peu nombreuses. Des essais d'incubation et de suivi en lysimètres de mélanges de compost de boues d'épuration des eaux usées (boues de STEP) et de roches non carbonatées ont été réalisés à l'école polytechnique fédérale de Lausanne entre 1985 et 1990 pour connaître la dynamique de l'azote dans un sol reconstitué et mesurer les pertes en polluants par les eaux de percolation (Greter-

[3] Le terme de "sol" est utilisé ici au sens large pour qualifier toute surface à structure meuble, d'épaisseur variable, constituée de une ou plusieurs couches et servant de support à la végétation. Dans la mesure où les sols des bords de routes sont créés par l'homme, ils sont fréquemment qualifiés "d'anthropiques".

Domergue, 1989; Duquet, 1991). Des expériences pratiques ont été conduites ponctuellement en Suisse par des exploitants de gravières et de carrières lors de la réhabilitation des terrains excavés (par exemple Coffrane, NE; Vallorbe, VD; Sion, VS). La remise en état de ceux-ci avec des matériaux minéraux très divers (graviers, fines de lavages, déchets de démolition) additionnés le plus souvent de boues de STEP plus ou moins compostées n'a pas été à chaque fois couronnée de succès, en particulier lorsque les surfaces devaient être restituées à l'agriculture. La variabilité et la multitude des matériaux utilisés rendaient par ailleurs impossible en 1986 l'élaboration d'une synthèse et d'une norme sur la création de sols artificiels.

1.5.2. Essais dans d'autres pays

Des composts urbains ou des boues ont été utilisés aux Etats-Unis dans des opérations de revégétalisation (Bennett et al., 1976; Topper et Sabey, 1986; Pietz et al., 1989), de réhabilitation ou de reconstitution de sols dégradés (Hall et Vigerust, 1983; Sutton et Vimmerstedt, 1974, Stucky et al., 1980). En Europe, les essais les plus conséquents ont été réalisés en France avec des composts d'ordures ménagères ou de boues de STEP (Brun, 1985, CEMAGREF, 1987-1994) et en Allemagne avec des mélanges de boues de STEP et de sable (Skirde, 1985). Les résultats de ces études ont montré que les composts d'ordures et les boues d'épuration constituaient une alternative à l'utilisation de terre ou de tourbe, mais n'étaient pas sans danger pour les eaux et la végétation (contamination par les métaux lourds). Si les quantités apportées étaient connues, les modalités de leur mélange avec le substrat en place (épaisseur, technique) ne faisaient pas toujours l'objet de tests comparatifs. La durée relativement brève de ces expérimentations ne permettait par ailleurs pas de prévoir l'évolution à moyen et long terme de tels sols.

1.6. Réglementations en vigueur en Suisse

La figure 5 de la page suivante illustre le contexte légal dans lequel s'insère la création de sols artificiels. Leur réalisation est soumise aux exigences des ordonnances sur le traitement des déchets (OTD, 1990), sur les substances dangereuses (Osubst, 1986) et sur les polluants du sol (Osol, 1986), ainsi qu'à la réglementation sur l'utilisation des matériaux terreux et la fabrication de terres végétales artificielles à partir de déchets[4].

[4] Information N° 5 (1993): *Exigences requises pour la fabrication de terres végétales artificielles à partir de déchets*, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) et Station fédérale de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement (FAC)

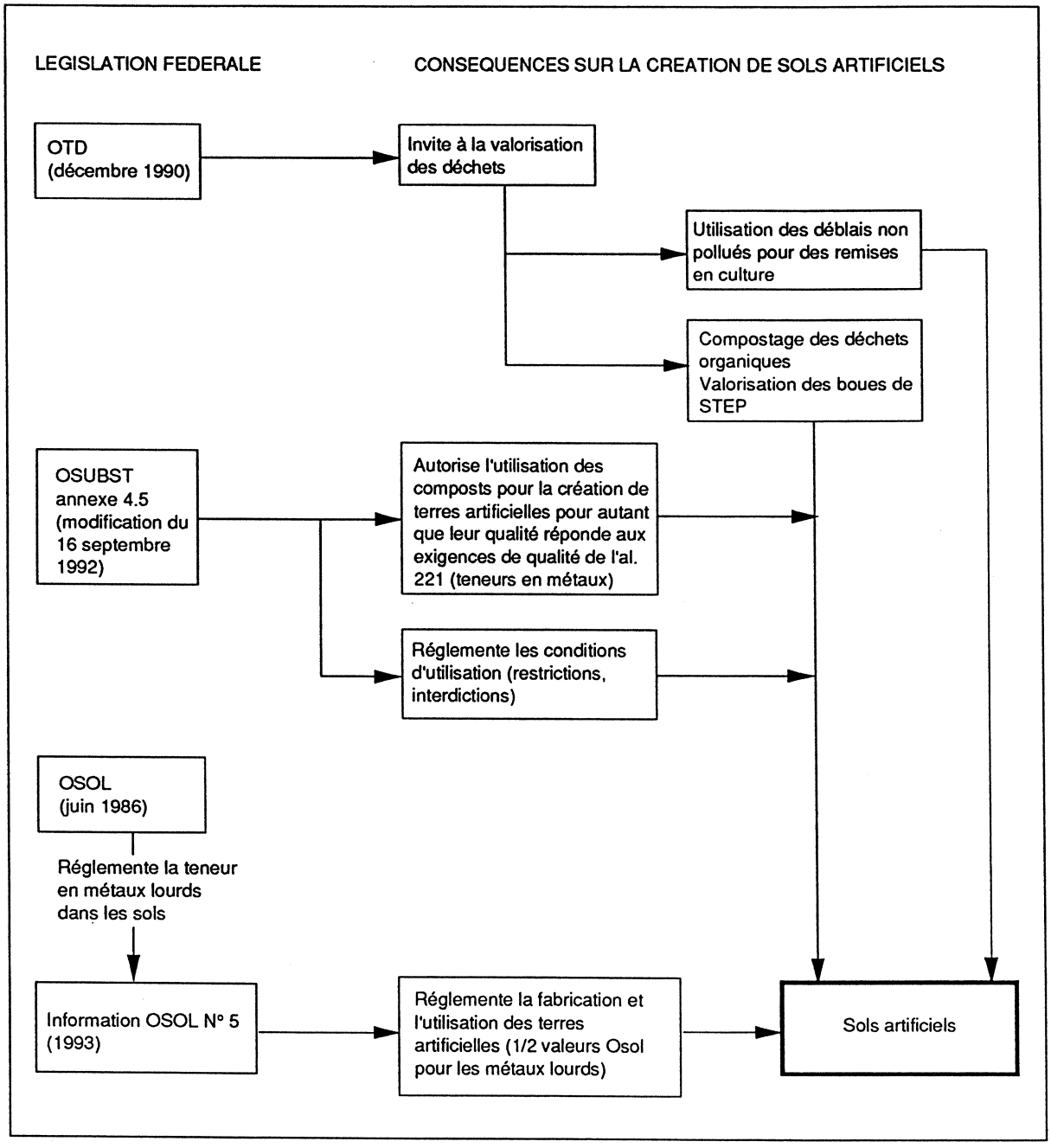


Figure 5 : Exigences légales pour la réalisation de sols artificiels

L'**OTD** encourage la valorisation des déchets organiques, ainsi que celle de matériaux terreux pour des remises en culture.

L'**Osubst** précise que les composts de boues ou de déchets verts peuvent être valorisés

si leurs propriétés permettent une utilisation sans danger pour l'environnement et l'homme. Depuis la modification de l'ordonnance du 16 septembre 1992, les composts sont assimilés à des engrais azotés et leur utilisation est précisée de la manière suivante :

- leur épandage doit être limité aux périodes où les plantes absorbent de l'azote;
- leur utilisation est interdite dans les régions protégées par le droit fédéral ou cantonal, ainsi que dans les roselières, les marais, les haies et les bosquets, aux bords des lacs et des rivières et dans les zones S1 de protection d'eaux souterraines;
- les prescriptions sur les quantités maximales de compost utilisables en agriculture[5] ne s'appliquent pas à la constitution de terres artificielles pour lesquelles seules des directives de qualité sont fixées.

Pour que les composts puissent être utilisés pour la création de terres artificielles, leur teneur en métaux ne doit pas dépasser les valeurs prescrites dans le tableau 1 ci-dessous. Si les composts comprennent des boues, ils sont considérés comme boues d'épuration au sens de l'article 22 de l'annexe 4.5 de l'Osubst et bénéficient d'exigences de qualité moins strictes.

Métaux	compost [g/t]	boues [g/t]
Cd	1	5
Co	-	60
Cr	100	500
Cu	100	600
Ni	30	80
Mo	-	20
Pb	120	500
Zn	400	2'000

Tableau 1 : Valeurs limites pour les métaux lourds dans les composts et les boues (Osubst, révision 1992)

Ces micropolluants inorganiques s'accumulent dans les sols et contaminent la chaîne alimentaire. Ils peuvent perturber les activités enzymatiques des micro-organismes du sol ou de la flore et créer des troubles neurologiques ou rénaux chez l'animal et chez l'homme.

L'**Osol** fixe des valeurs indicatives sur les teneurs en métaux lourds dans les sols de manière à préserver leur fertilité (cf. tableau 2).

5 25 t MS/ 3 ans pour du compost, 5 t MS/ 3 ans pour des boues

Selon les recommandations de l'OFEFP (1993) et de la station fédérale de recherches agronomiques de Liebefeld (**Information Osol no 5**), les teneurs totales en métaux lourds des terres artificielles (fraction inférieure à 2 mm) doivent être au moins inférieures de moitié aux valeurs indicatives de l'Osol (cf. tableau 2) :

Métaux	Valeurs indicatives (Osol) [g/t]	Valeurs limites dans les terres artificielles [g/t]
Cd	0.8	0.4
Co	25	12.5
Cr	75	37.5
Cu	50	25
Ni	50	25
Pb	50	25
Zn	200	100
Hg	0.8	0.4

Tableau 2 : Valeurs limites en métaux lourds des sols et des terres artificielles

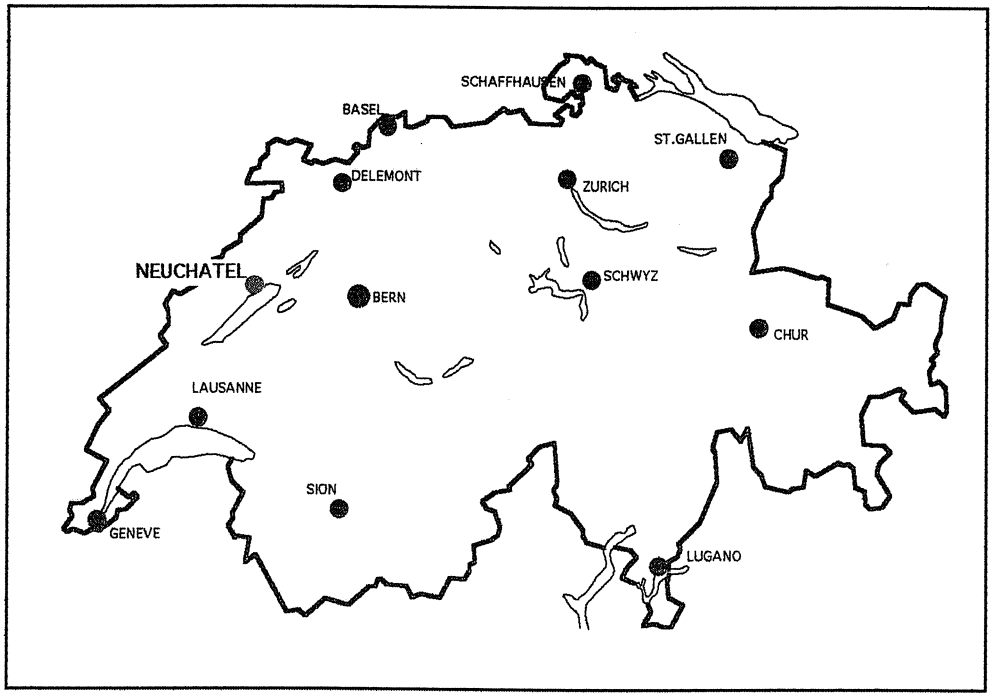
Les teneurs en éléments nutritifs des terres artificielles sont également réglementées. La teneur en azote total ne doit pas dépasser 0,3 % de la matière sèche. Celles en phosphore et en potasse doivent correspondre à des teneurs "satisfaisantes" selon le barême de l'état de fertilité des sols des stations fédérales de recherches agronomiques. En raison en particulier de leur richesse en azote, les terres artificielles ne peuvent être utilisées dans les zones de protection des eaux.

En résumé, d'une part, des composts de déchets organiques peuvent être utilisés pour des sols artificiels s'ils respectent les exigences de l'Osubst, d'autre part leurs quantités sont limitées par les teneurs finales du sol en métaux lourds et en éléments nutritifs.

1.7. Objectifs et contexte des essais de création de sols

1.7.1. Cadre de l'étude

Les essais de sols artificiels qui font l'objet du présent rapport ont été réalisés à Neuchâtel dans le cadre de la planification des aménagements paysagers de la route nationale 5 (N5) entre Serrières et St-Blaise (cf. figure 6 à la page suivante). Sur ce tronçon, de nouvelles rives ont été gagnées sur le lac par remblayage avec les matériaux minéraux extraits des tunnels creusés sous la ville. Pour les végétaliser, près de 150'000 m^3 de terre végétale étaient nécessaires. Afin de pallier à un éventuel manque de terre, l'Office de construction de la route nationale 5 (OCRN5) et l'Office fédéral des routes (OFR) ont décidé de lui prévoir un substitut. Ils ont décidés de présenter ces études sous la forme d'un rapport de recherche du DFTCE.



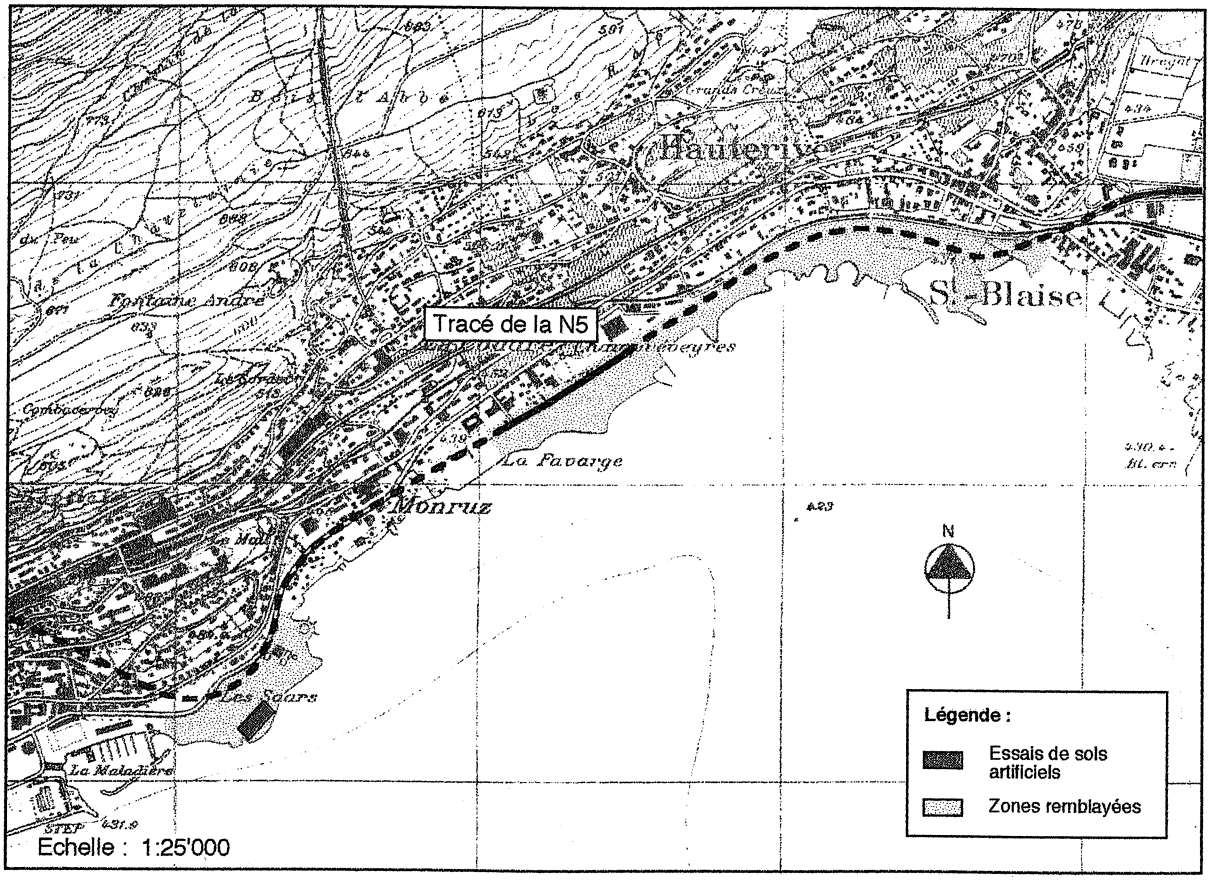


Figure 6 : Localisation des essais de sols artificiels

Des sols artificiels constitués d'un mélange de compost et des matériaux minéraux des remblais ont été proposés. Leur mise en place a débuté à titre expérimental au printemps 1986 pour une durée de 5 ans. En 1991, l'intérêt des premiers résultats obtenus a justifié la poursuite des essais sous une forme simplifiée.

1.7.2. Objectifs de l'étude

Les essais avaient pour objectifs de caractériser et de préciser la composition et l'évolution de mélanges de déchets urbains compostés et de roches. Pour ce faire, les étapes suivantes ont été réalisées :

- test de différents constituants organiques et minéraux tels que composts de boues de STEP, compost de déchets verts, graves calcaires, marnes, moraines et alluvions;
- définition d'une épaisseur et d'une composition assurant au sol artificiel une rétention hydrique et nutritive comparable à terme à celle d'un sol naturel;
- évaluation des risques de pollution des eaux souterraines dus à l'utilisation de déchets.

Dans le cadre de l'aménagement de plusieurs hectares de remblais, les aspects techniques, économiques et paysagers des sols artificiels ont été également pris en compte de manière à pouvoir élaborer en fin d'étude une norme destinée aux utilisateurs potentiels (ingénieurs et entrepreneurs).

CHAPITRE 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1. Introduction 15

2.2. Caractéristiques du site 15

2.3. Constituants des sols 15

2.3.1. Composants minéraux 15

2.3.2. Composants organiques 18

2.4. Parcelles d'essais 23

2.4.1. Concept général 23

2.4.2. Sols expérimentaux 25

2.4.3. Sols prototypes 29

2.5. Végétalisation et entretien 29

2.5.1. Sols expérimentaux 29

2.5.2. Sols prototypes 31

2.6. Suivi scientifique 33

2.6.1. Croissance de la végétation sur les sols artificiels 33

2.6.2. Fertilité des sols artificiels 33

2.6.3. Evaluation de l'impact des sols artificiels sur les eaux 35

2.6.4. Analyse des résultats 35

2.6.4.1. Production végétale et composition floristique 35

2.6.4.2. Caractéristiques bio-physico-chimiques des sols et des eaux 36

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1. Introduction

Pour compléter les données lacunaires de la littérature et pour préciser les conditions de réalisation puis d'entretien des sols artificiels, un dispositif expérimental a été mis en place sur les rives mêmes du lac de Neuchâtel.

2.2. Caractéristiques du site

Le site d'essais se trouve en bordure du lac à une altitude de 431,5 m sur une zone de remblais destinés à la construction de la N5 et à ses aménagements annexes (Nid-du-Crô, Neuchâtel, cf. également figure 6). Le sous-sol est constitué de moraines limoneuses et de roches calcaires rendues peu perméables en surface par le passage des machines de chantier. Pour pallier à l'hétérogénéité du terrain et faciliter la percolation des eaux, leur surface a été rippée au bulldozer et recouverte d'une couche de 50 cm de débris calcaires (ø 0-10 cm) issus du creusement du tunnel.

Les caractéristiques climatiques du littoral nord neuchâtelois sont les suivantes[6]:

- précipitations moyennes annuelles : 976 mm;
- température moyenne annuelle : 9.2 °C avec 0.8 °C en hiver, 9.0 °C au printemps, 17.7 °C en été et 9.5 °C en automne;
- insolation : 1'673 h/an (moyenne 1931 à 1980).

2.3. Constituants des sols

2.3.1. Composants minéraux

Les calcaires du Crétacé, qui constituent la majorité des roches mises en remblai au bord du lac de Neuchâtel, ont été utilisés de 1986 à 1988 pour la création des sols artificiels (Valanginien inférieur, Hauterivien inférieur). Leurs caractéristiques granulométriques, minéralogiques et chimiques sont résumées ci-dessous et dans les tableaux 3 et 4 des pages suivantes.

Valanginien inférieur : Le Valanginien inférieur, dit aussi marbre bâtard, est une roche abondante dans la région de Neuchâtel. Les analyses granulométriques et minéralogiques effectuées sur les déblais du creusement des tunnels sous la ville en 1986 sont présentées dans le tableau 3. Produits par l'abrasion de la roche par un tunnelier, ces fragments sont avant tout constitués d'éléments grossiers (entre 1 et 10 cm). Leur densité apparente est de 1.6.

6 Données de l'observatoire de Neuchâtel (1901 à 1980)

ROCHE DATE	Valanginien inf. (marbre bâtard) 1986	Hauterivien. inf. (marnes bleues) 1986
pH (H2O)	8.4	8.0
Humus [%]	0.0	1.0
Argile [%] / < 2 µm	2	21
Limon fin [%] / 2-20 µm	4	31
Limon grossier [%] / 20-50 µm	1	10
Sable fin [%] / 50-200 µm	2	7
Sable moyen [%] / 200-630 µm	3	6
Sable grossier [%] / 630-2000 µm	5	3
Gravier fin [%] / 2000-6300 µm	13	11
Squelette [%] / > 6300 µm	70	11
CaO Al [mg/100g]	22'400	21'700
CaO tot. [mg/100g]	51'200	35'300
CEC [meq/100g]	6.4	15.8
Carbone [%]	10.8	7.6
en équivalent calcite [%]	89.8	63.3
Minéralogie par diffraction rayon X *		
Calcite	1.00	1.00
Quartz	+	0.35
Mica	-	0.01
Fraction < 2µm		
Smectite	0.21	0.30
Micas	0.35	0.36
Kaolinite	0.44	0.34
Quartz	8.30	6.20
Plagioclase	-	1.00
Fraction 2-16 µm		
Smectite	0.16	0.20
Micas	0.36	0.42
Kaolinite	0.48	0.38
Quartz	2.00	4.00
Feld-K	0.50	-

*Les résultats sont exprimés selon un ordre de grandeur relatif et indicatif qui permet de comparer les échantillons entre eux

Tableau 3 : Analyses granulométriques et minéralogiques du Valanginien et de l'Hauterivien

La fraction fine du Valanginien (< 2 mm) est constituée aux 2/3 (poids) de sables, dont la moitié sont des sables grossiers. Les argiles sont peu abondantes et ne représentent que 12% (poids) de la fraction fine. L'argile minéralogique dominante est la kaolinite, dont la capacité d'échange cationique est faible. La diversité minéralogique de la roche est faible.

Les résultats des analyses effectuées sur la fraction fine sont présentés dans le tableau 4.

ROCHE DATE	Val. inf.* 86/88	Haut. inf. 88	Moraines * 88	Alluvions 88
Densité apparente	1.6	1.0	1.3	1.4
pH (H2O)	8.7	8.3	8.4	8.7
pH (AL)	5.9	5.7	5.4	5.3
SELS (mg/100 g)	25	230	41	38
Argile [%]	8	26	14	5
Limon [%]	18	30	25	9
Sable [%]	75	44	61	86
Humus [%]	0.1	0.8	0.2	0.1
Eléments nutritifs solubles à l'eau (mg/100g de sol sec)				
N-NO3	0.3	0.2	0.3	0.2
N-NH4	0.4	0.4	0.6	0.2
P2O5	0.2	<0.1	0.1	0.1
K20	1.1	18.4	1.6	1.5
CaO	7.6	88.1	13.0	13.2
MgO	0.8	16.2	2.5	1.0
Fe	0.03	0.01	0.01	0.07
Na	1.7	4.7	2.0	2.0
B	0.01	0.03	0.02	<0.01
Eléments nutritifs solubles au réactif Egner-Riehm (réserves du sol) (mg/100g de sol sec)				
CaO	23350	22200	20150	20300
P2O5	3	2	2	6
K20	3	44	8	3
MgO	89	308	295	143
Mn	6	23	38	17

* moyenne de 2 analyses

Tableau 4 : Analyses physico-chimiques des constituants minéraux

Les concentrations en éléments nécessaires à la croissance de la végétation sont faibles (essentiellement du calcium).

Pour préciser les teneurs naturelles en métaux du Valanginien, une analyse de leurs teneurs totales a été effectuée sur la fraction fine. Aucun dépassement des valeurs indicatives de l'Osol n'a été constaté, les valeurs étant inférieures à 10 g/t pour le cobalt, le chrome, le cuivre, le nickel, le plomb ainsi que le zinc, et égale à 0,2 g/t pour le Cd.

Hauterivien inférieur : L'Hauterivien inférieur, dit marne bleue, provient aussi du creusement des tunnels sous la ville. Sa densité apparente est de 1.0. Les analyses granulométriques du tableau 3 montrent que sa fraction graveleuse (> 2 mm) est faible et que ses teneurs en argiles et en limons fins sont élevées. La composition minéralogique de l'Hauterivien est proche de celle du Valanginien. Toutefois, les argiles gonflantes, de type smectite, sont plus abondantes. Ces minéraux confèrent à la roche une capacité d'échange cationique plus élevée que celle du Valanginien et une rétention en eau plus grande. Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur la fraction fine permettent de constater que les marnes sont relativement riches en potassium, en magnésium et en manganèse (cf. tableau 4).

D'autres matériaux extraits de la tranchée de la N5 entre Monruz et St-Blaise ont également été utilisés en cours d'essais (moraines et alluvions). Comme le Valanginien, ils sont riches en squelette et leur fraction fine est constituée en grande partie de sables calcaires (cf. tableau 4).

2.3.2. Composants organiques

Des composts à base de sciures et de boues digérées des STEP de Colombier et de Saanen, ainsi que des composts de déchets verts produits dans les cantons d'Argovie et de Zurich ont servi à la création des sols artificiels. Les quantités et les proportions utilisées tenaient compte des résultats de l'inventaire des déchets organiques du canton de Neuchâtel et de leurs perspectives de production (1986). Leur prix à l'échelle de la Suisse variait entre Fr. 10.- et 35.- par m^3 en 1986 suivant qu'il était ou non criblé (au vu de l'augmentation de la production de compost de déchets organiques ménagers en Suisse, ces prix ont plutôt baissé au cours des années et se situaient entre Fr.5 .- et 25.- par m^3 en 1993 (OFEFP, Umwelt-Materialen, Nr. 21,1993).

Les caractéristiques principales de ces composts sont décrites ci-dessous et résumées dans les tableaux 5, 6 et 7 des pages suivantes.

Composts de boues de STEP (Colombier et Saanen, 1986, 1987) : A base de boues digérées, ils sont compostés avec de la sciure. Leur densité apparente varie entre 0,25 et 0,5.

Comme le tableau 5 permet de le constater, les composts de boues sont riches en éléments nutritifs, phosphore en particulier, puisque cet élément extrait des eaux usées par précipitation au chlorure ferrique se retrouve dans les boues d'épuration.

PROVENANCE DATE	Colombier 4/86	Colombier 7/86	Colombier 5/87	Saanen 5/88	Saanen 6/88	Valeurs de référence [*] moyenne	 variation
pH	6.2	6.7	6.7	6.7	7.0	6.8	5.9-8.0
Matière sèche [%MF]	31.0	-	34.9	44.7	62.9	40.0	27.9-53.1
Matière organique [%MS]	76.8	-	75.2	51.2	45.8	68.0	50.0-86.5
Humus [% MS]	55.9	-	-	-	-	-	-
Carbone [%MS]	45.2	-	44.2	30.1	26.9	40.0	29.4-50.9
Cendres [%MS]	23.2	-	24.8	48.8	54.2	32.0	13.5-50.0
C/N	28	-	33	23	29	20	15-29
MO/P	39	-	72	26	25	25	19-53
ELEMENTS FERTILISANTS [mg/100g MS]							
N tot	1'620	-	1'350	1'302	915	1'600	1'000-2'200
N-NH4	-	-	10	9	5	-	-
P2O5	4'281	-	2'380	4'515	3'886	1'700	600-3'700
K20	148	-	190	253	188	240	80-1'000
Ca	3'031	-	3'090	6'412	8'951	2'100	500-5'900
Mg	150	-	190	370	278	290	100-640
METAUX LOURDS (ppm)							
Mo	<7	2	<7	8	6	6	5-7
Cd	5	7	3	1	1	3	0.9-5.4
Co	7	7	4	6	6	6.4	0.2-10
Ni	27	18	21	17	16	34	10-153
Cr	67	65	53	34	33	99	8-922
Cu	201	230	203	157	123	151	43-339
Pb	403	520	631	134	97	133	43-350
Zn	882	1'020	614	945	846	789	265-1'600
MESURES BIOLOGIQUES							
Activité CO2 [µg CO2 /g MS* h]	121.7	56.1	102.7	96.9	142.3	-	-
Réactivité (%)	82.0	85.0	88.0	59.0	48.0	-	-
Minéral. MO [µg MO/g MS*15 j]	16'630	8'008	14'087	10'199	12'489	-	-
Biomasse ATP [ng ATP/g MS]	7'137	9'067	9'667	10'626	9'068	-	-
MIN Corg/ATP [g CO2/g ATP*h]	2.3	0.9	1.5	1.0	1.4	-	-
Dégage. de CO2 après 4 j [µg CO2/g MS*h]	106.7	50.2	94.0	73.1	100.6	-	-
Dégage. de CO2 après 9 j [µg CO2/g MS*h]	88.0	42.8	83.1	43.5	48.5	-	-
Dégage. de CO2 après 15 j [µg CO2/g MS*h]	113.7	63.9	87.8	47.3	34.1	-	-

[*] d'après analyses de composts de boues et de supports carbonés produits en routine dans 19 installations (bioréacteurs BAV, Weiss et Triga en France, en Italie et en Suisse) (EPFL, 1985)

Tableau 5 : Analyses des composts de boues de station d'épuration

De manière à connaître la fertilité des sols artificiels qui allaient être mis en place, les composts ont été soumis à des solutions d'extraction plus ou moins fortes permettant de mesurer les teneurs en azote, phosphore, potassium, calcium et en magnésium disponibles pour la végétation (éléments immédiatement disponibles = solubles à l'eau;

disponibles à moyen terme après action des racines = solubles au réactif Egner-Riehm : AL) et celles qui ne le sont pas (résidu insoluble). Les résultats sont illustrés par la figure 7 ci-dessous :

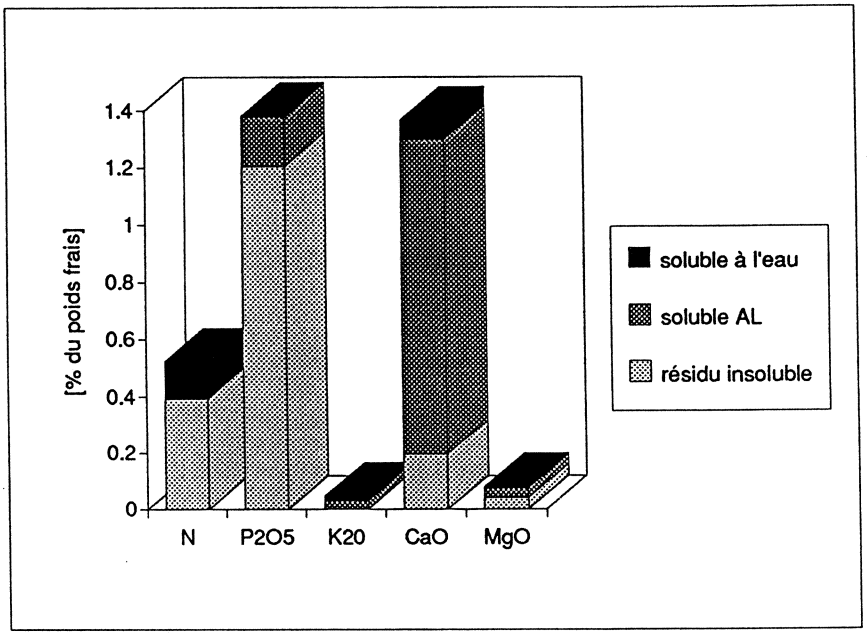


Figure 7 : Teneurs relatives en éléments nutritifs du compost de boues (Colombier, 1986)

Plus des 2/3 de l'azote et du phosphore se trouvent dans les composts de boues sous des formes peu disponibles pour la végétation. Liés vraisemblablement à des molécules organiques, des oxydes ou des hydroxydes, ces éléments ne peuvent être libérés dans la solution du sol qu'au travers des processus de minéralisation, de dissolution ou d'échange de cations. Leur risque de lessivage est par conséquent relativement limité (phosphore en particulier). Inversement, plus des 3/4 du calcium sont facilement échangeables.

Les teneurs en métaux lourds des composts utilisés sont relativement élevées et dépassent pour le cadmium, le plomb, le cuivre et le zinc les valeurs limites de l'Osubst prescrites pour les composts, mais respectent celles prévues pour les boues (cf. tableau 2).

De manière à évaluer la disponibilité des métaux pour la végétation et par conséquent les risques de contamination, une extraction séquentielle a été réalisée sur le compost de Colombier. Le tableau 6 de la page suivante présente les résultats obtenus :

Métaux	disponibles pour la végétation (%)	liés à des carbonates (%)	résidu insoluble [%] (= très peu disponible)
Cd	0.7	12.1	87.2
Cu	0.9	0.5	98.6
Pb	0.6	0.2	99.2
Zn	0.2	4.8	95.0

Tableau 6: Solubilité des métaux dans le compost de Colombier 1986 (méthode Tessier, 1979, modifiée Orlab, 1991)

Sur la base de cette extraction, moins de 1% des teneurs totales des métaux est facilement accessible à la végétation. Une fraction non négligeable du cadmium et du zinc liée à des carbonates pourrait toutefois passer en solution suite à leur dissolution.

La biomasse bactérienne des composts de boues utilisés est importante et active comme le montrent respectivement les résultats des mesures d'adénosine triphosphate (ATP, molécule présente dans toute cellule vivante et servant au stockage de l'énergie) et celles du dégagement de CO_2 (indicateurs de l'intensité du métabolisme). A titre de comparaison, la biomasse bactérienne d'un sol naturel contenant 1 à 5% de matière organique est 10 à 20 fois inférieure à celle des composts.

Pour permettre l'emploi des différents composts susceptibles d'être produits dans le canton de Neuchâtel, les composts de boues ont été mélangés aux composts de déchets verts à raison de 1/3 des premiers et 2/3 des seconds. Les caractéristiques du mélange sont présentées dans le tableau 7 de la page suivante.

PROVENANCE DATE	Composts de déchets verts Muri 5/87	Muri 5/88	ROM 7/88	Valeur de référence [*] moyenne	variation	Mélange de 2 composts
pH	7.8	7.7	8.0	7.8	7.0-8.2	7.8
Matière sèche [%MF]	37.4	41.1	66.4	46	35-60	37.4
Matière organique [%MS]	42.3	40.6	27.3	35	20-50	45.2
Cendres [%MS]	57.7	59.4	72.7	65	50-80	54.8
C/N	18	15	16	-	-	19
MO/P	144	183	121	-	-	97
ELEMENTS FERTILISANTS (mg/100g MS)						
N tot	1'380	1'575	1'027	1'300	600-1'600	1370
N-NH4	3	2	-	-	-	3
P2O5	670	506	515	700	300-1000	1060
K20	830	635	765	900	300-1800	740
Ca	4'170	5'981	8'540	7'300	4'000-10'000	4840
Mg	550	590	1'073	800	300 -1200	540
METAUX LOURDS (ppm)						
Mo	<6	7	7	3	1-3	7
Cd	1	<1	<1	0.9	0.5-1	1
Co	3	7	6	4	1-5	4
Ni	17	34	32	23	10-30	22
Cr	31	49	63	32	20-60	44
Cu	16	46	44	51	20-60	80
Pb	59	71	152	90	30-120	193
Zn	200	223	169	275	100-400	298
MESURES BIOLOGIQUES						
Activité CO2 [µg CO2 /g MS* h]	31.8	38.6	55.2	-	-	42.8
Réactivité (%)	104	83	78	-	-	94
Minéralis. de la MO [µg MO/g MS*15 j]	5'281	4'821	6'504	-	-	6'982
Biomasse ATP [ng ATP/g MS]	4'115	3'103	7'110	-	-	5'260
MIN Corg/ATP [g CO2/g ATP*h]	1.3	1.6	0.9	-	-	1.3
Dégage. de CO2 après 4 j [µg CO2/g MS*h]	32.8	33.8	46.9	-	-	41.0
Dégage. de CO2 après 9 j [µg CO2/g MS*h]	34.2	27.9	36.4	-	-	38.6
Dégage. de CO2 après 15 j [µg CO2/g MS*h]	33.6	14.7	18.2	-	-	66.0

[*] d'après analyses de 54 composts de jardins privés et de 82 composts de places de compostage
(Boues d'épuration et composts en agriculture, cahier de la FAC n° 9, 1992)

Tableau 7 : Analyses des composts de déchets verts et du mélange composts de boues (1/3) - déchets verts (2/3)

Composts de déchets verts (Muri, AG; ROM, ZH; 1987, 1988) : Leur densité apparente est comprise entre 0,3 et 0,5. Comme les composts de boues, ils sont riches en éléments nutritifs (cf. figure 8 ci-après et tableau 7).

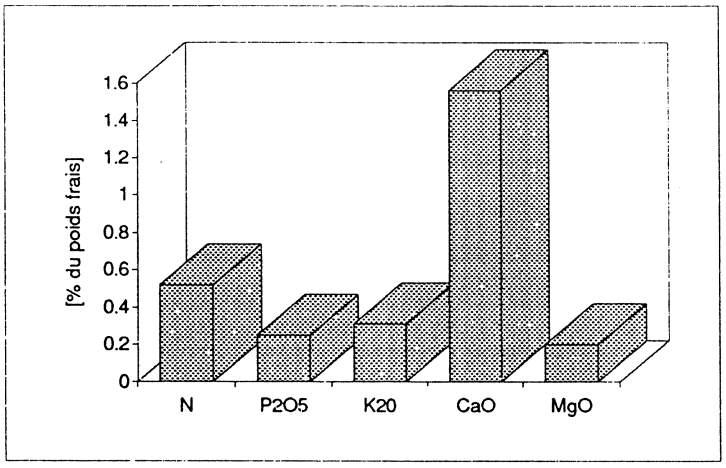


Figure 8 : Teneurs en éléments nutritifs du compost de déchets verts de Muri [% du pds frais]

Les composts de déchets verts possèdent des teneurs en azote, en phosphore et en potasse proches les unes des autres, alors que celles des composts de boues sont très différentes d'un élément à l'autre. Ils ont des teneurs en azote équivalentes à celles des composts de boues. Ils sont en revanche plus riches en potasse, mais plus pauvres en phosphore.

Leurs teneurs en métaux lourds sont inférieures aux valeurs limites de l'Osubst à l'exception du nickel et du plomb dont la présence pourrait être liée à du matériel végétal prélevé en bordure de routes ou en zone urbaine.

La biomasse microbienne des composts de déchets verts est inférieure à celle des composts de boues. Des différences de maturité et de biodégradabilité de la matière organique en sont vraisemblablement à l'origine.

2.4. Parcelles d'essais

2.4.1. Concept général

Pour répondre aux objectifs de l'étude, deux types principaux d'essais ont été réalisés :

- des essais expérimentaux, mis en place manuellement sur des surfaces inférieures ou égales à 1 m^2, permettant de comparer des mélanges d'épaisseur différentes, plus ou moins riches en compost, et de suivre le développement de leur végétation en fonction de traitements différenciés (arrosage, engraissement, piétinement);
- des essais prototypes mis en place à la machine sur des surfaces supérieures à 40 m^2 permettant d'évaluer la faisabilité technique, le coût, ainsi que les possibilités d'aménagements paysagers de quelques sols artificiels.

Une présentation schématique de l'intégralité du site d'essais figure à la page suivante.

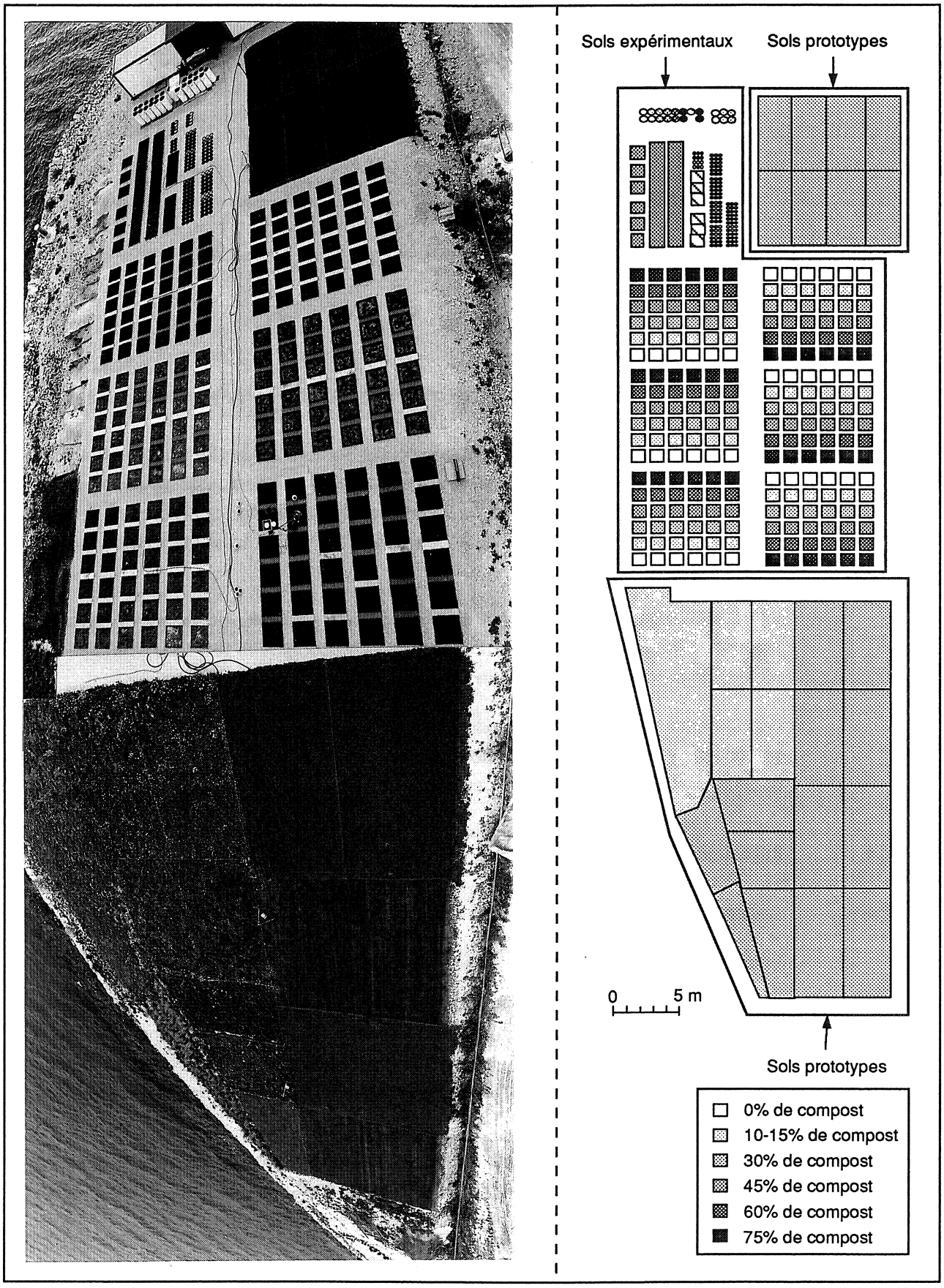


Figure 9 : Présentation schématique des essais

2.4.2. Sols expérimentaux

Ces sols sont réalisés avec du Valanginien inférieur, de l'Hauterivien inférieur (marnes) et du compost de boues de STEP mélangés dans les proportions suivantes :

Mélange	Valanginien % Vol. frais du mélange	Haut. inf. % Vol. frais du mélange	Compost de boues % Vol. frais du mél. (% Pds sec du mél.)
1	100	0	0
2	85	0	15 (3.5)
3	70	0	30 (8.1)
4	55	0	45 (14.4)
5	40	0	60 (23.6)
6	25	0	75 (38.2)
7	75.0	25.0	0
8	63.8	21.2	15 (3.5)
9	52.5	17.5	30 (8.1)
10	41.3	13.7	45 (14.4)
11	30.0	10.0	60 (23.6)
12	18.8	6.2	75 (38.2)

Tableau 8 : Composition des mélanges

Le volume de chacun des constituants a été mesuré en bennes de trax (0,15 ou 0,25 m^3). Préalablement, le Valanginien avait été tamisé sur un crible à mailles de 35 mm, placé à 45°, de manière à éliminer la plupart des cailloux de taille supérieure à 20 mm. Les matériaux ont été étendus manuellement en couche sur une surface damée de 100 m^2. Un premier mélange a été fait au motoculteur, il a été ensuite mis en tas au trax et réétendu. L'opération a été répétée deux à trois fois jusqu'à l'obtention d'un substrat homogène.

Les 12 mélanges sont mis en place dans des casiers de bois de 1 m^2, sans fond, posés sur le remblai. Trois épaisseurs de sol sont réalisées : 15, 30 et 45 cm (cf. figure 10). La combinaison de ces variantes est à la base de la création d'une surface type de 36 carrés dont une représentation schématique figure à la page suivante. Cette surface type est répétée 6 fois afin de permettre un traitement statistique des données et l'application d'entretiens différenciés.

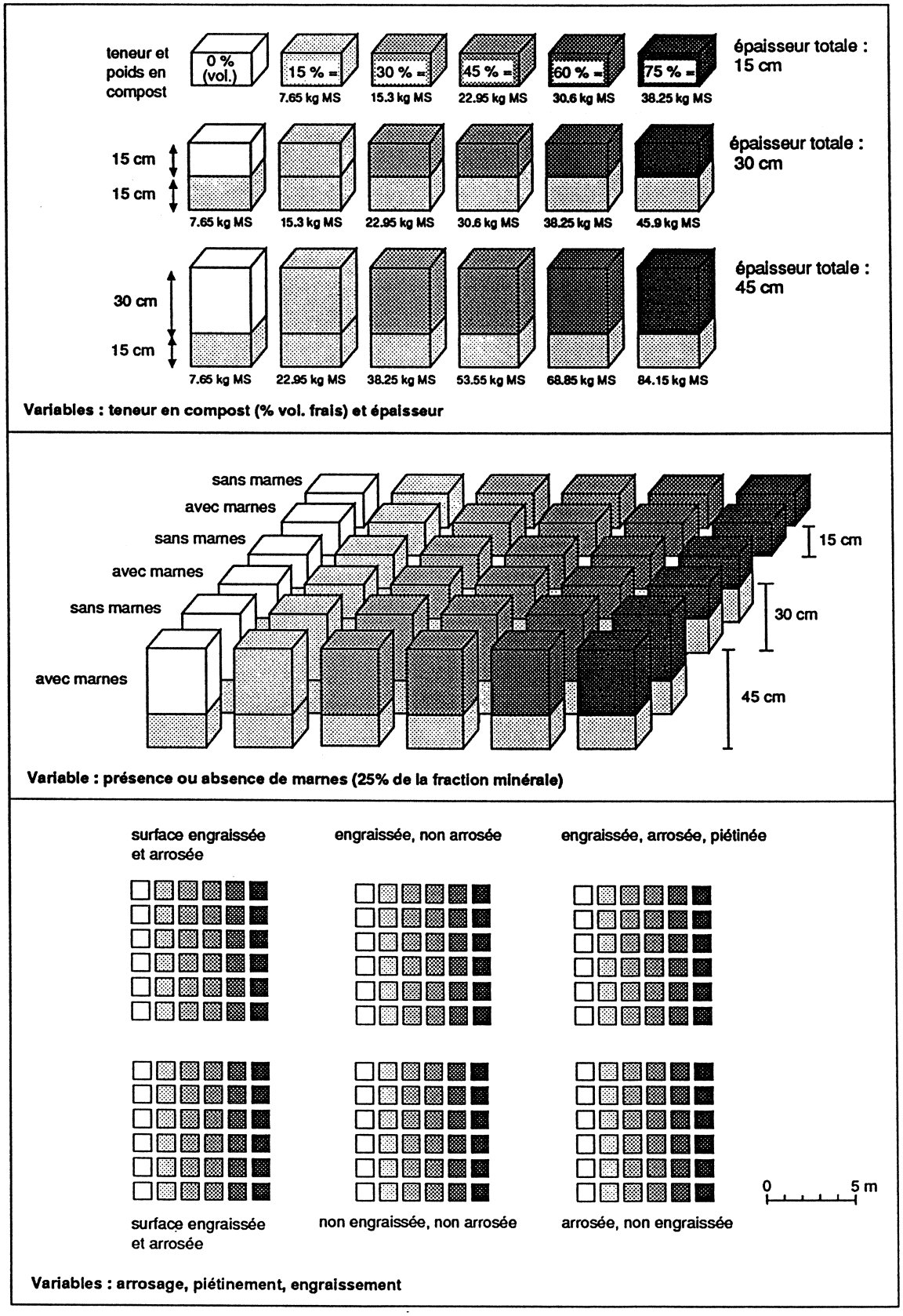


Figure 10 : Variables testées dans les sols expérimentaux

Six carrés supplémentaires de 1 m^2 et de 45 cm d'épaisseur, constitués du mélange à 45% de compost, ont été mis en place simultanément aux surfaces types pour suivre l'influence d'un apport de lombrics sur la structuration du sol (les vers de terre jouant un rôle important dans l'agrégation et la redistribution des matières organiques et minérales, en particulier les espèces des genre *Lumbricus et Nicodrilus*). Les biomasses introduites dans 3 des 6 carrés ont été d'environ 200 g/m^2, valeur habituelle dans une prairie permanente[7]. La liste des espèces introduites est présentée dans le tableau 9 ci-dessous :

Lombriciens	Nombre [ind./m^2]	Biomasse [g/m^2]
Lumbricus terrestris (adultes = ad.)	21	71.0
Lumbricus friendi (ad.)	1	1.6
Lumbricus rubellus (ad.)	7	7.1
Lumbricus castaneus (ad.)	1	0.1
Lumbricus sp. immatures (=imm.)	40	14.4
Nicodrilus nocturnus et longus (ad.)	72	100.3
Nicodrilus sp. (imm.)	3	0.7
Nicodrilus caliginosus caliginosus (ad.)	1	0.4
Octolasion cyaneum (ad.)	12	14.2
Octolasion cyaneum (imm.)	4	1.4
Allolobophora rosea (ad. et imm.)	2	0.2
Allolobophora icterica (ad. et imm.)	2	1.0
Total	**166**	**212.4**

Tableau 9 : Liste des vers de terre introduits dans les sols artificiels

De manière à disposer de surfaces de référence susceptibles de refléter les variations annuelles de production végétale induites par les conditions climatiques, six carrés de terre végétale de 15, 30 et 45 cm d'épaisseur ont également été mis en place (2 répétitions).

Enfin, pour s'assurer que les sols artificiels créés sur les rives n'allaient pas perturber la qualité des eaux du lac, les 12 mélanges à base de compost de boues et 1 témoin de terre végétale ont été placés dans des tubes de PVC fermés à leur base et équipés d'un tuyau permettant de récupérer leurs eaux de percolation et de contrôler leur qualité (système lysimétrique).

Une deuxième série de lysimètres a été créée avec les variantes les plus riches en compost dont les teneurs en métaux et en éléments nutritifs étaient aussi les plus élevées. Pour évaluer les risques de lessivage de ces éléments, des arrosages

7 Valeurs normalement observées : 60-300 g/m^2 (FAC, 1991)

importants (50 mm) ont été réalisés une fois par mois sur ces variantes. La solubilisation des métaux étant accrue en milieu acide, l'eau d'arrosage a été acidifiée à pH 4. Pour se placer dans des conditions d'extraction maximale, les lysimètres ont été recouverts d'un toit en Plexiglas qui les protégeaient des eaux de pluie et les soumettaient ainsi à des alternances contrôlées de périodes sèche et humide.

Une présentation schématique des essais lysimétriques figure ci-dessous :

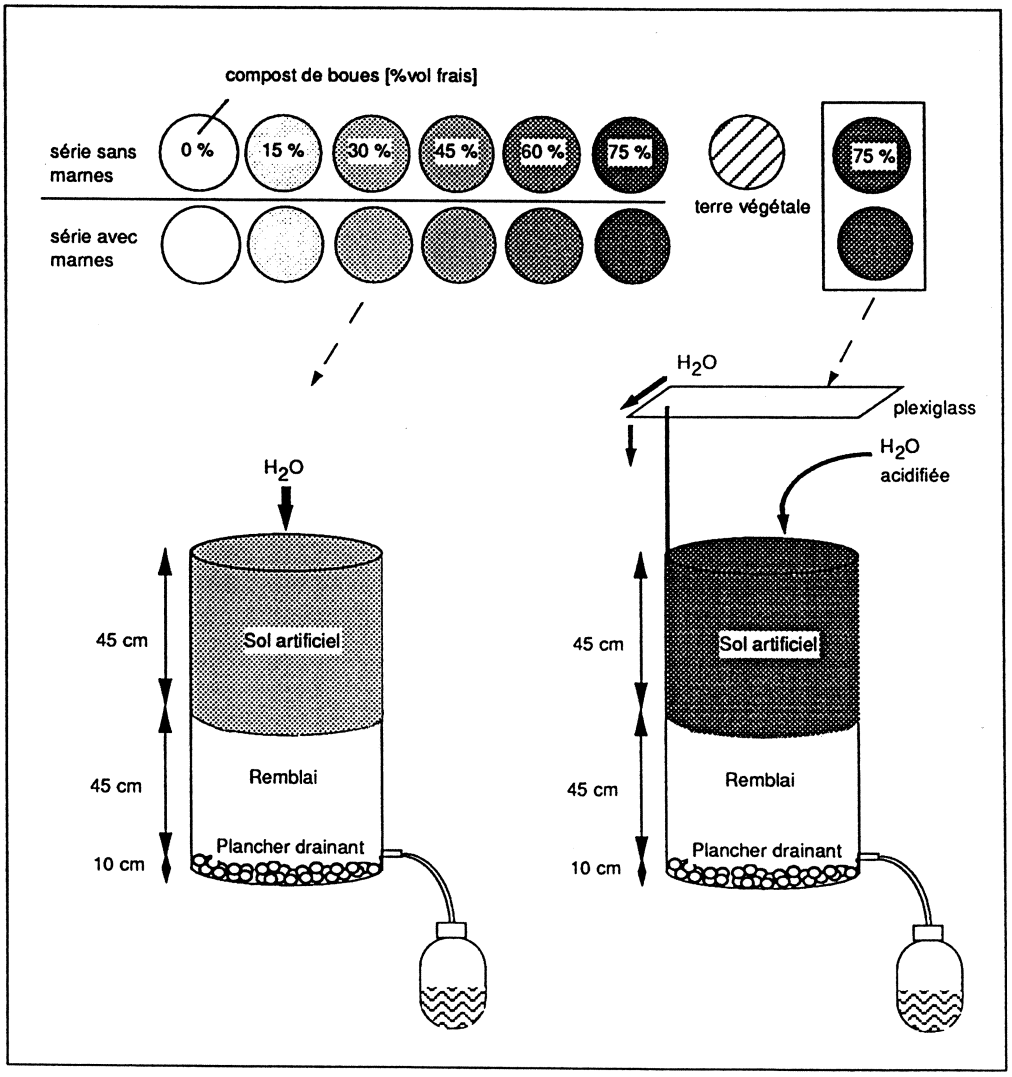


Figure 11 : Présentation schématique des essais lysimétriques

2.4.3. Sols prototypes

Ces essais sont destinés à préciser la technique de mise en place des sols et à estimer leur coût, ainsi que leur adéquation avec les aménagements paysagers projetés : gazons ou prairies plus ou moins densément arborées. Leur réalisation a été planifiée une année après le début des essais de sols expérimentaux de manière à bénéficier des premiers résultats et permettre le choix d'un nombre limité de variantes (10 et 30 % de compost en volume). La composition effective des sols mis en place est présentée dans le tableau 10:

Mélange	Valanginien	Hauterivien (marnes)	Moraines	Alluvions	Compost de boues	Compost de déch. verts
	% Vol. frais du mélange	% Vol. frais du mélange	% Vol. frais du mélange	% Vol. frais du mélange	% Vol. frais du mélange	% Vol. frais du mélange
A	-	-	70	-	10	20
B	-	-	-	70	10	20
C	56	21	-	-	8	15
D	68	22	-	-	4	6

Tableau 10 : Variantes retenues pour la mise en place des sols sur de grandes surfaces

A la différence des sols expérimentaux, les constituants minéraux ont été utilisés tels quels, sans criblage préalable. Leur volume a été mesuré directement sur camions. Les différents matériaux ont été étendus uniformément au trax, en couches minces, en marche arrière sur le remblai rippé (la composition et la profondeur du sol déterminant pour chaque constituant l'épaisseur de la couche à étendre). Le mélange a été fait à la bêcheuse[8] (type Celli, largeur de travail de la machine de 2.30 m tirée par un tracteur de 120 CV). Une fraise de type Rotovator a ensuite permis d'affiner le mélange en surface et préparer un lit de semences régulier. Un épierrage superficiel s'est avéré nécessaire pour la majorité des matériaux minéraux utilisés. L'utilisation d'une broyeuse de pierres tirée par un tracteur de 130 CV s'est révélée la machine la plus efficace et la seule permettant de conserver la proportion initiale de matière organique/matière minérale.

2.5. Végétalisation et entretien

2.5.1. Sols expérimentaux

Semis : Les sols ont été ensemencés sitôt leur mise en place terminée avec un mélange de graminées dont le développement devait permettre une évaluation indirecte de leur fertilité *(Festuca rubra, Agrostis gigantea, Lolium perenne et Poa pratensis).*

8 D'autres machines, telles que charrure ou épandeuses à fumier ont également été testées. Leur utilisation n'a toutefois pas donné satisfaction, la première retournant le sol sans le mélanger, la seconde étant inadaptée à des matériaux grossiers. Plus de détails relatifs à la mise en place des sols artificiels peuvent être trouvés dans les rapports de 1987 et 1988 (cf. bibliographie) ainsi que dans le § 5.2.

Entretien : Pour garantir le développement de la végétation sur tous les sols, ceux-ci ont été engraissés la première année de leur mise en place. Les plans d'engraissement ont été établis sur la base des données suivantes :

- teneurs totales et solubles des sols en éléments nutritifs[9];
- exigences nutritives des espèces végétales,
- régime de tontes.

Les apports d'éléments nutritifs ont été calculés de manière à équilibrer la fertilité des différentes variantes (les teneurs en éléments nutritifs de la variante la plus riche servant de valeurs de référence). Ils ont été fractionnés sur l'année et des engrais de longue durée ont été utilisés pour limiter le risque de lessivage (azote en particulier). En plus des éléments majeurs (N, P, K), du magnésium (Mg), du manganèse (Mn), du bore (B) et du fer (Fe) ont été apportés en raison des faibles teneurs mesurées dans les constituants de départ et du risque d'insolubilisation de ces éléments en milieu alcalin (formation d'hydroxydes et de carbonates). Les apports annuels d'azote, de phosphore et de potasse minimaux (sol à 75 % de compost) et maximaux (sol à 0% de compost) réalisés entre 1986 et 1993 sont résumés dans le tableau 11 ci-dessous :

Année	Azote [g/m^2]		Phosphore [g/m^2]		Potassium [g/m^2]	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1986	15.95	21.40	3.90	12.50	11.17	23.60
1987	10.00	38.60	2.50	13.40	4.00	21.80
1988	31.90	40.80	5.90	14.15	9.40	23.10
1989	21.50	38.90	4.85	13.50	7.85	22.10
1990	21.50	36.80	5.40	11.30	8.75	18.35
1991	19.25	29.15	4.65	9.80	7.50	15.95
1992	12.30	21.00	3.50	8.40	5.65	13.80
1993	12.30	21.00	3.50	8.40	5.65	13.80

Tableau 11: Apports d'engrais sur les parcelles expérimentales

Les surfaces d'essais ont été arrosées manuellement à la pomme tous les 2 à 5 jours en l'absence de pluie ou en cas de faibles précipitations[10]. L'apport annuel a été d'environ 200 mm d'eau pour une pluviométrie moyenne annuelle de 1000 mm.

Les gazons ont été régulièrement tondus en période de végétation, à raison d'une à deux fois par mois.

9 Les méthodes d'analyses sont présentées dans le tableau 14.

10 Les mesures de capacité de rétention en eau effectuées en laboratoire et sur le terrain ont permis de fixer à 8 l/m^2 la quantité minimale d'eau à apporter à chaque arrosage pour assurer une humectation de toute l'épaisseur du sol.

Dès la deuxième année, des traitements différenciés portant sur la suppression de l'arrosage ou de l'engraissement et sur le piétinement des sols ont été appliqués sur une partie des essais (cf. fig. 10).

2.5.2. Sols prototypes

Semis : Différents mélanges grainiers ont été testés sur les bandes de sols à base de Valanginien. Ils étaient en majorité destinés à recréer une végétation typique de la rive Nord du lac de Neuchâtel en vue des aménagements naturels qui allaient être faits dans ce secteur ("garide", "prairie maigre neuchâteloise", KTZ, VSS A et VSS B). Les mélanges VSS étaient recommandés par l'Union suisse des professionnels de la route pour le reverdissement des places de repos, des terres pleins centraux et des talus jusqu'à 1200 m d'altitude (norme VSS 640.671 a). Le mélange KTZ était conseillé par les maisons grainières pour la création de prairies fleuries. Les mélanges "prairie maigre neuchâteloise" et "garide" ont été faits spécifiquement pour la végétalisation des rives du lac de Neuchâtel. Ces trois derniers mélanges ont été semés en 1987 sur des sols à 10%, alors que les mélanges VSS l'ont été en 1988 sur des sols à 30% de compost (% vol.).

En complément à l'utilisation de ces mélanges, composés en grande partie d'espèces récoltées et produites à l'étranger, un essai de semis direct à partir de végétation fauchée dans des prairies maigres naturelles neuchâteloises a également été réalisé en 1988 sur une centaine de m^2 de sols artificiels à 30% de compost. Le prélèvement de la végétation et l'épandage du foin ont été faits selon les recommandations de Voser (1985).

La composition floristique de ces mélanges et leur densité de semis sont présentées dans le tableau 12 de la page suivante.

Entretien : Comme pour les parcelles expérimentales, les prairies ont été engraissées l'année de leur semis et pour certaines d'entre elles l'année suivante encore. Les apports d'éléments nutritifs sont présentés dans le tableau 13 ci-dessous :

Année	Azote [g/m^2]		Phosphore [g/m^2]		Potassium [g/m^2]	
	garide, prairie neuch., KTZ	VSS	garide, prairie neuch., KTZ	VSS	garide, prairie neuch., KTZ	VSS
1987	20	-	9.7	-	23.1	-
1988	0	26	0	6.5	0	10.4
1989	0	6	0	1.5	0	2.4

Tableau 13: Apports d'engrais sur les prairies

Les prairies ont été fauchées 2 fois par année (juillet et octobre). Elles n'ont été arrosées qu'exceptionnellement, à la suite d'une fauche par exemple.

Espèces	Mélange [semences en % du Pds total]				
	KTZ 83	Prairie maigre Ne	Garido	VSS A	VSS B
Achillea millefolium	0.4	1.6			1
Agrimonia eupatoria		0.4			
Agrostis tenuis (Bardot)		1.6		5	5
Agrostis gigantea	3.2				
Agrostis stolonifera palustris	2.4				
Alopecurus pratensis		1.6			
Allium schoenoprasum		0.8	2.5		
Anthericum ramosum			2.5		
Anthoxanthum odoratum		0.8			
Anthyllis vulneraria	0.4	0.4	0.5		
Arrhenaterum elatius		1.6			
Briza media		0.2			
Bromus erectus	20.0	16.0	40.0		5
Bromus secale	3.2	4.0			
Bromus sterilis		0.4			
Campanula rotundifolia		0.2			
Carum carvi	2.0				
Centaurea scabiosa	0.4	0.2			
Chrysanthemum leucanthemum	0.8	1.4			
Coronilla varia	2.0				
Crepis biennis	0.1	0.6			
Cychorium intybus	1.0	0.6			
Cynosyrus cristatus		4.0			
Dactylis glomerata	3.2	3.2			5
Daucus Carota	2.8	0.6			
Dianthus Carthusianorum	0.3	0.6	2.0		
Echium vulgare		0.8			
Festuca arundinacea					10
Festuca ovina ovina	13.6	8.0	12.0	10	10
Festuca ovina duriuscula		8.0			
Festuca ovina (Ridu)	8.0				
Festuca rubra rubra		9.1		25	25
Festuca rubra commutata				23	15
Fragaria vesca	0.4	0.4	2.0		
Galium mollugo		0.2	1.5		
Galium verum	0.2	1.0			
Geranium pratense			0.5		
Helianthemum nummularium		1.0	5.5		
Hieracium pilosella		0.2			
Holcus lanatus	4.0				
Hypericum perforatum	1.0	1.2	2.0		
Koeleria cristata		4.0			
Knautia arvensis	0.2	0.4			
Linaria vulgaris	0.4	0.6			
Lotus corniculatus	0.8	0.4		5	5
Lolium perenne		2.4		20	10
Medicago lupulina	1.6				5
Onobrychis viciifolia	2.0	0.6			
Papaver Rhoeas	0.8	0.4			
Pastinaca sativa	2.0				
Phleum nodosum	4.0	0.4	2.0		
Pimpinella saxigraga	0.3	0.6			
Plantago lanceolata	0.8	0.8			
Poa annua	4.0				
Poa compressa	4.0	4.0			
Poa nemoralis		3.2			
Poa pratensis	2.4			10	
Poa trivialis		3.2			
Polygonatum multiflorum			2.5		
Potentilla argentea		0.8	2.0		
Primula veris	0.2				
Prunella vulgaris		0.4			
Ranunculus bulbosus		1.0			
Reseda lutea	0.6				
Salvia pratensis	0.7	1.2			
Sanguisorba minor	1.6	0.6	5.0		
Saponaria Ocymoides			5.0		
Scabiosa columbaria	0.1				
Sedum acre	0.2	0.4	0.5		
Silene vulgaris	0.1				
Stachys recta			5.0		
Teucrium chamaedrys			5.0		
Thymus serpyllum	0.3	0.8			
Tragopogon pratensis	0.2				
Trifolium repens				2	4
Trisetum flavescens	1.6	2.4			
Trifolium dubium	1.6				
Veronica officinalis		0.6			
Veronica spicata			2.0		
Semis [g/m2]	15	15	10	20	30

Tableau 12 : Composition floristique des mélanges et densité de semis

Plantation : Les arbustes suivants ont été plantés par pied isolé dans un des sols à 10% de compost : *Amelanchier ovalis, Berberis vulgaris, Cornus sanguinea, Coryllus avellana, Crataegus monogyna, Evonymus europaeus, Ligustrum vulgare, Lonicera xylosteum, Prunus spinosa, Rhamnus cathartica, Rosa canina, Viburnum lantana.* Aucun apport d'engrais n'a été effectué à la plantation.

2.6. Suivi scientifique

2.6.1. Croissance de la végétation

Une plante ne peut se développer normalement sur un sol que si l'épaisseur de ce dernier est suffisante et si elle trouve dans l'horizon prospecté par ses racines les conditions qui répondent à ses besoins physiologiques (eau, oxygène) et nutritifs (eau, minéraux). Le suivi de la végétation a donc été utilisé pour évaluer cette fertilité et mettre en évidence les contraintes qui pouvaient naître d'une mise en place artificielle : épaisseur du sol insuffisante, pierrosité excessive, rétention en eau limitée, blocage des éléments nutritifs, horizon compacté,...

A chaque fauche, la matière végétale fraîche a été récoltée, pesée et séchée à 80 °C pour permettre une comparaison de la productivité des différentes variantes de sols. Dans les prairies et les gazons, des relevés de végétation portant sur l'ensemble de la surface ont été effectués deux fois par année pour suivre l'évolution de leur composition floristique.

Le développement du système racinaire a été suivi au travers de carottes de sols prélevées annuellement à la fin de l'automne[11]. La biomasse racinaire a été séparée du sol par tamisage, suivi d'un tri minutieux, avant d'être pesée et séchée. De plus, des mesures de résistance mécanique destinées à évaluer la densité du chevelu racinaire, sa résistance au cisaillement et la structuration du sol en place, ont également été effectuées une fois par an [12].

2.6.2. Fertilité des sols artificiels

Un sol fertile doit au minimum pouvoir assurer les fonctions suivantes :

- permettre le développement du système racinaire de la plante;
- offrir des sites de rétention et d'échange pour les éléments nutritifs;
- posséder une faune et une biomasse microbienne active et diversifiée assurant la dégradation et la transformation de la matière organique.

---

[11] Utilisation d'une carotteuse de 115 cm de long et de 6,5 cm de ø, pourvue à l'intérieur de 4 cylindres en PVC de 6,2 cm de ø et de 10 cm de longueur unitaire.

[12] Mesure réalisée à l'aide d'une ailette de 2,5 cm de ø enfoncée dans les premiers cm du sol et reliée à un dynamomètre.

Pour évaluer la fertilité des terres artificielles au moment de leur mise en place et la suivre en fonction du temps, plusieurs critères relevant de méthodes de physique, de chimie et de biologie du sol ont été pris en compte. Leur liste figure dans le tableau 14, de même qu'une description succincte de la méthodologie utilisée et le nombre d'analyses effectuées chaque année.

Fonction du sol	Critère d'appréciation	Méthode in situ	Méthode en labo	Technique	Nbre de prélèvements
Espace radiculaire	Densité apparente		X	Mesure de la masse d'un échantillon cylindrique non perturbé et séché à 105 °C	1 x à la mise en place des sols
	Teneur en pierre		X	Tamisage à sec	1 x à la mise en place
	Composition et grosseur des particules de terre fine (texture)		X	Tamisage humide après destruction de la matière organique par H_2O_2 (pipettes Robinson, Afnor)	1 x an
	Mode d'agrégation des particules (structure)	X	X	Observation de profils de sol;	1 x an
				Fractionnement de la matière organique et sédimentation (Gobat et al., 1984)	1 x tous les 2 ans
				Micromorphologie (Doirisse, 1989)	1 x en 1991
Lieu d'échange de gaz et d'eau	Infiltration d'eau à l'état de saturation	X		Infiltromètre à double cylindre	1 x an
	Courbe de désorption		X	Mesure de la capacité de rétention en eau à différentes pressions (Jordan et al., 1992)	1 x an de 1986 à 1988
Filtre et réservoir d'éléments nutritifs	Réaction du sol : pH (H_2O) et pH (Al)		X	Electrode	1 x an
	Teneur du sol en humus (matière organique)		X	Méthode Anne d'oxydation au permanganate de potassium	1 x an
	Degré d'évolution de la matière organique		X	Dosage des acides humiques et fulviques. Extraction au pyrophosphate pH = 10 et précipitation à l'HCl	1 x tous les 2 ans
	Teneur en carbonates		X	Calcination et dosage du CO_2 dégagé	1 x tous les 2 ans
	Somme des cations échangeables (CEC)		X	Méthode au chlorure de baryum (Mehlich), dosage du baryum par spectrométrie d'absorption atomique	1 x en 1991
	Teneurs totales et solubles en métaux lourds		X	Pour les teneurs totales, extraction HNO_3; pour les teneurs solubles extraction $NaNO_3$ 0.1 M et CH_3COOH d'après Tessier, 1979 modifiée Orlab, 1991. Dosage par spectrométrie d'absorption atomique (cahier n° 105 FAC, 1989)	1 x au début des essais, 1 fois en fin des essais
	Teneurs en sels		X	Conductimétrie sur un extrait à l'eau	1 x an
	Teneurs disponibles pour la végétation		X	Extraction à l'eau et au réactif d'Egner-Riehm (Riehm, 1960), mesure par colorimétrie automatique	1 x an
				Extraction séquentielle du phosphore, selon la méthode Oberson, FAC, 1993)	1 x en 1993 1 x en 1994
Réservoir d'activité biologique responsable de la structuration du sol et de sa fertilité	Densité et biomasse des peuplements de vers de terre	X		Extraction à l'aide d'une solution de formaldéhyde diluée (0.1 %, 50 à 80 l /m²)	1 x an jusqu'en 1991 3 fois (1987, 1990, 1991)
	Etude de la microfaune		X	Extracteur multiple de type Mac Fadien	
	Biomasse microbienne		X	Extraction de l'ATP et mesure par bioluminescence selon Maire (1984)	1 x an
	Respiration du sol		X	Dégagement de CO_2 sur une période de 4, 9 et 15 jours (Jaeggi, 1976)	1 x an
	Minéralisation du carbone organique		X	Par calcul sur les résultats de dégagement de CO_2	1 x an

Tableau 14 : Critères d'appréciation de la fertilité des sols artificiels

2.6.3. Evaluation de l'impact des sols artificiels sur les eaux

Le compost appliqué en quantité importante sur le littoral neuchâtelois pouvait potentiellement altérer la qualité des eaux du lac. Pour quantifier et qualifier cet impact, les eaux de percolation des lysimètres ont été prélevées deux fois par semaine dès la mise en place des sols. Une aliquote de 1 ou 2 % a été conservée et congelée de manière à constituer un échantillon moyen annuel. Après filtration à 0,45 µm, les eaux ont été soumises aux analyses suivantes :

Paramètre	Abréviation	Méthode
Conductivité	COND.	Conductimétrie
pH	pH	Electrode
Phosphore	P_2O_5	Mesure par colorimétrie automatique
Potassium	K_2O	Mesure par spectrométrie d'absorption atomique
Azote nitrique	$N\text{-}NO_3$	Mesure par colorimétrie automatique
Azote ammoniacal	$N\text{-}NH_4$	Mesure par colorimétrie automatique
Carbone organique dissout	DOC	Oxydation photochimique (persulfate/oxygène - UV) dosage dans l'IR
Cations majeurs et métaux lourds	Al, B, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Co, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn	Dosage par spectroscopie d'émission plasma ou spectrométrie d'absorption atomique

Tableau 15 : Paramètres analysés dans les eaux de percolation

Parallèlement, le Laboratoire cantonal et le Laboratoire des eaux de la Ville de Neuchâtel ont procédé à des analyses mensuelles de la qualité chimique et bactériologique des eaux du lac devant le site d'essais.

2.6.4. Analyse des résultats

2.6.4.1. Production végétale et composition floristique

Des analyses de covariance ont été réalisées sur les résultats de productions végétales annuelles moyennes de manière à évaluer le degré de signification et l'importance des variables suivantes :

- épaisseur du sol;
- quantité de compost;
- présence de marnes dans les composants de départ;
- entretien des parcelles (arrosage, piétinement).

L'influence de chacune des variables a été testée seule ou en interaction avec les autres. L'engraissement constituant une variable dépendante de la teneur en compost (apport d'engrais initial calculé selon la teneur en compost), les résultats des productions végétales des sols artificiels engraissés et non engraissés ont été analysés de manière séparée.

Des analyses de régression multiple ont ensuite été réalisées sur les variables significatives afin de savoir si elles contribuaient à augmenter ou à diminuer la productivité des sols artificiels.

Pour suivre dans le temps l'évolution des productions végétales des sols non engraissés indépendamment des variations annuelles induites par la météorologie, les résultats ont également été exprimés en valeurs relatives en divisant pour chaque épaisseur les valeurs de productions absolues par celles obtenues sur la terre végétale engraissée (variante témoin).

Les analyses de végétation concernent leur recouvrement, le nombre d'espèces par type de prairie et les valeurs indicatrices de Landolt (1977).

2.6.4.2. Caractéristiques bio-physico-chimiques des sols et des eaux

Les mesures effectuées au champ et en laboratoire ont été valorisées statistiquement par des analyses de covariance et de régression linéaire. Des modèles de régression non linéaires ont également été utilisés pour prédire l'évolution à moyen terme des teneurs en humus des sols artificiels.

CHAPITRE 3 : RESULTATS

3.1. Présentation des résultats 39

3.2. Développement de la végétation et productivité des sols artificiels 39

3.2.1. Levée des semences 39

3.2.2. Productivité des surfaces expérimentales 40

3.2.2.1. Composition floristique 40

3.2.2.2. Productions végétales 40

3.2.2.3. Variations annuelles 41

3.2.2.4. Influence de la composition des sols et de leur entretien 42

3.2.3. Composition floristique et productions de prairies extensives 49

3.2.3.1. Garide, prairie maigre neuchâteloise et prairie KTZ 49

3.2.3.2. Prairies extensives VSS 53

3.2.3.3. Semis direct d'une prairie 54

3.2.4. Croissance d'arbustes sur les sols artificiels 56

3.2.5. Conclusions sur la productivité des sols artificiels et le développement de leur couverture végétale 57

3.3. Caractéristiques bio-physico-chimiques des sols 58

3.3.1. Etat structural 58

3.3.1.1. Nature du sol 58

3.3.1.2. Structure 62

3.3.1.3. Croissance des racines 65

3.3.1.4. Résistance mécanique 66

3.3.1.5. Perméabilité et rétention en eau 68

3.3.2. Caractéristiques chimiques 71

3.3.2.1. Fertilité des sols artificiels 71

3.3.2.2. Teneurs en métaux lourds 76

3.3.3. Biologie 79

3.3.3.1. Faune du sol 79

3.3.3.2. Activité biologique 82

3.3.4. Conclusions sur les caractéristiques bio-physico-chimiques. 83

3.4. Qualité des eaux de percolation 84

3. RESULTATS

3.1. Introduction

Ce chapitre présente les principaux résultats acquis sur les essais de sols artificiels entre 1986 et 1993. Il est organisé en trois parties traitant respectivement :

- du développement de la végétation et des productions végétales;
- des caractéristiques morphologiques, physiques, chimiques et biologiques des sols;
- des risques de pollution que peuvent générer des sols contenant du compost.

La plus grande partie des tableaux et figures illustrant ce chapitre font référence aux sols expérimentaux qui bénéficient du suivi scientifique le plus long. Les résultats acquis sur les sols prototypes sont présentés ponctuellement dans les paragraphes traitant de la mise en place de prairies extensives (paragraphe 3.2.3) et de l'utilisation d'autres matériaux que le Valanginien pour créer des sols artificiels.

3.2. Développement de la végétation et productivité des sols artificiels

3.2.1. Levée des semences

Au cours des premiers mois qui ont suivi les semis, une flore d'adventices et de rudérales comprenant les espèces principales suivantes s'est développée sur les variantes qui contenaient du compost :

Espèce	
Solanum lycopersicum	Tomate
Urtica dioica	Ortie dioique
Panicum sanguinale	Panic sanguin
Panicum crus-gallis	Panic pied de coq
Senecio vulgaris	Séneçon vulgaire
Mercurialis annua	Mercuriale annuelle
Taraxacum sp.	Pissenlit

Tableau 16 : Espèces se développant spontanément sur les sols artificiels à base de composts de boues et de déchets verts

Ces espèces, en majorité annuelles, ont été éliminées dès la première année par une fauche précoce.

Sur les sols expérimentaux qui avaient été mis en place au printemps, une carence temporaire en azote a été observée. Ce phénomène, dû à la consommation excessive d'azote par les microorganismes du sol au détriment de la végétation, se produit également sur des sols naturels amendés en compost en début de saison de végétation.

3.2.2 Productivité des sols expérimentaux

3.2.2.1 Composition floristique

Les 4 graminées semées sur les surfaces expérimentales *(Agrostis, Festuca, Poa et Lolium)* se sont maintenues sur toutes les variantes qui contenaient du compost. Sur les sols de calcaires purs, seules des mousses, des lichens et quelques rudérales telles que *Taraxacum sp. et Achillea millefolium* ont pu se développer. En fonction de l'entretien appliqué au gazon, la densité respective de chacune des espèces a varié: l'agrostide et la fétuque rouge ont été dominantes sur les variantes non engraissées, alors que sur les sols engraissés, les espèces les mieux représentées étaient dans l'ordre: le ray-grass, le pâturin, la fétuque. Le recouvrement n'étant jamais de 100%, les rudérales des variantes sans compost se sont également développées de manière prolifique sur les autres sols.

3.2.2.2 Productions végétales

Les productions végétales annuelles des parcelles expérimentales non engraissées depuis 1988, toutes teneurs en compost, épaisseurs et années confondues, sont illustrées par la figure 12 ci-dessous. A titre de comparaison, la production moyenne d'un gazon régulièrement tondu sur un sol naturel est également présentée [13].

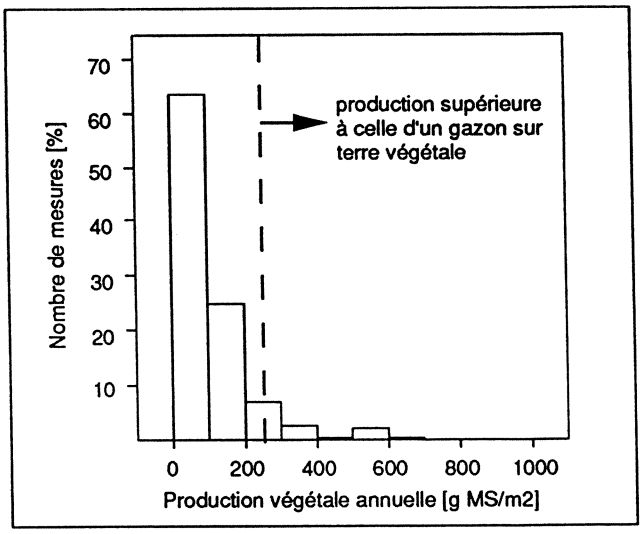


Figure 12 : Productions végétales annuelles des sols artificiels non engraissés (1988-1991)

Ce graphique permet de constater que les productions s'échelonnent entre 0 et 700 g/m^2. Plus des 3/4 sont inférieures à 200 g/m^2. Soixante-cinq pour-cent d'entre elles sont comprises entre 0 et 100 g/m^2 soit deux fois moins que la production d'un gazon sur un sol naturel.

[13] Donnée de la maison OH-semences pour un gazon à base de Lolium (50%) et de Poa pratensis (50%)

3.2.2.3 Variations annuelles

Entre 1988 et 1991, les productions annuelles sur les sols non engraissés et non arrosés ont significativement varié d'une année à l'autre comme l'illustre la figure ci-dessous. Pour suivre leur évolution dans le temps, elles ont été comparées (figure de gauche) puis rapportées à celles de la terre végétale qui constitue un témoin (figure de droite):

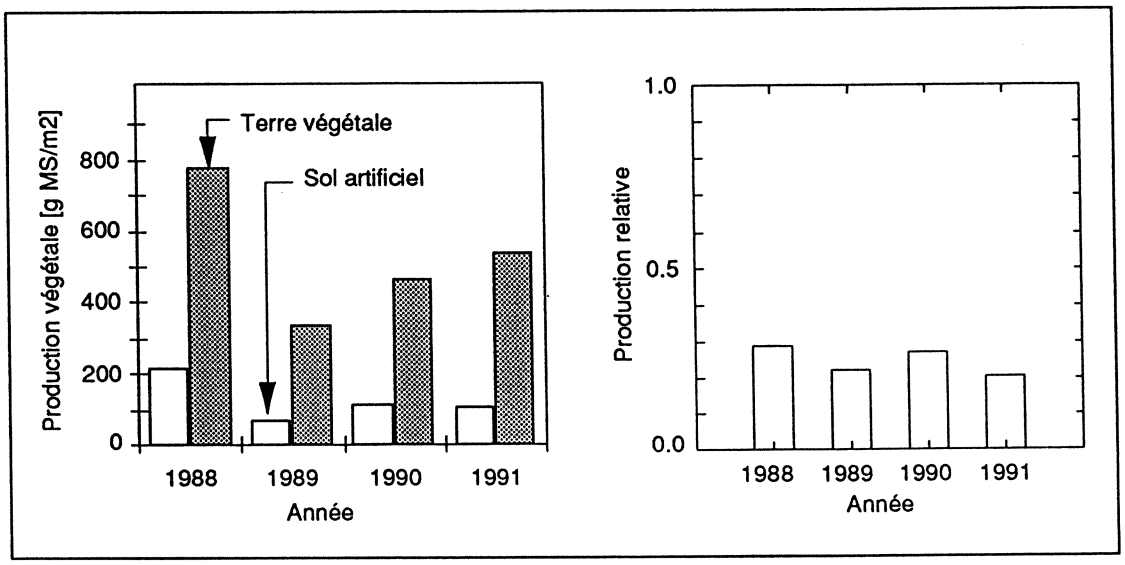


Figure 13 : Productions végétales de la terre végétale et d'un sol de 45 cm à 30% de compost non engraissé, non arrosé et sans marnes

On constate que les variations de productions annuelles concernent autant la terre végétale que les sols artificiels. Elles sont principalement dues aux variations des conditions météorologiques et ne traduisent pas de modifications significatives de la fertilité des sols.

Sur la base de cette première conclusion, une analyse globale de covariance de tous les résultats acquis entre 1988 et 1991 sur les sols contenant 0 à 75% de compost a été effectuée et est présentée dans les paragraphes qui suivent.

3.2.2.4 Influence de la composition des sols et de leur entretien

Le tableau 17 ci-dessous présente les résultats de l'analyse statistique destinée à mettre en évidence les paramètres qui jouent un rôle significatif dans la productivité des sols artificiels non engraissés :

Variable significative	Influence sur la production
Apport de compost x épaisseur **	+
Teneur en compost x marnes*	--
Arrosage x apport de compost x épaisseur**	+

*= variable significative (p <0.05) ** = variable très significative (p<0.01)

Tableau 17 : Influence des variables testées (analyse de covariance et de régression multiple sur les productions absolues annuelles des sols non engraissés /1988-1991)

Cette analyse montre que 3 groupes de variables influencent significativement la productivité des sols artificiels non engraissés (variance expliquée : 75%). Leur importance respective est discutée dans les paragraphes qui suivent.

Apport de compost et épaisseur du sol

La figure ci-dessous illustre l'influence positive qu'exerce l'augmentation de la teneur en compost dans un sol de 15 cm sur sa production végétale :

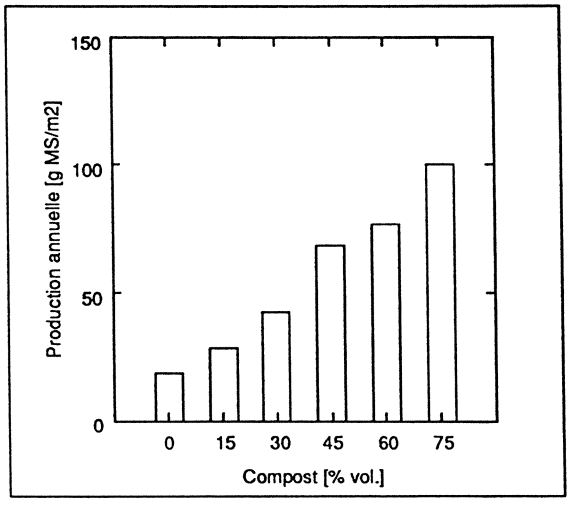


Figure 14 : Productions végétales des sols artificiels non engraissés et non arrosés de 15 cm d'épaisseur en fonction de leur teneur en compost (moyenne 1988-1991)

La production végétale augmente avec la teneur en compost. L'augmentation est significative puisqu'en doublant l'apport de compost on accroît d'environ 80% sa productivité.

Comme l'analyse statistique l'a démontré, l'effet de l'apport en compost interagit avec l'épaisseur du sol. En augmentant cette dernière, on améliore la productivité comme l'illustre la figure 15 ci-dessous :

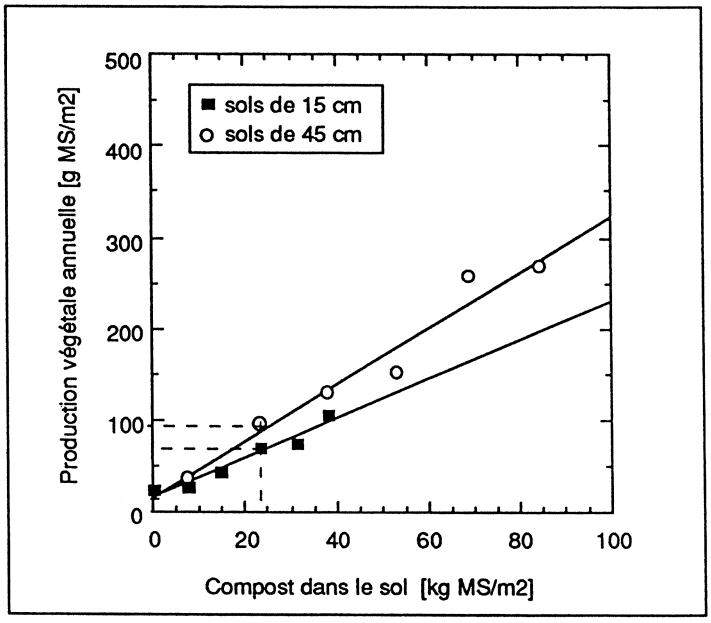


Figure 15 : Productions végétales des sols artificiels non engraissés et non arrosés de 15 et 45 cm d'épaisseur en fonction de la quantité de compost dans le sol (moyenne 1988-1991)

On constate que pour un même apport de compost de 23 kg MS/m^2 par exemple, la production végétale passe de 69 à 98 g MS/m^2 si le sol a 45 cm d'épaisseur au lieu de 15 cm.

L'augmentation seule de l'épaisseur n'entraîne toutefois pas nécessairement celle de sa productivité. La figure 16 de la page suivante présente les variantes d'incorporation du compost testées et les productions végétales obtenues avec 23 kg/m^2 de compost dans le sol:

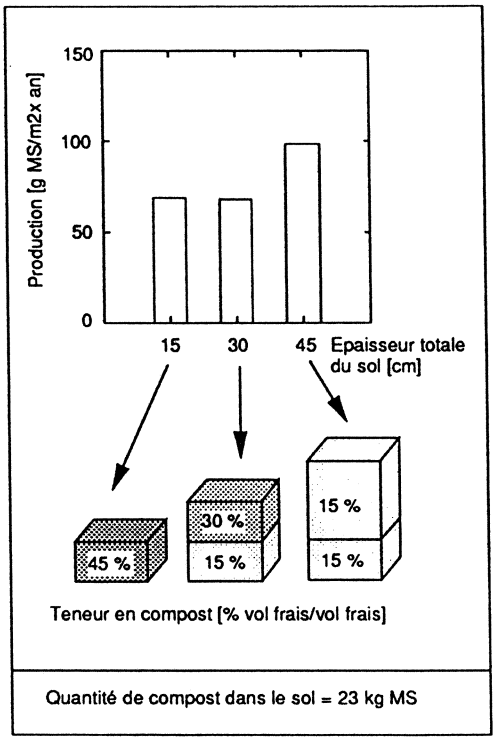


Figure 16 : Influence de la distribution du compost dans un sol sur sa production végétale

Ce graphique permet de constater que pour un même apport de compost, la production est maximale lorsque le sol est profond et que sa teneur en compost est identique en surface et en profondeur. Ainsi, la mise en place de deux couches de composition différente, destinées à imiter la diminution progressive du taux de matière organique habituelle dans un sol naturel, constitue dans le cas des sols artificiels une entrave au bon développement de la végétation.

En résumé, ces résultats montrent que la mise en place d'un sol profond pauvre en compost assure une meilleure croissance d'un gazon à base de graminées qu'un sol superficiel riche en compost. Trente à quarante kg de compost par mètre carré (90 à 120 l) incorporés de manière homogène à 30 cm remblai permettent sans engraissement complémentaire la croissance et le maintien d'un gazon soumis à un entretien intensif (1 à 2 tonte/mois).

Présence ou absence de marnes

La composition minéralogique des sols artificiels influence leur productivité comme l'illustre la figure 17 ci-dessous qui compare les productions de variantes avec et sans marnes :

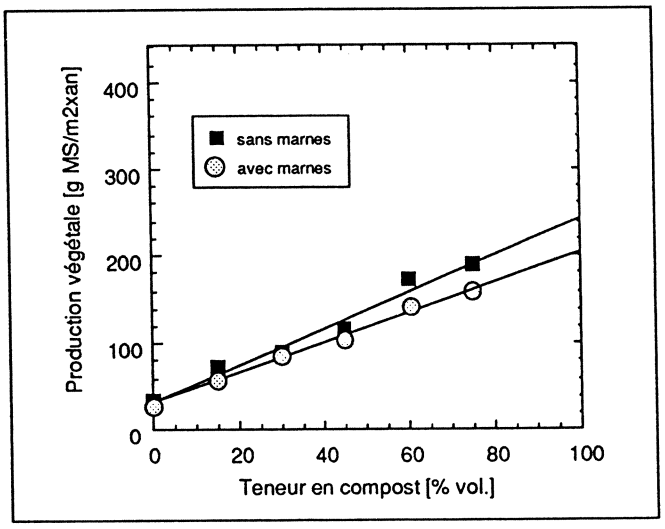


Figure 17 : Productions végétales des sols artificiels non engraissés et non arrosés, toutes profondeurs confondues, avec et sans marnes en fonction de leur teneur en compost (1988-1991)

Ajoutées initialement aux sols à base de Valanginien pour accroître leur teneur en argiles minéralogiques et améliorer ainsi leur capacité d'échange cationique, les marnes diminuent leur productivité. Ce résultat, perceptible à l'oeil, est confirmé par l'analyse statistique. Il pourrait être dû à un blocage partiel de la minéralisation de la matière organique induit par la précipitation de carbonates autour des fibres de compost. Par ailleurs, les marnes libèrent des teneurs élevées en calcium dans la solution du sol. Or, cet élément concurrence l'assimilation par la végétation d'autres éléments nutritifs comme le fer, le bore et le manganèse. Il peut aussi, en fonction du pH du sol, entraîner la précipitation du phosphore sous une forme non accessible aux plantes (phosphate tricalcique).

En résumé, l'ajout de marnes bleues pour pallier à la pauvreté en argiles minéralogiques des sols à base de Valanginien n'améliore pas leur productivité. Il augmente leurs teneurs en calcium, sature la solution du sol en cet élément qui précipite sous forme de carbonates autour de la matière organique, ralentissant ainsi sa minéralisation et la libération d'éléments nutritifs.

Entretien de la végétation

Comme l'a montré l'analyse statistique (tableau 17), l'**arrosage** améliore les productions végétales des sols. Son influence est d'autant plus marquée que leur épaisseur est importante et que leur teneur en compost est élevée (variable significative : arrosage x épaisseur x apport de compost). L'épaisseur et la distribution du compost jouent en effet un rôle important puisqu'ils déterminent la profondeur d'enracinement de la végétation et par conséquent la réserve en eau utilisable [14].

Comme l'illustre par exemple la figure 18 ci-dessous, l'arrosage augmente en moyenne de 1,1 g par m^2 et par kg de compost supplémentaire la production des sols de 45 cm :

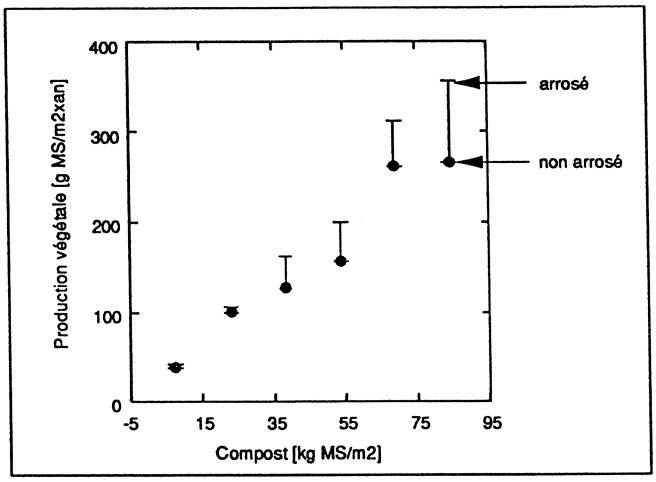


Figure 18 : Effet de l'arrosage sur les sols non engraissés de 45 cm d'épaisseur (1988-1991)

Sur les sols engraissés, toutes variantes confondues, l'augmentation moyenne annuelle de production liée à l'arrosage est de 48,4%.

Quant aux prairies extensives fauchées deux fois années, elles se sont développées normalement sans arrosage.

> L'arrosage améliore significativement la productivité des sols artificiels soumis à un régime de tonte intensif. Il est nécessaire si l'on souhaite garder un gazon vert toute l'année. Il est en revanche superflu pour les prairies extensives.

14 $RU = \int(\theta_{max} - \theta_{fp})dz \approx (\theta_{max} - \theta_{fp})z$
où θ_{max} = taux d'humidité du sol en-deça duquel la composante de pression du potentiel total devient plus importante que sa composante gravitaire
où θ_{fp} = taux d'humidité du sol en-deça duquel les forces d'adsorption surpassent celles que la plante peut générer pour extraire l'eau nécessaire à sa croissance
et z = profondeur d'enracinement

Un **engraissement** différentiel, destiné à égaliser les teneurs initiales en éléments nutritifs des sols les plus pauvres en compost aux sols les plus riches, permet partiellement d'égaliser les productions végétales d'une partie des surfaces d'essais comme le montre la figure 19 ci-dessous :

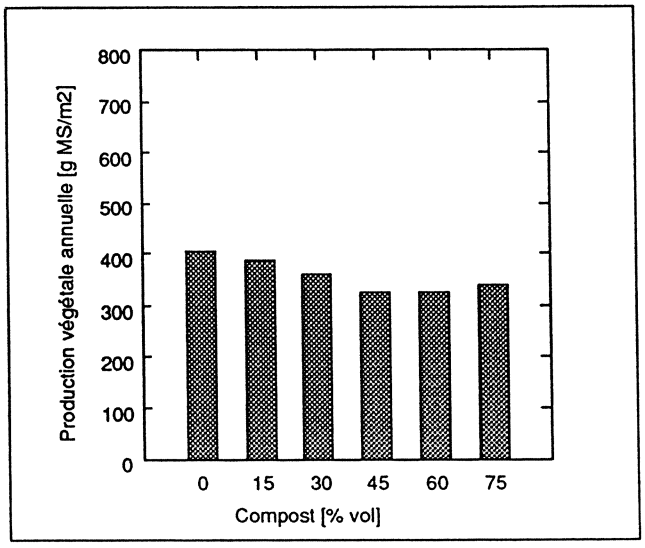


Figure 19 : Productions végétales moyennes annuelles, toutes profondeurs confondues, des sols non arrosés et engraissés différentiellement (1988-1991)

Les productions obtenues dépassent largement celle d'une terre végétale moyenne (250 g/m^2). La végétalisation artificielle d'un remblai purement minéral ou d'un sol artificiel pauvre en compost est donc possible. Elle implique toutefois un apport annuel d'engrais important et régulier.

L'engraissement des sols artificiels permet le développement d'une couverture végétale régulière, quelle que soit la teneur en compost du sol. Il est nécessaire si les sols sont essentiellement minéraux ou si l'on souhaite un recouvrement du sol de 100 %. Comme on l'a vu précédemment (figure 14), il ne l'est pas si le sol contient 10% ou plus de compost (vol.) et que l'aménagement est composé d'une végétation extensive.

Le **piétinement** des sols arrosés et engraissés, toutes variantes confondues, diminue d'environ 20 % leurs productions végétales. Son effet s'atténue toutefois lorsque la teneur en compost du sol augmente comme le montre la figure 20 ci-dessous (variable significative statistiquement : piétinement x teneur en compost):

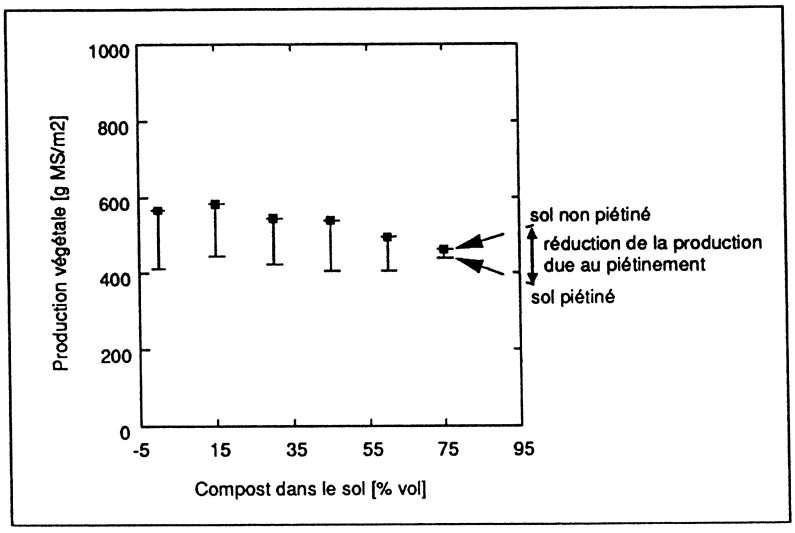


Figure 20 : Effet du piétinement sur les productions moyennes des sols engraissés et arrosés (1988-1991)

L'effet dépressif du piétinement est dû au tassement du sol et à une diminution locale de sa porosité qui peuvent, à terme, entraîner un enracinement de la végétation plus superficiel et le développement d'un feutrage racinaire. Le compost, en allégeant le sol et en améliorant sa structure, le rend moins sensible au tassement.

Le piétinement des sols artificiels perturbe modérément le développement aérien de la végétation, mais n'entraîne pas son dépérissement. Les sols très riches en compost sont moins sensibles au piétinement que ceux qui en sont dépourvus.

Composition minéralogique

Les essais réalisés avec du Valanginien ont permis de constater que les productions de gazons non engraissés et régulièrement tondus étaient faibles, même en présence de quantités importantes de compost. Il ne faut pas pour autant en conclure que tous les sols artificiels produisent peu. En effet, les essais réalisés à partir de 1988 avec des moraines et des alluvions ont montré que leurs productions étaient supérieures à celles

obtenues sur les sols à base de Valanginien. Une distribution granulométrique plus équilibrée ainsi qu'une diversité minéralogique plus grande sont vraisemblablement à l'origine de ces différences. Rappelons par ailleurs que les calcaires utilisés sont relativement purs, qu'ils sont constitués presque essentiellement de calcite et qu'ils ne libèrent qu'un faible résidu insoluble. Ils représentent par conséquent une situation extrême, une grande partie des autres roches sédimentaires ou ignées offrant une plus grande richesse minéralogique et permettant ainsi la formation de sols plus fertiles.

3.2.3. Composition floristique et production de prairies extensives

3.2.3.1. Garide, prairie maigre neuchâteloise et prairie KTZ

Le tableau 18 ci-dessous présente sous forme synthétique l'évolution de la diversité floristique des prairies créées en automne 1987, sur des sols de 45 cm de profondeur à 10% de compost (~10 kg de MS/m^2):

Mélange	Espèces semées [nb]	Espèces après 1 année [nb]	Espèces dominantes	Espèces après 5 ans [nb]	Espèces dominantes
KTZ 83	45	42 (15)*	*Anthyllis vulneraria* *Dactylis glomerata* *Daucus carota* *Holcus lanatus* *Lotus corniculatus* *Medicago lupulina* *Melilotus officinalis* *Plantago lanceolata* *Trifolium repens* *Trisetum flavescens*	43 (12)*	*Achillea millefolium* *Chrysanthemum leuc.* *Coronilla varia* *Dactylis glomerata* *Linaria vulgaris* *Plantago lanceolata* *Sanguisorba minor* *Silene vulgaris* *Trisetum flavescens*
Prairie maigre neuchâteloise	53	37 (5)*	*Achillea millefolium* *Anthyllis vulneraria* *Chrysanthemum leuc.* *Lotus corniculatus* *Medicago lupulina* *Onobrychis viciifolia* *Trifolium repens*	41 (10)*	*Achillea millefolium* *Arrhenaterum elatius* *Chrysanthemum leuc.* *Cichorium intybus* *Lotus corniculatus* *Medicago lupulina* *Plantago lanceolata* *Salvia pratensis* *Trisetum flavescens*
Garide	20	28 (14)*	*Anthyllis vulneraria* *Bromus erectus* *Galium mollugo* *Hypericum perforatum* *Medicago lupulina* *Melilotus officinalis* *Phleum nodosum* *Sanguisorba minor* *Saponaria ocymoides* *Sedum acre* *Stachys recta*	39 (24)*	*Bromus erectus* *Dianthus carthusianorum* *Galium mollugo* *Medicago lupulina* *Sanguisorba minor* *Stachys recta*

* = le chiffre entre parenthèses indique les espèces initialement non présentes dans le mélange

Tableau 18 : Composition floristique des prairies sur les sols artificiels à 10% de compost (vol)

Ce tableau permet de constater qu'en moyenne, 70% des espèces semées se retrouvent cinq années plus tard dans la composition floristique des prairies. Certaines espèces ne se sont jamais développées comme *Helianthemum nummularium, Anthericum racemosum, Briza media et Polygonatum multiflorum.* En revanche, de nouvelles espèces ont enrichi les mélanges de départ au cours du temps. Leur origine est diverse :

- une grande partie d'entre elles proviennent des parcelles d'essais adjacentes, les prairies KTZ, maigre neuchâteloise et garide étant limitrophes les unes des autres;
- d'autres sont liées à des semences impures (certaines légumineuses et bromes en particulier);
- enfin certaines sont des adventices présentes sur les décombres et tas de terres des chantiers environnants.

Ces sursemis naturels contribuent à rendre très semblable le cortège floristique des trois prairies. Cinq années après leurs semis, celles-ci comprennent approximativement toutes trois le même nombre d'espèces (39 à 43), que le nombre initial d'espèces semées ait été de 20 (garide), 45 (KTZ) ou 53 (prairie maigre neuchâteloise). Cette similitude traduit également l'influence prépondérante du sol dont les teneurs en humus et en éléments nutritifs sont identiques d'une prairie à l'autre.

Le port de la végétation des prairies est relativement élevé (~50 cm) et le recouvrement au sol d'environ 70%. Les espèces les plus abondantes sont présentées dans le tableau 18 de la page précédente. Leurs exigences par rapport aux conditions de stations (sol en particulier) figurent dans le tableau 19 à la page 52.

Les espèces recensées sont pour moitié environ habituelles de prairies grasses, pour l'autre moitié habituelles de prairies maigres. Cette composition botanique présente de nombreuses analogies avec des prairies grasses sèches. Celles-ci comprennent habituellement entre 30 et 40 espèces et poussent sur des sols plats à faiblement pentus, moyennement profonds et moyennement riches en éléments nutritifs, séchards en surface. Elles se développent généralement grâce à l'action conjuguée d'une fumure traditionnelle (un peu de fumier) et d'un maximum de deux coupes par année.

Comme le montre la figure 21 de la page suivante, les productions végétales des prairies créées correspondent, les premières années tout au moins, à celles de prairies grasses sèches. Dès 1991, elles se rapprochent de celles de prairies maigres. Les différences de productions, d'une année à l'autre et d'une prairie à l'autre, sont, non seulement, imputables aux variations climatiques annuelles, mais reflètent également l'évolution de leur composition floristique. Les productions importantes de 1988 sont dues au développement prolifique de légumineuses (en particulier de la lupuline, du lotier et de l'anthyllide). En 1991, les productions diffèrent peu d'une prairie à l'autre et traduisent bien l'obtention d'un équilibre floristique (même nombre d'espèces et cortège d'espèces commun aux 3 prairies).

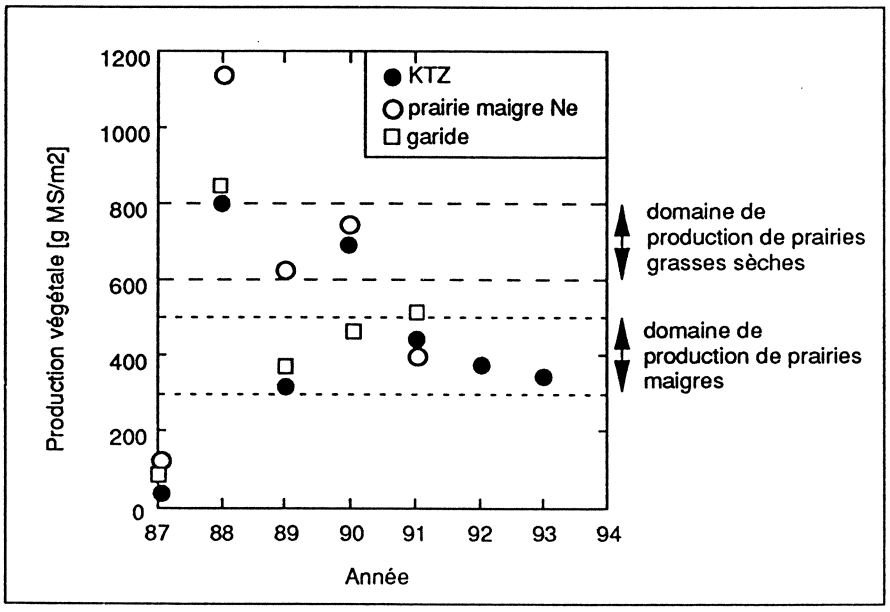


Figure 21 : Productions végétales annuelles des prairies KTZ, prairie maigre neuchâteloise et garide

Ces essais montrent que l'implantation de prairies fleuries extensives à partir de mélanges grainiers du commerce sur des sols artificiels à 10% de compost est possible. La relative richesse en éléments nutritifs des sols artificiels et leur faible rétention en eau favorisent la croissance et le maintien d'espèces caractéristiques de prairies grasses sèches (brome dressé, fromental, marguerite, sauge, thym et anthyllide). Les modifications de la diversité et de l'importance relative de chaque espèce sont fréquentes dans les premières années qui suivent le semis. L'utilisation d'un mélange contenant un petit nombre d'espèces est possible, pour autant que celles-ci soient adaptées à la station et que les milieux naturels environnants offrent un potentiel grainier susceptible d'enrichir le semis de base.

Espèces dominantes	Valeurs indicatrices de Landolt (1977) F	R	N	H	Groupe écologique (Landolt, 1991)
Achillea millefolium	2	3	3	3	plante de prairies grasses
Anthyllis vulneraria	1	3	2	3	plante de prairies maigres sèches
Arrhenaterum elatius	3	3	4	3	plante de prairies grasses
Bromus erectus	2	4	2	3	plante de prairies maigres sèches
Chrysanthemum leucanthemum	3	3	3	3	plante de prairies grasses
Cichorium intybus	2	4	3	3	plante de prairies grasses
Dactylis glomerata	3	3	4	3	plante de prairies grasses
Daucus carota	2	3	2	3	plante de prairies maigres sèches
Dianthus carthusianorum	2	3	2	3	plante de prairies maigres sèches
Galium mollugo	3	3	4	3	plante de prairies grasses
Holcus lanatus	3	-	3	4	plante de prairies grasses
Hypericum perforatum	2	3	3	3	plante de prairies maigres sèches
Linaria vulgaris	2	3	3	3	rudérale
Lotus corniculatus	2	4	3	3	plante de prairies grasses
Medicago lupulina	2	4	3	3	plante de prairies grasses
Melilotus officinalis	2	4	3	3	plante de prairies grasses
Phleum nodosum	2	4	4	3	plante de prairies grasses
Plantago lanceolata	2	3	3	3	plante de prairies grasses
Salvia pratensis	2	4	2	3	plante de prairies maigres sèches
Sanguisorba minor	2	4	2	3	plante de prairies maigres sèches
Saponaria ocymoides	2	4	2	2	plante de forêt
Sedum acre	1	3	1	3	plante pionnière
Silene vulgaris	2	3	2	3	plante de prairies maigres sèches
Stachys recta	1	4	2	3	plante de prairies maigres sèches
Trifolium repens	3	3	4	3	plante de prairies grasses
Trisetum flavescens	3	3	4	3	plante de prairies grasses

F : Valeur d'humidité
- 1 = plantes indicatrices nettes de sécheresse
- 2 = plantes indicatrices de sécheresse modérée
- 3 = plantes indicatrices d'humidité moyenne

R : Valeur d'acidité
- 3 = plantes indicatrices sur sols peu acides
- 4 = plantes indicatrices d'alcalinité

N : Valeur de substances nutritives
- 1 = plantes indicatrices prononcées de sols maigres
- 2 = plantes indicatrices de sols maigres
- 3 = plantes indicatrices de sols modérément riches en substances nutritives
- 4 = plantes indicatrices de substances nutritives

H : Valeur d'humus
- 3 = plantes indicatrices de sols à teneur moyenne d'humus
- 4 = plantes indicatrices d'humus

Tableau 19 : Valeurs indicatrices des espèces les plus abondantes dans les prairies sur sols artificiels

3.2.3.2 Prairies extensives VSS

L'évolution de la composition floristique des prairies VSS A et B sur un sol de 45 cm d'épaisseur à 30% de compost est résumées dans le tableau ci-dessous. Rappelons qu'à la différence des prairies mises en place en 1987, les mélanges VSS ont non seulement été engraissés lors du semis, mais également l'année suivante :

Mélange	Espèces semées [nb]	Espèces la 1ère année [nb]	Espèces dominantes	Espèces après 5 ans [nb]	Espèces dominantes
VSS A	8	4 (1)	*Lolium perenne* *Lotus corniculatus* *Trifolium repens*	29 (22)*	*Arrhenaterum elatius* *Bromus erectus* *Daucus carota* *Festuca rubra* *Medicago lupulina* *Plantago lanceolata*
VSS B	12	13 (4)*	*Festuca rubra* *Lolium perenne* *Lotus corniculatus* *Medicago lupulina* *Trifolium repens*	14 (5)*	*Achillea millefolium* *Bromus erectus* *Dactylis glomerata* *Lotus corniculatus* *Medicago lupulina* *Trifolium repens*
* = le chiffre entre parenthèses indique les espèces initialement non présentes dans le mélange					

Tableau 20 : Développement et composition floristique des prairies VSS A et B

La première année du semis, la composition floristique des prairies correspond à celle des mélanges semés. Une année plus tard, les prairies commencent à s'enrichir de nouvelles espèces provenant des prairies voisines. La colonisation est plus importante dans la prairie VSS A que B vraisemblablement en raison de la taille plus basse des espèces qui la compose (20-40 cm, contre 60 à 110 cm dans la prairie VSS B). Quatre années après son semis, le nombre d'espèces de la prairie VSS A est 7 fois plus élevé que la première année, alors que la prairie VSS B ne compte qu'une seule espèce de plus. Leur diversité floristique reste toutefois encore faible, puisqu'elle correspond à celle d'une prairie grasse. Bien qu'une partie des espèces des prairies KTZ, prairie maigre neuchâteloise et garide se soient ressemées dans les prairies VSS, ces dernières gardent une apparence très différente (peu de coloration de la prairie, dominance du jaune, du blanc et du vert, typique des prairies grasses). Leur recouvrement est par ailleurs plus irrégulier.

Comme la figure 22 de la page suivante permet de le constater, les productions sont élevées jusqu'en 1990. Dès l'arrêt de l'engraissement, elles baissent de manière importante :

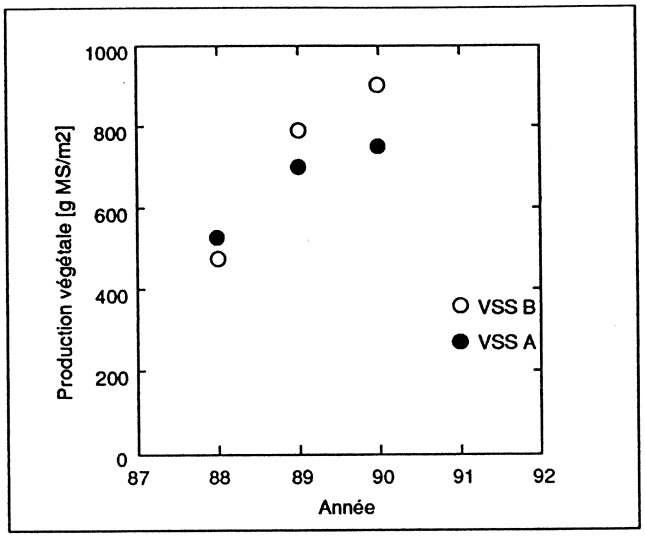


Figure 22 : Productions végétales des prairies VSS A et B

Les mélanges VSS A et B peuvent être utilisés pour le verdissement et la stabilisation des sols artificiels. Ils n'offrent toutefois pas une diversité botanique équivalente à celle d'un mélange type KTZ. Peu colorées, écologiquement plus pauvres, ces prairies répondent à des objectifs de reverdissement et de protection contre l'érosion mais non à ceux de milieux de compensation écologique.

3.2.3.3. Semis direct d'une prairie

Les résultats des essais de semis direct[15] réalisés sur un sol de 45 cm à 30% de compost (% vol.) sont résumés dans le tableau 21 ci-dessous :

Mélange	Espèces de la prairie mère [nb]	Espèces après 1 année [nb]	Espèces dominantes	Espèces après 3 ans [nb]	Espèces dominantes
Semis direct	40-50	20 (3)*	*Arrhenaterum elatius*	35 (7) *	*Arrhenaterum elatius* *Chrysanthemum leuc.* *Medicago lupulina*
* = le chiffre entre parenthèses indique les espèces initialement non présentes dans la prairie d'origine					

Tableau 21: Développement et composition floristique des prairies de semis direct

15 Rappelons que l'expérience a consisté à faucher une surface de prairie maigre naturelle équivalente à celle qui allait être créée et à épandre le foin frais.

Ce tableau permet de constater que la diversité originale des prairies de départ (40-50 espèces) n'est pas encore atteinte après 3 ans (35 espèces). Le développement des espèces de la prairie mère est lent (4 années pour l'hyppocrépide à toupet). La composition floristique met en évidence, comme dans le cas des prairies KTZ, garide et prairie maigre neuchâteloise, le succès des espèces de prairies grasses sèches comme le fromental, ainsi que celui des adventices (1/5 du nombre d'espèces total en 1991). La majorité des espèces relevées sont également présentes dans les prairies adjacentes aux parcelles de semis direct, ce qui laisse supposer qu'elles se sont ressemées et qu'elles ne viennent pas du foin épandu.

Comme le graphique ci-dessous permet de le constater, les productions végétales sont faibles en raison du recouvrement irrégulier et partiel du sol par la végétation (~50% de sol nu) :

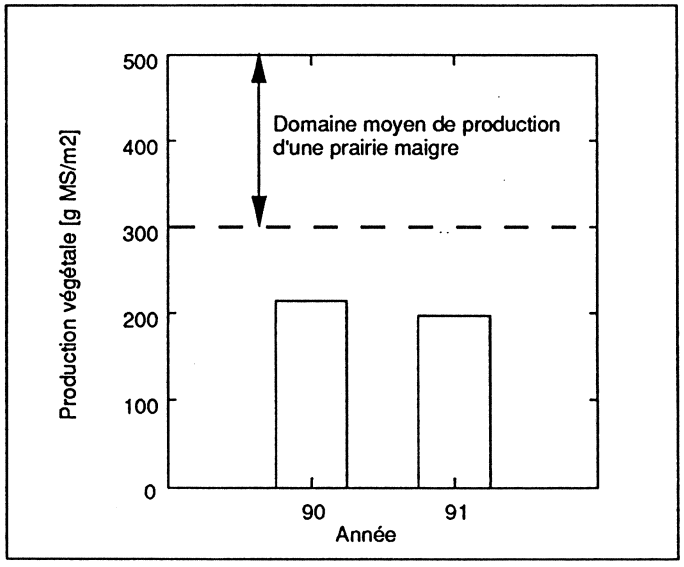


Figure 23 : Productions végétales de la prairie issue d'un semis direct

Ces essais montrent qu'il est difficile par un semis direct de retrouver rapidement la diversité floristique de la prairie d'origine. Le recouvrement du sol est plus lent et plus irrégulier par cette méthode qu'avec un mélange semé. Les espèces favorisées par les sols artificiels sont caractéristiques de prairies grasses sèches. Une teneur en compost de 10% est suffisante pour le développement et le maintien de ce type de végétation.

3.2.4. Croissance d'arbustes sur les sols artificiels

De 1987 à 1989, la croissance des arbustes indigènes plantés par pied isolé dans la garide avec 10% de compost a été lente. La très faible rétention en eau du sol et la concurrence importante de la strate herbacée sont à l'origine de ce faible développement.

Dès 1990, suite à un entretien plus intensif (arrosage pendant la saison de végétation, engraissement au printemps et en automne, fauche de la végétation au pied des arbustes), plusieurs espèces ont présenté des nouveaux rameaux ou des drageons dont la croissance annuelle a dépassé pour certains 1 mètre (chèvrefeuilles, églantier, cornouiller).

Des essais complémentaires effectués dans des sols plus riches (30% de compost), additionnés de terre végétale, ont montré que la croissance des arbustes était normale.

Ces résultats montrent que le maintien d'arbustes dans des sols artificiels de 45 cm à 10% de compost nécessite des soins comprenant des fauches à leur pieds, ainsi que des arrosages réguliers et abondants les deux premières années suivant leur plantation. Si le sol est plus riche en matière organique et qu'un apport ponctuel de terre est réalisé dans les trous de plantation, la durée de l'entretien intensif peut être réduite à une année.

3.2.5. Conclusions sur la productivité des sols artificiels et le développement de leur couverture végétale

Les résultats des mesures de production végétale et les observations effectuées entre 1986 et 1994 sur le développement de gazons et de prairies sur des sols artificiels permettent de tirer les conclusions suivantes :

- le développement des semis est analogue à celui sur terre végétale;
- sans engraissement complémentaire, la productivité des sols artificiels est faible. Elle est toutefois suffisante pour assurer un recouvrement végétal apte à éviter leur érosion. Trente à quarante kg de compost par m^2 (90 à 120 l), mélangés sur 30 cm, soit 30% en volume, permettent le développement et le maintien d'un gazon soumis à un entretien intensif (1 à 2 tonte/mois). Dix à vingt kg de compost par m^2 sur 40 cm (30 à 60 l/m^2, soit 10% en volume) suffisent si la végétation semée comprend des dictolydénones et qu'elle est soumise à un régime de fauche extensif (1 à 2 fauche/année);
- l'épaisseur du sol artificiel joue un rôle primordial dans sa capacité de rétention en eau et la croissance de la végétation. Elle doit être légèrement supérieure à la profondeur physiologique d'enracinement des végétaux (25 à 30 cm pour des gazons à base de graminées, 30 à 45 cm pour des prairies comprenant des légumineuses);
- la relative richesse en éléments nutritifs des sols artificiels et leur faible rétention en eau favorisent la croissance et le maintien d'espèces caractéristiques de prairies grasses sèches;
- pour permettre une utilisation optimale des éléments nutritifs par la végétation et garantir son enracinement en profondeur, le sol artificiel doit présenter une structure homogène et sa concentration en compost doit être la même en surface et en profondeur (pas de diminution progressive de sa teneur);
- l'ajout de marnes bleues aux sols à base de Valanginien abaisse leur productivité (et peut-être, par extension, l'ajout de toute fraction argileuse calcaire) ;
- en revanche, le remplacement du Valanginien par une roche de texture et de composition minéralogique plus diversifiée, moraines ou alluvions par exemple, améliore la productivité des sols artificiels.

3.3. Caractéristiques bio-physico-chimiques des sols

3.3.1. Etat structural

3.3.1.1. Nature du sol

La pierrosité, la texture et le taux d'humus caractérisent un sol et influencent sa stabilité structurale (risques de battance et de compactage, aération et perméabilité).

Pierrosité : Les sols artificiels testés sont riches en graviers et en cailloux. En volume, leur teneur en cailloux varie entre 10 et 90% suivant que le sol contienne 75% ou 0% de compost. La distribution des fractions grossières dépend fortement de la provenance des matériaux minéraux (abrasion par les tunneliers pour le Valanginien, dépôts fluvio-glaciaires pour les alluvions et les moraines).

Texture : Dans les sols artificiels à base de calcaires abrasés (cf. figure 24), qu'ils contiennent ou non des marnes, comme dans ceux à base de moraines ou d'alluvions, les fractions minérales inférieures à 2 mm comprennent essentiellement des particules de la taille des sables grossiers (500-2'000 µm) et des limons (2-50 µm) (texture limono-sableuse à sablo-limoneuse). Cette granulométrie relativement grossière entraîne une faible cohésion des éléments minéraux entre eux. Au toucher, les sols sont très granuleux et peu plastiques (les marnes restant en blocs).

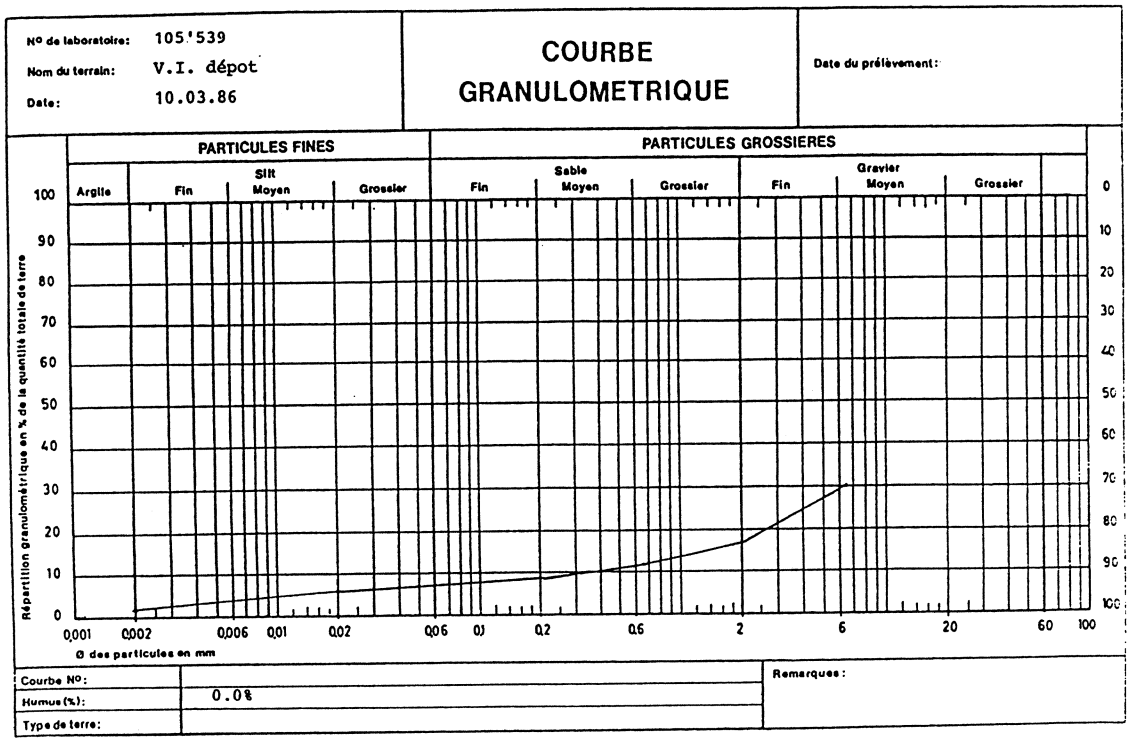


Figure 24 : Granulométrie d'un sol artificiel calcaire à base de Valanginien

Les sols artificiels composés de matériaux fortement foisonnés sont meubles et se tassent facilement sous une pression extérieure. Six années après leur mise en place, leur tassement sous la pression manuelle d'une carotteuse était encore compris entre 20 et 40%. De manière générale, les sols dont le mélange n'a pas été fait in situ sont plus sensibles au tassement que ceux dont le mélange a été fait in situ (le tassement variant dans ces derniers de 0 à 10%). Même compactés, leur macroporosité reste importante.

Humus : La teneur en humus des sols testés varie à leur mise en place entre 2 et 25%, alors que celle d'une terre végétale pour une texture équivalente est en général d'environ 2%. Selon la classification pédologique usuelle en Suisse, un sol est qualifié d'humifère lorsque sa teneur en humus égale ou dépasse 5%. Comme le montre la figure 25 ci-dessous, cette valeur est atteinte dans les sols artificiels pour une teneur en compost dans l'horizon de surface équivalente à 30% en volume [16] :

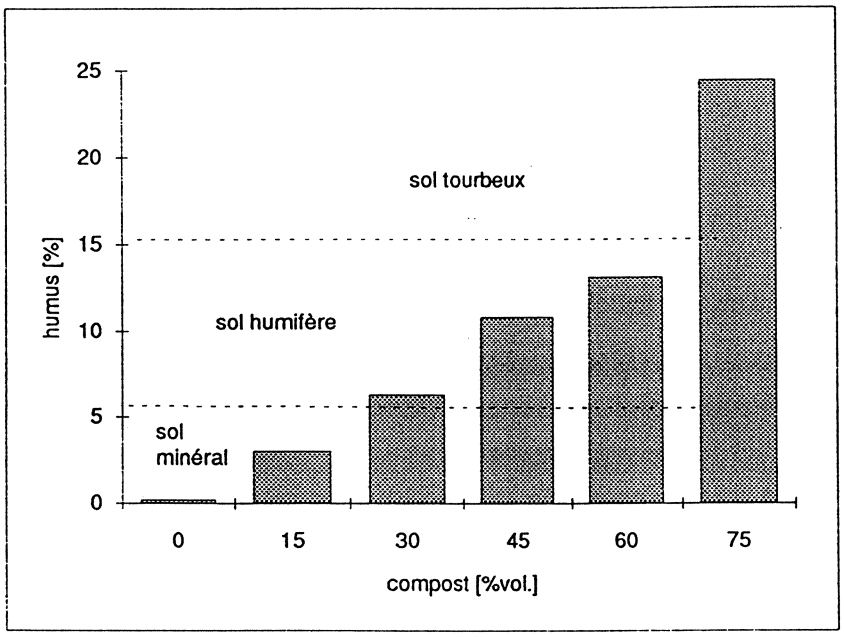


Figure 25 : Teneurs en humus des sols artificiels à leur mise en place

Suite aux processus de renouvellement et de minéralisation de la matière organique, les teneurs en humus des sols ont significativement changé sept années après leur mise en place comme le montre la figure 26 de la page suivante :

[16] Sur la bases des analyses effectuées sur le compost pur, sa teneur en matière organique (MO) est égale à 76,8% de sa teneur en matière sèche et sa teneur en humus est égal à 72,8 % de sa MO

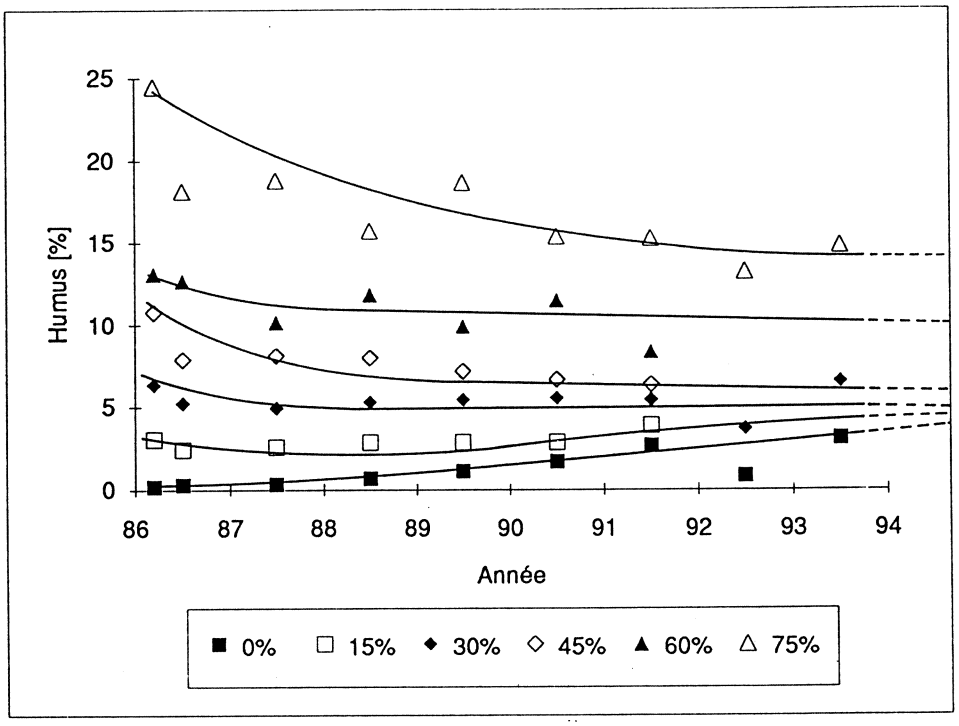


Figure 26 : Evolution des teneurs en humus au cours du temps

Sur la base de ces résultats, on observe 3 tendances distinctes qui tendent à converger vers une valeur d'humus commune à tous les sols :

- une diminution de la teneur en humus dans les sols possédant plus de 30% en compost dans leur horizon de surface;
- un maintien de la teneur en humus dans les sols avec 30% de compost;
- une augmentation de la teneur en humus dans les sols pauvres en matière organique ayant 0 ou 15 % de compost.

Ces évolutions différentes d'un sol à l'autre traduisent toutefois des processus de minéralisation et d'humification de la matière organique qui leur sont communs et qui sont schématisés sur la figure 27 de la page suivante.

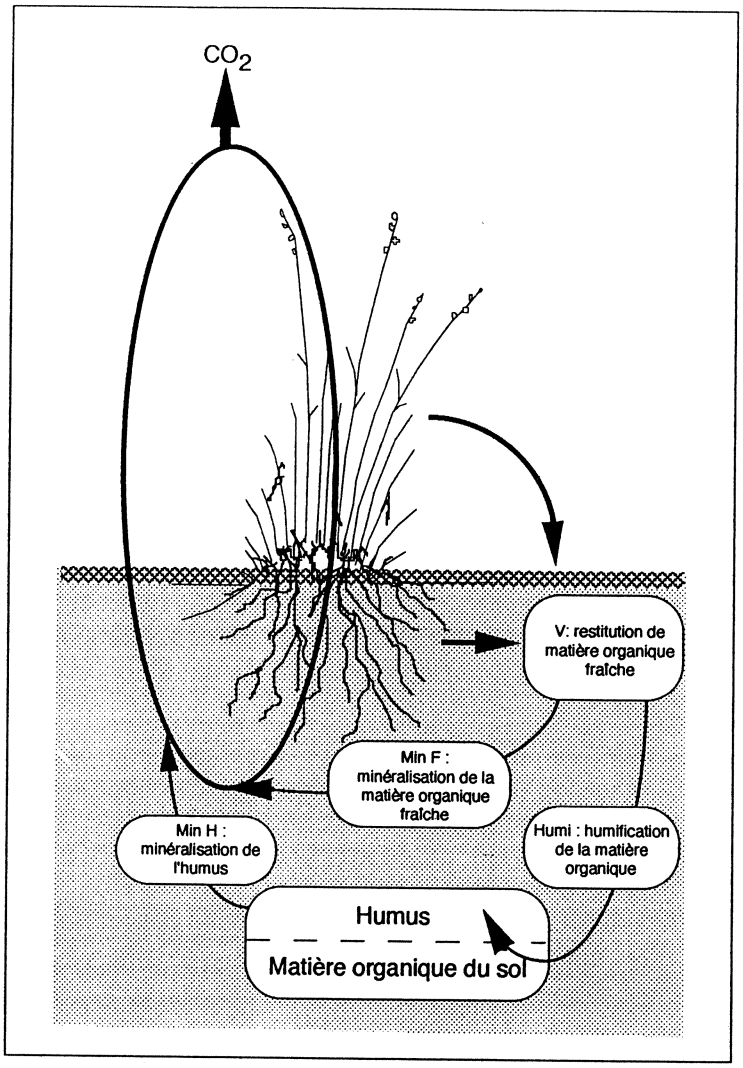


Figure 27 : Représentation schématique du turn-over de la matière organique

En admettant :

- que l'apport annuel de matière organique fraîche (V) est le même pour tous les sols[17] :

  V = 1 g/100g de sol

- que la minéralisation de la matière organique fraîche (Min F) = 50%

- que la minéralisation de la matière humifiée (Min H) est très faible :

  Min H : 3% pour l'humus (selon résultats de dégagement de CO_2 des sols artificiels soumis en laboratoire à des tests d'incubation, 1986-1993)

- et que l'humification de la biomasse fraîche est faible en raison de son rapport C/N bas :

  Humi : 10% (Henin, 1969)

[17] Cette hypothèse est valable pour les sols engraissés dont la production végétale est équivalente d'un sol à l'autre

il est possible de prédire l'évolution à moyen et long terme des teneurs en humus dans les sols artificiels.

Sur la base de ces hypothèses, les teneurs en humus atteindront à long terme une valeur commune d'environ 4%. Comme leurs teneurs en calcaire actif sont très élevées et que cet élément ralentit la minéralisation de l'humus, l'équilibre dynamique entre la quantité annuelle de matière organique humifiée et celle minéralisée ne sera pas atteint avant une centaine d'années. D'ici une vingtaine d'années, les teneurs seront encore très proches de celles mesurées en 1993 (2,3 % pour le sol sans compost, 12 % pour celui à 75%).

En résumé, les sols artificiels testés sont caillouteux et leur terre fine est limono-sableuse. Ils sont minéraux avec moins de 30% de compost (vol.), humifères jusqu'à 60% et tourbeux avec 75% de compost. Leur teneur en humus évolue sous l'action conjuguée des processus d'apport, de minéralisation et d'humification, pour tendre vers une valeur d'équilibre de 4% environ (valeur correspondant à une teneur de départ en compost de 30%).

3.3.1.2. Structure

La structure d'un sol désigne le mode d'assemblage des particules et leur répartition dans l'espace. Elle conditionne l'ensemble de ses propriétés physiques et chimiques fondamentales : aération et possibilités de respiration des racines, rétention en eau, perméabilité, capacité d'échange cationique,... Elle résulte de processus biologiques, chimiques, physiques qui agissent de manière concomitante ou seuls suivant la nature du sol.

Les sols artificiels développent dans leurs 15 à 30 premiers centimètres une structure grumeleuse, ceci dès la deuxième année suivant leur mise en place (agrégats millimétriques à centimétriques). A l'oeil nu, la structure est la même que le sol contienne 15 ou 75% de compost. Au toucher, les agrégats sont plus friables dans les sols de texture sableuse (sols à base de moraines ou d'alluvions) que dans ceux de texture limono-sableuse (sols à bases de calcaire). Leur nombre augmente avec la densité du chevelu racinaire qui est maximal dans les sols recouverts d'un gazon à base de graminées. En profondeur, hors de la zone d'influence des racines, la structure héritée de leur mode de mise en place reste dominante (blocs de marnes compactés, semelle de labour par exemple, pas de restructuration ou de mélange intime des constituants).

A la loupe binoculaire et au microscope (cf. photos à la page 64), on constate que ces agrégats sont souvent le produit du travail de la faune du sol (déjections de vers de

terre[18], boulettes fécales d'enchytréides ou de collemboles). Les agrégats contiennent des éléments figurés encore nettement identifiables (fragments de bois provenant du compost, sables calcaires, graviers). Les boulettes fécales de quelques dizaines de µm, concentrées au niveau du feutrage racinaire, sont constituées en grande partie de matière organique fragmentée et d'un peu de matière minérale. De manière générale, les constituants de départ (compost, calcaire, moraines) sont encore peu dégradés ou altérés. Quelques rares golfes de corrosion ont été relevés sur les fragments minéraux calcaires. Les fibres de matière organique sont souvent recouvertes d'une pellicule de quelques microns de carbonates.

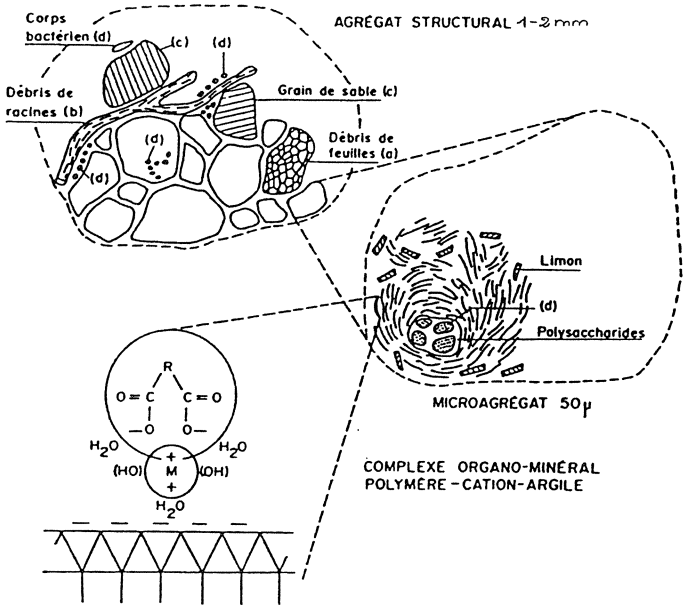
La structuration du sol est également décelable par l'analyse du fractionnement de la matière organique. Dans un sol naturel, le mélange intime de la matière organique et de la matière minérale se traduit par la présence d'agrégats de très petite taille (< 50 µm), riches en carbone organique, qui constituent la réserve hydrique et nutritive du sol. Dans les sols artificiels, la première année de leur mise en place, les fractions fines étaient essentiellement minérales (limon et argiles) et la matière organique apportée par le compost était concentrée dans les fractions plus grossières (> 100 µm). Au cours du temps, on assiste à la formation progressive de micro-agrégats et à une diminution de la taille des éléments organiques qui enrichissent en carbone les fractions fines.

En l'espace de quelques années des structures organo-minérales analogues à celles des sols naturels se forment dans les sols artificiels. Elles résultent en grande partie des exsudats racinaires et de l'action de la faune du sol qui fragmente, ingère et mélange les fibres de compost et particules minérales.

[18] Bien que seuls trois carrés aient été inoculés avec des vers de terre, tous les sols ont été progressivement colonisés par des vers de terre, cf.également § 3.3.3.1.

Structure observable à l'oeil nu
(agrégats de 1 à 2 mm)

Détail d'un agrégat de 1 mm à la loupe binoculaire
pris dans le chevelu racinaire

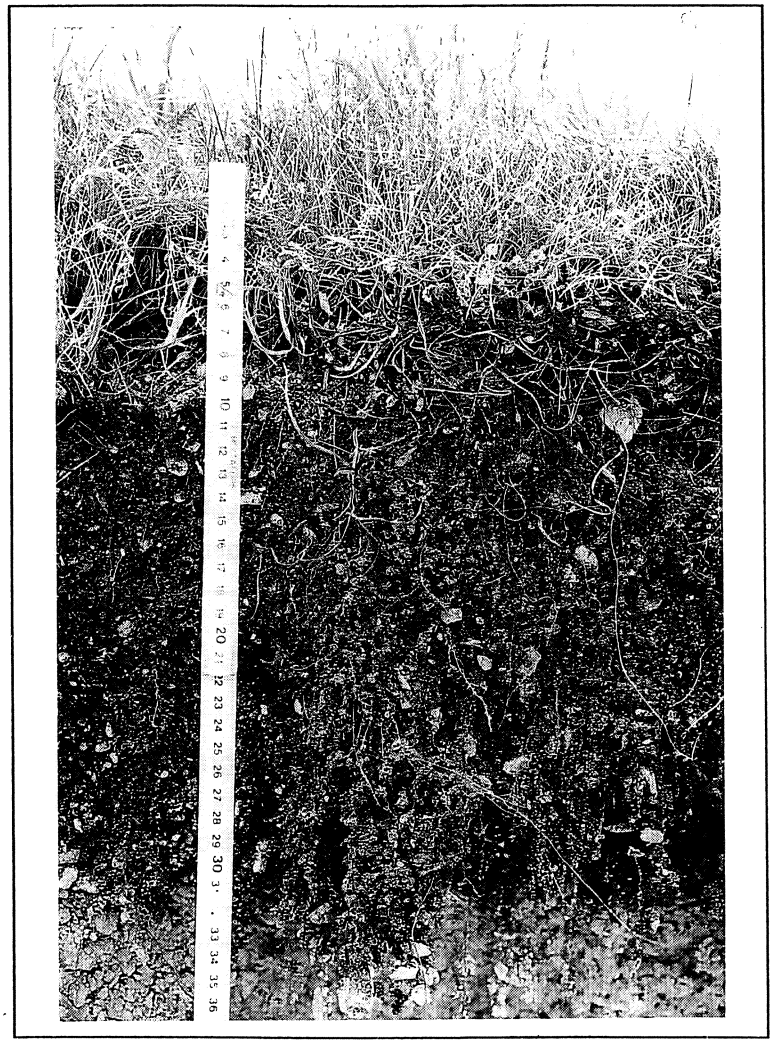


Au microscope une partie de cet agrégat
(agrandissemen 160 X)

en gris : sable calcaire
en brun : fibres de compost partiellement digérées

3.3.1.3. Croissance des racines

Les observations visuelles du chevelu racinaire réalisées chaque année sur des carottes ou des lames de sol, ainsi que les mesures de biomasse, sont résumées ci-dessous et illustrées par la photo suivante :



Enracinement d'un gazon dans un sol artificiel calcaire à 30% de compost

- la profondeur d'enracinement de la végétation varie en fonction de sa composition floristique, de l'homogénéité du sol et de son mode de mise en place : elle est comprise entre 20 et 30 cm en moyenne pour les gazons à base de graminées et peut atteindre 45 cm pour les prairies. La composition minérale du sol n'entraîne pas de différences significatives dans le développement de la biomasse racinaire. Dans les sols constitués de deux horizons, l'enracinement est superficiel et se limite à l'épaisseur de l'horizon de surface. La limite est d'autant plus nette que les compositions des deux horizons diffèrent fortement. Les sols mis en place in situ (mélange des constituants à la bêcheuse) montrent

un enracinement de leur couverture végétale moins profond que ceux dont le mélange a précédé la mise en place et qui sont plus homogènes et moins tassés;

- la répartition du chevelu racinaire est plus homogène dans les sols à base de compost que dans ceux qui en sont dépourvus. La proportion de racines fines y est par ailleurs plus élevée;
- les racines se développent aussi bien entre les agrégats qu'au sein des agrégats et ne colonisent pas préférentiellement les galeries des vers de terre. Le chevelu racinaire est sain, quelle que soit la teneur en compost du sol. Son développement est maximal dans les dix premiers centimètres. Il confère aux sols artificiels une certaine "élasticité" qui les rend moins sensibles au tassement.

Le mélange de composants grossiers très différents, comme du compost et des fragments de roches calcaires, ne constitue pas une entrave au développement des racines. Le chevelu racinaire est d'autant plus régulier et homogène que la teneur en compost du sol est élevée.

3.3.1.4. Résistance mécanique

Les résistances mécaniques des sols engraissés et arrosés, recouverts d'un gazon, toutes teneurs en compost confondues, sont illustrées par la figure 28. De 1986 à 1991, les mesures ont été faites sur les sols de 15 cm, les années suivantes sur les sols de 45 cm.

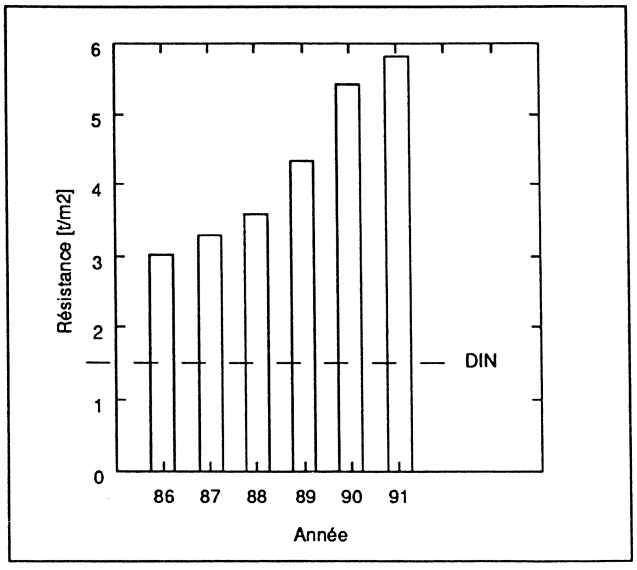


Figure 28 : Résistances mécaniques des sols artificiels arrosés et engraissés (1986-1991)

La résistance mécanique des sols artificiels augmente avec le temps et le développement du chevelu racinaire. Quel que soit le sol ou l'année considérée, elle est supérieure à la valeur DIN de 1,5 t/m^2 requise pour les gazons de terrain de sport (norme DIN, 18035-4). Le traitement statistique de ces données montre que les valeurs diffèrent significativement entre années, qu'elles dépendent de la teneur en compost ou en calcaire du sol, de son épaisseur et de sa production végétale. La figure 29 illustre l'influence de la teneur en compost :

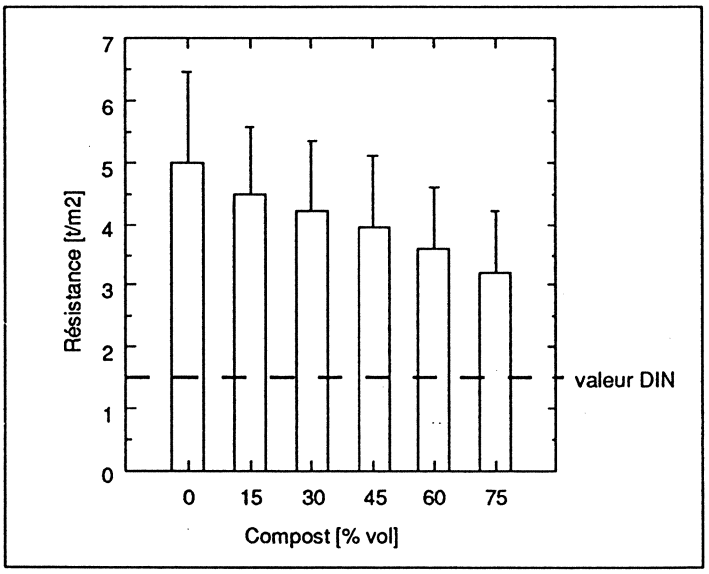


Figure 29 : *Résistances mécaniques des sols en fonction de leur teneur en compost (moyenne et écart-type 1986-1993)*

Les résistances mécaniques des sols artificiels décroissent de manière linéaire avec l'augmentation de leur teneur en compost qui s'accompagne d'une diminution des cailloux (qui entravent la rotation de l'ailette du dynamomètre).

Les espèces qui composent la couverture végétale influencent la résistance mécanique des sols. Les graminées dont le chevelu racinaire est très dense en surface offrent en général une résistance plus élevée que les légumineuses.

Bien que présentant une structure de départ très meuble et foisonnée, les sols artificiels acquièrent rapidement une résistance mécanique élevée que renforce une couverture végétale riche en graminées.

3.3.1.5. Perméabilité et rétention en eau

Perméabilité : La figure 30 ci-dessous présente les valeurs de conductivité hydraulique [k] des sols à base de Valanginien mesurées entre 1986 et 1993. La perméabilité des variantes sans compost ne différant pas significativement de celles qui en contiennent pour des raisons qui seront évoquées plus loin, seules les valeurs moyennes des sols avec 0, 30 et 75 % de compost sont représentées :

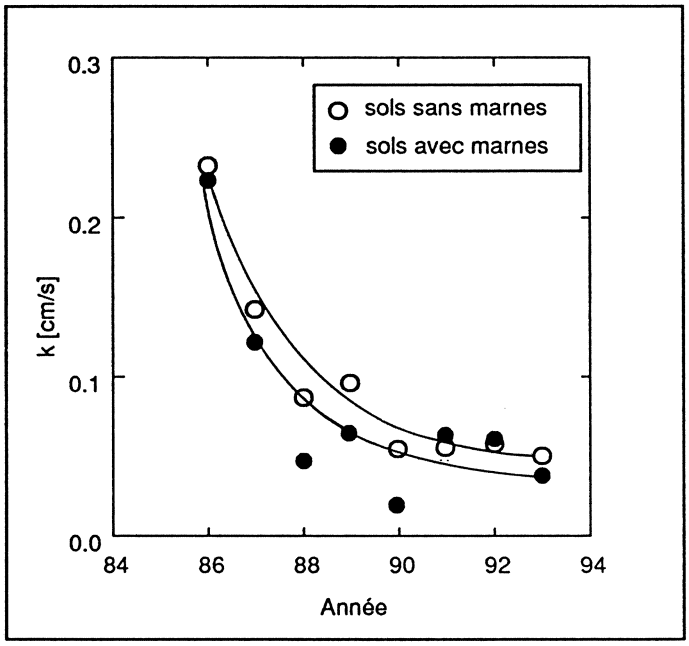


Figure 30 : Evolution de la conductivité hydraulique dans les sols artificiels (moyenne des sols à 0, 30 et 75 % de compost)

La perméabilité des sols artificiels diminue de manière exponentielle dès la première année suivant leur mise en place pour se stabiliser deux à trois ans plus tard vers une valeur équivalente à celle d'un mélange de sables et de graviers. Cette diminution est due au tassement naturel des constituants. Lorsque les sols contiennent des marnes, les vitesses d'infiltration sont plus faibles, mais restent égales à celles de sables et de graviers. Que la fraction minérale de départ soit faite de calcaires abrasés, d'alluvions ou de moraines, leur texture et leur pierrosité très proches entraînent des perméabilités identiques.

Le tableau 22 synthétise les valeurs mesurées sur les sols artificiels et les compare à celles de sols naturels :

K s[m/s]	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Perméabilité	Perméable				Semi-perméable			Imperméable			
Type de sols	Gravier sans sable ni éléments fins		Sable avec gravier Sable grossier à sable fin			Sable très fin Limon grossier à limon argileux		Argile limoneuse à argile homogène			
					Tourbes						
sols artificiels			Valanginien + compost		moraines/ alluvions + compost						
terre végétale											

Tableau 22 : Perméabilité des sols artificiels

Ce tableau rend compte de la perméabilité élevée des sols artificiels. Sur des lames minces effectuées en surface, leur macroporosité a été estimée entre 10 et 30 %. Elle leur assure un ressuyage rapide, mais indique indirectement aussi que leur rétention en eau est faible.

Le suivi en lysimètre de la dynamique d'écoulement de l'eau dans les différents sols artificiels confirme leur similitude de comportement, indépendamment de leur teneur en compost. Il apporte par ailleurs les renseignements suivants :

- en moyenne et suivant l'année, 60 à 78 % de l'eau tombant sur les sols est évaporée ou évapotranspirée, alors que 22 à 40% percole. Dans la terre végétale, 69 à 83% de l'eau est évaporée ou évapotranspirée, alors que 17 à 31% percole;
- l'écoulement est maximal en automne et en hiver, alors qu'en saison de végétation il est souvent égal à zéro en raison de l'évapotranspiration;
- la percolation de l'eau dans les sols artificiels est très rapide. Les essais réalisés sur ceux à 75% de compost soumis à un arrosage de 50 mm après une phase de dessiccation montrent qu'en deux heures environ, 50% de l'eau d'arrosage a déjà traversé 45 cm de sol et 50 cm de remblai.

En résumé, les sols artificiels ont une macroporosité élevée et sont très perméables. L'influence du compost sur leur perméabilité et sur les bilans annuels d'écoulement des eaux gravitaires est négligeable en regard de celle exercée par leur granulométrie et leur pierrosité. La végétation joue un rôle important dans la régulation de l'écoulement des eaux, raison pour laquelle il est important qu'elle se développe rapidement après la mise en place des sols.

Rétention en eau : La capacité de rétention en eau d'un sol est définie comme la quantité d'eau qu'il retient après que toute l'eau gravitaire ait percolé. Sa mesure est basée sur la teneur en eau résiduelle du sol après l'application d'une pression de 0,33 atm. La quantité d'eau disponible pour les plantes correspond à la différence entre les valeurs mesurées entre 0,33 atm et de 10 atm. Les mesures réalisées sur les sols expérimentaux peu après leur mise en place et deux années plus tard sont illustrées par la figure 31 ci-dessous :

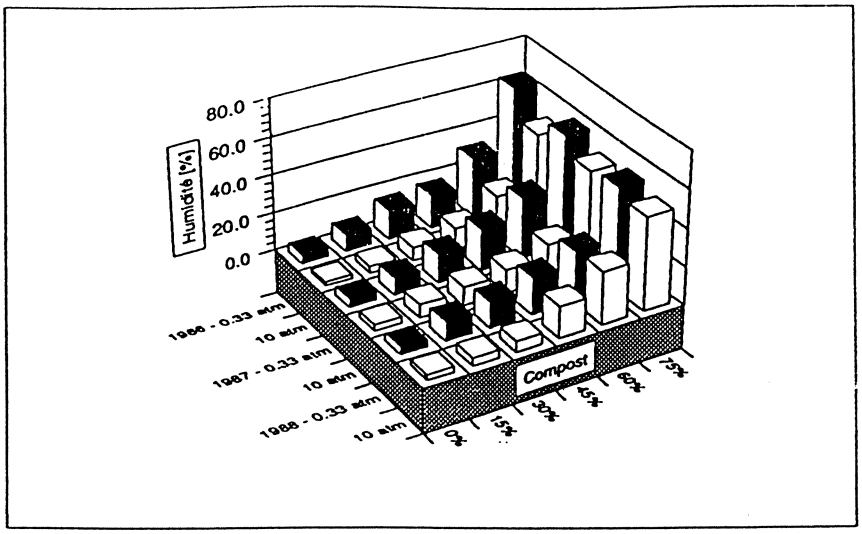


Figure 31 : Variations d'humidité pondérale dans les sols artificiels entre 1986 et 1988

On constate que la capacité de rétention en eau des sols augmente avec leur teneur en compost, mais que la quantité d'eau disponible pour les plantes reste la même et qu'elle est faible (différence entre 0,33 et 10 atm). Aucune évolution significative n'a été constatée entre 1986 et 1988.

Les sols artificiels testés sont des filtres à mailles grossières qui retiennent peu l'eau. L'apport de compost en quantité importante n'améliore que faiblement cette capacité de rétention. Leur végétalisation doit par conséquent être faite avec des espèces supportant la sécheresse, espèces dont les valeurs d'humidité sont de 1 à 3 selon la classification de Landolt. Les semis doivent bénéficier de précipitations naturelles ou d'un arrosage artificiel. L'implantation de prairies à molinie sur les sols artificiels serait par exemple impossible.

3.3.2. Caractéristiques chimiques

3.3.2.1. Fertilité des sols artificiels

Tous les sols artificiels testés sont calcaires et présentent un pH alcalin (> 7.3). Ils contiennent des quantités importantes de calcaire actif et de calcium qui constituent plus de 95% des bases échangeables fixées sur le complexe absorbant du sol, comme l'illustre la figure 32 ci-dessous :

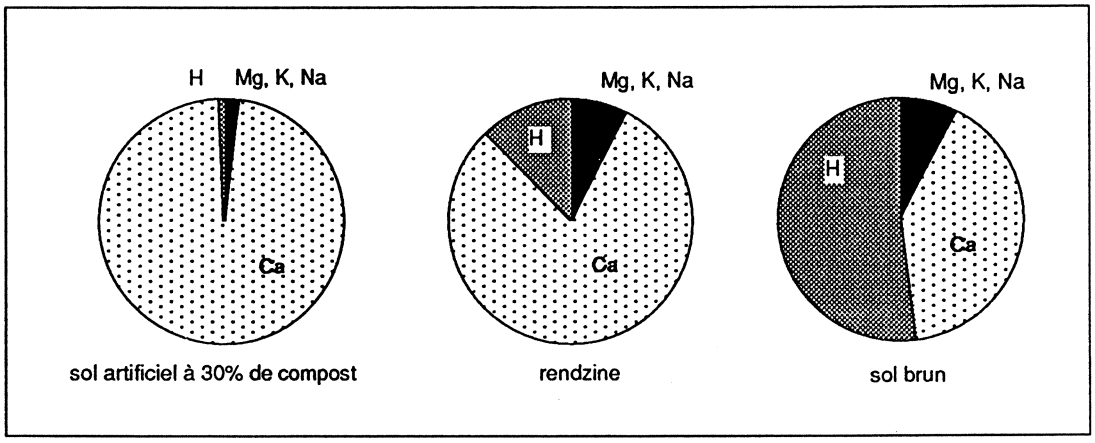


Figure 32 : Capacité d'échange cationique des sols artificiels et de sols naturels

Cette caractéristique les rend proche de sols naturels calcaires (rendzine par exemple).

En fonction de leur teneur en humus, ils sont, comme on l'a vu plus haut (figure 25), soit des sols minéraux, soit des sols humifères, soit encore des sols tourbeux. Le tableau 23 ci-dessous compare la salinité et la granulométrie des sols artificiels à celles de sols naturels :

	domaine de variation			
	sols artificiels	sols naturels		
		minéral	humifère	tourbeux
pH (EAU)	7.6-8.3	7.6-8.2	7.6-8.1	7.3-7.9
pH (AL)	5.2-5.6	4.0-4.6	4.0-4.5	4.0-4.3
Sels [mg/100g]	28-209	37-50	46-70	50-120
Argile (%)	7-18	14-100	20-38	27-100
Limon (%)	19-30	17-100	17-34	25-100
Sable (%)	54-81	56-70	40-100	25-51
Humus (%)	0.1-25.3	1.9-3.2	6.2-10.2	8-20

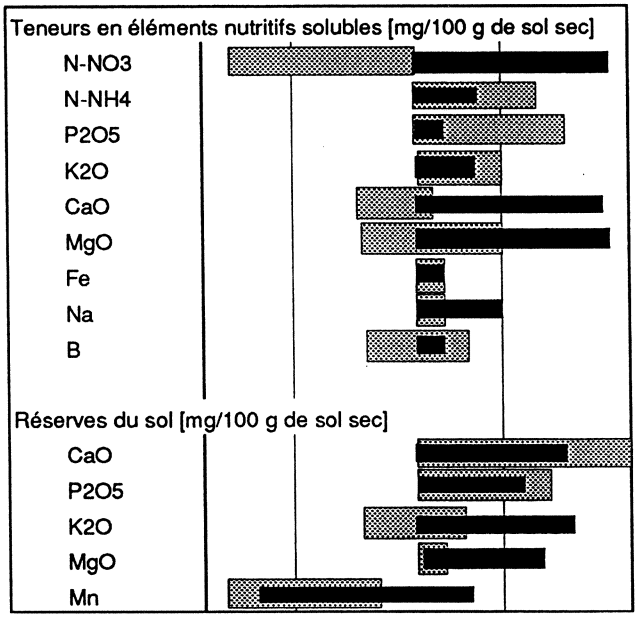
Tableau 23 : Classes de sols calcaires naturels et domaine de variation des sols artificiels

Leur salinité est supérieure à celles de sols agricoles de texture équivalente, en particulier lorsqu'ils contiennent du compost de boues et des marnes comme le montre le tableau 24.

	Sols artificiels						sol minéral
	Année de mise en place			**1993**			léger
	1986	1986	1987				calcaire
Comp. [%V fr]	30	30	30	30	30	30	
boues	3/3	3/3	1/3	3/3	3/3	1/3	
déchets verts	-	-	2/3	-	-	2/3	
Valanginien [%V fr]	70	53	53	70	53	53	
Marnes [%V fr]	0	18	18	0	18	18	
Mesures physico-chimiques							
pH (EAU)	7.6	7.6	8.0	7.5	7.8	7.7	7.6-8.2
pH (AL)	5.6	5.6	5.4	5.4	5.4	5.4	4.0-4.6
Sels [mg/100g]	162	209	55	52	54	63	37-50
Argile (%)	10	14	14	13	18	16	14-100
Limon (%)	20	25	25	22	25	25	17-100
Sable (%)	70	61	61	65	58	58	56-70
Humus (%)	6.4	6.2	3.8	5.4	6.5	6.0	1.9-3.2
N-tot [mg/g]	-	-	-	2.5	3.1	2.6	-
P205 tot [mg/g]	-	-	-	7.0	6.9	2.1	-
Teneurs en éléments nutritifs solubles [mg/100 g de sol sec]							
N-NO3	26.3	26.3	0.2	0.1	0.1	0.3	1.2-2.1
N-NH4	0.9	0.7	0.3	1.0	1.4	2.8	0.4-0.5
P2O5	0.4	0.2	0.7	2.9	2.3	2.3	0.3-0.6
K2O	3.4	5.1	12.8	5.7	6.7	9.7	1.5-2.8
CaO	69.4	93.6	12.5	21.5	22.5	22.5	14-18
MgO	4.6	12.2	2.9	2.0	1.7	3.3	0.9-1.2
Fe	0.09	0.03	0.26	0.53	0.36	0.34	0.3-0.6
Na	2.3	2.7	2.6	2.4	2.0	2.0	1.6-2.0
B	0.06	0.07	0.08	0.03	0.03	0.04	0.02-0.03
Réserves du sol [mg/100 g de sol sec]							
CaO	20'800	21'300	20'700	20'907	20'716	20'828	2'400-5'500
P2O5	26	25	17	42	43	29	19-32
K2O	9	10	26	18	26	24	10-18
MgO	93	137	134	103	129	149	67-148
Mn	5	5	7	17	13	18	39-48

Tableau 24 : Analyses bio-physico-chimiques de sols artifiiciels à 30% de compost l'année de leur mise en place et 7 années plus tard

A leur mise en place, leurs caractéristiques agronomiques sont très différentes de sols naturels. Elles le restent à court terme, quand bien même les concentrations en éléments solubles sont plus faibles qu'au départ (cf. tableau 25).



	Domaine de variation dans un sol artificiel	Domaine de variation dans un sol minéral calcaire
Teneurs en éléments nutritifs solubles [mg/100 g de sol sec]		
N-NO3	0-26.3	1.2-2.1
N-NH4	0.8-0.9	0.4-0.5
P2O5	0.4-1.1	0.3-0.6
K2O	3.4-3.9	1.5-2.8
CaO	20-70	14-18
MgO	0.9-4.6	0.9-1.2
Fe	0.1-0.8	0.3-0.6
Na	2.0-2.3	1.6-2.0
B	0.02-0.06	0.02-0.03
Réserves du sol [mg/100 g de sol sec]		
CaO	20'800-20'650	2'400-5'500
P2O5	26-39	19-32
K2O	9-26	10-18
MgO	88-134	67-148
Mn	5-12	39-48

■ valeurs mesurées à la mise en place des sols

▒ valeurs mesurées 7 années plus tard

Tableau 25 : Caractéristiques générales de fertilité d'un sol artificiel non engraissé à 30% de compost (min-max.)

De manière générale, les teneurs en **phosphore** des sols à base de compost de boues sont élevées et supérieures à celles de sols agricoles. Avec 3% de compost en volume, les sols atteignent déjà un niveau de fertilité que l'on qualifierait de "satisfaisant" dans un sol naturel selon le barême de l'état de fertilité des stations fédérales de recherches agronomiques. Le phosphore, en grande partie sous forme organique dans un sol naturel (entre 20 et 80 %), se trouve dans les sols artificiels essentiellement sous forme inorganique du fait de son extraction des eaux usées par du chlorure ferrique (cf. figure 33 à la page suivante).

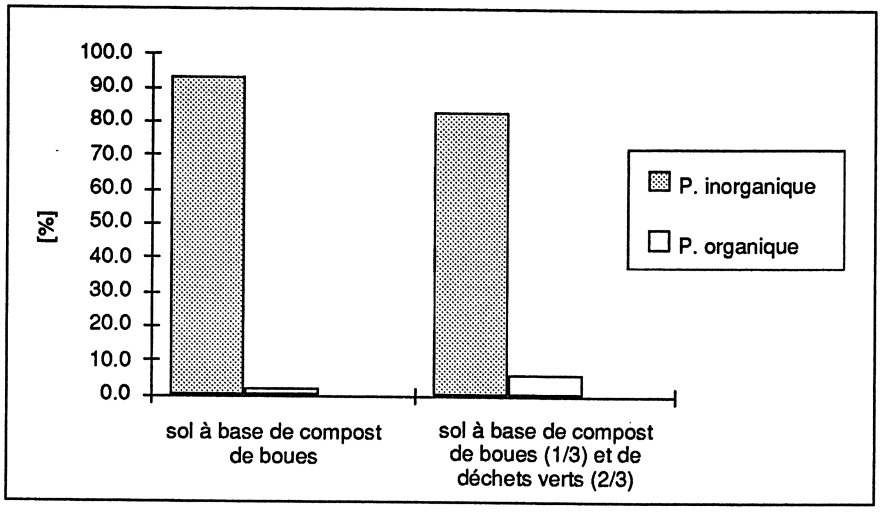


Figure 33 : Distribution du phosphore extractible dans les sols artificiels 7 années après leur mise en place

Dans les sols contenant du compost de déchets verts, la proportion de phosphore lié à la matière organique est légèrement plus élevée que dans ceux à base de compost de boues uniquement.

La figure 34 présente l'évolution entre 1986 et 1993 des concentrations en phosphore dans les réserves des sols engraissés et non engraissés (par réserve on entend des formes potentiellement disponibles pour la végétation) :

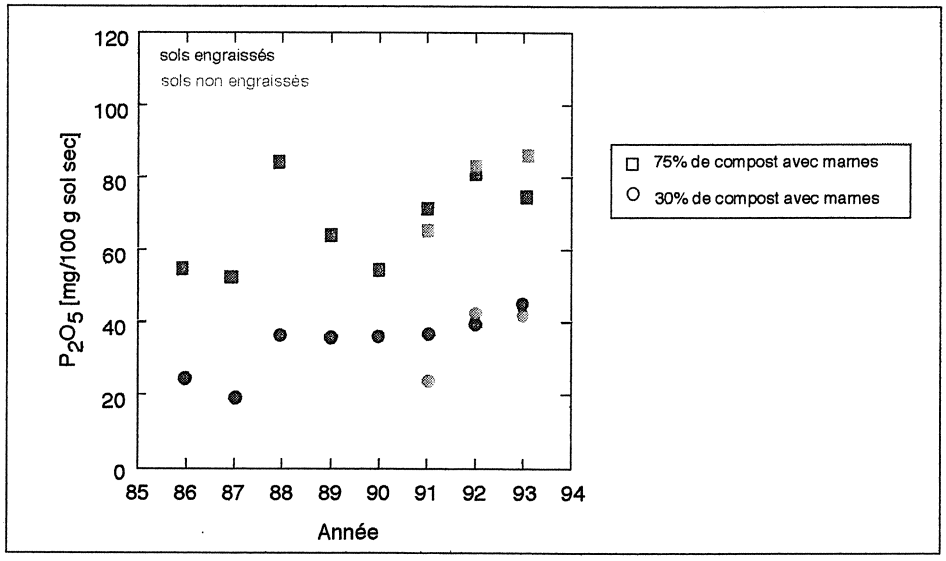


Figure 34 : Evolution des teneurs en phosphore dans les réserves de deux sols engraissés et non engraissés

On constate que les concentrations en phosphore des réserves augmentent avec le temps dans les sols engraissés et dans ceux non engraissés. Elles sont du même ordre

de grandeur chez les uns comme chez les autres, avec ou sans apport d'engrais de synthèse. Cette évolution laisse supposer que les microorganismes, par leur action de fragmentation, d'ingestion et de minéralisation de la matière organique, accèdent également aux formes inorganiques du phosphore et améliorent sa disponibilité.

Les teneurs en **azote** des sols artificiels dépendent, comme pour le phosphore, des quantités de compost utilisés et de son origine (compost de boues ou compost de déchets verts). Comme le tableau 24 permet de le constater, les sols initiaux contiennent des teneurs en azote minéral (NO_3^- + NH_4^+) nettement supérieures à celles de sols agricoles. Ces concentrations tombent toutefois en l'espace de 3 mois à un niveau proche de zéro sous l'effet du lessivage et de leur consommation par la végétation. Le stock total d'azote diminue également au cours du temps suite à la minéralisation de la matière organique (2 à 20% par année suivant les variantes).

Pour respecter les exigences de l'OFEFP et de la FAC sur les terres artificelles, la teneur en compost du sol en volume devrait être au maximum de 30 %, ce qui correspond à une teneur en azote total du sol de 0,3 % de matière sèche.

Le rapport carbone/azote des sols artificiels (C/N = 15-20) est en moyenne plus élevé que celui de sols naturels calcaires humifères biologiquement actifs (C/N = 9-15). Cette différence est due à la richesse en carbone et à la stabilité des composts (la sciure a par exemple un C/N supérieur à 70). Au cours du temps, l'apport par la végétation de matière organique facilement biodégradable et riche en azote (exsudats racinaires) atténue cet écart. Sept années après leur mise en place, seuls les sols artificiels à base de compost de boues ont encore un C/N plus élevé qu'un sol naturel. A long terme, ces différences devraient disparaître.

Les sols artificiels contenant du compost de déchets verts sont riches en **potassium**; leurs teneurs sont de manière générale plus élevées que celles de sols naturels (cf. tableau 24).

Si les composts contiennent des quantités importantes d'éléments nutritifs majeurs, leur apport en oligo-éléments est en revanche faible (Mn en particulier). La composition minéralogique de la roche mère peut, selon son origine et dans une certaine mesure, compenser cette carence. C'est par exemple le cas pour les moraines, mais pas pour les calcaires.

En résumé, les sols artificiels constitués de compost sont initialement très riches en éléments nutritifs majeurs. Ils sont saturés en calcium, possèdent un pH très alcalin et se rapprochent des sols caillouteux calcaires humifères du Jura. Comme les composts possèdent soit des teneurs élevées en phosphore s'ils contiennent des boues, soit des teneurs élevées en potassium s'ils sont faits à partir de déchets verts, leur mélange permet d'équilibrer le rapport de ces éléments et d'améliorer ainsi leur fertilité.

3.3.2.2. Teneurs en métaux lourds

Teneurs totales dans le sol : Les teneurs en métaux lourds mesurées dans les sols au moment de leur mise en place sont présentées dans le tableau 26.

SOLS ARTIFICIELS						NORME
Compost [% vol]	15	30			45	
Type de compost	boues	boues	1/3 boues+2/3 déchets verts		boues	
Type de roche	Valanginien	Valanginien	Valanginien	moraines	Valanginien	Valeurs limites
Métaux [g/t]						
Cd	**0.4**	**0.8**	0.2	<0.2	**1.2**	0.4
Cr	4	7	3	24	11	37
Co	1	2	2	7	2	13
Cu	9	20	6	19	**34**	25
Ni	4	4	5	**57**	5	25
Mo	2.0	2.0	<2	<2	2	2.5
Pb	20	**44**	20	25	**77**	25
Zn	45	91	28	71	**155**	100

Tableau 26 : Teneurs en métaux lourds dans les sols artificiels (en gras, atteinte ou dépassement des valeurs limites pour les terres artificielles)

Les sols testés à base de compost de boues ont des teneurs en métaux lourds relativement élevées. Dès 15% (vol.), la demi-valeur Osol pour le cadmium est atteinte. Pour le plomb, le cuivre et le zinc, les valeurs limites sont atteintes dès 20% de compost de boues environ. L'utilisation complémentaire de compost de déchets verts permet d'obtenir des sols dont les teneurs en métaux sont plus basses. Selon les types de substrats minéraux et les composts utilisés, le volume maximum de compost peut être calculé comme suit en admettant les exigences et hypothèses suivantes :

- la teneur en métaux lourds (b[19]) du sol artificiel (mg/kg de terre fine < 2mm) ne doit pas dépasser les valeurs limites admises pour les terres artificielles (1/2 Osol);
- à long terme la totalité des métaux apportés par le compost se retrouve dans la fraction fine du sol (f =1);

[19] où b est donné par l'équation suivante : $b = \frac{a \cdot f \cdot M}{gm + fM}$

a : teneur massique en métaux du compost de départ (teneur totale)
g : fraction de la roche < 2 mm
f : fraction du compost < 2 mm
M : masse du compost
m : masse de la roche

alors

$$\frac{V_{compost}}{V_{compost} + V_{roche}} = \frac{\rho_{roche}\, g}{(\rho_{roche}\, g) + (\rho_{compost}\, f\,[(a/b) - 1])}$$

où b : teneur massique en métaux du sol artificiel = 1/2 Osol
a : teneur massique en métaux du compost de départ (teneur totale)
g : fraction de la roche < 2 mm
f : fraction du compost < 2 mm
M : masse du compost
m : masse de la roche
$\rho_{compost}$: masse volumique du compost
ρ_{roche} : masse volumique de la roche
$V_{compost}$: volume de compost
V_{roche} : volume de roche

A titre d'exemple, si un compost de boues ($\rho_{compost}$ =0.3 t/m^3) avec des teneurs en métaux lourds égalant les valeurs limites de l'Osubst était mélangé à une fraction minérale composée à 70% d'éléments grossiers (g = 0,3, ρ_{roche}=1.5 t/m^3), l'apport ne devrait pas dépasser 6% du volume total. Si un compost de déchets verts était utilisé, l'apport pourrait aller jusqu'à 27 % du volume total. Dans cette exemple, le cuivre est le métal qui empêche un apport plus important de compost de boues, et le nickel celui de déchets verts.

Comme le tableau 26 permet de le constater, la nature de la fraction minérale influence également la charge polluante des sols artificiels. Dans le cas de Neuchâtel, les moraines possèdent des teneurs naturelles (géogènes) en nickel qui dépassent la valeur indicative de l'Osol. Une solubilisation de ce métal n'est toutefois pas à craindre dans la mesure où celui-ci fait partie intégrante des structures cristallines des minéraux.

Teneurs solubles et disponibilité des métaux : Pour évaluer la solubilité des métaux et par conséquent leur risque d'assimilation par les plantes ou la microfaune, une extraction séquentielle a été effectuée sur les sols à 30% de compost de boues, après leur mise en place et cinq années plus tard (tableau 27 de la page suivante). La part de métaux extractible au $NaNO_3$ est facilement disponible, les métaux précipités avec des carbonates peuvent passer dans la solution du sol si les conditions physico-chimiques du milieu changent (baisse du pH par exemple), le solde est adsorbé ou complexé par de la matière organique ou de la matière minérale amorphe ou cristallisée (peu disponible).

	NaNO3 [%] (facilement diponible)		CaCO3 [%] (potentiellement dispo.)		autre forme de liaison [%] (peu disponible)	
	1986	1991	1986	1991	1986	1991
Cadmium	0.3	0.3	68.6	63.2	31.1	36.5
Chrome	0.0	0.1	0.6	0.4	99.4	99.5
Cuivre	0.8	0.8	2.3	1.3	97.0	97.9
Plomb	0.0	0.0	1.5	1.8	98.4	98.2
Zn	0.0	0.1	16.5	16.3	83.5	83.6

Tableau 27 : Répartition et solubilité des métaux dans les sols artificiels à leur mise en place et cinq années plus tard

Ces résultats montrent que la solubilité des métaux est faible et qu'elle ne change pas au cours du temps. A la mise en place des sols, comme cinq années plus tard, moins de 1% de leurs teneurs totales est facilement disponible pour les plantes.

Les racines et les tiges des graminées poussant sur les sols à base de 15, 30 et 75% de compost de boues ont également été analysées. Aucun dépassement des valeurs limites de consommation prescrites pour l'homme (Lindt et al. 1990) n'a été constaté, tant que la teneur en compost des sols artificiels testés ne dépassait pas 15% (% vol.). Pour des teneurs supérieures, une accumulation marquée en Cd, en Zn et en Pb dans les racines et les gaines pérennes des graminées a été relevée. Aucun dépassement dans les tiges et les feuilles fauchées mensuellement n'a en revanche été mesuré. Au vu de ces résultats, les vers de terre introduits dans les parcelles à 45 % de compost de boues ont également été analysés 5 années après le début des essais. Pour comparaison, les vers extraits des parcelles témoins de terres végétales ont été soumis à la même analyse. Deux à cinq fois plus de Pb, de Cd et de Zn ont été mesurés dans les vers des parcelles contenant 45% de compost. Bien que la littérature fasse mention de teneurs équivalentes sans effet létal pour les vers (Beth Levine et al. 1989), les métaux à ces concentrations peuvent contaminer par voie trophique d'autres espèces plus sensibles (oiseaux par exemple).

Ces résultats mettent en évidence l'importance du respect des valeurs limites prescrites pour les métaux dans les terres artificielles. En effet, bien qu'apparemment peu solubles, ces polluants se concentrent néanmoins dans la faune du sol et la végétation comme le résume la figure 35 de la page suivante.

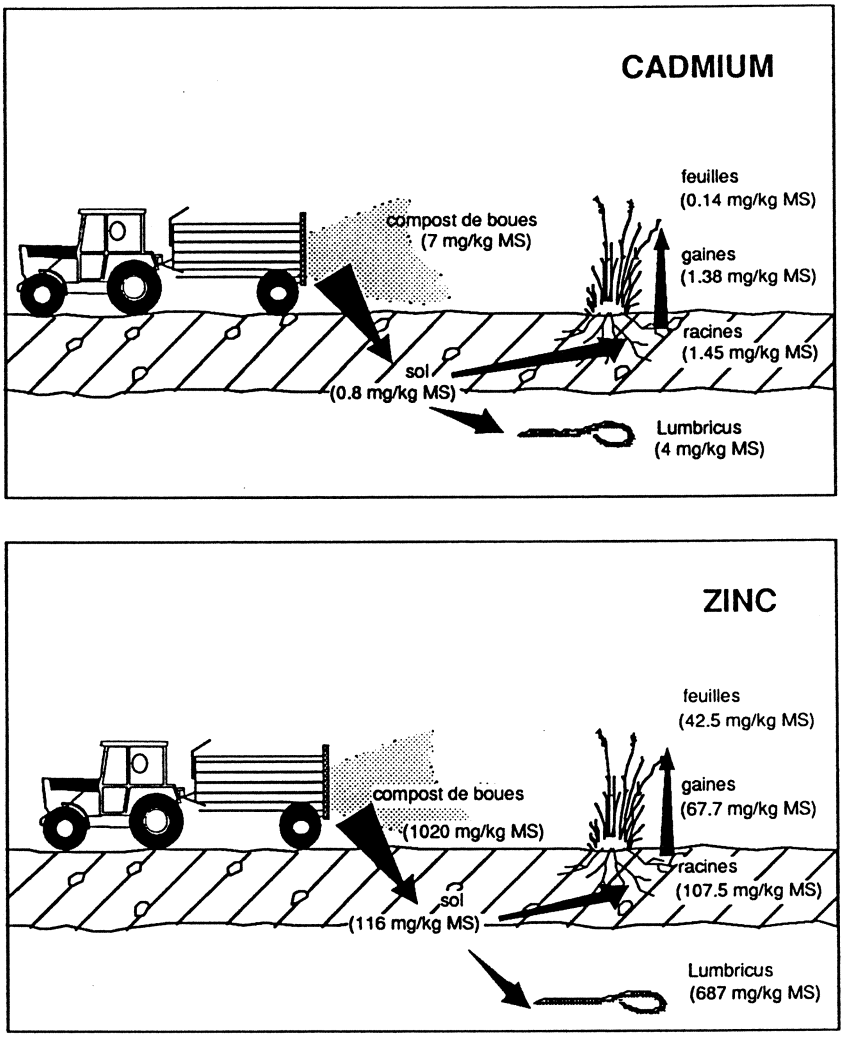


Figure 35 : Présentation schématique du transfert du Cd et du Zn dans les sols artificiels

3.3.3. Biologie

3.3.3.1. Faune du sol

Les inventaires faunistiques réalisés à 3 reprises dans les 20 premiers cm des sols (1987, 1990, 1991), ainsi que les extractions annuelles des vers de terres dans les sols inoculés en 1986, apportent les informations suivantes sur la colonisation des parcelles d'essais.

Micro et mésofaune : La diversité faunistique des sols artificiels double entre 1987 et 1991 comme le montre la figure 36 ci-dessous :

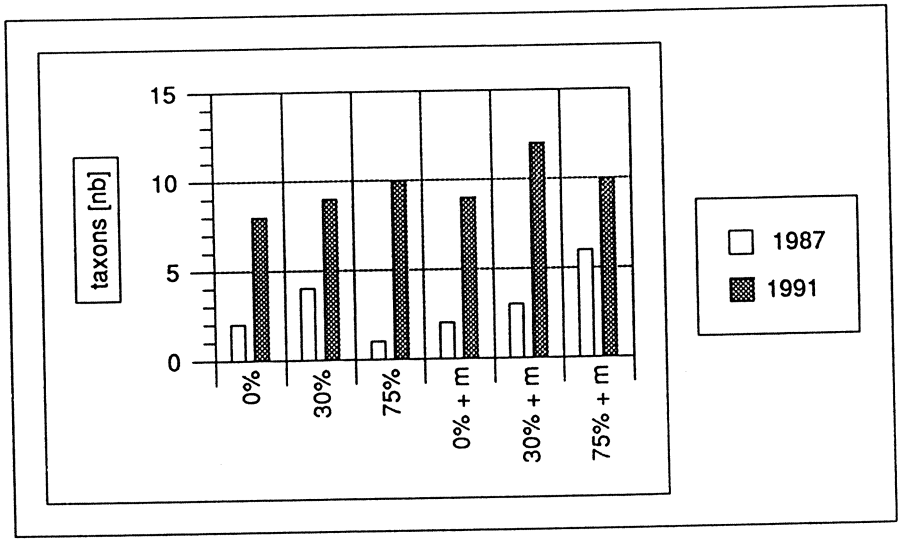


Figure 36 : Diversité faunistique dans les sols artificiels en 1987 et en 1991

Cette évolution s'accompagne d'un accroissement de la taille des populations. Plusieurs groupes participant à la fragmentation et à la décomposition de la matière organique ainsi qu'au mélange intime des particules minérales et organiques colonisent progressivement les sols. Ce sont principalement de petits acariens *(Oribates)*, des insectes *(Collemboles et Diploures)* et des crustacés *(Isopodes)*. Les listes exhaustives des espèces inventoriées se trouvent dans les rapports annuels de 1991 et 1992.

Des différences de composition faunistique existent entre les sols selon leur texture, leur teneur en compost et leur type d'entretien. Les sols enrichis en marnes paraissent mieux convenir aux acariens que ceux qui n'en contiennent pas. Inversement certains groupes d'insectes *(Diploures)* sont mieux représentés dans les sols sans marnes. Les plus grands effectifs d'acariens et de coléoptères se trouvent dans les sols contenant 75% de compost. Finalement, on observe que l'arrosage et l'engraissement, en stimulant le développement de la végétation, améliorent les conditions de vie des invertébrés et accroissent la vitesse de colonisation des sols.

Macrofaune : la dynamique des populations de lombrics introduits en 1986 et en 1988 est schématisée par la figure 37 qui compare la proportion d'espèces anéciques[20], épigées[21] et endogées[22] dans un sol naturel à celle obtenue dans un sol artificiel cinq

20 Anéciques : espèces de grande taille venant se nourrir de déchets végétaux en surface et creusant de profondes galeries subverticales.

21 Epigées : espèces de petite taille se nourissant de la litière déjà bien fragmentée et vivant très près de la surface du sol ou dans les accumulations organiques.

22 Endogées : espèces généralement de taille moyenne, consommant la matière organique dispersée dans la

années après sa mise en place (après inoculation) :

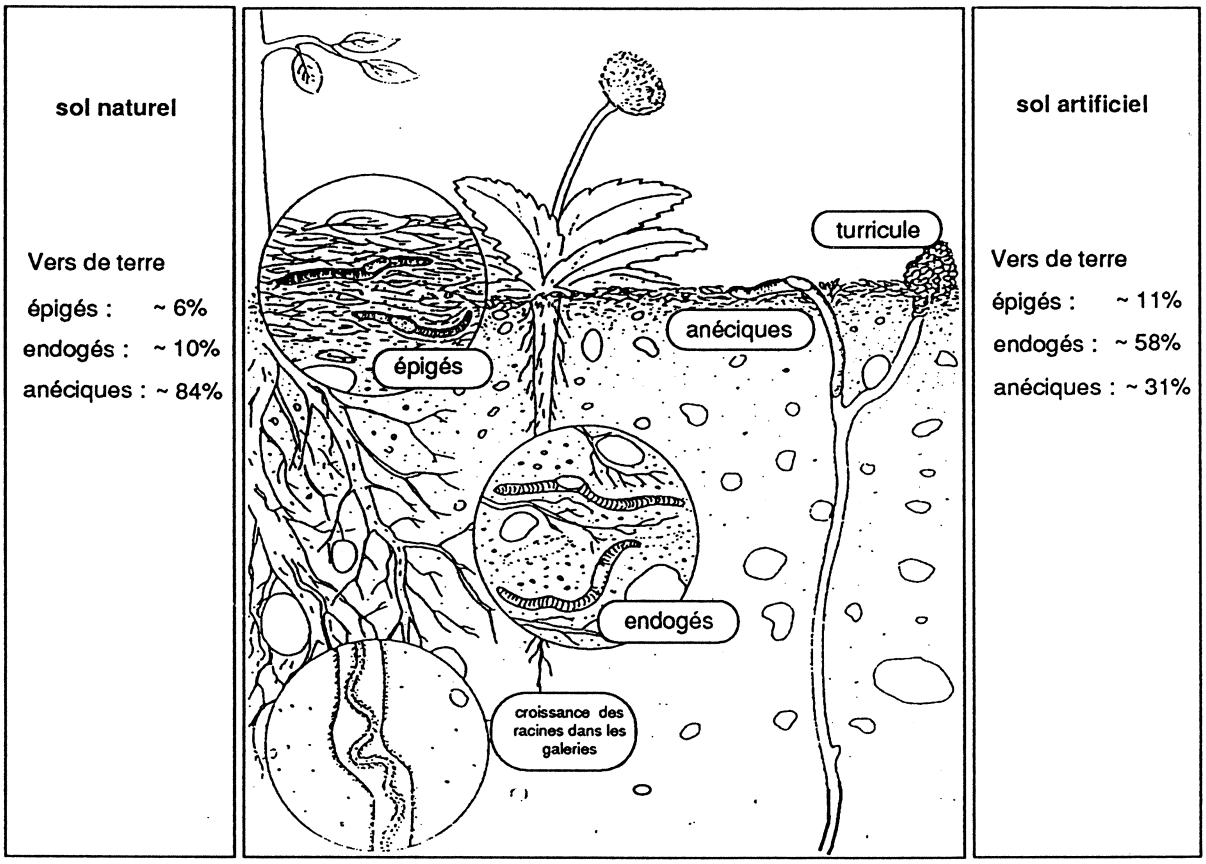


Figure 37 : Population lombricienne dans un sol artificiel et dans un sol naturel

On constate qu'à la différence d'un sol naturel, le sol artificiel est pauvre en espèces anéciques. La faible représentation de *Lumbricus terrestris*, espèce anécique de grande taille fréquente dans les sols de prairies, est due à l'écologie de cette espèce qui a besoin d'un horizon humide en profondeur durant l'été (or les sols des parcelles expérimentales sont très pierreux et macroporeux sur toute leur profondeur et souvent très secs en été). Les espèces épigées ou endogées, comme *Lumbricus rubellus*, *Octolasium cyaneum*, *Allolobophora rosea et Allolobophora chlorotica*, sont en revanche très abondantes. Elles constituent à elles-seules plus de 50% de la biomasse extraite après 5 ans des sols artificiels. Ces espèces sont ubiquistes et fréquentes dans les sols agricoles du Plateau suisse et des montagnes avoisinantes.

La biomasse totale des vers de terre inoculés dans les sols artificiels variait en 1991 entre 50 et 130 g/m^2 (~200 individus). Ces valeurs sont légèrement plus faibles que celles mesurées dans des sols naturels sous prairies permanentes (Cuendet et al., 1990).

partie minérale du sol, ingérant ainsi de grandes quantités de sol, et creusant des galeries subhorizontales qu'ils rebouchent avec des déjections.

Une colonisation naturelle par les vers de terre de terre a par ailleurs été constatée dans les sols non inoculés, trois années après leur mise en place. Des espèces différentes de celles introduites dans les parcelles tests ont été relevées mettant en évidence la migration des vers depuis des stocks de terre présents sur les chantiers avoisinants.

Les vers de terre jouent un rôle fondamental dans la structuration des sols artificiels. Ils ingèrent et mélangent des sables et des fibres de compost plus ou moins altérées. Leurs déjections cimentent le squelette du sol et assurent une redistribution de la matière organique et minérale dans le profil.

Ces résultats montrent que les sols artificiels sont progressivement colonisés par la faune habituelle d'un sol naturel. Cinq années après leur mise en place, leur diversité faunistique se rapproche de celle de la terre végétale, avec des effectifs toutefois plus faibles. La microfaune responsable de la fragmentation de la matière organique est très abondante. Elle comprend de nombreuses espèces d'acariens, de coléoptères et des petits crustacés. L'introduction artificielle de lombrics n'est pas nécessaire pour structurer les sols artificiels. Elle accélère toutefois leur implantation car les caractéristiques physiques de départ des sols leur sont relativement peu favorables (faible rétention en eau, pierrosité très importante).

3.3.3.2. Activité biologique

L'évolution de l'activité biologique des sols artificiels au cours du temps est présentée de manière schématique par la figure 38 ci-dessous :

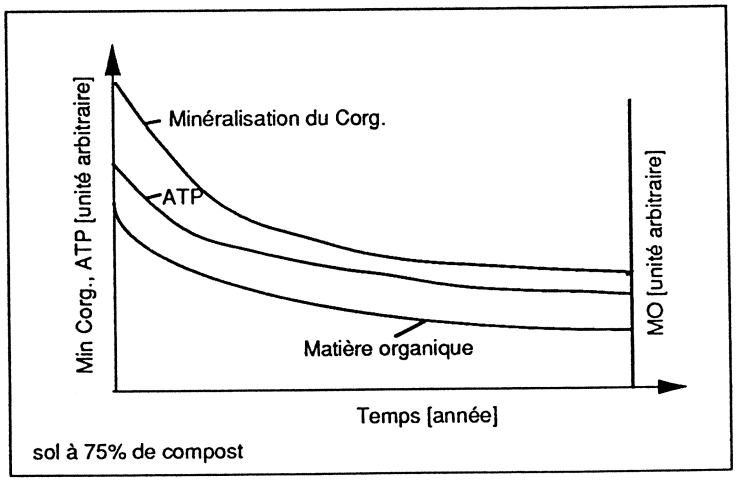


Figure 38 : Présentation schématique des relations entre la teneur en matière organique et les paramètres de l'activité biologique des sols artificiels

La biomasse microbienne des sols artificiels est au départ proportionnelle à la quantité de matière organique apportée par le compost. Elle diminue simultanément à la disparition des composés organiques les plus facilement biodégradables, puis des composés les plus réfractaires. Par la suite, la stabilisation de la biomasse microbienne traduit un équilibre entre la taille de la population et l'apport par les feuilles et les racines de matière organique qui lui sert de sources de carbone et d'énergie.

3.3.4. Conclusions sur les caractéristiques bio-physico-chimiques des sols artificiels

Les sols artificiels à base de calcaires abrasés ou de moraines présentent les caractéristiques communes suivantes :

- une pierrosité élevée sur toute leur épaisseur;
- une fraction fine limono-sableuse;
- un pH alcalin;
- une structure grumeleuse dans l'espace racinaire;
- une macroporosité et une perméabilité élevées, équivalentes à celle d'un mélange de sables et de graviers;
- une faible rétention en eau;
- une faune diversifiée, proche de celle que l'on peut trouver dans un sol naturel, riches en taxons détritivores;
- une activité biologique analogue à celle d'un sol naturel calcaire.

Lorsque leur teneur en compost égale ou dépasse 30% en volume frais (5% d'humus), les sols présentent des caractéristiques de sols humifères, voir tourbeux. Ils subissent dès leur mise en place une minéralisation importante qui, en fonction de leur teneur en compost au départ, est entièrement ou partiellement compensée par les restitutions au sol de matière organique (racines). Ainsi avec le temps, les teneurs en humus des sols initialement très différentes convergent vers une valeur commune située entre 4 et 5% d'humus. Cette valeur correspond à celle de prairies permanentes pâturées ou fauchées.

L'utilisation simultanée de compost de boues et de déchets verts améliore l'équilibre des éléments nutritifs majeurs (N, P, K). De manière très générale, ces éléments sont en concentrations supérieures dans les sols artificiels que dans ceux agricoles de texture équivalente. Leurs teneurs en oligo-éléments, manganèse en particulier, sont en revanche souvent plus faibles. Pour éviter un enrichissement excessif des sols artificiels en azote (N total ≤ 0,3 % de la matière sèche), l'apport initial de compost (boues ou/et déchets verts) doit être au maximum de 30% du volume total. Dès 10% de compost en volume (1/3 boues et 2/3 déchets verts), les teneurs en azote, phosphore et potasse des sols artificiels sont satisfaisantes.

Pour respecter les exigences légales sur les teneurs en métaux lourds des sols artificiels, le compost ne peut être utilisé qu'en quantité limitée. Son apport doit être calculé en fonction de sa densité, de ses teneurs en polluants et de la proportion en squelette du sol. Avec les composts de boues de STEP de Saanen ou de Colombier et une fraction minérale grossière de 70%, cet apport peut être au maximum de 15% du volume total. Avec du compost de déchets verts, l'apport total peut être de 30% du volume total au maximum.

3.4. Qualité des eaux de percolation

Le tableau 28 ci-dessous compare la qualité des eaux de percolation des sols artificiels aux exigences de l'ordonnance sur le déversement des eaux usées (Odévers, colonne II : déversement des eaux usées dans les eaux de surface). Cette comparaison est indicative et ne sert qu'à fixer l'ordre de grandeur des paramètres mesurés puisque l'ordonnance est destinée à d'autres eaux (celles des zones bâties).

	SOLS ARTIFICIELS Domaine de variation		TERRE VEGETALE Domaine de variation	NORME [*]
	Année de mise en place	Six années plus tard		
COND. (µS/cm)	400-1300	297-460	456	--
pH	7.7-8.5	8.1-8.3	8.1	6.5-8.5
P2O5 (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.1	1
K2O (mg/l)	6.3-8.8	5.3-9.9	5.5	--
N-NO3 (mg/l)	5.6-67.2	0.3-9.6	20	(**) 40
N-NH4 (mg/l)	0.1-0.4	<0.1	0.4	--
DOC (mg/l)	25-92	10-41	5-7	10
ANALYSES ELEMENTAIRES (mg/l)				
B	1.4-7	0.1-0.2	0.1	--
Ca	977-3300	38-78	66	--
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	0.1
Cr	<0.005	<0.005	<0.005	2
Cu	<0.002	0.002-0.02	<0.003	0.5
Fe	<0.01	0.01-0.04	<0.01	2
Mg	279 -1100	9.4-15.8	29	--
Mn	<0.005	0.01	<0.005	--
Mo	<0.005	<0.005	<0.005	--
Ni	<0.005	<0.005	<0.005	2
Pb	<0.03	<0.03	<0.03	0.5
Zn	<0.01	<0.01	<0.01	2

* : Norme : ordonnance sur le déversement des eaux usées (1975) - colonne II : exigences pour le déversement dans les eaux
** : comme l'ordonnance ci-dessus ne précise pas de valeur limite, la teneur prescrite pour les eaux de consommation a été utilisée, de manière à fixer l'ordre de grandeur des valeurs obtenues.

Tableau 28 : Qualité des eaux de percolation des sols artificiels et exigences de l'ordonnance sur le déversement des eaux usées

On constate que la qualité des eaux s'écoulant des sols artificiels répond en tout temps à ces exigences pour les paramètres suivants : salinité, phosphore, plomb, cadmium, fer, cobalt, cuivre, nickel et zinc. Temporairement et plus particulièrement au cours de la première année qui suit la mise en place des sols, de l'azote est lessivé. Dans les variantes sans compost, son exportation sous forme de nitrates correspond environ à un quart de la quantité d'azote total apportée sous forme d'engrais. De manière générale, le lessivage des éléments nutritifs se limite aux formes azotées et, dans une moindre mesure, au potassium, le phosphore étant très peu soluble depuis la première année de création des sols (<0,1 mg/l dans les eaux de percolation).

Les eaux de percolation des sols artificiels sont alcalines. Occasionnellement, leur pH peut dépasser la valeur de 8.5 de l'Odévers.

Dès leur mise en place en place et jusqu'à la fin de l'expérimentation, les sols artificiels dont la teneur en compost dépasse 15% en volume libèrent dans les eaux gravitaires des concentrations en carbone organique qui sont supérieures aux valeurs de l'Odévers. Elles fluctuent avec les saisons et l'activité de la végétation, atteignant des valeurs maximales en été. Elles sont en moyenne 2 à 4 fois plus élevées que celles mesurées dans les eaux de percolation de la terre végétale, mais comparables à celles que l'on peut mesurer sous un sol minéral brut enrichi avec une couche de 10 cm de fumier (CEMAGREF, 1989).

Soumis à un arrosage à l'eau acidifiée, les sols artificiels libèrent en solution des quantités de calcium plus importantes que les sols exposés aux précipitations naturelles. Les concentrations en éléments fertilisants et en métaux restent en revanche identiques.

Les analyses bactériologiques et chimiques des eaux du lac effectuées depuis 1986 à l'est, à l'ouest, ainsi que devant les essais de sols artificiels du Nid-du-Crô ont montré que les eaux des sols ne polluaient en rien le lac.

CHAPITRE 4 : SYNTHESE ET CONCLUSIONS

4.1. Synthèse 89

4.1.1. Introduction 89

4.1.2. Description morphologique 89

4.1.3. Structure 90

4.1.4. Rétention en eau 90

4.1.5. Enracinement de la végétation 91

4.1.6. Couverture du sol 91

4.1.7. Pédofaune 92

4.1.8. Métaux lourds 93

4.1.9. Fertilité et composts 93

4.1.10. Fertilité et substrats minéraux 94

4.2. Possibilité d'utilisation des sols artificiels 94

4. SYNTHESE ET CONCLUSIONS

4.1. Synthèse

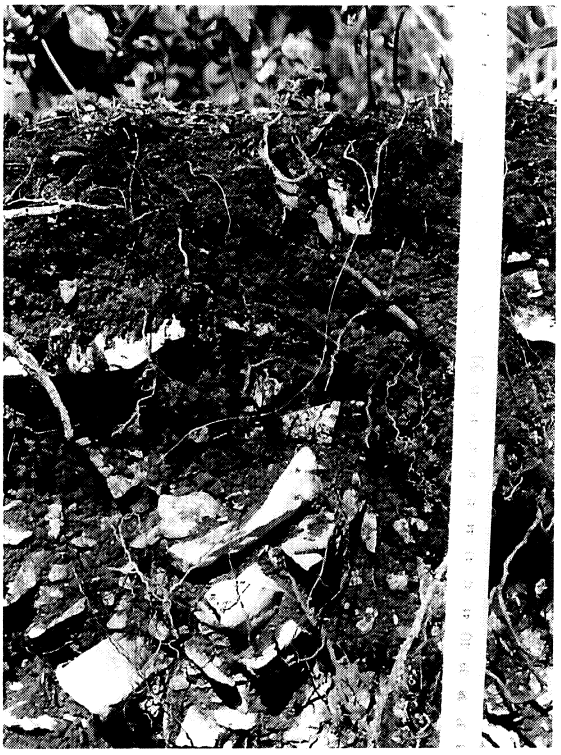
4.1.1. Introduction

Les sols artificiels sont des supports de végétation d'épaisseur et de composition modulables faits par mélange mécanique d'une fraction organique et d'une fraction minérale.

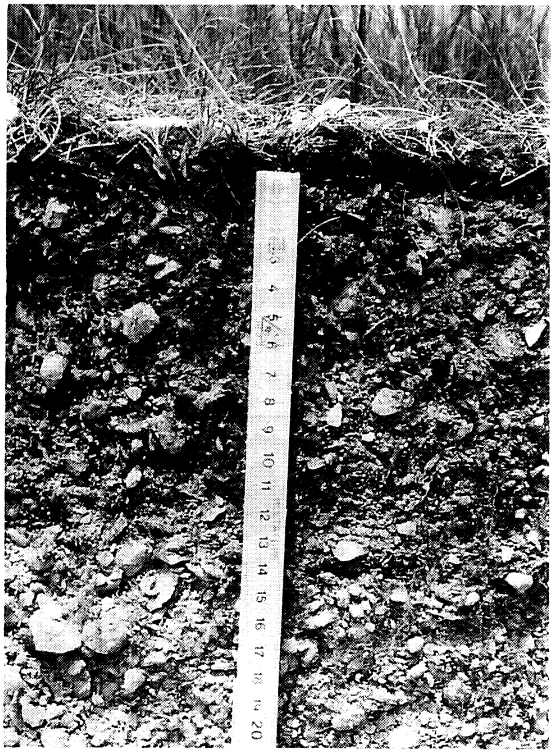
Les essais réalisés à Neuchâtel avec des déchets de roches calcaires ou des moraines, des compost de boues et de déchets verts, permettent de tirer les conclusions suivantes.

4.1.2. Description morphologique

Les sols artificiels testés ont des caractéristiques morphologiques proches de sols naturels calcaires humifères (rendzine par exemple) :



Sol humocalcique (La Cernia, Neuchâtel)



Sol artificiel à base de Valanginien et de compost , âgé de 5 ans

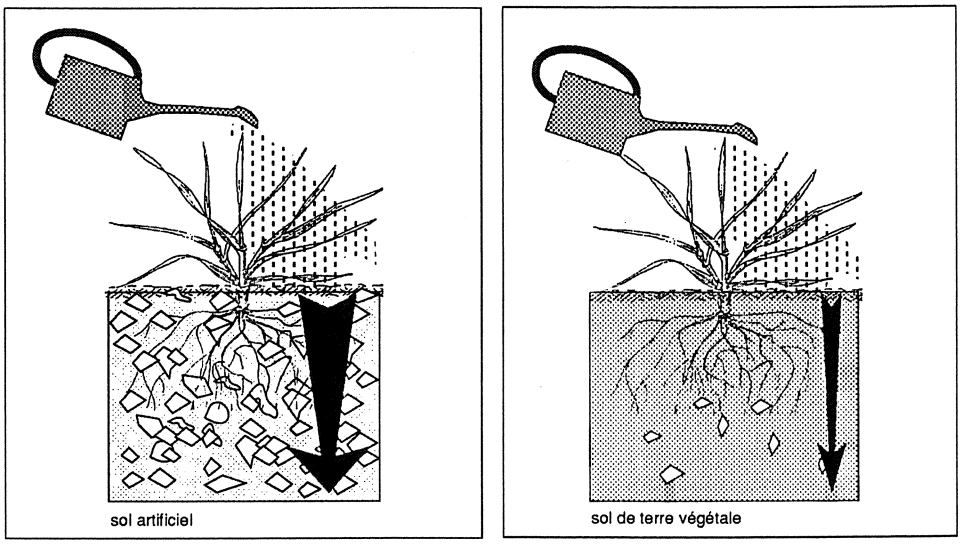
4.1.3. Structure

Ils évoluent et se structurent comme des sols naturels. Sept années après leur mise en place, ils présentent une agrégation intime de la matière minérale et de la matière organique tant à l'échelle micrométrique qu'à l'échelle millimétrique.

Structure d'un sol artificiel à 30% de compost 7 ans après sa mise en place

4.1.4. Rétention en eau

Même riches en matière organique, ils restent, en raison de leur pierrosité importante et de leur faible teneur en argiles, des sols séchards favorisant le développement d'espèces de prairies grasses sèches.



Ecoulement comparatif de l'eau dans un sol artificiel et dans un sol de terre végétale

4.1.5. Enracinement de la végétation

Ils permettent un enracinement de la végétation d'autant plus homogène que leur teneur en compost est régulière sur tout le profil, enracinement qui leur confère rapidement une résistance mécanique élevée.

Enracinement d'un gazon dans un sol artificiel à 75% de compost, 3 mois après sa mise en place

4.1.6. Couverture du sol

Une teneur initiale en compost de 10% (vol.) sur 30 cm d'épaisseur de sol est suffisante pour assurer le développement et le maintien d'une prairie fleurie sans engraissement complémentaire.

Prairie fleurie sur sol artificiel calcaire à 10% de compost (% vol.)

Une teneur en compost de 30% (vol.) sur 30 cm est nécessaire pour une végétation qui doit se développer rapidement et qui sera régulièrement tondue. Une teneur de 10% peut toutefois suffire si le sol ne doit pas être recouvert à 100%.

Gazon sur sol artificiel calcaire à 30% de compost (% vol.)

4.1.7. Pédofaune

Les sols artificiels comprennent une faune détritivore importante composée de lombriciens, d'acariens, d'insectes primitifs et de petits crustacés. Leur relative sécheresse favorise les vers de terre ubiquistes épigés et endogés.

Vers de terre extrait d'un sol artificiel à 45% de compost

4.1.8. Métaux lourds

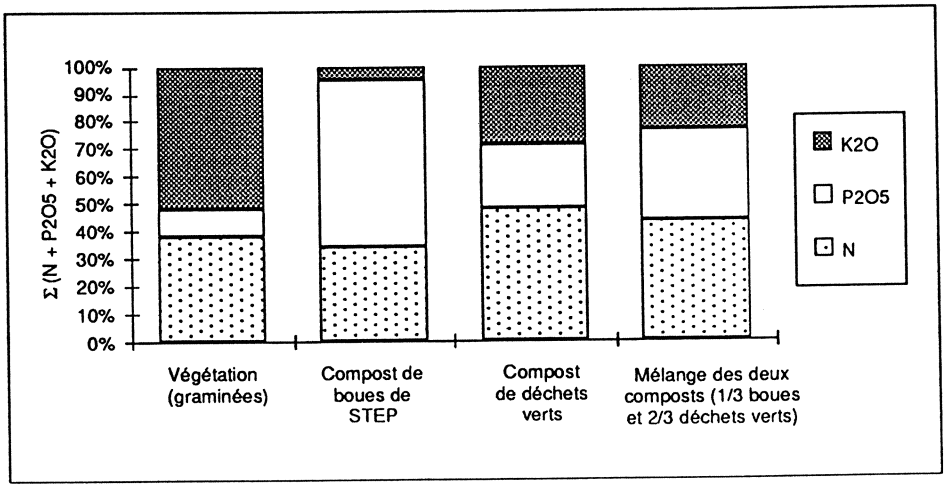
Pour respecter les valeurs limites en métaux lourds des terres artificielles (1/2 Osol), les composts doivent d'une part répondre aux exigences de qualité de l'Osubst, d'autre part être apportés en faibles quantités. L'utilisation de compost de boues, riche en métaux lourds, est particulièrement limitée. Sur la base d'une composition moyenne, sa proportion dans le mélange final devrait être inférieure à 10% du volume total de sol. Avec du compost de déchets verts de composition moyenne, sa proportion ne devrait pas dépasser 30%. L'équation qui suit permet de calculer ces proportions si les teneurs en métaux des composts et les caractéristiques du substrat minéral sont connues :

$$\frac{V_{compost}}{V_{compost} + V_{roche}} = \frac{\rho_{roche}\, g}{(\rho_{roche}\, g) + (\rho_{compost}\, f\,[(a/b) - 1])}$$

où b : teneur massique pour chaque métal du sol artificiel = 1/2 valeur Osol
a : teneur massique en métaux du compost de départ (teneur totale)
g : fraction de la roche < 2 mm
M : masse du compost
m : masse de la roche
$\rho_{compost}$: densité du compost
ρ_{roche} : densité de la roche
$V_{compost}$: volume de compost
V_{roche} : volume de roche

4.1.9. Fertilité et composts

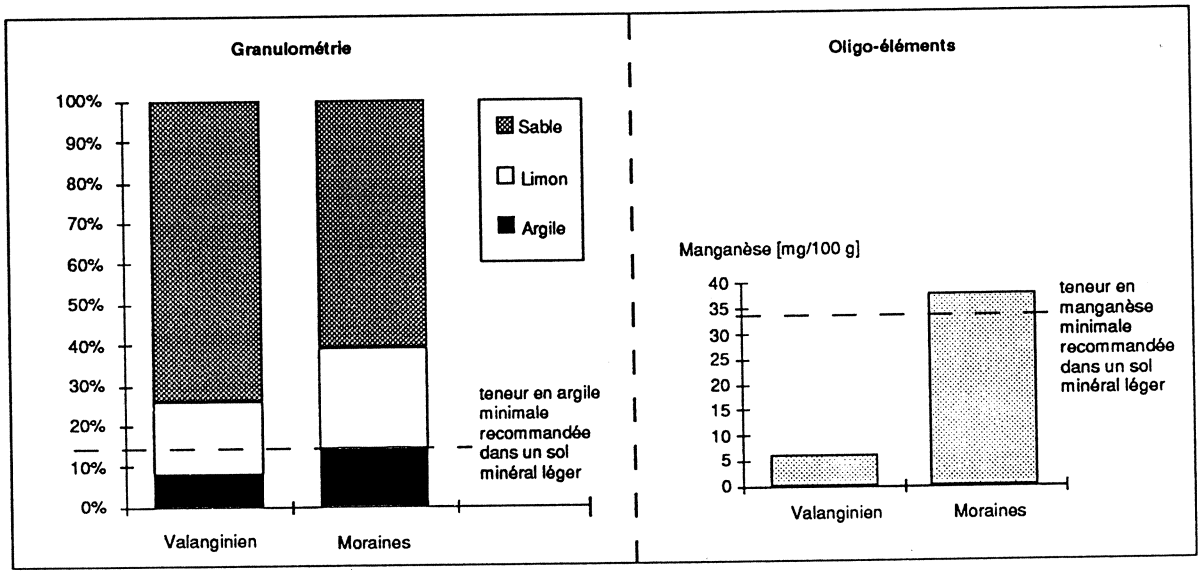
Le compost de boues possède des teneurs en phosphore et en azote très élevées par rapport à celle en potassium. L'ajout de compost de déchets verts permet de rééquiliber le rapport N/P/K et ainsi de mieux répondre aux besoins de la végétation.



Proportions relatives des éléments nutritifs dans la végétation et dans des composts de boues et de déchets verts

4.1.10. Fertilité et substrats minéraux

Tant d'un point de vue granulométrique que chimique, les moraines sont de meilleurs substrats minéraux que les roches calcaires.



Granulométrie et manganèse dans le Valanginien et les moraines

4.2. Possibilité d'utilisation des sols artificiels

Les résultats montrent que l'utilisation de sols artificiels peut être envisagée pour l'aménagement de gazons ou de prairies extensives. Selon l'information Osol N° 5 (OFEFP, 1993), les terres artificielles devraient prioritairement être utilisées dans les zones d'habitat, aux abords des routes et pour la couverture de décharges (la reconstitution des sols agricoles restant à priori faite avec de la terre végétale). Pratiquement, elles peuvent remplacer la terre végétale naturelle si :

- cette dernière fait défaut (en particulier si elle est réservée pour des réaménagements agricoles);
- du compost est produit dans la région du site d'utilisation. En 1992, 51 places de compostage traitant plus de 1000 t/an de déchets compostables et environ 100 places traitant entre 100 et 1000 t/an étaient répertoriées en Suisse, produisant au total 190'000 t/an de compost (OFEFP, Abfälle Nr.21, 1993);
- le substrat minéral est meuble et exempt de blocs d'un diamètre supérieur à 10 cm (si ce n'est pas le cas, une couche criblée devrait être déposée en surface ou un épierrage par concassage devrait être effectué);

La mise en place de sols artificiels présente par ailleurs les avantages suivants :

- les volumes de matériaux à acheminer sur le chantier sont plus faibles que ceux nécessaires à la mise en place de terre végétale (le compost ne représentant que 10 à 30% du mélange final);
- la composition du sol peut être adaptée et modulée en fonction des matériaux disponibles sur le chantier et des aménagements paysagers souhaités.

Signalons, par ailleurs, que les dépôts morainiques et alluvionnaires d'origine alpine ou jurassienne, tels ceux utilisés à Neuchâtel, sont fréquents en Suisse. Ils recouvrent plus des 3/4 du Plateau. Les calcaires durs du Jurassique et du Crétacé sont de même abondants dans tout le Jura plissé et tabulaire, de Genève à Schaffhouse.

Les inconvénients ou les contraintes qui sont liés aux sols artificiels sont :

- leur mise en place nécessite une opération de mélange des constituants (sur place ou à proximité pour les bermes centrales étroites, les banquettes, les talus étroits ou de pente > 35%);
- leur utilisation est interdite dans les zones de protection des eaux.

CHAPITRE 5 : UN EXEMPLE D'UTILISATION : HAUTERIVE - ST.-BLAISE

5.1. Description de l'aménagement d'Hauterive - St.-Blaise 99

5.2. Coût de mise en place des sols 100

5. UN EXEMPLE D'UTILISATION : HAUTERIVE - ST.-BLAISE

5.1 Description de l'aménagement

Le secteur d'Hauterive-St.-Blaise fait partie avec ceux de Serrières et du Nid-du-Crô, des zones gagnées sur le lac par le déversement des déblais issus du percement du tunnel et des excavations de la N5 entre St.-Blaise et Neuchâtel. Ces trois secteurs forment les principales zones de détente qui seront à disposition du public.

La zone naturelle d'Hauterive-St.-Blaise consiste en une bande de terrain de 6.7 ha de faible pente (< 10%). Les aménagements, constitués de prairies maigres entrecoupées de bosquets de chênes, d'un étang et d'une forêt riveraine, visent à recréer les paysages typiques de la rive Nord du lac de Neuchâtel.

La disposition des milieux respecte la zonation naturelle de la végétation et l'utilisation prévue pour la population. Les sols de la zone sont principalement artificiels et leur composition a été adaptée à la végétation qu'ils devaient accueillir:

- chênaie et prairie naturelle : un même sol a été créé pour ces milieux en raison de leur imbrication très étroite. Il est constitué d'une couche de 12 cm de compost de déchets verts et de boues, à raison de 2/3 du premier et d'1/3 du second, mélangée sur 40 cm à un remblai morainique en place. Sa teneur en compost est plus élevée que celle préconisée pour des prairies fleuries en raison des plantations qui seront réalisées. Pour faciliter la reprise des buissons et des arbres, un ajout ponctuel de terre est fait dans les trous de plantation (10 l/par plant);
- forêt riveraine : de la tourbe noire extraite des tranchées de la N5 remplace le compost pour éviter son lessivage par l'eau du lac dont le niveau atteint temporairement la base du sol. L'épaisseur totale du sol est de 70 cm. Pour pouvoir mélanger de manière homogène les constituants, le bêchage est fait en deux fois (2 couches de 35 cm). Chaque couche est constituée de 10 cm de remblais graveleux, de 15 cm de terre végétale et de 10 cm de tourbe.

Pour les aménagements situés en bordure immédiate du lac ou de l'étang, des sols de terre végétale ont été mis en place :

- pelouse : affectée à une zone de détente (baignade) et soumise à des tontes fréquentes, son sol est constitué de 40 cm de terre végétale;
- bas-marais : le sol, en légère pente et inondé régulièrement par les fluctuations du niveau de l'étang, est constitué de 20 cm de terre humifère.

Pour accroître la diversité floristique et faunistique des aménagements, de petites zones de galets et de remblais ont été laissées brutes de manière à permettre leur colonisation naturelle par une flore indigène et favoriser le maintien d'une faune pionnière (petit gravelot, crapaud calamite,...). Ces différents éléments sont illustrés par les plans et photos des pages suivantes.

5.2. Coût de mise en place des sols

Le coût de mise en place des sols artificiels est influencé par plusieurs éléments dont les principaux sont énumérés ci-dessous :

- le prix de fourniture des matériaux de base (compost, remblais s'ils doivent être amenés sur le site);
- le transport des matériaux de leur lieu de stockage jusqu'à celui de leur mise en place;
- le nombre et l'épaisseur de chaque couche;
- la diversité des sols que nécessitent les aménagements paysagers;
- la pierrosité des remblais qui peut nécessiter leur épierrage.

Le tableau 29 à la page suivante présente et compare les prix effectifs de mise en place des sols réalisés en 1994, fourniture et transport des matériaux compris. Il permet les remarques suivantes :

- le coût des sols de terre végétale ou artificiels exprimé en Fr./m^2 varie de 1 à 3. Exprimé en Fr./m^3, il varie de 1 à 2. Il est relativement constant pour les sols à base de terre, ne dépendant que de leur épaisseur. Il varie en revanche du simple au double pour les sols artificiels pour les raisons décrites ci-dessous :
- un sol artificiel à base de compost, tel celui créé pour la prairie, ne coûte que le prix de mise en place du compost et de son incorporation au remblai. A épaisseur finale équivalente, le prix d'un tel sol est moins élevé que celui d'un sol à base de terre végétale. En effet, l'épaisseur de la couche qui doit être épandue est 3 à 6 fois plus faible pour le sol artificiel que pour le sol de terre végétale;
- un sol artificiel à base de tourbe, de terre et d'alluvions, comme le sol de la forêt riveraine, nécessite de répéter l'épandage des constituants autant de fois qu'il y a de constituants. Si en plus, l'épaisseur totale du sol dépasse 45 cm, il devient trop épais pour ne permettre qu'un seul passage de bêcheuse et les opérations doivent être dupliquées. Malgré cela, à épaisseur équivalente, le prix d'un tel sol reste encore moins cher que celui d'un sol à base de terre végétale en raison de la fourniture gratuite des matériaux utilisés (tourbe et alluvions).

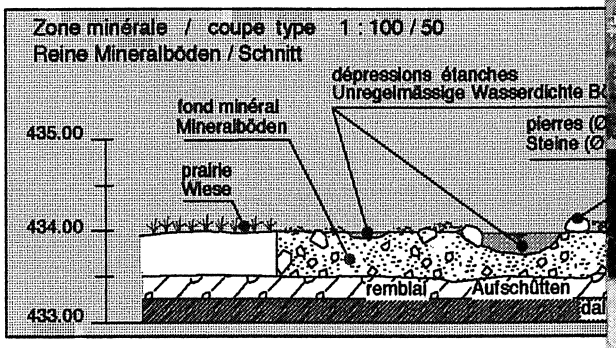
SECTEUR HAUTERIVE-ST.BLAISE	sols artificiels		sols de terre végétale	
Végétation Epaisseur du sol	prairie 45 cm Fr. / m^2	forêt riveraine 70 cm Fr. / m^2	pelouse 40 cm Fr. / m^2	bas-marais 20 cm Fr. / m^2
Ameublissement du sous-sol, 2 passages en croix profondeur 80 cm (ripper)	-.50	-.50	-.50	-.50
Réglage du sous-sol, tolérance ±5 cm	-.60	-.60	-.60	-.60
Fourniture des matériaux *				
40 cm de terre végétale			8.00	
20 cm de terre humifère				4.00
12 cm de compost	2.40			
2 x 15 cm de terre humifère		6.00		
2 x 10 cm de tourbe		0.00		
10 cm d'alluvions		0.00		
Ramassage des cailloux et transport interne des matériaux	1.35	5.50	3.35	1.10
Mise en place des matériaux, y.c. réglage à ±3 cm				
40 cm de terre végétale			3.60	
20 cm de terre humifère				1.50
12 cm de compost	1.50			
2 x 15 cm de terre humifère		2.80		
2 x 10 cm de tourbe		3.00		
10 cm d'alluvions		1.50		
Labour du sol à la machine avec rotobêcheuse type Celli sur 35-40 cm	-.50	-.80		
Préparation de la surface pour le semis, soit double fraisage croisé, réglage à ±3 cm, y.c. enlèvement et évacuation des pierres de plus de 10 cm ø et des déchets	1.40	1.80	1.80	1.80
Total (prix du sol en Fr. /m^2)	8.25	22.50	17.85	9.50
Total (prix du sol en Fr. /m^3)	18.35	32.15	44.65	47.50

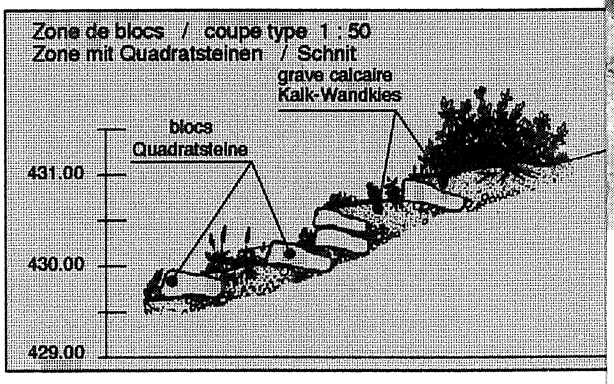
[*] Prix de la terre et du compost : 20.--/m^3 (prix comprenant l'achat et la livraison sur le chantier)

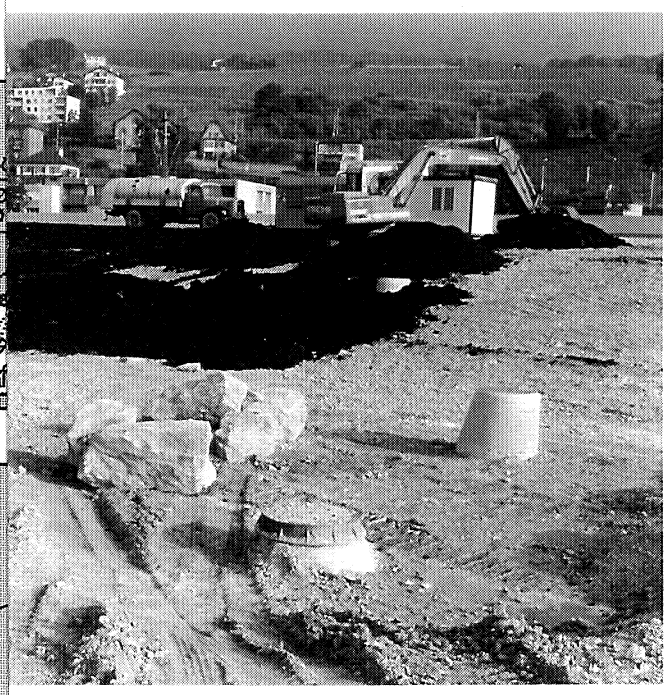
Tableau 29: Etapes et coûts de la mise en place des sols dans le secteur Hauterive-St.-Blaise selon prix de décembre 1994

HA
DEN

SOLS BRUTS
ROHBODEN

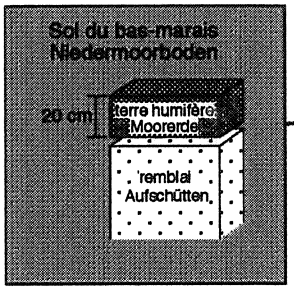


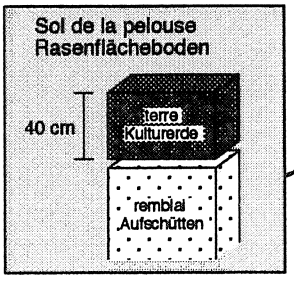


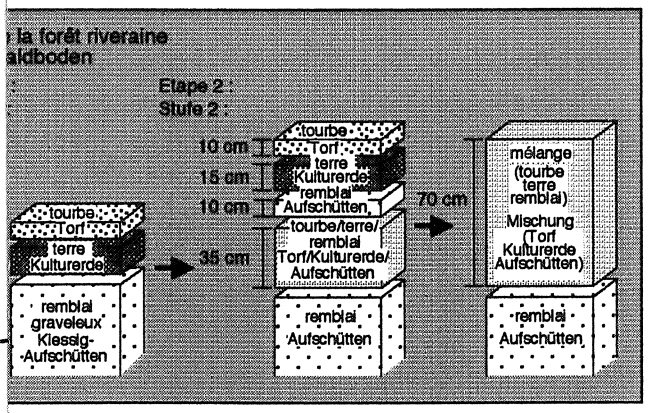


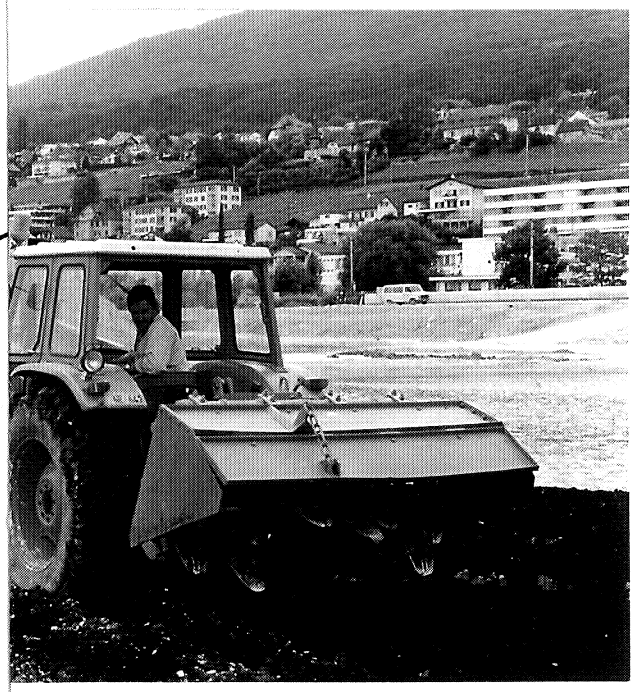
Humusieren mit Kompost

SOLS DE TERRE VEGETALE
KULTURERDE

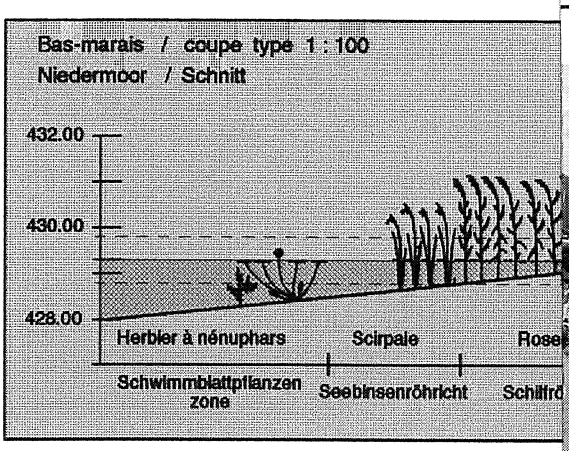








Mekanische Umgrabung des künstlichen Bodens

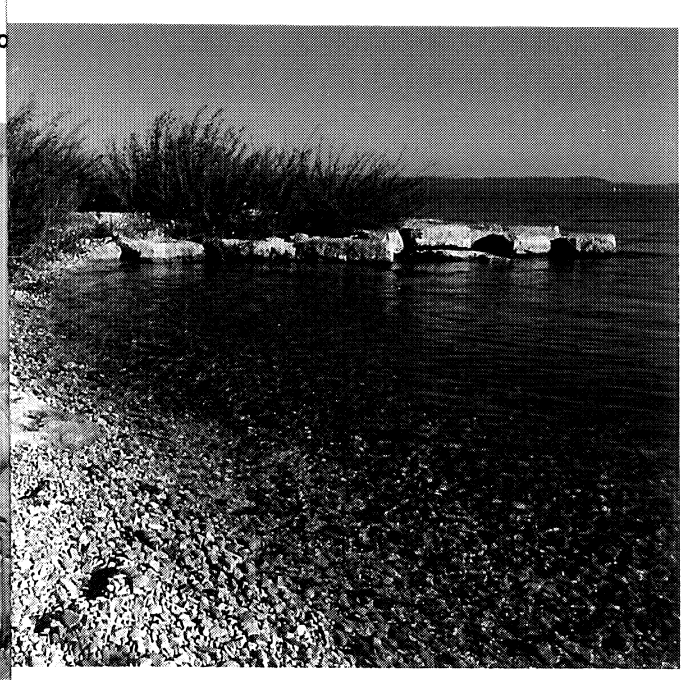


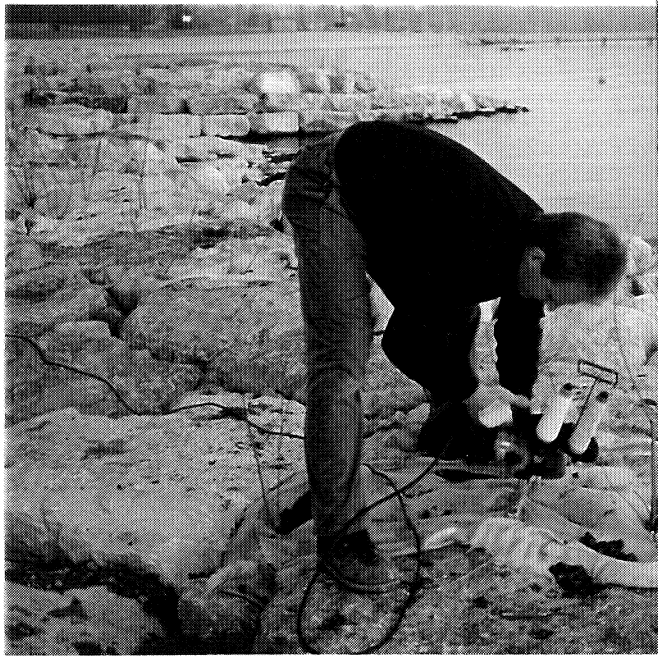
eaux

Bepflanzung von Schilfröhren

Zone de galets

Bo





Bac de plantation:
fermeture du géotextile

Bepflanzur
Erschliessu

es (3 ans après leur plantation)

Weidengebüsch (3 Jahren nach Bepflanzung)

CHAPITRE 6 : PROPOSITION DE NORME SUR LES SOLS ARTIFICIELS

L'ensemble des résultats obtenus jusqu'ici permet de rédiger une proposition de norme destinée à ceux qui sont amenés à réaliser des sols artificiels. Elle est faite sur le modèle des normes VSS qui, sous une forme succinte, contiennent toutes les informations utiles aux praticiens.

1. Objet
2. Buts
3. Qualité des matériaux
4. Composition des sols
5. Réalisation du sol
6. Ensemencement et plantations
7. Entretien

SOLS ARTIFICIELS

1. Objet

Cette norme vise à présenter les possibilités et les modalités d'utilisation de composts de boues d'épuration et de déchets verts pour la création de sols artificiels et leur végétalisation.

2. Buts

Les composts de boues et de déchets verts, mélangés à une fraction minérale, peuvent constituer un substrat fertile susceptible de remplacer la terre végétale lorsque celle-ci fait défaut. Les sols artificiels permettent par exemple les utilisations paysagères suivantes :

- végétalisation des bords de routes, de remblais, de carrières ou de gravières;
- végétalisation de places de jeu, de zones de détente, de parcs.

Selon les exigences de l'OFEFP (Information Osol N° 5, 1993), leur utilisation doit être prioritairement réservée aux zones d'habitat, aux abords des routes et pour la couverture de décharges. Elle est interdite à proximité des cours d'eau et des zone de protection des eaux.

3. Qualité des matériaux

Constituants organiques : Les composts doivent être mûrs et présenter les critères de qualité suivants :

Caractéristiques	Recommandations
Poids spécifique	400 à 600 kg/m3 [1]
Matière sèche	> 40 % de la MF [1]
Matière organique	> 25 % de la MS [1]
Porosité	> 60 % du volume [1]
Teneur totale en corps étrangers de > 2 mm ø	≤ 0.5% de la MS [2]
Rapport N-NO3/NH4	> 2/1
Conductivité [µS/cm]	2000 à 3000 pour les composts de déchets verts [2] < 10'000 pour les boues compostées

[1] : Directives d'utilisation et exigences de qualité pour le compost de déchets de jardin et de cuisine (Ryser et al. 1988)
[2] : Qualité minimale du compost (FAC, 1993)

Critères de qualité des composts

Leurs teneurs en métaux lourds doivent être inférieures aux valeurs de l'ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement (Osubst, 1986, révision 1992):

Eléments	Valeur limite [g/t]	
	Compost	Boues
Cadmium	1	5
Cobalt	-	60
Chrome	100	500
Cuivre	100	600
Nickel	30	80
Molybdène	-	20
Plomb	120	500
Zinc	400	200
Mercure	1	5

Valeurs limites en métaux des composts et des boues (Osubst, 1986, 1992)

Les composts peuvent être utilisés non tamisés. Leur stockage sur les chantiers ne sera pas fait à proximité immédiate de cours d'eau. Il sera limité dans le temps pour préserver leur fertilité et éviter leur lessivage par les eaux de pluie. Si le stockage devait durer plus de 3 mois, les tas seront couverts avec une toile, un paillis ou un mulch. Lors de la reprise du compost, la végétation adventice ou le paillis sera enlevé.

Constituants minéraux : Différents constituants minéraux tels que des moraines, des alluvions ou des roches calcaires concassées peuvent être utilisés pour la création de sols artificiels. Ils doivent permettre la structuration du sol et posséder les caractéristiques suivantes :

- une perméabilité élevée, équivalente à celle d'un mélange de sable et de graviers;
- une texture légère, limono-sableuse à sableuse si la pierrosité du substrat est faible ou nulle;
- une pierrosité ne dépassant pas 70% et permettant le passage d'une bêcheuse (ø < 10 cm);
- des teneurs en polluants très faibles (<< Osol).

4. Composition des sols

Les sols artificiels doivent satisfaire aux exigences de l'information Osol N° 5 sur les terres artificielles (1993) qui fixent comme teneurs limites en métaux lourds les demi-valeurs Osol. En utilisant des composts dont les teneurs en métaux lourds atteignent les valeurs limites de l'Osubst, leur proportion rapportée au volume total du sol doit être inférieure ou égale à 6% pour du compost de boues et inférieure ou égale à 27% pour du compost de déchets verts. Si les teneurs en métaux lourds des composts sont faibles et que la pierrosité du substrat est inférieure à 70%, leur proportion dans le sol peut être augmentée et calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{V_{compost}}{V_{compost} + V_{roche}} = \frac{\rho_{roche}\, g}{(\rho_{roche}\, g) + (\rho_{compost}\, f\,[(a/b) - 1])}$$

où b : teneur massique du sol artificiel pour chaque métal = 1/2 Osol
a : teneur massique du compost de départ pour chaque métal (teneur totale)
g : fraction de la roche < 2 mm
M : masse du compost
m : masse de la roche
$\rho_{compost}$: densité du compost, ρ_{roche} : densité de la roche
$V_{compost}$: volume de compost V_{roche} : volume de roche

Le mélange de compost de boues et de compost de déchets verts, à raison de 1/3-2/3 (vol/vol), permet d'équilibrer leurs teneurs en éléments nutritifs. Pour garantir son homogénéité, il est préférable de le faire avant la mise en place des matériaux. Pour éviter un enrichissement excessif des sols en éléments nutritifs, la proportion de compost doit être au maximum de 30% en volume.

Le tableau suivant présente les compositions moyennes qui permettent le développement de prairies extensives et de gazons.

Utilisation du sol	Prairies extensives	Gazons
Compost [% vol.]	10	30
Constituants minéraux [% vol.]	90	70
Epaisseur du sol non tassé [cm]	30-40	30

Composition des sols artificiels

Un foisonnement minimum de 20 % doit être pris en compte dans le calcul du volume de compost nécessaire.

5. Réalisation du sol

Généralités : La mise en place des sols se fera durant la période de végétation (avril à septembre) par temps sec, de préférence au printemps de manière à garantir une levée rapide des semences et assurer l'absorption par la végétation des éléments nutritifs solubles du compost. Les matériaux doivent être ressuyés au moment de leur utilisation.

Les machines nécessaires pour la fabrication de sols artificiels présenteront les caractéristiques suivantes :

- bêcheuse : profondeur de travail de 30-50 cm, mélange homogène des constituants, possibilité de travail dans un sol avec plus de 50 % de cailloux;
- fraiseuse : mélange homogène sur 10 cm.

Techniques de mise en place : deux techniques de mise en place seront utilisées suivant la possibilité ou non de mélanger les constituants *in situ* (selon la pente, l'accès, la surface,...). Dans un cas comme dans l'autre, le rippage du sous-sol jusqu'à une profondeur de 50 cm est nécessaire lorsque celui-ci est compacté ou étanché en surface, ou lorsque l'on souhaite utiliser le sous-sol comme constituant minéral du sol (adjonction de compost seulement).

Pour la création de sols sur des surfaces planes ou présentant une faible pente, la méthode suivante sera appliquée (cf. figure ci-dessous) :

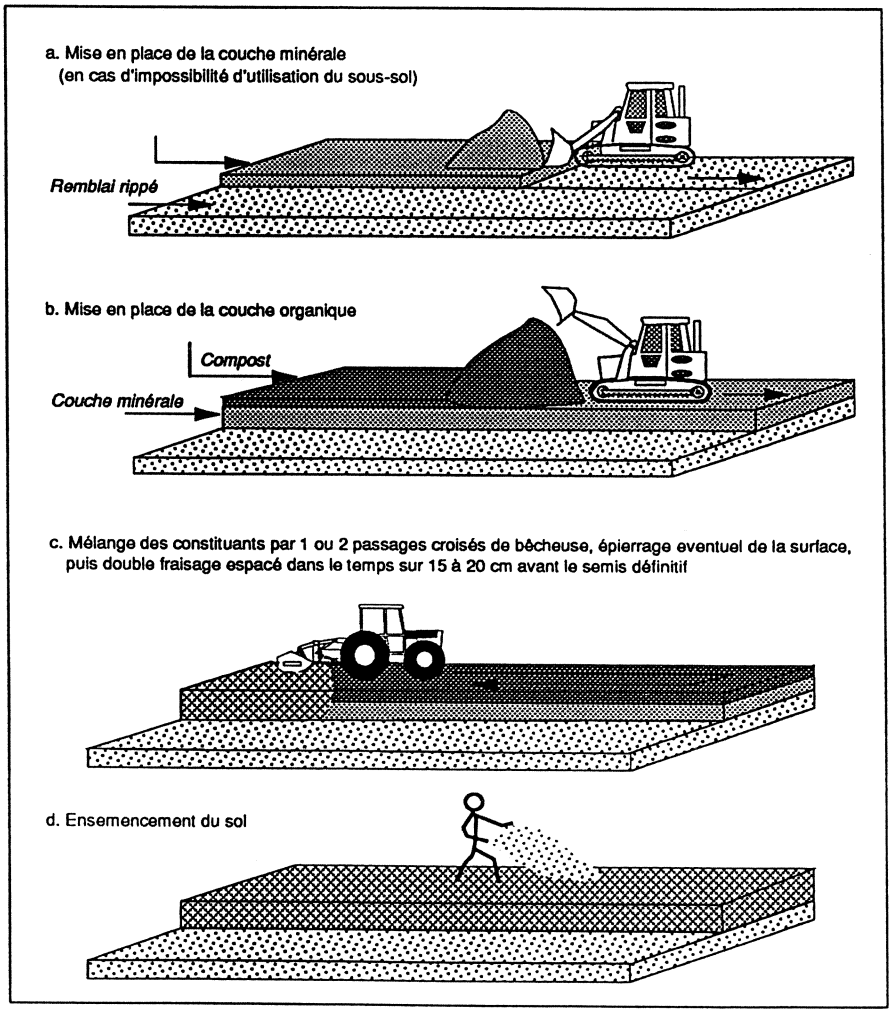


Schéma de mise en place des sols artificiels

Lorsque les caractéristiques du chantier ne permettent pas le passage d'une bêcheuse, le mélange des constituants se fera hors du site sur une surface plane. Le substrat mélangé sera alors mis en place sur le sous-sol rippé à l'aide d'une pelle hydraulique par exemple.

6. Ensemencement et plantation

Ensemencement : L'ensemencement sera fait immédiatement après la mise en place du sol pour protéger ce dernier de l'érosion et empêcher que les éléments nutritifs très solubles du compost ne soient entraînés par les eaux de pluie. Un ensemencement hydraulique est approprié dans le cas de sols en pente d'accès difficile ou pour des surfaces de grandes tailles. L'ensemencement de petites surfaces peut être effectué manuellement ou avec un semoir à faible pression (< 500 g/m^2).

Plantation : La plantation d'arbustes sera précédée ou accompagnée du semis d'un mélange grainier pour éviter que le sol ne reste sans couverture végétale. Les arbustes ne devront pas être acidophiles en raison du pH souvent élevé des composts. Ils devront être adaptés à la région. Un apport ponctuel de terre végétale dans les trous de plantation est recommandé pour favoriser la reprise des plants.

7. Entretien

Engraissement : L'engraissement des sols artificiels n'est en principe pas nécessaire. Toutefois si l'on souhaite un recouvrement de 100% et que l'on prévoit de tondre fréquemment la couverture vegétale, un engrais complet devra être apporté. En raison de la nature filtrante des sols, seuls des engrais longue durée seront utilisés. Leur apport ne se fera qu'en période de végétation. Il sera fractionné et réparti sur la saison en fonction du développement et des besoins (3 à 6 engraissements/an).

Arrosage : Les sols artificiels sont souvent très filtrants en raison de la nature des constituants utilisés (forte pierrosité, faible rétention en eau du compost). Un apport d'eau sera nécessaire pour les semis et les plantations si ceux-ci n'ont pas bénéficié d'une pluviosité naturelle suffisante. Les prairies extensives ne nécessiteront plus d'arrosage une fois la végétation développée. En revanche, les gazons engraissés et tondus fréquemment seront arrosés régulièrement. Les arbres et arbustes seront arrosés la première année.

Fauches ou tontes : Une fauche effectuée en début de saison, la première année du semis, permettra d'évincer les mauvaises herbes annuelles. Des machines exerçant une faible pression au sol ou travaillant à côté de la surface (épareuse) seront utilisées pour la tonte durant les premiers mois suivant la mise en place des sols de manière à ne pas les tasser.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Surface d'habitat et d'infrastructures en Suisse (OFS, 1979/1985)	3
Figure 2 :	Pourcentage de surface de transport par district en Suisse (OFS, 1979/1985)	4
Figure 3 :	Répartition des surfaces affectées aux différents modes de transport en Suisse (tiré de Hüsler et al., 1989)	4
Figure 4 :	Profils de sols mis en place le long des surfaces de transport	6
Figure 5 :	Exigences légales pour la réalisation de sols artificiels	8
Figure 6 :	Localisation des essais de sols artificiels	11
Figure 7 :	Teneurs relatives en éléments nutritifs du compost de boues (Colombier, 1986)	20
Figure 8 :	Teneurs en éléments nutritifs du compost de déchets verts de Muri (% du pds frais)	23
Figure 9 :	Présentation schématique des essais	24
Figure 10 :	Variables testées dans les sols expérimentaux	26
Figure 11 :	Présentation schématique des essais lysimétriques	28
Figure 12 :	Productions végétales annuelles des sols artificiels non engraissés (1988-1991)	40
Figure 13 :	Productions végétales de la terre végétale et d'un sol de 45 cm à 30% de compost non engraissé, non arrosé et sans marnes	41
Figure 14 :	Productions végétales des sols artificiels non engraissés et non arrosés de 15 cm en fonction de leur teneur en compost (moyenne 1988-1991)	42
Figure 15 :	Productions végétales des sols artificiels non engraissés et non arrosés de 15 et 45 cm d'épaisseur en fonction de la quantité de compost dans le sol (moyenne 1988-1991)	43
Figure 16 :	Influence de la distribution du compost dans un sol sur sa production végétale	44
Figure 17 :	Productions végétales des sols artificiels non engraissés et non arrosés, toutes profondeurs confondues, avec et sans marnes en fonction de leur teneur en compost (1988-1991)	45
Figure 18 :	Effet de l'arrosage sur les sols non engraissés de 45 cm d'épaisseur (1988-1991)	46
Figure 19 :	Productions végétales moyennes annuelles, toutes profondeurs confondues, des sols non arrosés et engraissés différentiellement (1988-1991)	47
Figure 20 :	Effet du piétinement sur les productions moyennes des sols engraissés et arrosés (1988-1991)	48
Figure 21 :	Productions végétales annuelles des prairies KTZ, prairie maigre neuchâteloise et garide	51
Figure 22 :	Productions végétales des prairies VSS A et B	54
Figure 23 :	Productions végétales de la prairie issue d'un semis direct	55
Figure 24 :	Granulométrie d'un sol artificiel calcaire à base de Valanginien	58
Figure 25 :	Teneurs en humus des sols artificiels à leur mise en place	59
Figure 26 :	Evolution des teneurs en humus au cours du temps	60
Figure 27 :	Représentation schématique du turn-over de la matière organique	61
Figure 28 :	Résistances mécaniques des sols artificiels arrosés et engraissés (1986-1991)	66
Figure 29 :	Résistances mécaniques des sols en fonction de leur teneur en compost (moyenne et écart type 1986-1993)	67
Figure 30 :	Evolution de la conductivité hydraulique dans les sols artificiels (moyenne des sols à 0, 30 et 75 % de compost)	68

Figure 31 :	Variations d'humidité pondérale dans les sols artificiels entre 1986 et 1988	70
Figure 32 :	Capacité d'échange cationique des sols artificiels et de sols naturels	71
Figure 33 :	Distribution du phosphore extractible dans les sols artificiels 7 années après leur mise en place	74
Figure 34 :	Evolution des teneurs en phosphore dans les réserves de deux sols engraissés et non engraissés	74
Figure 35 :	Présentation schématique du transfert du Cd et du Zn dans les sols artificiels	79
Figure 36 :	Diversité faunistique dans les sols artificiels en 1987 et en 1991	80
Figure 37 :	Population lombricienne dans un sol artificiel et dans un sol naturel	81
Figure 38 :	Présentation schématique des relations entre la teneur en matière organique et les paramètres de l'activité biologique des sols artificiels	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	1 :	Valeurs limites pour les métaux lourds dans les composts et les boues (Osubst, révision 1992)	9
Tableau	2 :	Valeurs limites en métaux lourds des sols et des terres artificielles	10
Tableau	3 :	Analyses granulométriques et minéralogiques du Valanginien et de l'Hauterivien	16
Tableau	4 :	Analyses physico-chimiques des constituants minéraux	17
Tableau	5 :	Analyses des composts de boues de station d'épuration	19
Tableau	6 :	Solubilité des métaux dans le compost de Colombier 1986 (méthode Tessier, 1979, modifiée Orlab, 1991)	21
Tableau	7 :	Analyses des composts de déchets verts et du mélange composts de boues (1/3) - déchets verts (2/3)	22
Tableau	8 :	Composition des mélanges	25
Tableau	9 :	Liste des vers de terre introduits dans les sols artificiels	27
Tableau	10 :	Variantes retenues pour la mise en place des sols sur de grandes surfaces	29
Tableau	11 :	Apports d'engrais sur les parcelles expérimentales	30
Tableau	12 :	Composition floristique des mélanges et densité de semis	31
Tableau	13 :	Apports d'engrais sur les prairies	32
Tableau	14 :	Critères d'appréciation de la fertilité des sols artificiels	34
Tableau	15 :	Paramètres analysés dans les eaux de percolation	35
Tableau	16 :	Espèces se développant spontanément sur les sols artificiels à base de composts de boues et de déchets verts	39
Tableau	17 :	Influence des variables testées (analyse de covariance et de régression multiple sur les productions absolues annuelles des sols non engraissés/1988-1991)	42
Tableau	18 :	Composition floristique des prairies sur les sols artificiels à 10 % de compost (vol)	49
Tableau	19 :	Valeurs indicatrices des espèces les plus abondantes dans les prairies sur sols artificiels	52
Tableau	20 :	Développement et composition floristique des prairies VSS A et B	53
Tableau	21 :	Développement et composition floristique des prairies de semis direct	54
Tableau	22 :	Perméabilité des sols artificiels	69
Tableau	23 :	Classes de sols calcaires naturels et domaine de variation des sols artificiels	71
Tableau	24 :	Analyses bio-physico-chimiques des sols artificiels à 30% de compost l'année de leur mise en place et 7 années plus tard	72
Tableau	25 :	Caractéristiques générales de fertilité des sols artificiels	73
Tableau	26 :	Teneurs en métaux lourds dans les sols artificiels	76
Tableau	27 :	Répartition et solubilité des métaux dans les sols artificiels à leur mise en place et cinq années plus tard	78
Tableau	28 :	Qualité des eaux de percolation des sols artificiels et exigences de l'ordonnance sur le déversement des eaux usées	84
Tableau	29 :	Etapes et coûts de la mise en place des sols dans le secteur Hauterive-St-Blaise selon prix de décembre 1994	101

Andersson A. (1975): Relative Efficiency of Nine Different Soil Extractants, *Swedish J. agric. Res 5, 125-135*

AFNOR (1987): Association française de normalisation; qualité des sols : méthode d'analyse. *Réf. X, 39-101 (novembre 1985), 66-71*

Bahr M. (1992) : Versuche zur Ermittlung des Stickstoffwirkung von Rasenschnittgut, in *Referate der Jahrestagung 1992 der Fördererkreises "Landschafts-und Sportplatzbauliche Forschung Giessen", Giessen Deutschland*

Beck T. (1971): Die Messung der Katalaseaktivität von Böden, *Zeitschrift für Pflanzennährung und Bodenkunde, 130, 68-81*

Bennett O.L.,Armiger W.H.,Jornes J.N. (1976) : Revegetation and use of eastern surface mining spoils. Land Application of Waste Materials. *Soil Conser. Soc. Am. Anheny, Jona, 195-215*

Beth Levine M., Tilghman Hall A., Barrett G.W., Taylor D.H. (1989) : Heavy metal concentrations during ten years of studge treatment to on old-field community. *J. Environ. Qual., 18, 411-418*

Bruckert S., et al (1978) : Fractionnement des agrégats appliqué à l'analyse des complexes organo-minéraux des sols. *Congrès AISS. Edmonton*

Brun J-J.(1985) : Etude expériementale du réaménagement agricole de la plaine des Iles à Passy, Haute Savoie, Rapports de synthèse, 1982-1985, C.E.M.A.G.R.E.F., *Groupement de Grenoble, Recherches et Ingénierie pour la revégétalisation des terrains dégradés*

CEMAGREF (1987-1989) : Essais d'engazonnement sur boues compostées, La Plagne-Savoie : bilan de trois saisons d'observations, *Groupement de Grenoble, Division Protection contre les érosions*

CEMAGREF (1989) : Valorisation des boues de station d'épuration de montagne en revégétalisation des pistes de ski : évaluation des risques de transfert par lessivage des principaux éléments biogènes, *Groupement de Lyon, Division Qualité des eaux, Pêche et Pisciculture*

CEMAGREF (1989) : Valorisation des boues de station d'épuration de montagne : description, évaluation technico-économique d'une filière de valorisation, la maturation naturelle des boues : le cas de la commune de Bellentre, *Groupement de Lyon, Division Qualité des eaux, Pêche et Pisciculture*

CEMAGREF (1991) : Valorisation des boues de station d'épuration de montagne, risque sanitaire lié à l'épandage en revégétalisation des pistes de ski : évaluation et recommandations, *Groupement de Lyon, Division Qualité des eaux, Pêche et Pisciculture*

CEMAGREF (1994) : Essai de végétalisation sur boues de papeteries / utilisation des boues en revégétalisation *Groupement de Grenoble, Division Protection contre les érosions*

Cuendet G.(1990) : Amélioration des sols par introduction de lombriciens, rapport annuel sur les essais d'inoculation des sols artificiels avec des lombrics, annexe 6.2.1, *rapport 8, Essais agropédologiques, Biol-conseils, avril 1991*

Doirisse M. (1989) : Note technique N° 31 concernant le prélèvement, l'imprégnation et la confection de lames minces de sols au Centre de Pédologie biologique, *54501 Vandoeuvre-Les-Nancy*

Duquet B. (1991) : Perturbation du cycle de l'azote par Cu, Zn et Cd dans des systèmes biphases compost-substrat minéral, *Thèse de Doctorat N° 916, EPFL, Lausanne*

Egner H., und Riehm H. (1955) : Die Doppellactatmethode, Thun, und R. und Hermann *Methodenbuch, band I, R. Neumann-Verlag. Radebeul und Berlin*

EPFL, station fédérale de recherches agronomiques de Changins Sol-Conseil, Nyon, SIEG, Vevey-Montreux, Prof. P. Regamey (1985) : Recherche interdisciplinaire sur la préparation des composts de boues d'épuration et sur leur utilisation en agriculture

FAC (1989) : Méthodes pour l'analyse des sols, *cahier N° 5, Liebefeld-Berne*

FAC (1991) : Directives pour l'estimation de la fertilité du sol, *Liebefeld-Berne*

FAC (1992) : Principes de la fumure, boues d'épuration et composts en agriculture, *cahier N° 9, Liebefeld-Berne*

Fischer P. (1992) : Kompostverwendung zur Bodenverbesserung und Düngung im Produktionsgartenbau und Garten-und Landschaftsbau, *Comm. ANS - Tagung, ETH-Zürich, 27.11.92*

Gobat J.-M. (1984) : Fractionnement de la matière organique, méthode granulométrique par tamisage humide, *tiré à part, Laboratoire d'écologie végétale, Université de Neuchâtel*

Greter-Domergue F. L., Vedy J. C. , (1989) : Entraînement gravitaire de Cd, Cu, 7n dans des sols reconstitués avec des boues compostées. *Science du Sd, Bull. A.F.E.S., 27, 3, 227-242*

Hall J.E., Vigerust E. (1983) : The use of sewage sludge in restoring disturbed and derelict land to agriculture. In : Utilisation of sewage sludge on land : rates of application and long term effects of metals. C.F.C. Proc., Uppsala. Ed. S. Berglund, R.O. *Davis and P. l'Hermite, 91-102*

Henin S., Gras R.,et Monnier G. (1969) : le profil cultural. *Paris, Masson*

Hüsler W. et al. (1989) : Surfaces de transport en Suisse, documentation pour l'aménagement du territoire, Office fédéral de l'aménagement du territoire, en collaboration avec le Service d'études des transports, *Office central fédéral des transports, des communications et de l'énergie, 97 p*

Jaeggi W. (1976) : Die Bestimmung der CO_2 -Bildung als mass der bodenbiologischen Aktivität. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung 15, 371-380*

Jordan J.-P., Caloz R., Mermoud A., (1982) : Utilisation des extracteurs à plaque poreuse pour déterminer les taux remarquables d'humidité, *tiré à part de mensuration, Photogrammétrie, Génie rural 8/82, EPFL Lausanne*

Khan D. H. and Frankland B. (1983) : Effects of cadmium and lead on radish plants eith particular reference to movement of metals through soil profile and plant. *Plant and soil 70, 335-345*

Krauter C. und Schulz H. (1992) : Biomasseanfall verschiedener Pflanzenbestände auf Landschaftsrasen, *Rasen-Turf-Gazon 1/1992, 17-28*

Landolt E. (1977) : Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora, *Veröffentlichungen des geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rübel, Zürich, 64 Heft.*

Landolt E. (1991) : Plantes vasculaires menacées en Suisse : listes rouges nationale et régionales, *Office fédéral des imprimés et du matériel, 3000 Berne.*

Maire N. (1984) : Extraction de l'adénosine triphosphate dans les sols : une nouvelle méthode de calcul des pertes ATP *Soil biol. Biochem., vol 16, N° 4, 361-366*

Mathey W., Zettel J., Bieri M. (1990) : Invertébrés bioindicateurs de la qualité des sols agricoles, *Bericht 56 des nationales Forschungsprogrammes "Boden," Liebefeld-Bern*

OFEFP (1993) : Information Osol N°5 concernant la protection des sols et l'ordonnance sur les polluants du sol : Exigences requises pour la fabrication de terres végétales artificielles à partir de déchets

OFEFP (1994): Stand und Entwicklung der Kompostierung in der Schweiz, *Umwelt-Materialen. Nr. 21, Bern*

OFS : Office fédéral de la statistique : l'utilisation du sol en Suisse, résultats par communes, 1979-1985, Berne 1992

Odévers : Ordonnance sur le déversement des eaux usées du 8 décembre 1975, RS 814.225.1

Osol : Ordonnance sur les polluants du sol du 9 juin 1986 (Etat le 1er janvier 1989), RS 814.12

Osubst : Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement du 9 juin 1986 (modification du 16 septembre 1992) : RS 814.013

OTD : Ordonnance sur le traitement des déchets du 10 décembre 1990, RS 814.015

Pietz R.I., Carlson C.R., Peterson J.R., Zenz D.R., Lue-Hing C. (1989): Applications of sewage sludge and other amendments to coal refuse material. I. Effects on chemical composition. II. Effects on revegetation. *J. Environ. Qual. 18, 164-173*

Skirde W. (1985) : Langzeitwirkung von Klärschlamm in Vegetationsschichten (1974-1984), *Zeitschrift für Vegetationstechnik 8, 45 - 50*

Strehler C. (1987) : Transfert des métaux lourds dans des sols modélisés, *travail de 3ème cycle en protection de l'environnement, EPFL Lausanne*

Stucky D.J., Bauer J. H., Lindsey T.C. (1980) : Restoration of acidic mine spoils with sewage studges. I. Revegetation. *Redam. Rev., 3, 129-139*

Sutton R., Vimmerstedt J.P. (1974) : Treat stripmine spoils with sewage sludge. *Compost Sci.,15,1,22-23*

Topper K.F., Sabey B.R. (1986) : Sewage studge as a cool mine spoil amendment for revegetation in Colorado. *J. Environ. Qual.,15., 44-49*

Voser P. (1985) : Neue Magerwiesen - (k)eine Modeartikel. *Angewandte Oekologie 4/85*

NORMES, DIRECTIVES OU PUBLICATIONS TRAITANT DES ASPECTS TECHNIQUES OU BIOLOGIQUES DES AMENAGEMENTS, DES SEMIS ET DES PLANTATIONS

- Directives concernant la stabilisation végétale ainsi que l'intégration d'ouvrages de soutènement et d'installations antibruit dans le paysage (1981), Office fédéral des routes, Office central fédéral des imprimés et du matériel, Berne
- Recommandations pour la production et l'utilisation de semences et de plants adaptés aux conditions locales pour l'aménagement des surfaces de compensation écologique et la revégétalisation des talus routiers et ferroviaires ainsi que les surfaces de nivellement (1994), Commission suisse pour la conservation des plantes sauvages CPS, Domaine de Changins, Nyon
- Aménagement des espaces verts dans les installations ferroviaires (1994). Manuel pour l'élaboration de projet, Chemins de fer fédéraux suisses. Direction générale
- Union des professionnels suisses de la route (VSS) :

  SNV 640.581 : Terrassements, terre végétale, dépôt et mise en oeuvre (1975)

  SNV 640.660a : Plantations, disposition : Taches et principes (1971)

  SNV 640.661 : Plantations, disposition : Espace plantable (1968)

  SNV 640.662 a : Plantations, disposition aux abords de la chaussée (1970)

  SNV 640.664 a : Plantations, aménagement du terre-plein central (1971)

  SNV 640.669 : Plantations : Aménagement des carrefours (1966)

  SNV 640.671a : Engazonnement, mélanges de graines (1973, en révision)

  SNV 640.672 b : Engazonnement, méthodes d'exécution (1975)

  SN 640 675 a : Plantation, exécution : Arbres et arbustes, choix des espèces (1992)

  SN 640 676 a : Plantation, exécution : Acquisition des plantes (1992)

  SNV 640 680 : Plantation, exécution : Stabilisation végétale (1977)

  SN 640.725 a : Entretien des plantations (1985)

LISTE DES RAPPORTS, NOTES TECHNIQUES ET PUBLICATIONS CONCERNANT LES ESSAIS DE SOLS ARTIFICIELS A NEUCHATEL (biol conseils s.a)

RAPPORTS

1986	Rapport 1	Granulométrie et minéralogie des composants minéraux potentiels des sols artificiels; préparation du site, mélange compost et roche.
	Rapport 2	Mise en place des sols artificiels en parcelles sur les remblais du Nid-du-Crô.
1987		Détermination de la qualité des sédiments de la Vieille Thielle en vue de leur utilisation pour la végétalisation des remblais N5.
	Rapport 3	Résultats acquis en 1986 sur les parcelles d'essais de végétalisation du Nid-du-Crô.
	Rapport 4	Description et essais technologiques de mise en place des sols artificiels du Nid-du-Crô.
1988		Possibilités d'utilisation des matériaux extraits de la tranchée N5 entre Monruz et St-Blaise.
	Rapport 5	Résultats acquis en 1987 sur les parcelles d'essais de végétalisation du Nid-du-Crô.
1989	Rapport 6	Résultats acquis en 1988 sur les parcelles d'essais de végétalisation du Nid-du-Crô.
1990	Rapport 7	Résultats acquis en 1989 sur les parcelles de sols artificiels du Nid-du-Crô.
		Rapport intermédiaire sur l'évolution des sols artificiels à base de roches calcaires et de compost (1986 - 1989).
1991	Rapport 8	Résultats acquis en 1990 sur les parcelles de sols artificiels du Nid-du -Crô.
1992	Rapport 9	Résultats acquis en 1991 sur les parcelles de sols artificiels du Nid-du-Crô.

PUBLICATIONS

Glauser M. et de Montmollin B., (1987)	Création de sols artificiels à partir de compost de déchets organiques en vue de la végétalisation des nouvelles rives du lac de Neuchâtel, I . Note préliminaire, *Bulletin de la société neuchâteloise des sciences naturelles*, tome 110, p. 109-111
Felber R., Glauser M., Strehler C., (1990)	Versuche zur Schaffung von Grünflächen auf verbesserten Skelettmaterial unter besonderer Berücksichtigung von Nitrat-und Schwermetallaustrag, *Zeitschrift für Vegetationstechnik* 13, 127-135

NOTES TECHNIQUES

1986 Projets et essais de végétalisation des remblais de la N5, inventaire des matériaux disponibles, prélèvement et analyse de sables dans le canal de la Broye.

Evaluation de l'intérêt des sols prélevés dans la boucle de la Vieille Thielle en vue de la végétalisation des remblais créés par la N5 sur les rives neuchâteloises.

Inventaire des déchets organiques du canton de Neuchâtel.

1987 Estimation des coûts des sols artificiels.

Caractérisation agronomique de la butte Shell à Cornaux.

Essais technologiques de mélanges en place des sols artificiels de la N5 sur le site du Nid-du Crô.

Possibilités d'utilisation des sols artificiels pour la plantation d'arbustes.

1988 Démonstration d'une bêcheuse-décompacteuse sur le site du Nid-du-Crô.

Démonstration d'un broyeur de pierres sur le site du Nid-du-Crô.

1989 Essais d'engazonnement des sols artificiels avec les mélanges VSS, commentaire de la norme SNV 640 671 a.