

Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

Caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution

N°: **P.C.1-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Préambule

Les règles professionnelles sont la transcription et l'identification du savoir-faire des entreprises du paysage. Elles sont rédigées par des professionnels du paysage : entreprises, donneurs d'ordre, bureaux d'étude, enseignants, fournisseurs, experts.

Elles sont élaborées en tenant compte de l'état des lieux des connaissances au moment de leur rédaction, et des documents existants sur certains sujets spécifiques. Elles constituent ainsi une photographie des "bonnes pratiques" du secteur.

Elles sont toutes organisées selon le même principe. Ainsi, on y trouve :

- une délimitation précise du domaine d'application
- un glossaire détaillé des termes employés dans le document
- des prescriptions techniques organisées selon la logique du déroulement de chantier
- des points de contrôle, qui donnent les moyens de vérifier la bonne exécution du travail
- des annexes techniques pouvant être de différents ordres : compléments techniques spécifiques, exemples de méthodes à mettre en œuvre, etc.

Les règles professionnelles sont applicables à tout acteur concourant à la réalisation et l'entretien d'un ouvrage paysager.

Nota bene : Les règles professionnelles du paysage n'ont pas pour vocation de remplacer le fascicule 35 mais de le compléter et de l'enrichir. Les règles professionnelles du paysage sont bien sûr conformes aux prescriptions générales du fascicule 35 et visent essentiellement à décrire les techniques mises en œuvre et les résultats à obtenir, pouvant notamment s'intégrer dans les CCTP des marchés de travaux.

Avertissement : Les réglementations de chantier et celles relatives à la sécurité des personnes ne sont pas abordées dans ces documents. Il va de soi que toutes les activités décrites doivent être réalisées dans le respect de la législation en vigueur.

Liste des personnes ayant participé à la rédaction

Comité de pilotage

Jean-Pierre BERLIOZ (Unep, Président du Groupe de conseil et de réflexion)
Christophe GONTHIER (Unep, Président de la Commission technique, innovation et expérimentation)
Eric LEQUERTIER (Unep, Secrétaire général, en charge des dossiers techniques)
Thierry MULLER (Unep, Vice-président de QualiPaysage)
Gilbert THEPAUT (Unep)

Comité de rédaction

Thierry MULLER (Unep)
Xavier MARIE (bureau d'études techniques)
Jean-Pierre ROSSIGNOL (enseignant-chercheur INHP retraité)
Claire GROSBELLET (Unep)
Marie RUAUD (Unep)

Comité de relecture

François-Xavier JACQUIN (enseignement agricole)
Isabelle FEIX (ADEME)
Olivier DAMAS (Plante & Cité)
Louis-Marie RIVIERE (Plante & Cité)
Laurent LOISELEUR (Unep)
Jacky WOLFF (Unep)
Jacques MACRET (HORTIS)
Bertrand MARTIN (AITF)
Frédéric SEGUR (AITF)
Clément ALABERGÈRE (FFP)
Rémi SUBLET (FFP)
Frédéric AUBRY (bureau d'études techniques)
Thierry STROBEL (bureau d'études techniques)
Serge GROSS (concepteur paysagiste)
Sébastien KALT (laboratoire d'analyses)



Document réalisé dans le cadre de la convention de coopération signée entre l'Unep et le Ministère en charge de l'Agriculture

Une nomenclature spécifique a été retenue pour les règles professionnelles du paysage. Par exemple, le numéro des règles professionnelles des travaux de terrassements généraux est le C.C.1-R0. La première lettre de la nomenclature sert à identifier l'axe auquel appartient le sujet (axe 1 - P : plantes / axe 2 - C : constructions paysagères / axe 3 - B : végétalisation de bâtiments / axe 4 - N : zones naturelles). Quant à la seconde lettre, elle permet d'identifier les travaux de création (C) ou d'entretien (E). Le premier chiffre est un numéro d'ordre et la mention "Rchiffre" indique le numéro de révision. Les annexes sont indiquées par la mention "Achiffre", placée avant le numéro de révision.

Les règles professionnelles du paysage sont téléchargeables sur le site de l'Unep à l'adresse suivante :

<http://www.entreprisesdupaysage.org/base-documentaire/regles-professionnelles/149-Regles-professionnelles-finalisees/>

Sommaire

Préambule	2
Liste des personnes ayant participé à la rédaction.....	2
1. Objet et domaine d'application.....	5
2. Définitions des termes.....	5
2.1. Fertilité.....	5
2.1.1. Fertilité physique.....	5
2.1.2. Fertilité chimique.....	5
2.1.3. Fertilité biologique.....	5
2.2. Sol en place.....	5
2.3. Terres ressources.....	5
2.3.1. Terre végétale et terre support (source : NF U44-551).....	6
2.3.2. Terres de bruyère (source : NF U44-551).....	6
2.4. Mélanges terre-pierres (MTP).....	6
2.5. Substrats de plantation circulables (ou substrats fertiles portant circulables).....	7
2.6. Amendements organiques (source : NF U44-051).....	8
2.7. Boues d'épuration urbaines.....	8
2.7.1. La valorisation des boues par « plan d'épandage ».....	8
2.7.1.1. Utilisation des boues pour la reconstitution ou la végétalisation des sols.....	8
2.7.1.2. Utilisation des boues pour les parcelles boisées.....	8
2.7.2. La valorisation de matières fertilisantes homologuées ou normalisées, produites à partir de boues d'épuration.....	8
2.8. Préparation microbienne (source : NF U44-551/A4).....	9
2.9. Amendements minéraux.....	9
2.9.1. Amendements minéraux basiques (source : NF U44-001).....	9
2.9.2. Amendements minéraux « granulaires ».....	9
2.10. Engrais (source : NF U42-001).....	9
2.11. Caractérisation des sols en place.....	9
2.11.1. Profil pédologique.....	9
2.11.2. Tarière.....	9
2.11.3. Horizon.....	9
2.11.4. Granulométrie.....	9
2.11.5. Texture.....	10
2.11.6. Structure.....	10
2.11.7. Couleur.....	10
2.11.8. Porosité.....	10
2.11.9. Humidités caractéristiques et pF.....	10
2.11.9.1. Humidité à la capacité au champ (HCC).....	10
2.11.9.2. Humidité au point de flétrissement (HPF).....	10
2.11.9.3. Réserve utile (RU).....	11
2.11.10. Hydromorphie.....	11
2.11.11. Compacité.....	11
2.11.12. Portance.....	11
2.11.12.1. Les essais à la plaque.....	11
2.11.12.2. Les essais à la dynaplaque.....	11
2.11.13. La perméabilité.....	11
2.11.14. Optimum Proctor.....	12
2.11.15. Propriétés mécaniques des matériaux terreux.....	12
2.11.16. Activité biologique.....	12
2.11.17. Matières organiques.....	12
2.11.17.1. La teneur en matière organique du sol.....	13
2.11.17.2. Le rapport C/N.....	13
2.11.18. Propriétés chimiques.....	13
2.11.18.1. Le pH.....	13
2.11.18.2. Solution du sol.....	13
2.11.18.3. Conductivité.....	13
2.11.18.4. Complexe adsorbant et CEC.....	13
2.11.19. Enracinement.....	14
2.12. Actions réalisées sur les matériaux terreux.....	14
2.12.1. Décapage.....	14

2.12.2. Andain.....	14
2.12.3. Foisonnement.....	14
2.13. Fond de forme.....	14
3. Description et prescriptions techniques	14
3.1. Préambule.....	14
3.2. Valorisation du sol pour l'aménagement	14
3.3. Qualité des sols en place et des matériaux apportés	15
3.3.1. Principes généraux	15
3.3.2. Cartographie et description.....	15
3.3.3. Caractérisation et analyse des terres ressources ou des fournitures complémentaires.....	15
3.3.4. Critères de qualité et de conformité des terres ressources.....	16
Points de contrôle	18
3.3.5. Décisions pour l'exécution du projet.....	18
3.4. Reconstitution du sol.....	18
3.4.1. Typologie des sols reconstitués pour la végétalisation.....	18
3.4.1.1. Profondeurs de référence	18
3.4.1.2. Application au projet d'exécution	18
3.4.1.3. Qualification des fonds de forme	19
3.4.1.4. Typologie.....	19
Points de contrôle	19
3.4.2. Conditions de mise en œuvre des matériaux de reconstitution de sol fertile.....	20
3.4.2.1. Qualité du décapage	20
3.4.2.1.1. Eléments généraux.....	20
3.4.2.1.2. Cas particulier des matériaux terreux à forte teneur en éléments grossiers.....	20
3.4.2.1.2.1. Evaluation des éléments grossiers.....	20
3.4.2.1.2.2. Opérations de concassage et de criblage	20
3.4.2.2. Conditions de stockage des terres ressources issues d'un décapage respectant les règles professionnelles	21
3.4.2.3. Déstockage	21
3.4.2.4. Remédiation	22
Points de contrôle	22
3.4.2.5. Décompactage du fond de forme	22
3.4.2.6. Mise en place des sols reconstitués	23
3.4.2.6.1. Conditions d'humidité.....	23
3.4.2.6.2. Eléments à prendre en compte.....	23
3.4.2.6.3. Choix des engins à utiliser.....	24
Point de contrôle	24
3.4.2.7. Réalisation des fosses de plantation	24
3.4.2.7.1. Nécessité de la fosse de plantation	24
3.4.2.7.2. Préparation d'une fosse de plantation et prise en compte du sol encaissant.....	24
Points de contrôle	25
3.4.2.8. Reconstitution de sol en mélange terre-pierres	25
3.4.2.8.1. Constitution et usages du mélange terre-pierres	25
3.4.2.8.2. Dispositions générales de mise en œuvre.....	25
3.4.2.8.3. MTP réalisé in situ.....	26
3.4.2.8.4. MTP réalisé sur stock.....	26
3.4.2.8.5. Dispositions particulières pour les fosses de plantation d'arbres.....	27
Points de contrôle	27
3.4.2.9. Mise en œuvre de substrats de plantation circulables	27
3.4.2.10. Préparation de la fouille pour la plantation dans un MTP ou dans un mélange de plantation circulaire	28
3.5. Préparation des sols pour la plantation des massifs et gazons	28
3.5.1. Massifs d'arbustes (strate arbustive)	28
3.5.2. Gazons, prairies et massifs de plantes couvre-sol et vivaces (strate herbacée)	28
4. Glossaire	29
5. Bibliothèque de référence.....	30
Annexes	
A1. Calcul d'un bilan humique	31
A2. Exemple de carte des ressources en matériaux fertiles	35
A3. Exemples de fiches de sondage et de profil.....	37
A4. Exemples de schémas des profils et de typologie des sols.....	43
A5. Exemples d'analyses de sol.....	47
A6. Exemple de plan des sols fertiles	53
A7. Exemple de fiche de stock.....	55

1. Objet et domaine d'application

Les travaux de préparation des sols ont pour objectif de préserver, ressourcer et reconstituer des sols fertiles, vivants et fonctionnels compatibles avec les usages prévus par l'aménagement et en relation avec un sol existant, plus ou moins naturel.

Ces travaux comprennent notamment les travaux de protection des sols, de terrassement, de préparation des sols, supports de paysage. Ils nécessitent de les connaître, au travers d'études adaptées le cas échéant.

Ne sont pas concernés par ce document :

- la mise en œuvre des sols pour reconstituer des berges de rivière, des zones érodées ou des travaux de reboisement forestier (cf. règles professionnelles de l'axe 4 relatif aux travaux d'aménagement et d'entretien des zones naturelles)
- les supports de plantation spécifiques aux plantations sur dalle ou aux toitures végétalisées (cf. règles professionnelles de l'axe 3 relatif aux travaux de mise en œuvre et d'entretien en végétalisation de bâtiments).

2. Définitions des termes

2.1. Fertilité

C'est l'aptitude d'un sol à exprimer le potentiel de croissance d'une culture ou de toute autre végétation. On peut distinguer trois types de fertilité : la fertilité physique, la fertilité chimique et la fertilité biologique.

2.1.1. Fertilité physique

Elle correspond à la plus ou moins grande facilité à créer et/ou maintenir un état physique du sol adapté à la végétation mise en place : stockage et infiltration de l'eau, aération et croissance racinaire. Elle est caractérisée par l'ensemble des propriétés physiques des sols liées à la porosité, à l'aération, à la réserve en eau, à la perméabilité et à la stabilité de la structure.

2.1.2. Fertilité chimique

Elle correspond à l'aptitude du sol à fournir des éléments nutritifs disponibles en quantités suffisantes pour la croissance et le développement des plantes. Elle est caractérisée par les propriétés chimiques des sols liées au pH, à la Capacité d'échange cationique (CEC) et aux teneurs en éléments minéraux.

2.1.3. Fertilité biologique

Elle traduit l'influence des êtres vivants, qui peuvent être plus ou moins utiles ou nuisibles à la croissance et au développement des plantes de par l'impact qu'ils ont sur l'état physique du sol et sur les quantités de nutriments disponibles pour les plantes. La fertilité biologique est caractérisée par les propriétés liées à l'activité biologique, à la teneur en matière organique, au rapport carbone azote (C/N) et à la caractérisation de l'activité et de la vitesse de dégradation et de transformation de la matière organique.

2.2. Sol en place

Il s'agit de la partie superficielle de la croûte terrestre, résultant de l'altération des roches sous l'action du climat et des organismes vivants et pouvant être impactée par les activités humaines, notamment en ville, autour des villes, des infrastructures ou des industries. Le sol en place est un compartiment primordial pour l'écosystème terrestre, constitué de matières minérales et organiques, abritant de nombreux êtres vivants (microorganismes, champignons, insectes, vers, etc.). On estime en effet qu'il y a environ 10 milliards de bactéries et de champignons dans une poignée de terre et de 20 à 400 g de vers de terre par m².

L'épaisseur moyenne des sols en place est de 1 m (sous climat tempéré et sous climat méditerranéen), cette valeur pouvant varier considérablement.

Les sols sont organisés en couches, appelées horizons, caractérisés par leurs constituants, l'agencement de ceux-ci et leurs propriétés physico-chimiques et biologiques.

2.3. Terres ressources

Le terme de "terres ressources" est introduit afin de disposer d'un terme générique pour désigner les matériaux terreux utilisés pour l'aménagement du paysage, qu'ils soient présents sur le site ou qu'ils proviennent d'apports extérieurs. Les terres ressources peuvent en effet avoir deux origines :

- les mouvements de sols liés au projet (terres ressources « internes »)
 - les excédents issus de processus de construction de zones d'activité, de logements en zones urbaines et péri-urbaines ou d'infrastructures (terres ressources « externes »).
- Dans une stratégie de bonne gestion des ressources, l'opérateur doit privilégier le réemploi des terres ressources présentes sur le site.

Ces matériaux terreux, d'origine pédologique et/ou géologique variée, sont des matériaux meubles, offrant une forte proportion d'éléments fins (inférieurs à 2 mm) avec parfois une charge plus ou moins importante en éléments grossiers (supérieurs à 2 mm).

On peut subdiviser ces terres ressources en plusieurs catégories :

- la couche de surface, qui est le plus souvent la couche agricole. Elle est travaillée et enrichie par des engrais et amendements. Les teneurs en Matière organique (MO) y sont généralement comprises entre 1,5 et 2,5 % et sont plus rarement comprises entre 1 et 1,5 % ou supérieures à 2,5 %. La couche de surface est habituellement utilisée en reconstitution de sols, telle quelle ou amendée, notamment compte tenu de sa fertilité biologique.
- les couches sous-jacentes. Elles sont toujours moins riches en MO et en éléments nutritifs. La plupart du temps, leur teneur en MO est inférieure à 1 %. Elle est plus rarement comprise entre 1 et 1,5%. Ces matériaux, suivant leurs propriétés, peuvent être utilisés pour la constitution d'horizons de transition ou d'horizons de profondeur dans les sols reconstitués.

Note : Les donneurs d'ordre ont l'habitude de séparer en trois horizons distincts les matériaux extraits : un horizon de surface, un horizon transitoire et un horizon profond, notamment dans le cas où les couches intermédiaires sont de qualité suffisante.

Les terres ressources englobent le terme “terre végétale”, utilisé traditionnellement par les paysagistes pour désigner les matériaux terreux le plus souvent riches en matière organique, et possédant des propriétés physiques et chimiques de fertilité qui servent aux aménagements paysagers. Le terme “terre végétale” a été choisi dans la norme NF U44-551, d’application obligatoire pour tout ce qui est négoce de matériaux, pour désigner une terre riche ou enrichie en matière organique.

2.3.1. Terre végétale et terre support (source : NF U44-551)

Suivant la norme NF U44-551, deux catégories de terres sont distinguées : la terre végétale et la terre support. Ces termes désignent des terres issues du décapage d’horizons de surface ou d’horizons peu profonds des sols naturels, et telles que leur teneur en éléments granulométriques de taille inférieure à 2 mm est supérieure à 50 % massique.

Note : La présente règle recommande, en § 3.3.4, une teneur en éléments grossiers inférieure à 20 %.

La terre support est un matériau naturel non amendé, caractérisé par une teneur en matière organique de 1 à 5 %. La terre support désigne des matériaux terreux qui proviennent le plus souvent des travaux de terrassements. On y retrouve les catégories de terres ressources définies au paragraphe précédent (couche de surface, couches sous-jacentes). Les caractéristiques physiques et chimiques des terres support (granulométrie, pH, conductivité, calcaire, éléments grossiers) doivent être précisées.

La terre végétale correspond à un mélange de terres ressources, amendé en produits organiques, de telle sorte que sa teneur finale en matière organique varie entre 3 et 15 %.

2.3.2. Terres de bruyère (source : NF U44-551)

La norme NF U44-551 différencie deux types de terres de bruyère :

- terre dite de bruyère, mélange acide composé en majorité de matières organiques végétales pouvant intégrer des amendements organiques, des matières minérales et des matières synthétiques
- terre de bruyère forestière, produit provenant uniquement de l’horizon humifère acide de sol sableux podzolisé (issu d’un podzol) ne pouvant être ni mélangé ni complétement.

Dans les deux cas, elles sont caractérisées par des pH inférieurs à 5,5 et des teneurs en matière organique supérieures à 25 % de la matière sèche.

2.4. Mélanges terre-pierres (MTP)

Dans les cas particuliers où on cherche à associer de façon pérenne la circulation piétonnière et automobile à la présence de végétaux et surtout de racines, le recours à des mélanges particuliers comme le Mélange terre-pierres (MTP) s’avère être un compromis efficace.

Il s’agit d’un mélange de granulats (pierres) et de terre végétale et/ou de terre support (cf. § 2.3.1) associant des propriétés de fertilité, de porosité, de perméabilité et de portance pour permettre, dans le même volume, le bon développement du système racinaire et la bonne stabilité du revêtement de voirie situé au-dessus et aux abords directs de la fosse de plantation.

Les proportions de MTP peuvent s’adapter à la taille et à la forme des granulats qui les composent, ainsi qu’à la teneur en eau de la terre au moment du mélange. Avec un granulats standard 50 / 100 mm et une terre sèche, on associe 1 m³ de pierres à 0,4 m³ de terre pour constituer 1 m³ de MTP, les 0,4 m³ de terre se logeant, après mélange, dans la porosité inter-granulaire. Ainsi, les pierres restent jointives entre elles après compaction et peuvent jouer leur rôle de stabilité mécanique pour le mélange. En proportion relative des volumes de chaque composant à part, entrant dans le mélange, on retiendra 70 à 75 % de pierres pour 30 à 25 % de terre. (1 m³ pierres + 0,4 m³ terre = 1,4 m³ ; 1,4 m³ = 100 % => 0,4/1,4 = 0,28 soit environ 30 % de terre par rapport à l’addition des volumes de terre et de pierres transportés pour faire le mélange). Grâce à ces proportions, la terre remplit uniquement les espaces vides entre les granulats après compactage et n’est pas compactée lors de la mise en œuvre du mélange. Elle conserve ainsi ses propriétés de structure et de porosité puisque seuls les granulats, en fonction de leur agencement après compactage, supportent les charges statiques et dynamiques.

Les pierres doivent avoir une dureté suffisante pour pouvoir résister au compactage lors de la mise en œuvre et pour ne pas s’altérer à moyen et long terme au cours de leur utilisation.

Les caractéristiques des MTP sont les suivantes :

- l’humidité de la terre à la mise en place est inférieure à 90 % de sa teneur en eau à la limite de plasticité (cf. § 2.11.9)
- la portance (cf. § 2.11.12) de référence d’un mélange terre-pierres est comprise pour la valeur EV2 entre 35 et 65 MPa, suivant le protocole d’un essai à la plaque (cf. norme NF P 94-117-1)
- la perméabilité (cf. § 2.11.13) du mélange est comprise entre 10⁻⁵ et 10⁻⁴ m/s (soit entre 36 et 360 mm/h)
- la dureté des pierres est mesurée sur des fractions 10/14mm par les essais LA (Los Angeles) et MDE (microDeval). Ces essais sont respectivement décrits dans les normes NF EN 1097-2 (juin 2010) et NF EN 1097-1 (août 2011) intitulées toutes deux « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats ». Il faut que la dureté des pierres soit inférieure à 45 (valeur de référence de l’essai) pour qu’elles puissent être utilisées dans les MTP.

Pour les MTP grossiers (granulats 40/80, 50/100, 80/120), le volume de vide entre granulats est d’environ 45 % du volume total.

Pour les MTP fins (granulats 15/30, 20/40), le volume de vide entre granulats est d’environ 35 % du volume total.

Selon les usages et les possibilités d’approvisionnement, les granulométries des pierres sont inscrites dans les fractions suivantes : 40/80, 50/100, 80/120, de façon à présenter un volume de vide supérieur ou égal à 45 % du volume total. La tolérance d’éléments fins des granulats, soit les éléments compris entre 0 mm et la granulométrie minimale du criblât, est de 15 %.

La nature et la classification des granulats naturels ou issus du recyclage proviennent de la norme NF P11-300 (septembre 1992), elle-même issue du *Guide des terrassements routiers (GTR), réalisation des remblais et des couches de formes*, LCPC, SETRA, édité en 1992 et réédité en 2000. Les types de roches admis pour les MTP sont les suivants :

- roches magmatiques et métamorphiques dures (granites, gneiss, pouzzolanes*) : classe R61
- roches calcaires dures : classe R21
- roches alluvionnaires dures : classe D21 ou D31, sous

condition qu'elles soient produites en semi-concassé de manière à assurer un blocage des grains

- roches siliceuses dures (grès, poudingues, brèches) : classe R41
- les matériaux recyclés doivent être exempts de plâtre, de ferraille et d'éléments putrescibles. Les matériaux de la classe F71 et les matériaux issus du concassage des bétons de déconstruction peuvent par exemple être utilisés. Le fait que les matériaux recyclés augmentent considérablement le pH (souvent supérieur à 9) limite fortement le choix de la palette végétale. Ces matériaux doivent donc être utilisés avec beaucoup de précautions pour pouvoir satisfaire aux valeurs agronomiques requises.

*Les pouzzolanes, compte tenu de leurs qualités intrinsèques de porosité, représentent un optimum de disponibilité en eau et en air pour le mélange. Cependant, étant plus ou moins friables, elles doivent faire l'objet d'une attention particulière (contrôles de dureté LA et MDE nécessaires).

La fertilité d'un mélange terre-pierres correspond aux minima requis pour la terre végétale et/ou la terre support intégrée dans les MTP.

Le mélange terre-pierres est un terme générique qui recouvre différentes qualités selon les natures de granulats utilisés (taille, granulométrie) et la nature de la terre utilisée (provenance, type de constituants). On obtient ainsi une diversité de mélanges d'un point de vue agronomique, dont la majeure partie des caractéristiques mécaniques est commune.

Note 1 : Le volume entrant de granulats dans le mélange équivaut au volume total de mélange. La terre des mélanges terre-pierres, située entre les pierres, n'apporte pas de volume au mélange.

Note 2 : Le mélange terre-pierres étant appelé à être compacté, la proportion de terre et de matière organique associée le cas échéant doit être telle que la porosité du mélange soit satisfaisante après compactage.

2.5. Substrats de plantation circulables (ou substrats fertiles portant circulables)

Pour les mêmes raisons que celles énoncées pour les mélanges terre-pierres, le recours aux substrats de plantation circulables s'avère être un bon compromis dès lors que l'on cherche à associer de façon pérenne la circulation piétonnière et automobile à la présence de végétaux, et surtout de racines. Il faut néanmoins être vigilant sur le choix de la palette végétale, qui doit être adaptée.

Les substrats de plantation circulables doivent permettre, dans un même espace, le développement du système racinaire et la bonne stabilité du revêtement de voirie situé au-dessus et aux abords directs de la fosse de plantation.

Il s'agit de mélanges parfaitement homogènes de granulats, insensibles à l'eau (c'est-à-dire présentant une faible quantité de limon et d'argile), composés dans des proportions variables de sables volcaniques, de sables roulés et/ou concassés, de briques concassées, de graviers et cailloux concassés et/ou roulés et de matière organique dans une faible proportion (environ 10 % volumique).

Ces substrats sont « prêts à l'emploi » et fabriqués sous contrôle continu dans une unité de fabrication offrant toutes les garanties du bon dosage des granulats et des éléments nutritifs qui les composent.

Les caractéristiques physico-chimiques de ces substrats compactés permettent d'obtenir des propriétés de portance, de porosité et de perméabilité, associées à des propriétés agronomiques permettant de disposer à minima des éléments nutritifs indispensables assimilés par les plantes et autorisant un développement racinaire malgré des masses volumiques sèches (ou densités apparentes) élevées.

Ces substrats peuvent être utilisés pour des fosses d'arbre isolées comme pour des fosses continues et sont considérés comme des couches de forme de voirie avec les caractérisations et contraintes associées à la norme NF P11-300, intitulée « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routières ».

Ces mêmes substrats, en général de granulométrie plus fine (de 0 à 16 mm), peuvent être utilisés comme revêtement de surface et être engazonnés pour la création de « parkings verts » ou de voies de circulation à condition que les couches de forme sous-jacentes soient dimensionnées en conséquence.

Ces substrats présentent l'avantage d'être insensibles à la ségrégation lors du transport et de leur mise en œuvre et donnent de bons résultats de portance.

D'autre part, du fait de leur faible teneur en limons et en argiles, ces substrats peuvent être considérés comme des matériaux non gélifs. Ils peuvent donc être utilisés comme couche de fondation de voirie légère car ils ne subissent pas ou très peu de déformations pendant les périodes de gel et de dégel et permettent ainsi de préserver la stabilité des revêtements de surface. Il faudra néanmoins veiller à mettre en œuvre une couche intermédiaire de réglage de 4 à 5 cm minimum en matériaux concassés type GNT 0/14 ou 0/20 compactée, avant de réaliser les enrobés ou les lits de pose pour les pavages et dallages.

Par ailleurs, compte tenu de la masse volumique sèche élevée après compactage et de la faible fertilité de ces substrats, il doit être porté attention au choix des essences ainsi qu'aux zones d'utilisation (notamment dans le cas d'un sol encaissant dépourvu en réserve hydrique).

Voici, à titre indicatif, un exemple de composition d'un substrat de plantation circulaire :

- sable volcanique ou/et sable silico-calcaire (0/4 à 0/6)
- graviers concassés ou/et roulés
- briques concassées (0/10)
- granulats à forte porosité ou roche volcanique et/ou roche magmatique ou métamorphique dure (8/32)
- argiles et limons en quantités inférieures ou égales aux valeurs mentionnées dans la norme NF P11-300
- compost végétal criblé ($\leq$ 0/10) dans une proportion de 10 à 15 % du volume environ (soit 5 à 7 % massique).

Les principales caractéristiques d'un substrat de plantation circulaire doivent répondre aux objectifs de résultats suivants :

- la portance de référence (cf. § 2.11.12) doit être comprise entre 40 et 80 MPa suivant les usages. Par exemple, pour une plate-forme de niveau PF2 selon le Guide des terrassements routiers (c'est-à-dire une plate-forme adaptée pour la circulation de piétons et de vélos ou pour la circulation légère ou les parkings), EV2 doit être supérieur ou égal à 50 MPa et avoir un coefficient de compactage K inférieur à 2
- la porosité à l'eau (cf. définition de la microporosité dans le § 2.11.8) doit être de 10 % minimum
- la porosité à l'air (cf. définition de la macroporosité dans le § 2.11.8) doit être de l'ordre de 10 %

- la perméabilité (cf. § 2.11.13) du mélange après compactage doit être supérieure à 10^{-6} m/s (c'est-à-dire supérieure à 3,6 mm/h)
- la disponibilité en eau (cf. § 2.11.9) minimale est de 4 % volumique (entre pF2 et pF3)
- la granulométrie (cf. § 2.11.4) courante est 0-31,5 et la courbe granulométrique s'inscrit dans le fuseau d'une grave type B2 ou B3
- les caractéristiques chimiques doivent correspondre aux minimas agronomiques requis pour le développement des plantes.

Le substrat de plantation circulaire est un terme générique qui recouvre différentes qualités en fonction des natures et dimensions des composants. On obtient ainsi une diversité de mélanges au niveau des caractéristiques mécaniques et agronomiques.

2.6. Amendements organiques

(source : NF U44-051)

Matières composées principalement de combinaisons carbonées d'origines végétales (composts) ou animales et végétales en mélange (fumiers), destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'amélioration de ses propriétés physiques, chimiques et/ou biologiques. Il s'agit de matières ayant un effet structural sur le sol, à moyen et à long terme.

Les amendements organiques s'incorporent au sol dans les 20 à 30 premiers centimètres et ne doivent en aucun cas être introduits en profondeur. En effet, un enfouissement en profondeur peut entraîner une décomposition anaérobie de la matière organique, ce qui pourrait limiter l'accès à l'oxygène du sol pour le système racinaire.

2.7. Boues d'épuration urbaines

Les boues d'épuration urbaines sont des amendements organiques et plus précisément des sédiments résiduels provenant d'installations de traitement ou de prétraitement biologique, physique ou physico-chimique des eaux usées domestiques.

Dans la situation française actuelle, l'épandage des boues d'épuration concerne essentiellement l'agriculture. Cependant, le cadre réglementaire permet deux types de valorisation des boues d'épurations pour les aménagements paysagers :

- la valorisation agricole des boues d'épuration dans le cadre d'un épandage contrôlé et réglementé (plan d'épandage autorisé par le préfet), pour les parcelles boisées publiques et privées et pour la reconstitution ou la végétalisation des sols
- la valorisation de matières fertilisantes homologuées ou normalisées (NF U44-095) produites à partir de boues d'épuration.

Dans le premier cas de figure, les boues d'épuration conservent leur statut de déchets et relèvent de la responsabilité du producteur. Dans le second cas de figure, elles ont le statut « d'amendements organiques » et relèvent de la responsabilité de l'utilisateur de ces matières fertilisantes.

Quel que soit le mode de valorisation retenu, il faut pouvoir garantir l'efficacité et l'innocuité du produit dans les conditions d'emploi. La traçabilité du devenir des produits utilisés est assurée dans tous les cas. Dans le cas de

la démarche de « plan d'épandage », cette traçabilité est exclusivement assurée par le producteur de boues qui doit justifier aux services de l'Etat la qualité des produits, leurs destinations et les pratiques d'utilisation effectivement mises en œuvre par l'utilisateur. Dans le cas de matières fertilisantes homologuées ou normalisées, cette traçabilité doit être assurée à la fois par le producteur concernant la qualité des produits et sa destination, et par l'utilisateur concernant l'application des règles d'usages fixées par le producteur sur une « fiche produit » obligatoire. L'utilisateur est alors responsable de la conformité de l'usage préconisé.

2.7.1. La valorisation des boues par « plan d'épandage »

2.7.1.1. Utilisation des boues pour la reconstitution ou la végétalisation des sols

Sur le plan réglementaire, les articles R211-25 à R211-47 du code de l'environnement relatifs à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées édictent les conditions et les dispositions techniques générales qui s'appliquent au cas de la reconstitution ou de la végétalisation des sols. Un arrêté spécifique relatif à la reconstitution ou à la végétalisation des sols est prévu par le code de l'environnement. Cet arrêté n'étant pas encore paru, les règles de l'épandage agricole s'appliquent, ce qui limite les doses d'usages largement en deçà de celles nécessaires en pratique.

2.7.1.2. Utilisation des boues pour les parcelles boisées

Le champ d'application des articles R211-25 à R211-47 du code de l'environnement relatifs à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées est également élargi à l'épandage sur parcelles boisées. Néanmoins, l'arrêté correspondant n'est pas paru, essentiellement par un manque de retours d'expériences nécessaires à la définition des règles conduisant à des pratiques respectueuses de l'environnement. Seuls les épandages réalisés à des fins expérimentales peuvent être autorisés à ce jour.

2.7.2. La valorisation de matières fertilisantes homologuées ou normalisées, produites à partir de boues d'épuration

La commercialisation de fertilisants à base de boues d'épuration nécessite :

- soit l'obtention préalable d'une homologation* ou d'une Autorisation provisoire de vente (APV), délivrées au cas par cas (c'est-à-dire par site de traitement des eaux ou par site de transformation des boues et/ou de formulation des produits à base de boues) par le ministère en charge de l'Agriculture, après examen d'un dossier par des commissions spécialisées
- soit la conformité à la norme NF U 44-095, intitulée « Amendements organiques. Composts contenant des Matières d'intérêt agricole, issues du traitement des eaux (MIATE) » et rendue d'application obligatoire par arrêté interministériel. Cette norme fixe les dénominations, les définitions et spécifications, le marquage, les éléments de caractérisation des composts contenant des MIATE. Elle s'applique aux produits finis utilisables en l'état contenant des matières issues du traitement physique, chimique ou biologique des eaux et aux mélanges constitués de ces matières et d'un ou de plusieurs engrais. En définitive, les règles fixées par cette norme limitent également les doses d'usages en deçà de celles nécessaires à la reconstitution des sols. L'usage de ces produits normalisés est donc limité à des pratiques d'amendements de sols en place.

* Les éléments pour constituer un dossier de demande d'homologation pour une matière fertilisante ou un support de culture, ainsi que le

guide homologation conçu par la Commission matières fertilisantes et supports de culture (CMFSC), sont à demander au ministère en charge de l'Agriculture / Direction générale de l'alimentation (DGAL) / Sous-direction de la qualité et de la protection des végétaux (SDQPV) ou à télécharger à l'adresse Internet suivante : <http://mesdemarches.agriculture.gouv.fr/Demande-d-homologation-des>

2.8. Préparation microbienne

(source : NF U44-551/A4)

Matière fertilisante à base d'organismes microscopiques végétaux (champignons mycorhiziens par exemple), animaux et bactériens ayant une action sur la croissance et le développement des plantes ou un effet améliorant les propriétés physiques et/ou biologiques du support de culture.

Les préparations microbiennes, vendues seules ou en mélange dans un support de culture de type horticole, doivent faire l'objet d'une Autorisation de mise sur le marché (AMM).

2.9. Amendements minéraux

2.9.1. Amendements minéraux basiques

(source : NF U44-001)

Matières destinées principalement à maintenir ou à élever le pH du sol et à en améliorer les propriétés physiques. Ces matières contiennent des carbonates, des oxydes, des hydroxydes et/ou des silicates, généralement associés à du calcium et/ou du magnésium.

2.9.2. Amendements minéraux « granulaires »

Au sens de la norme NF U44-551, il existe un certain nombre de matières minérales qui constituent des amendements minéraux dans le cas d'apport à des terres en place. Par exemple, un sablage est un amendement minéral. Plus globalement, l'expression « amendements minéraux » peut désigner des ajouts de matériaux granulaires permettant de modifier les propriétés de porosité d'un substrat pour augmenter sa perméabilité, sa disponibilité en eau pour les plantes, sa résistance mécanique, etc.

Exemples d'amendements minéraux « granulaires » : argile expansée, perlite, sable volcanique, vermiculite expansée, etc.

2.10. Engrais (source : NF U42-001)

Matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition : éléments fertilisants majeurs ou secondaires (N, K, P, Mg, Ca, S) et oligo-éléments (Fe, Cu, Zn, Mo, B, Mn, Cl).

2.11. Caractérisation des sols en place

2.11.1. Profil pédologique

Paroi d'une fosse creusée dans le sol, permettant l'observation de l'organisation verticale du sol et permettant notamment de distinguer les différents horizons qui le composent.

2.11.2. Tarière

Outil manuel simple permettant une observation rapide de quelques caractéristiques des horizons d'un sol (épaisseur, couleur, présence de taches, texture, présence de calcaire, présence d'éléments grossiers, humidité, etc.)

par prélèvement d'une carotte de terre à différentes profondeurs.

2.11.3. Horizon

Couche de sol de quelques centimètres à quelques décimètres d'épaisseur plus ou moins parallèle à la surface du sol et présentant des propriétés physico-chimiques relativement homogènes.

Un horizon donné se différencie des horizons contigus par sa couleur, sa structure, sa texture, sa teneur en éléments grossiers, sa teneur en matière organique, etc.

2.11.4. Granulométrie

Les constituants minéraux du sol sont classés en deux grandes fractions : la terre fine (éléments inférieurs à 2 mm) et les éléments grossiers (éléments supérieurs à 2 mm).

La granulométrie détermine les différentes classes des constituants minéraux d'un horizon identifiées par leur taille. La texture et la structure d'un sol dépendent essentiellement de sa granulométrie.

Les analyses de sols sont usuellement faites sur la terre fine, obtenue après séchage, broyage et criblage des agrégats. Néanmoins, la terre fine ne représente parfois qu'une petite partie des sols analysés, ce qui peut se révéler insuffisant pour qualifier les matériaux terreux dans leur ensemble. On a alors recours à l'évaluation de la proportion d'éléments grossiers dont la somme peut être regroupée sous l'expression « refus à 2 mm ». Ainsi, la proportion de terre fine est un élément d'appréciation essentielle pour certains matériaux terreux.

La répartition de la dimension des particules solides qui résulte d'une analyse granulométrique est exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau analysé (la terre fine).

L'analyse granulométrique s'effectue :

- par tamisage (norme NF P 94-056) pour les grains d'un diamètre supérieur à 80 µm jusqu'à 100 mm
- par sédimentométrie (norme NF P 94-057) pour les grains les plus fins.

Les limites des dimensions des grains qui définissent les fractions granulaires sont fixées selon l'échelle conventionnelle du tableau 1 :

Tableau 1 : Granulométrie de différents éléments	
Terre fine (< 2 mm)	
Argiles	< 2 µm
Limons fins	de 2 à 20 µm
Limons grossiers	de 20 à 50 µm
Sables fins	de 50 à 200 µm
Sables grossiers	de 200 à 2 000 µm (0,2 mm à 2 mm)
Éléments grossiers (> 2 mm)	
Graviers	2 mm à 2 cm
Cailloux	2 à 7,5 cm
Pierres	7,5 à 12 cm
Grosses pierres	12 à 20 cm
Blocs	> 20 cm

2.11.5. Texture

La texture est définie par la proportion relative des différents éléments minéraux (caractérisés par leur taille) présents dans la terre fine d'un sol. La texture ne rend donc pas compte de la proportion des éléments grossiers. Les résultats de l'analyse granulométrique permettent d'invoquer les propriétés physiques de la terre fine en fonction de l'élément qui possède l'influence la plus importante.

L'utilisation de différents triangles des textures permet de faciliter l'interprétation des résultats des analyses granulométriques en distinguant différentes classes de textures ayant des propriétés physiques proches. (cf. exemple de la figure 1).

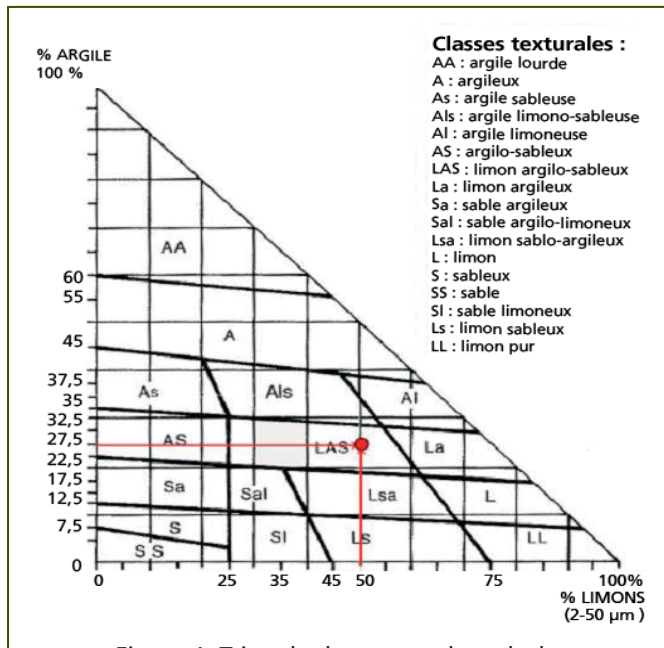


Figure 1. Triangle de texture des sols du Groupe d'étude pour les problèmes de pédologie appliquée (GEPPA)

(D. Baize, 1995, *Guide pour la description des sols*)

Commentaire : Le point rouge désigne dans la figure 1 l'exemple de détermination d'un sol comprenant 50 % de limons totaux, 25 % d'argile et 25 % de sables totaux. Il s'agit d'un matériau Limon argilo-sableux (LAS), dont la texture est équilibrée (compromis entre perméabilité, réserve en eau et stabilité structurale). Ce matériau peut néanmoins être sensible à la compaction.

2.11.6. Structure

Elle est définie par l'agencement des particules solides entre elles (argiles, limons, sables, matières organiques). Elle détermine ainsi la place, la forme des pores et le volume total qu'ils occupent à l'intérieur du sol. De ce fait, la structure est à l'origine de la porosité et de la perméabilité. Il existe plusieurs types de structures, souvent regroupées en plusieurs grandes familles :

- sols à structure fragmentaire (polyédrique, grumeleuse) organisés en agrégats poreux dans le cas de bons sols propices aux cultures
- sols à structure particulaire dans lequel les particules sont dissociées, ce qui est souvent le cas pour les sols très sableux et caillouteux
- sol à structure lamellaire dont les éléments sont disposés parallèlement et horizontalement comme dans le cas des croûtes de battance
- sols à structure fibreuse pour les sols comprenant une grande quantité de fibres végétales.

2.11.7. Couleur

La couleur du sol varie des ocres clairs à des bruns très foncés, voire des bleus-gris. Elle peut renseigner sur les teneurs en certains éléments (calcaire, fer, matière organique) ou sur les degrés d'humidité et d'engorgement des sols (hydromorphie). La couleur du sol révèle par ailleurs dans certains cas la forme sous laquelle se trouve certains éléments impliqués dans la coloration (exemple : la couleur du fer n'est pas la même selon le degré d'oxydation du fer). La couleur du sol peut être déterminée à l'aide d'un code de couleur : par exemple le code Munsell est un système de couleurs universel.

2.11.8. Porosité

Ensemble des espaces entre les particules solides du sol. Les pores peuvent être de taille et de formes différentes et être plus ou moins connectés entre eux. Selon leur taille et leurs connections, ils sont utiles pour permettre la circulation de l'air et de l'eau (macroporosité) et la rétention d'eau (microporosité).

2.11.9. Humidités caractéristiques et pF

La teneur en eau du sol peut s'apprécier sur le terrain (sol sec, « frais », humide, engorgé, etc.) ou se mesurer en laboratoire (exprimée en pourcentage massique ou volumique de teneur en eau).

Le sol, milieu poreux, permet l'infiltration, la circulation et le stockage de l'eau. Cette fonction de réservoir en eau est définie par deux humidités caractéristiques :

- l'Humidité à la capacité au champ (HCC), exprimée en pourcentage massique
- l'Humidité au point de flétrissement (HPF), exprimée en pourcentage massique.

Les forces de tension de l'eau dans le sol s'expriment en unité de pression (Pascal) ou, plus généralement en France, en valeurs logarithmiques (le pF). Pour déterminer HCC, les valeurs sont échelonnées de pF 2,3 à pF 2,8 selon la texture du sol. Pour déterminer HPF, la valeur est de pF 4,2. Comme il s'agit d'une tension (pression négative), lorsque le sol s'assèche, le pF augmente. Au contraire, lorsque le sol se réhumecte, le pF diminue.

2.11.9.1. Humidité à la capacité au champ (HCC)

C'est la quantité d'eau maximum qu'un sol ressuyé est capable de stocker pour ensuite la restituer en partie aux plantes jusqu'à la teneur en eau correspondant au point de flétrissement (HPF). Le pF à HCC est compris entre 2,3 (sol sableux) et 2,8 (sol argileux) suivant la texture. Pour ces valeurs, les forces de succion du sol pour l'eau sont de 0,2 à 0,5 bar (soit 200 à 500 hPa).

2.11.9.2. Humidité au point de flétrissement (HPF)

Le point de flétrissement correspond au taux d'humidité d'un sol à partir duquel la plante ne peut plus prélever d'eau. Dans cet état, l'eau est retenue par le sol avec une intensité supérieure aux forces de succion des racines. Autrement dit, le point de flétrissement marque la limite entre la quantité d'eau disponible pour la plante (réserve utile) et l'eau non disponible qui reste retenue dans le sol. Le pF à HPF est de 4,2 (valeur moyenne pour la plupart des plantes des zones tempérées). Les forces de succion du sol pour l'eau sont de 16 000 hPa (16 bar).

Remarque : Pour certaines plantes adaptées à la sécheresse, comme la vigne ou l'olivier, le point de flétrissement correspond à une tension bien plus élevée, de l'ordre de 25 bar.

Si le sol atteint le point de flétrissement, la plante ne peut plus absorber l'eau du sol, ce qui implique le flétrissement et la mort de la plante si cet état persiste.

2.11.9.3. Réserve utile (RU)

Il s'agit de la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement.

$$RU = (HCC - HPF) (\text{densité apparente} \times \text{hauteur})$$

Précisions : HCC est mesuré à pF 2,3 à 2,8 (suivant les textures), HPF à pF 4,2 et la hauteur de la couche de sol est en dm. Par ailleurs, la hauteur de sol considérée est liée à la hauteur d'enracinement dans le sol. Cette épaisseur est par exemple d'environ 30 cm pour un gazon et est d'au moins 60 cm pour des plantations arbustives.

En pratique, la réserve facilement utilisable considérée dans les programmes d'arrosage est une partie de la RU :

- 1/2 de la RU pour les sols argileux et pour les sols à forte RU
- 1/3 de la RU pour les sols sableux et pour les sols à faible RU.

Le tableau 2 synthétise les ordres de grandeur de la réserve en eau pour les sols sableux, limoneux, limono-argileux et argileux.

Tableau 2. Ordres de grandeur de la réserve en eau pour différentes textures de sols			
Texture	HCC (% massique)	HPF (% massique)	RU mm/dm de sol*
Sols sableux	8 à 12 %	3 à 5 %	7 à 12
Sols limoneux	20 à 25 %	10 %	15 à 20
Sols limono-argileux	24 à 27 %	11 à 13 %	17 à 30
Sols argileux	32 à 37 %	20 à 25 %	17 à 25

*Prendre en compte la profondeur d'enracinement

Note : 1mm = 1litre/m²

2.11.10. Hydromorphie

Manifestation d'un excès d'eau dans un horizon avec présence de taches rouille et de taches grises en proportion variable en fonction des conditions d'engorgement temporaire. Ces taches sont le signe de la réduction (dissolution) ou oxydation (précipitation) du fer. L'hydromorphie peut entraîner l'asphyxie des racines par manque d'oxygène.

2.11.11. Compacité

Etat plus ou moins compact du sol. Elle s'apprécie qualitativement à l'observation ou quantitativement par la mesure de la densité apparente. Différentes méthodes de détermination existent : cylindre emporte-pièce, pénétromètre, densitomètre à membrane, gamma-densimètre, etc.

Le pénétromètre permet de renseigner indirectement la compacité du sol. L'interprétation des mesures faites selon cette méthode est sensible car elle prend également en compte la densité apparente et l'humidité du sol.

Une compacité trop élevée diminue la pénétration racinaire et la circulation de l'eau et déprécie donc la valeur agronomique du sol.

2.11.12. Portance

La portance, exprimée en mégaPascals (MPa), est la caractéristique du sol qui définit sa capacité à supporter les charges qui sont appliquées sans tassement ni déformation. La portance dépend de la nature du sol, de son humidité et de sa densité apparente.

La portance est déterminée par des essais. Deux types d'essais sont utilisés : les essais à la plaque et les essais à la dynaplaque.

2.11.12.1. Les essais à la plaque

Les essais à la plaque (selon la norme NF P 94-117-1) comprennent deux cycles de chargement d'une plaque d'un diamètre de 60 cm surmontée d'un vérin transmettant la charge en prenant appui sous un camion chargé. Les déformations sont mesurées à l'aide d'une poutre de Benkelman et d'un comparateur au centième.

Lors du premier cycle (de 0 à 25 MPa), la pression est maintenue jusqu'à stabilisation de la déformation. La mesure de l'enfoncement (effectuée avant le relâchement de la pression) permet de déterminer la valeur du module EV1 qui caractérise la déformabilité du remblai dans l'état de compacité où il se trouve. (Une valeur EV1 faible peut être due soit à une insuffisance de compactage, soit à un matériau de médiocre qualité, soit à une teneur en eau trop élevée du matériau.)

Lors du deuxième cycle (de 0 à 20 MPa), la pression est également maintenue jusqu'à stabilisation de la déformation. La mesure de l'enfoncement permet de déterminer la valeur du module EV2, dit module de Westergaard, qui caractérise l'évolution de la déformabilité au cours de chargements successifs. (Si le compactage initial en EV1 est insuffisant, on notera une diminution de la déformabilité au cours de l'essai EV2.) L'EV2 est la valeur la plus importante des deux valeurs. Elle renseigne sur la résistance mécanique du sol à moyen et long terme.

Le coefficient de compactage K, qui est égal à EV2/EV1, permet d'apprécier la qualité du compactage. Le compactage est donc d'autant meilleur que K est faible. En ce qui concerne les travaux de petites voiries (surfaces piétonnes, trottoirs, stationnements, etc.), le coefficient de compactage K doit être inférieur à 2.

2.11.12.2. Les essais à la dynaplaque

Les essais à la dynaplaque (selon la norme NF P 94-117-2) permettent de déterminer le module sous chargement dynamique.

Quelque soit l'essai réalisé, les coefficients de restitution à obtenir sont les suivants :

- EV2 compris entre 30 et 50 MPa pour les voies piétonnes et de circulation douce
- EV2 compris entre 50 et 80 MPa pour le stationnement et les chaussées.

Remarque : Les autres types d'essais, notamment avec des appareils manportables, sont à considérer avec beaucoup de précautions même s'ils donnent de bonnes indications.

2.11.13. La perméabilité

Fortement liée à la morphologie et la porosité du sol, la perméabilité est l'aptitude d'un sol à permettre la circulation d'eau et de solutions. Elle s'exprime en quantité d'eau par quantité de temps et par unité de surface du sol. Son unité est généralement le m/s et parfois le cm/h ou le mm/h.

Exemples :

- sols très perméables : perméabilité de 10⁻³ m/s à 10⁻⁴ m/s (c'est-à-dire de 3 600 mm/h à 360 mm/h) / dans le cas, par exemple, des sols sableux

- sols perméables : perméabilité de 10^{-4} m/s à 10^{-6} m/s (c'est-à-dire de 360 mm/h à 3,6 mm/h) / dans le cas, par exemple, des sols limoneux
- sols peu perméables à imperméables : perméabilité de 10^{-6} m/s à 10^{-8} m/s (c'est-à-dire de 3,6 mm/h à 0,036 mm/h) / dans le cas, par exemple, des sols argileux et de certains sols limoneux et argilo-limoneux.

2.11.14. Optimum Proctor

L'essai Proctor consiste à tester la compacité d'un matériau pour une teneur en eau variable. Les résultats sont représentés par une courbe en cloche appelée « courbe de saturation en eau à l'optimum Proctor ». L'optimum Proctor est déterminé par la teneur en eau optimum pour une compacité maximum.

Le test Proctor est une détermination effectuée dans les laboratoires des Ponts et Chaussées. Il s'agit d'un test de compactage dynamique à différentes humidités qui permet de relier l'humidité du matériau à sa masse volumique. L'optimum Proctor correspond au taux d'humidité du matériau pour lequel la masse volumique sèche résultante est maximum (cf. figure 2). En génie civil, les chaussées présentent une stabilité maximum si le taux d'humidité du matériau lors de la construction est supérieur à 95 % de l'Optimum Proctor normal (OPN).

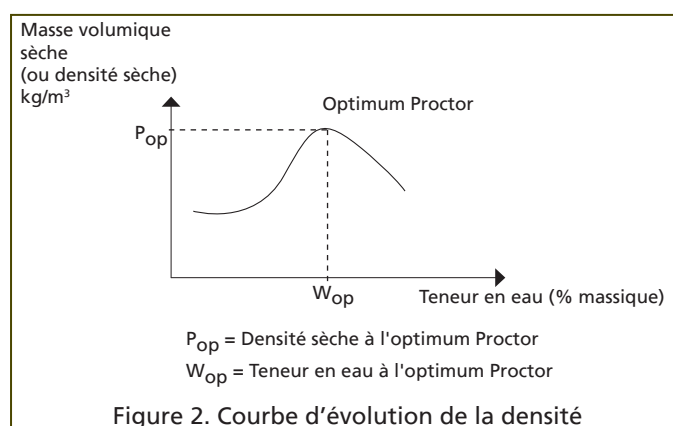


Figure 2. Courbe d'évolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau – détermination de l'optimum Proctor

Tableau 3. Exemples de teneurs en eau de matériaux à optimum Proctor (% massique)	
Matériaux	Teneur en eau à l'optimum Proctor (W _{op})
Sable	10-15 %
Sable limoneux	15-20 %
Limon sableux	20-25 %
Argile	25-35 %

Illustration :

- Un sable très sec présente une compacité faible. En effet, on s'enfonce dedans à pied.
- Si on augmente sa teneur en eau, il devient de plus en plus compact jusqu'au point de devenir très dur sous les pieds. Il devient portant, on ne s'enfonce plus. Le sable est alors proche de sa saturation en eau qui correspond à la teneur en eau optimum pour une compacité maximum.
- Si on augmente encore la teneur en eau au-delà de la saturation, le sable perd de sa compacité, devient fluant et on s'enfonce à nouveau dedans.

2.11.15. Propriétés mécaniques des matériaux terreux

Selon son état d'humidité, un sol peut être considéré comme cohérent, plastique ou liquide. Les limites d'Atterberg de plasticité (LP) et de liquidité (LL) caractérisent les changements d'état mécanique du sol.

A l'état cohérent, les agrégats résistent à une pression extérieure puis s'effritent.

A l'état plastique, les particules glissent les unes sur les autres en fonction des films d'eau.

Par exemple, une terre limoneuse ou limono-argileuse à l'état plastique se comporte comme une pâte à modeler (il est alors possible de faire un boudin avec une poignée de matériau).

Le travail de préparation des sols s'effectue à l'état cohérent non plastique pour disloquer les mottes et permettre la portance des engins de chantier.

Sur un sol à l'état plastique, les terrassements et les travaux du sol compactent le sol et détériorent sa structure, de manière irréversible ou presque.

2.11.16. Activité biologique

Action directe et indirecte des organismes vivants des sols (micro-organismes, champignons, faune telle qu'insectes et vers de terre, racines des plantes). L'activité biologique joue entre autres sur :

- la structuration du sol
- l'aération du sol
- la dégradation des matières organiques (processus de minéralisation et d'humification)
- la mise à disposition des éléments fertilisants (notamment l'azote) pour les plantes
- la régulation des populations d'organismes phytopathogènes.

Un sol trop compact altère l'activité biologique du sol en limitant la respiration des micro-organismes.

2.11.17. Matières organiques

Composés issus des organismes vivants végétaux, animaux et microbiens. Ces éléments sont composés majoritairement de carbone et d'azote, auxquels sont ajoutés des atomes d'hydrogène, d'oxygène, de soufre, et d'autres composés (métaux, halogènes, etc.).

La Matière organique d'apport (MOA) peut être fraîche et/ou compostée. Elle est apportée à la surface du sol et est constituée de résidus végétaux, de composts ou de fumiers. Dans le sol, la MOA évolue sous l'action de l'activité biologique et une partie se transforme en Matière organique humifiée stable (MOS), liée fortement à la matière minérale (argiles). Cette matière organique humifiée stable est aussi appelée humus. Cette évolution de la matière organique des sols est schématisée dans la figure 3.

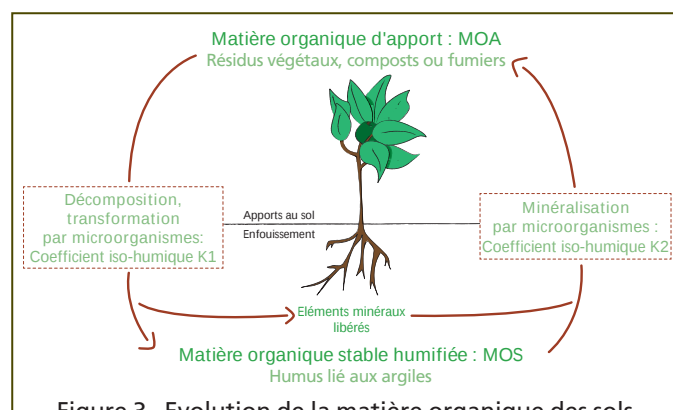


Figure 3. Evolution de la matière organique des sols

La matière organique fraîche, composée de résidus végétaux (tontes de gazon, tailles d'arbustes, feuilles d'arbres, etc.), ne peut être utilisée qu'en surface (en mulch ou en paillis) ou mélangée aux cinq premiers centimètres du sol, tandis que la matière organique compostée ne peut être incorporée que dans les 30 premiers centimètres au plus. De plus, l'apport en mélange dans l'horizon superficiel de matières organiques trop « fraîches » et/ou en trop grande quantité risque de provoquer une faim d'azote nuisible pour les plantes. En effet, dans ce cas l'azote du sol est mobilisé par les microorganismes assurant la dégradation de cette matière organique fraîche.

Remarque : Dans le cas de la reconstitution des sols, les MOA ne doivent pas être prises en compte dans l'épaisseur de sol.

2.11.17.1. La teneur en matière organique du sol
La proportion de carbone dans une MOS représente environ 58 % massique. La teneur en matière organique du sol est déterminée généralement en laboratoire à partir de la teneur en carbone organique selon la formule suivante :

$$\text{Teneur en MOS} = \frac{1,72 \times \text{teneur en carbone organique}}{100}$$

L'annexe P.C.1-A1-R0 donne des éléments pour calculer un bilan humique.

2.11.17.2. Le rapport C/N

Le rapport carbone sur azote (C/N) renseigne sur la vitesse et le degré d'évolution de la matière organique. Au fur et à mesure de la transformation de la matière organique par les microorganismes, le rapport C/N diminue. Ainsi, le rapport C/N est élevé au stade de l'humification alors qu'il est faible au stade de la minéralisation (cf. tableau 4). De l'azote minéral est en effet incorporé à la matière organique pendant la phase d'humification.

Généralement, le rapport C/N de la Matière organique humifiée stable (MOS) présente dans les sols est compris entre 8 et 12. Ces valeurs indiquent une transformation normale.

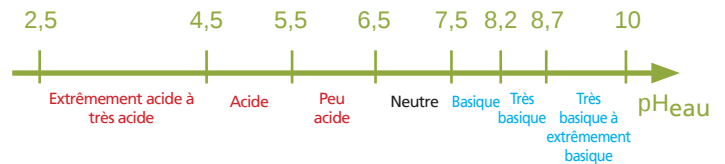
Tableau 4. Les différentes catégories de rapport C/N

	Valeur du rapport C/N	Exemple de sols concernés	Description
Rapport C/N bas	< 10	Sols calcaires	Il y a très peu d'humification et l'on se trouve en phase de minéralisation. L'azote minéral est disponible pour les plantes.
Rapport C/N moyen	Environ 15	Sols amendés en matières organiques	La minéralisation et l'humification agissent ensemble et la libération d'azote minéral est progressive.
Rapport C/N élevé	> 20-25	Podzols, terres de bruyère	L'humification et la minéralisation sont très lentes, comme dans le cas des litières acides de résineux ou de la « terre de bruyère ».

2.11.18. Propriétés chimiques

2.11.18.1. Le pH

C'est un indicateur important car il permet de juger de l'état d'acidité ou d'alcalinité d'un sol ou d'un horizon. Il est généralement déterminé au laboratoire par une mesure après agitation au sein d'un liquide, lequel est soit de l'eau pure (pH_{eau}), soit une solution de chlorure de potassium (pH_{KCl}). Par exemple, les valeurs des pH_{eau} sont les suivantes



Les pH_{KCl} sont généralement inférieurs de 0,5 à 1 unité pH au pH_{eau} . Il faut donc être très attentif au protocole utilisé (eau ou KCl) lors de l'interprétation des résultats d'analyse. Dans les sols non calcaires, il y a un risque de salinité lorsque $(\text{pH}_{\text{eau}} - \text{pH}_{\text{KCl}}) < 0,4$.

Les sols calcaires ont des pH_{eau} basiques en lien avec leur teneur en calcaire total mais surtout en calcaire actif.

Un pH bas peut être révélateur d'un sol pauvre en éléments nutritifs (calcium, magnésium, potassium et oligo-éléments).

2.11.18.2. Solution du sol

C'est l'eau occupant la porosité du sol et contenant divers éléments dissous dont les éléments nutritifs. Les racines y puisent les éléments minéraux dont la plante a besoin.

2.11.18.3. Conductivité

La conductivité électrique permet d'estimer la valeur globale de la salinité d'un sol ou d'un matériau. Elle est déterminée en laboratoire et exprimée en milliSiemens/cm (mS/cm). Elle était autrefois exprimée en millihoms/cm (mmhos/cm).

On considère généralement qu'une terre est non salée si sa conductivité est inférieure à 1 mS/cm (pour une extraction au 1/5^{ème}, c'est-à-dire une masse de sol pour cinq masses d'eau).

2.11.18.4. Complexe adsorbant et CEC

Le complexe adsorbant d'un sol (capacité à fixer de façon réversible des éléments nutritifs comme le potassium, le magnésium ou le calcium) est mesuré par sa Capacité d'échange cationique (CEC), exprimée en cmol⁺/kg, anciennement me/kg (ou meq/100g), sachant que 1 cmol⁺/kg équivaut à 1 me/100g.

La saturation est le rapport de la somme des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}) sur la CEC. Un sol à faible taux de saturation est un sol acide fixant des cations H^{+} .

On considère que :

- la CEC est faible si elle est inférieure à 10 cmol⁺/kg
- la CEC est moyenne si elle est comprise entre 10 et 20 cmol⁺/kg
- la CEC est forte si elle est supérieure à 20 cmol⁺/kg.

La CEC est due d'une part à la teneur en argile et d'autre part à la teneur en humus.

Les sols sableux ont généralement une faible CEC alors que les sols argileux ont une forte CEC car la CEC est très dépendante de la surface active du complexe argilo-humique. Or un sol argileux présente une surface active bien plus importante que celle d'un sol sableux. Par ailleurs, les éléments nutritifs sont fortement fixés dans un sol argileux, ce qui permet de créer des réserves. Au contraire, dans un sol sableux, la surface active est plus petite et peu d'éléments peuvent être mis en réserve. Ils sont en revanche facilement disponibles pour les plantes.

2.11.19. Enracinement

Il s'agit de décrire la localisation, la forme, l'abondance, la taille des racines. Celles-ci s'adaptent aux caractéristiques des différents horizons du sol. Leur présence varie, pour une espèce donnée, en fonction de la nature des horizons, du régime hydrique, et de la compacité.

L'activité racinaire est un indicateur très important de l'état physique du sol. Les racines ont du mal à coloniser les milieux trop compacts, très humides ou très secs.

Stabilité racinaire : les racines assurent l'ancrage physique de l'arbre au sol et la stabilité des arbres dépend entre autres du bon développement racinaire.

Il faut donc préserver la capacité d'exploration racinaire des arbres, en largeur autour de l'arbre et en profondeur.

2.12. Actions réalisées sur les matériaux terreux

2.12.1. Décapage

Action de retirer la partie superficielle du sol, après l'avoir débarrassé de sa végétation ligneuse et des éléments grossiers (déchets, gravas de démolition, etc.).

Le décapage s'effectue par couches pour pouvoir les stocker séparément si nécessaire. La couche de surface (terre végétale ou terre support), souvent anciennement cultivée, est agronomiquement meilleure que celles de profondeur. Pour préserver la qualité agronomique des terres décapées, il est impératif de travailler les matériaux dans des conditions suffisamment sèches, à l'état cohérent. Autrement dit, la teneur en eau doit être inférieure à la limite de plasticité.

2.12.2. Andain

Forme de tas de stockage de la terre, caractérisé par sa forme linéaire, à section triangulaire. L'emprise de la base est de l'ordre de 6 à 8 m de large pour une hauteur maximale de 3 à 4 m.

2.12.3. Foisonnement

Le foisonnement est l'augmentation de volume du sol lors de l'extraction d'un matériau ou d'un travail mécanique. Il s'exprime en pourcentage.

$$\text{Foisonnement} = \frac{\text{volume apparent occupé par le matériau après extraction ou travail}}{\text{volume initialement occupé par le matériau en place}}$$

C'est un phénomène temporaire : le foisonnement s'estompe plus ou moins rapidement au cours du temps, sous l'action de la pluie et l'effet du propre poids du matériau.

Les ordres de grandeur du foisonnement sont les suivants :

- 10 à 15 % pour une terre sableuse
- 15 à 20 % pour une terre limoneuse
- 25 à 30 % pour une terre argileuse.

2.13. Fond de forme

Surface résultant des opérations de déblais ou de remblais avant la mise en œuvre des terres ressources pour reconstituer des sols. La différence altimétrique entre le niveau de fond de forme et le niveau de projet correspond à l'épaisseur de sol à reconstituer.

3. Description et prescriptions techniques

3.1. Préambule

Les règles professionnelles recommandent la valorisation des sols existants pour préserver les ressources naturelles, réduire les coûts d'achat de terres végétales et réduire les déplacements engendrés par le transport. Ce parti pris permet en outre d'améliorer le bilan économique et écologique du maître d'ouvrage du chantier. L'entreprise du paysage doit être en mesure de proposer des alternatives à l'apport de terres ressources extérieures au site, sous réserve d'une caractérisation qualitative et quantitative des sols en place.

Dans le cas où la valorisation des sols en place se substitue à un apport de terres, il est obligatoire de produire des études d'exécution avec l'appui d'un contrôle externe.

3.2. Valorisation du sol pour l'aménagement

Il est recommandé de chercher, dans un premier temps, à valoriser le sol en place avant de rapporter des matériaux exogènes.

En fonction de la nature des sols en place, de leur caractérisation, des résultats d'analyse d'une part, et des aménagements souhaités d'autre part, les sols en place seront conservés ou non. Si les sols en place sont utilisés, des améliorations pourront leur être apportées, soit par travail du sol, soit par apport d'amendements organiques et minéraux, et/ou aussi par drainage. La figure 4 permet de guider la réflexion.

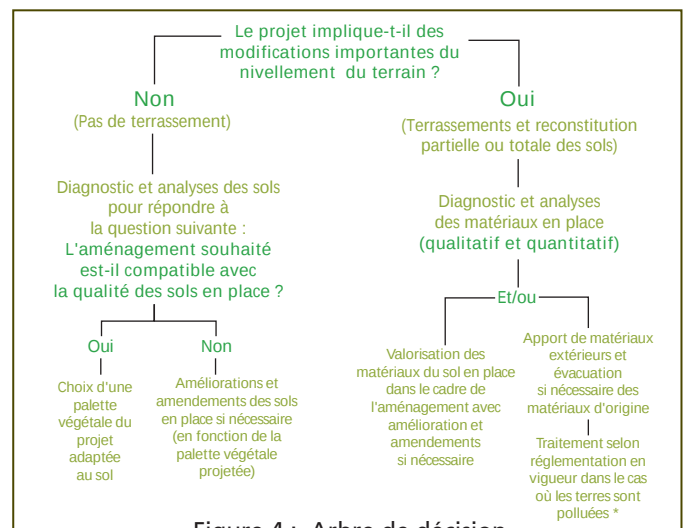


Figure 4 : Arbre de décision

* cf. Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement, Rapport final, BRGM/RP-60013-FR, Février 2012

Les espèces végétales ayant des plages de tolérance plus ou moins serrées vis-à-vis des caractéristiques des sols (texture, pH, humidité, teneurs en azote, porosité, etc.), il existe deux stratégies principales :

- soit on adapte les aménagements aux caractéristiques des sols (choix des espèces végétales, choix de l'emplacement des voies circulables ou d'autres éléments paysagers, etc.)
- soit on « adapte » les sols aux aménagements prévus (amélioration des sols par des amendements et engrais, drainage ou arrosage, importation de sols, etc.).

Vis-à-vis de l'environnement, la première stratégie est bien sûr préférable mais dans certains cas seule la seconde stratégie est envisageable. Il existe par ailleurs des stratégies intermédiaires qui reposent sur un projet d'aménagement évolutif en fonction de la caractérisation et de la cartographie des sols.

Par ailleurs, lorsque des sols en place de qualité sont identifiés sur un chantier, il est parfois nécessaire de veiller à leur préservation vis-à-vis de la circulation et du risque de compactage.

L'établissement d'une carte des ressources en matériaux fertiles permet de synthétiser les informations relatives à la valorisation des sols dans le cadre d'un aménagement (cf. annexe P.C.1-A2-R0 pour un exemple de carte de ressources en matériaux fertiles).

En toute hypothèse, il est essentiel que le sol soit rendu agronomiquement favorable à l'aménagement. Des apports de terres ressources peuvent être prévus dans ce cadre. Cependant, si la qualité et la quantité des sols en place (cf. § 3.3) est suffisante, ils ne sont pas nécessaires.

Remarque : L'entreprise est susceptible de faire des préconisations si elle juge que les aménagements végétaux demandés par le client sont incompatibles avec la qualité agronomique du site.

3.3. Qualité des sols en place et des matériaux apportés

3.3.1. Principes généraux

La qualité des sols en place sur le site du futur aménagement doit être contrôlée par une connaissance du type de sol et de ses principales caractéristiques. Cette étude du sol a pour finalité de définir la fertilité du sol dans ses trois composantes (physique, chimique et biologique). Cette connaissance est indispensable pour orienter l'aménagement du site (choix des végétaux les plus adaptés, choix des emplacements des différents éléments paysagers, planification des travaux à réaliser lors de l'aménagement puis lors de l'entretien, etc.). L'état initial du site est ainsi caractérisé. En zone urbaine, un historique de la parcelle peut être effectué pour connaître les usages antérieurs par l'homme.

Note : Il est nécessaire que l'historique du site soit porté à la connaissance de l'entreprise, notamment si on soupçonne un site d'être contaminé (ancien site industriel par exemple) ou d'avoir un intérêt archéologique.

3.3.2. Cartographie et description

En fonction de la surface de l'aménagement, cette connaissance peut aller de la description d'une observation (à la tarière ou dans une fosse) à une cartographie des différents types de sols présents à partir d'un maillage d'observations. La densité des observations dépend de la complexité du terrain. La partie 5 des présentes règles professionnelles recense différentes références bibliographiques dont certaines sont relatives à la réalisation de ces observations. Dans une zone supposée homogène d'après la connaissance du site et de l'occupation du sol, quelques observations peuvent suffire. En revanche, dans les zones très hétérogènes, ces observations doivent être plus nombreuses (cf. tableau 5).

Tableau 5. Nombre de prélèvements à effectuer dans un sol en place pour le décrire correctement		
Ordre de grandeur de la surface	Caractéristique	Nombre d'observations (fosse ou tarière)
1000 m ²	Homogène	2
1000 m ²	Hétérogène	5 à 6
10 000 m ²	Homogène	10
10 000 m ²	Hétérogène	20

Les observations de sols sont menées sur des sondages à la tarière manuelle (description simplifiée) ou sur des fosses pédologiques creusées à l'aide d'un engin (description complète). L'annexe P.C.1-A3-R0 rassemble un exemple de fiche de sondage (observation à la tarière) et un exemple de fiche de profil (observation dans une fosse).

Les caractéristiques des sols que l'on peut observer sont les suivantes : profondeur, succession des horizons et épaisseur, couleur, texture, structure, compacité, porosité, nature et quantité des éléments grossiers, humidité, hydromorphie, teneur en calcaire, nature et quantité des éléments anthropiques (débris), activité biologique et enracinement.

Si le terrain à aménager est une friche ou une zone « naturelle », l'observation des végétaux en place (plantes indicatrices) peut renseigner sur la nature des sols (« richesse » en éléments fertilisants, acidité, compaction, profondeur d'enracinement, caractère humide...) et peut aider au découpage du terrain en zones homogènes.

Les informations issues de ces observations peuvent être rassemblées sur des cartes semblables à celles présentées en annexe P.C.1-A4-R0 (schéma des profils, typologie des sols).

3.3.3. Caractérisation et analyse des terres ressources ou des fournitures complémentaires

Lorsque cela est nécessaire (par exemple pour un site contaminé), ou demandé (notamment dans le cadre des marchés publics), des échantillons de sols sont prélevés afin qu'un laboratoire agréé effectue des analyses. Les échantillons doivent de préférence être composites et issus d'un nombre minimum de prélèvements sur des sols ou matériaux similaires (cf. norme NF X31-100).

Les types d'analyses possibles sont de deux types :

- les analyses de routine : granulométrie de la terre fine, éléments grossiers supérieurs à 2 mm, calcaire (total et actif si nécessaire), matière organique, carbone organique, azote total, pH_{eau} et pH_{KCl}, conductivité, éléments nutritifs majeurs (phosphore assimilable, cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺), Capacité d'échange cationique (CEC)
- les analyses particulières :
 - oligo-éléments (Fe, Cu, Zn, Mo, B, Mn, Cl)
 - analyses de polluants (dans les cas où une pollution est suspectée) : Eléments traces métalliques (ETM), polluants organiques suivant les cas. Par exemple, dans le cas où l'aménagement est réalisé dans des zones de friches industrielles, il sera porté une attention particulière aux teneurs en polluants, dont l'étude détaillée est à la charge du maître d'ouvrage et

pratiquée par des bureaux d'études spécialisés ayant connaissance de l'historique d'occupation

- l'indice de battance
- la capacité de rétention (pF 2,8) et le point de flétrissement (pF 4,2)
- tests de germination si demandés (exemple de références : norme XP U44-165 (Février 2004), intitulée « Amendements organiques et supports de culture - Test rapide d'évaluation de la maturité d'un compost et de caractérisation des matières premières, vis-à-vis de la germination du cresson »).

Pour mémoire, d'autres analyses peuvent être exigibles en application de la norme NF U44-551 (exemples : phytopathogènes indésirables, zoopathogènes nuisibles, etc.).

En l'absence d'analyses de laboratoire, des déterminations simples de terrain sont nécessaires :

- test à l'acide chlorhydrique (HCl) pour déterminer la nature calcaire du terrain
- pH mesuré par pHmètre portatif ou par méthode colorimétrique
- éléments nutritifs par méthodes colorimétriques
- texture et humidité appréciées au touché
- couleur.

Note : Le ministère en charge de l'Agriculture publie chaque année un arrêté fixant la liste des laboratoires d'analyses de terre agréés pour l'année en cours. Cet arrêté est téléchargeable sur le site Internet Légifrance (www.legifrance.gouv.fr). Par ailleurs, le Groupement d'intérêt scientifique Sol propose une liste intéressante de laboratoires d'analyses à l'adresse suivante : <http://annuaire.gissol.fr/index.php/default/repedo>

Remarque : Toute analyse des matériaux du site doit être reliée à la description de sol. L'annexe P.C.1-A5-R0 comporte deux exemples de fiches descriptives d'analyse de matériau permettant de consigner les observations faites.

3.3.4. Critères de qualité et de conformité des terres ressources

La texture est une caractéristique importante à considérer, mais il existe peu de terres qui ne puissent être utilisées. Certaines terres présentant des textures déséquilibrées devront faire l'objet de précautions. Par exemple, les terres argileuses (contenant plus de 40 % d'argile) sont difficiles à utiliser du fait de leur faible perméabilité et de leur forte malléabilité. Ces propriétés peuvent cependant se révéler favorables dans certains aménagements. De même, les terres très limoneuses présentent des structures fragiles et les terres sableuses de faibles réserves hydriques et minérales. En fonction des aménagements, du climat et des types de sols présents dans la région, les caractéristiques texturales des terres sont plus ou moins adaptées à l'aménagement souhaité.

Il est possible de se retrouver dans des situations différentes d'utilisation de terre. On peut donc obtenir des caractérisations très différentes et prévoir des conformités variables.

On peut distinguer huit catégories de textures regroupant des classes de textures dont les propriétés sont similaires :

- **textures grossières** : forte proportion d'éléments grossiers (cailloux, pierres). Selon l'usage désiré, un criblage peut se révéler nécessaire

- **textures sableuses (SS, S, SI)** : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, souvent pauvre en éléments nutritifs et sensible à la compaction

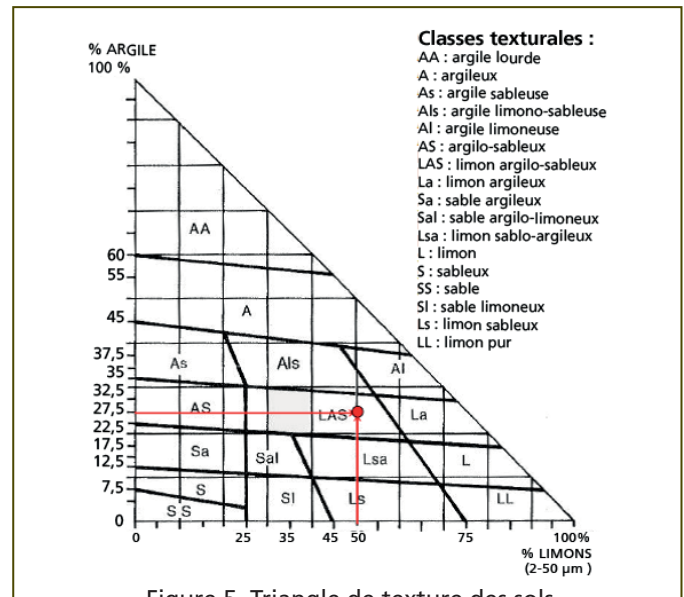


Figure 5. Triangle de texture des sols du Groupe d'étude pour les problèmes de pédologie appliquée (GEPPA) (D. Baize, 1995, *Guide pour la description des sols*)

- **textures limoneuses (Ls, LL, Lsa, L, La)** : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques (battance). Cette tendance peut être corrigée par des apports en humus et calcium

- **textures argileuses (As, Als, Al, AS)** : sol en général riche chimiquement, mais à piètres propriétés physiques. Milieu peu perméable et mal aéré, travail du sol difficile, en raison de la forte plasticité (état humide) ou de la forte rigidité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en partie ces propriétés défavorables

- **textures très argileuses (AA, A)** : la teneur en argile dépasse 40 %. Les propriétés physiques (faible perméabilité et forte plasticité) sont des contraintes importantes lors de la mise en œuvre et lors des opérations d'entretien, notamment si la teneur en eau augmente

- **textures sablo-argileuses (Sa)** : la teneur en argile corrige partiellement les défauts des textures sableuses, mais augmente les risques de prise en masse et de rigidité

- **textures sablo-limoneuses (SI)** : propriétés semblables à celles des textures sableuses, avec une meilleure disponibilité en eau

- **textures équilibrées (LAS, Sal, Lsa)** : elles correspondent à l'optimum, dans la mesure où elles présentent la plupart des qualités des catégories précédentes, sans en avoir les principaux défauts. Cependant, les textures équilibrées restent sensibles à la compaction.

Exemples de textures moyennes favorables à la mise en œuvre : 10 à 20 % d'argiles, 30 à 50 % de limons, 30 à 60 % de sables.

Les terres ressources contenant de fortes proportions d'éléments grossiers peuvent être traitées par criblage ou concassage afin d'être utilisées pour constituer des supports de plantation (cf. § 3.4.2.1.2).

Par ailleurs, on distingue également les terres selon leur pH (cf. § 2.11.18.1) et leur teneur en calcaire. Il existe trois

catégories de terres peu basiques à très basiques (c'est-à-dire de terres dont le pH est compris entre 7,5 et 8,7) :

- les terres faiblement calcaires : < 5 % de calcaire
- les terres calcaires : entre 5 et 20 % de calcaire
- les terres très calcaires : > 20 % de calcaire.

Remarque : En France, les calcaires sont à 90 % des carbonates de calcium (CaCO_3). Dans certains cas, les calcaires peuvent par exemple être des carbonates de magnésium (MgCO_3).

En présence de sols calcaires et très calcaires, la détermination du calcaire actif est nécessaire. En effet, le calcaire actif est à l'origine de la chlorose ferrique qui apparaît sur certains végétaux calcifuges comme par exemple les Rosacées. Il est possible de pallier cette chlorose soit par l'apport au sol de chélates de fer soit par pulvérisation sur les feuillages de solution de fer. Cette pulvérisation est généralement à l'origine de colorations rouille sur les feuilles. Il est également possible de remplacer la terre en place par de la terre de bruyère dans la zone explorée par les racines (cas par exemple des arbustes dits « de terre de bruyère », tels qu'Azalées, Rhododendrons, Camélias, etc.). Dans ce cas, il convient de mettre en place une barrière anti-racinaire et il faut veiller à ce que le sol encaissant soit drainant ou qu'un drainage spécifique soit réalisé avec un exutoire.

Tableau 6. Exemples de valeurs préférentielles de pH pour quelques végétaux (extrait de : Aménagement et maintenance des surfaces végétales (2 ^{ème} édition) - collection Agriculture d'Aujourd'hui - J.-L. Larcher, T. Gelgon - © Lavoisier, 2005)	
Valeur de pH	Exemples
4-5	<i>Calluna vulgaris</i> , <i>Camellia japonica</i> , <i>Camellia sasanqua</i> , <i>Hydrangea macrophylla</i> (bleu), <i>Picea abies</i> , <i>Pinus cembra</i> , <i>Rhododendron hybride</i> ...
5-6	<i>Abies alba</i> , <i>Acer palmatum</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Cryptomeria japonica</i> , <i>Erica carnea</i> , <i>Fuchsia magellanica</i> , <i>Hydrangea macrophylla</i> , <i>Ilex aquifolium</i> , <i>Kalmia latifolia</i> , <i>Magnolia grandiflora</i> , <i>Magnolia soulangeana</i> , <i>Nandina domestica</i> , <i>Pieris japonica</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Rhododendron hybride</i> , <i>Skimmia japonica</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Viburnum opulus</i> ...
6-6,5	<i>Aucuba japonica</i> , <i>Ceanothus x delilianus</i> , <i>Cedrus deodara</i> , <i>Choisya ternata</i> , <i>Cupressus arizonica</i> , <i>Erica x darleyensis</i> , <i>Euonymus japonica</i> , <i>Genista lydia</i> , <i>Hydrangea petiolaris</i> , <i>Laurus nobilis</i> , <i>Philadelphus coronarius</i> , <i>Pinus strobus</i> , <i>Ribes sanguineum</i> , <i>Rosa chinensis</i> , <i>Syringa vulgaris</i> ...
6,5-7,5	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Arbutus unedo</i> , <i>Berberis thunbergii</i> , <i>Chaenomeles japonica</i> , <i>Chamaecyparis lawsoniana</i> , <i>Cistus x purpureus</i> , <i>Cotoneaster salicifolius</i> , <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Forsythia x intermedia</i> , <i>Hibiscus syriacus</i> , <i>Nerium oleander</i> , <i>Olea europea</i> , <i>Potentilla fruticosa</i> , <i>Pyracantha</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Symphoricarpos albus</i> , <i>Tamarix pentandra</i> , <i>Viburnum tinus</i> , <i>Weigelia hybride</i> , <i>x Cupressocyparis leylandii</i> ...
7,5-8	<i>Abies pinsapo</i> , <i>Acer platanoides</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Albizzia julibrissin</i> , <i>Buxus sempervirens</i> , <i>Caryopteris x clandonensis</i> , <i>Cercis siliquastrum</i> , <i>Cornus mas</i> , <i>Coronilla glauca</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Kerria japonica</i> , <i>Lavandula angustifolia</i> , <i>Ligustrum ovalifolium</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Prunus spinosa</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Sambucus nigra</i> , <i>Spirea x billardii</i> , <i>Viburnum opulus</i> ...

Les valeurs du tableau 6 sont indicatives. Certaines espèces citées ont en effet une tolérance plus ou moins importante aux amplitudes de pH.

Les terres végétales utilisées doivent a minima être conformes à la norme d'application obligatoire NF U44-051. Par ailleurs, les matières fertilisantes doivent a minima

- être conformes aux normes d'application obligatoire en vigueur (NF U42-001, NF U44-001, NF U44-051, NF U44-095, NF U44-551, etc.)
- avoir reçu une autorisation provisoire de vente ou être homologuées
- obéir à des critères de qualité additionnels en fonction des aménagements prévus.

Tableau 7. Exemples de valeurs des paramètres physico-chimiques d'une terre fertile d'apport sur un chantier	
Paramètres	Valeurs
Teneur en éléments grossiers (> 2 mm)	< 10 et 20 %
• Teneur en graviers (2 à 20 mm)	< 10 %
• Teneur en cailloux (de 2 à 7,5 cm)	< 10 %
Teneur en argiles	Entre 10 et 20 %
Teneur en limons	Entre 30 et 50 %
Teneur totale en sables	Entre 30 et 60 %
Teneur en matière organique (cf. § 2.11.17) :	
• pour un horizon de surface	• Entre 2,5 et 5 % (après dégradation des amendements)
• pour un horizon de sous-face	• Entre 1 et 2,5 % (sans amendement)
pH _{eau}	Entre 6,5 et 8,5
Teneur en P ₂ O ₅ , K ₂ O, MgO	> 0,1-0,2 g/kg
Teneurs en oligo-éléments	Voir tableau suivant
Teneurs en polluants	Respect des seuils des normes

Tableau 8. Teneurs en oligoéléments d'une terre fertile d'apport sur un chantier		
Oligo-éléments	Teneurs minimales souhaitables (mg/kg)	Méthode de laboratoire
Zn	1 à 7	EDTA
Cu	1 à 5	EDTA
Mn	7 à 10	EDTA
Mo	0,1 à 2	Acétate NH ₄
Fe	> 30	EDTA
B	0,5 à 2	Eau bouillante

Remarque : En plus de ces valeurs de référence, il est nécessaire de prêter attention aux conditions de stockage des terres végétales sur le site, déterminantes pour la fertilité physique du futur aménagement (cf. § 3.4.2.2).

Dans la plupart des cas, afin d'améliorer l'activité biologique du sol et de protéger la structure de l'horizon superficiel, il est recommandé un apport de matière organique en surface dont les caractéristiques sont recensées dans le tableau 9.

Tableau 9. Valeurs des paramètres physico-chimiques d'un compost vert (issu de déchets verts) de composition courante	
Paramètres	Valeurs pour un compost vert
Humidité	< 30-50 %
Masse volumique apparente sèche en vrac (densité apparente)	Entre 400 (densité 0,4) et 700 kg/m ³ (densité 0,7)
Matière organique	> 30-40 % de matière sèche
Azote total	> 1 % de matière sèche
Teneur en potassium	> 0,8 % de matière sèche
Teneur en phosphore	> 0,4 % de matière sèche
Teneurs en polluants	< seuils norme NF U44-051

Quelques repères visuels existent pour permettre d'identifier un bon compost :

- texture homogène et friable
- humide mais non saturé d'eau
- absence de morceaux de taille supérieure à 5 cm visibles (tolérance de 10 %)
- absence de déchets imputrescibles (verre, plastique, ferraille, etc.) visibles
- couleur « noire »
- faible odeur.

La durée de compostage (maturation comprise) doit être au moins de quatre à six mois, en fonction des processus de compostage (compostage avec ou sans ventilation forcée).

Points de contrôle

Fournir une fiche de description compilant au minimum les résultats des observations de terrain (tarière ou fosse) ainsi que leur localisation sur un plan.

Si des analyses complémentaires (carte des sols, résultats d'analyses, etc.) ont été faites ou communiquées par le maître d'ouvrage, elles doivent être annexées à cette fiche de description.

Dans le cas d'anciens sites pollués, il est recommandé de s'assurer que le maître d'ouvrage possède bien toutes les analyses, cartes, études de risques et descriptifs des travaux réalisés relatifs au terrain.

3.3.5. Décisions pour l'exécution du projet

L'observation des sols permet de caractériser les ressources et de réaliser des échantillonnages représentatifs, qui permettent la réalisation des analyses.

Leur interprétation permet soit de conserver les sols en place, soit de reconstituer des sols (cf. figure 4 de la partie 3.2) :

- les sols en place peuvent être améliorés par des opérations de drainage, de travail profond du sol (sous-solage) et/ou d'enrichissement par engrais et amendements

- les sols reconstitués doivent être produits soit à partir des matériaux des sols existants, soit à partir de matériaux d'apport, à la place ou sur les sols existants
- dans le cas de sols pollués, ces derniers doivent être améliorés en vue de limiter leur phytotoxicité (grâce, par exemple, à des amendements minéraux et/ou organiques qui diminuent la biodisponibilité des polluants ou favorisent leur dégradation).

L'interprétation des analyses de sol permet de déterminer les apports à effectuer et les quantités à apporter.

Dans le cas où les compétences n'existent pas au sein de l'entreprise, il est conseillé de se faire assister par un bureau d'étude spécialisé pour aider à la caractérisation des sols en place et à leur amélioration éventuelle : cartographie et typologie des sols à conserver et/ou à reconstituer, dosages des amendements, procédure d'exécution et contrôle qualité.

3.4. Reconstitution du sol

3.4.1. Typologie des sols reconstitués pour la végétalisation

3.4.1.1. Profondeurs de référence

Les sols reconstitués ont pour objectif d'offrir la profondeur d'enracinement nécessaire aux différents types de végétation. Suivant la nature des strates végétales du projet, suivant la qualité du fond de forme, la profondeur minima et la constitution des différents horizons de sols reconstitués peuvent varier :

- pour la strate herbacée, plantes annuelles, bisannuelles et vivaces : il faut prévoir de 20 à 30 cm d'épaisseur totale en une seule couche de matériau selon les exigences culturales. Ce matériau doit au minimum avoir la qualité d'une terre support
- pour la strate arbustive : il faut prévoir de 40 à 60 cm d'épaisseur totale. Deux couches de sols doivent être mises en œuvre :
 - terre végétale ou ancien horizon de culture (20 à 30 cm) au-dessus
 - terre support (20 à 40 cm) au-dessous.
- pour la strate arborée : il faut prévoir 80 à 120 cm d'épaisseur totale. Deux à trois couches doivent être mises en œuvre :
 - la couche superficielle (20 à 30 cm) de qualité terre végétale
 - la couche intermédiaire (40 à 100 cm) de qualité terre support
 - la couche la plus profonde peut être seulement constituée par un matériau terreux (de 0 à 60 cm).

Ces profondeurs correspondent à des profondeurs minimales pour un aménagement de qualité, sous réserve d'être en présence d'un fond de forme favorable (cf. § 3.4.1.3)

3.4.1.2. Application au projet d'exécution

Lors de la mise en place du projet d'exécution, il est essentiel d'interpréter les épaisseurs de sol et la nature des matériaux entrant dans la mise en place des sols reconstitués, en prenant en compte le contexte du projet. Deux principes sont à respecter :

- le principe de continuité des sols. On privilégie par exemple, lorsque c'est possible, des fosses continues de 80 cm de profondeur à des fosses individuelles de 1,20 m de profondeur pour les plantations d'alignement
- le principe d'association des strates qui partagent le même espace d'enracinement. On privilégie par exemple les sols

de 80 cm partagés par l'ensemble des strates sur une surface importante plutôt que de systématiser les fosses isolées de 1,20 m de profondeur en cas d'association mixte strate herbacée / strate arborée.

L'investissement sur les sols reste un point majeur du projet, et en cas de fond de forme défavorable à l'enracinement (cf. § 3.4.1.3), la valeur la plus élevée des épaisseurs doit absolument être mise en œuvre.

La réalisation d'un plan des sols fertiles (cf. exemple en annexe P.C.1-A6-R0) permet de visualiser les différents types de sols à reconstituer sur le site.

3.4.1.3. Qualification des fonds de forme

Un fond de forme est jugé favorable s'il est poreux, perméable et sans excès d'eau. Il doit présenter une compatibilité par rapport à la végétation prévue au projet.

Au contraire, les éléments suivants sont très défavorables au bon développement des végétaux :

- un fond de forme compact, imperméable, engorgé ou avec présence d'eau permanente (dans les cas où les plantes prévues à l'aménagement ne sont pas adaptées à l'eau)
- un sous-sol asséchant constitué par exemple de matériaux de granulométrie très grossière (matériaux de démolition par exemple)
- des pH inférieurs à 5 ou supérieurs à 9
- des conductivités (extraits au 1/5) supérieures à 1mS (c'est à dire un sol chargé en sels)
- la présence de polluants biocides.

Dans des conditions de sous-sol peu ou non perméable, il est important de mesurer la perméabilité du fond de forme. En présence d'hydromorphie, ou pour des mesures de perméabilité inférieures à 10^{-7} à 10^{-6} m/s (ce qui équivaut à des mesures inférieures à 0,36 à 3,6 mm/h), des systèmes de drainage sont recommandés dès que des plantations ne supportant pas des sols engorgés sont concernées.

Remarque : On peut soupçonner un engorgement du fond de forme si on détecte les symptômes d'hydromorphie (présence de taches rouille et grises, accompagnées parfois d'odeurs de fermentation anaérobie quand le sol est riche en matière organique).

Le dispositif de drainage consiste à mettre en place des drains, dans des tranchées drainantes, reliés à un exutoire. Si les sols sont sableux, les drains ou les massifs drainants sont protégés par des géotextiles pour éviter de les colmater. Les drains peuvent être de type agricole (drains annelés) ou de type routier (drains à cunette). Les drains de type routier sont plus faciles à mettre en œuvre dans le cas notamment des faibles pentes d'écoulement. En effet, leur rigidité par rapport au drain agricole et l'existence d'une cunette facilitent l'écoulement des eaux et limite le phénomène de sédimentation des éléments fins dans le fil d'eau. Dans un drain agricole, les pentes minimales efficaces dans le cas de mise en œuvre manuelle sont de l'ordre de 1 à 2 % et pour les drains à cunettes ces pentes minimales sont de l'ordre de 0,2 à 0,5 %.

Les géotextiles thermo-liés dont les diamètres d'ouverture sont trop petits sont à proscrire dans la mesure où l'expérience montre qu'ils peuvent se colmater. Il est recommandé d'utiliser des géotextiles non tissés aiguilletés car :

- les diamètres d'ouverture de ces géotextiles sont suffisamment grands pour laisser passer les particules les

plus fines (argile et limons). Ces particules étant entraînées par l'eau, elles ne colmatent pas les drains

- les diamètres d'ouverture de ces géotextiles ne laissent pas passer les particules plus grossières (sables), qui ne sont donc pas évacuées par l'eau et ne colmatent par conséquent pas non plus les drains.

Par ailleurs, les drains chaussettes ne sont utiles que pour des textures de sableuses, qui vérifient la condition suivante :

$$2A+LF < 50 \%$$

*Avec : A argile, en pourcentage massique
LF limon fin, en pourcentage massique*

Le respect de cette relation indique que le sol présente une texture sableuse ou sablo-limoneuse (voire parfois sablo-argileuse) avec des limons grossiers. Ces particules mal structurées entre elles sont susceptibles de pénétrer et de sédimenter dans les drains et également de les colmater. Il est aussi prêté attention à la planéité et/ou aux pentes et portance des fonds de forme, notamment dans le cadre de l'aménagement de terrains de sport (cas spécifique, cf. norme NF P90-113).

3.4.1.4. Typologie

Pour chaque type de sols fertiles reconstitués, on définit :

- une cote altimétrique de fond de forme
- les différentes épaisseurs des différents matériaux reconstituant le type de sol considéré
- la somme des épaisseurs de matériaux reconstituant le sol fertile représentant l'épaisseur totale adaptée à la strate végétale du futur aménagement (strate herbacée, strate arbustive et strate arborée).

Il est recommandé de mettre en place un plan du type des sols reconstitués. En effet, le plan d'études des sols a l'avantage de créer une bonne interface (qualité, cote altimétrique, bilan des matériaux ressources) avec les travaux de terrassements généraux (cf. règles professionnelles C.C.1-R0 "Travaux des terrassements généraux").

Points de contrôle

- Un bilan volumique des ressources en matériau terreux et apports complémentaires éventuels doit être réalisé.
- L'adéquation entre le plan de plantation et le plan des sols de plantation doit être vérifiée.
- La caractérisation de l'état de compaction du fond de forme et la mesure de la perméabilité doivent être réalisés.
- La mesure de la planéité ou de la pente doit être réalisée. Les tolérances sont de 5 à 10 % par rapport aux épaisseurs des couches à reconstituer (à l'exception des sols sportifs dont les tolérances sont bien plus faibles).
- La conformité de l'état altimétrique du fond de forme selon les différents types de sol à reconstituer doit être vérifiée.

3.4.2. Conditions de mise en œuvre des matériaux de reconstitution de sol fertile

3.4.2.1. Qualité du décapage

Note : Avant le décapage, il faut abattre les arbres, dessoucher, débroussailler et enlever les éléments indésirables. Le nettoyage des surfaces, préalable au décapage, constitue une opération distincte décrite dans les règles professionnelles C.C.1-R0 « Travaux de terrassements généraux ».

3.4.2.1.1. Eléments généraux

Avant tout décapage, il convient d'avoir identifié les différentes couches de sol à décapier. Le décapage doit être effectué par couches, une couche pouvant contenir un ou plusieurs horizons. La profondeur de décapage peut déterminer la teneur en matière organique du matériau décapé (par exemple, plus le décapage est profond, plus la teneur en matière organique est faible). Par ailleurs, le décapage doit être effectué lorsque le sol est suffisamment sec (humidité inférieure à la teneur en eau à la limite de plasticité LP).

Il est préconisé de décapier à part la couche de surface, plus riche en matières organiques et éventuellement améliorée par des amendements et des pratiques culturales précédant le décapage. En outre, cette couche doit être stockée distinctement des couches sous-jacentes.

L'objectif concernant la couche supérieure est de disposer d'une terre présentant une teneur en matière organique la plus élevée possible. Dans certains cas, lorsque l'épaisseur de décapage est supérieure à l'épaisseur de la couche superficielle, il faut veiller à adapter l'épaisseur de la couche décapée de façon à ce que sa teneur en matière organique reste supérieure à la valeur limite d'une terre support (teneur en MO > 1 %). Dans de tels cas, les terres support doivent être significativement amendées en matières organiques pour reconstituer les horizons superficiels des sols de plantation.

3.4.2.1.2. Cas particulier des matériaux terreux à forte teneur en éléments grossiers

3.4.2.1.2.1. Evaluation des éléments grossiers

Une terre ressource peut contenir des Eléments grossiers (EG) en quantité plus ou moins importante. Ces éléments peuvent présenter une gêne plus ou moins grande pour les aménagements. On distingue quatre catégories de charge en éléments grossiers :

- charge faible : EG < 20 % (massique)
- charge moyenne : 20 % < EG < 40 %
- charge importante : 40 % < EG < 60 %
- charge dominante : EG > 60 %.

Lorsque des blocs (> 20 cm) sont présents en quantité relativement importante, le matériau terreux est difficilement utilisable.

3.4.2.1.2.2. Opérations de concassage et de criblage

Le tableau 10 synthétise les différentes façons de traiter les éléments grossiers sur le terrain.

Tableau 10. Opérations pour traiter les éléments grossiers sur le terrain	
Opération	Caractéristiques de l'opération
Criblage des sols préalablement décapés et traités par une station mobile type crible à étoiles, à doigts ou crible à tambour (Trommel) avant d'être remis en œuvre	Cette opération ne pourra être menée à bien que sur des sols secs, notamment dans le cas d'un crible à tambour. Cette opération ne peut être envisagée que pour des quantités supérieures à 1 000 m ³ . Les refus de criblage doivent être évacués. S'ils ne comportent pas de déchets organiques (racines, bois, végétaux, etc.), ils peuvent être valorisés par concassage et criblage (après avoir procédé à un scalpage, c'est-à-dire un pré-criblage visant à éliminer les particules les plus fines, notamment les limons et les argiles pouvant nuire à la qualité des remblais de voirie).
Criblage « in situ » des terres par une pelleteuse équipée en godet cribleur ou godet cribleur/broyeur (option supplémentaire pour le broyage des racines et autres déchets végétaux)	Cette opération, efficace pour des petites quantités ou pour des zones difficiles d'accès, présente l'avantage de pouvoir traiter et remettre en œuvre simultanément les terres criblées en limitant les opérations et les passages successifs d'engins sur les sols. Les refus de criblage doivent être évacués.
Criblage/enfouissage par un tracteur agricole équipé avec un préparateur de sol qui consiste à émietter, cribler et enfouir les éléments grossiers sous 15 cm de terre fine en une opération	Ce travail ne peut être exécuté correctement que sur des sols secs, chargés au maximum de 25 à 30 % d'éléments grossiers d'un diamètre maximum de 60 mm. Ce matériel est bien sûr dédié principalement à la préparation des gazons ou prairies.
Concassage in situ par un tracteur agricole (180 chevaux minimum) équipé d'un concasseur rotatif à marteaux	Ce travail peut être exécuté quelle que soit la charge en éléments grossiers mais peut, dans les cas extrêmes, modifier significativement la structure du sol traité. Ce type de matériel peut travailler sur une profondeur de 30 cm environ et est utilisé pour la préparation de grandes surfaces de prairies rustiques. (Cette opération doit être suivie par le passage d'une herse rotative pour parfaire le nivellement ou, selon le cas, d'un préparateur de sol pour obtenir un travail plus fin.)

3.4.2.2. Conditions de stockage des terres ressources issues d'un décapage respectant les règles professionnelles

Afin de permettre une réutilisation locale des matériaux décaissés, notamment pour de futurs travaux de plantation, il est nécessaire de préserver leur fertilité physique. Les conditions de stockage à respecter sont les suivantes :

- différents stockages doivent être prévus lorsque différents horizons pédologiques ont été identifiés
- la forme des andains est triangulaire et n'admet pas de surface plane. En effet, la planéité limite le ruissellement de l'eau et permet les infiltrations, contribuant à réduire la disponibilité en oxygène dans le matériau stocké et favorisant ainsi des conditions d'anaérobie. Le serrage superficiel de l'andain avec le dos du godet de curage est recommandé pour limiter la pénétration des eaux de pluie et limiter l'érosion superficielle
- les andains doivent impérativement être orientés dans le sens de la pente pour empêcher la stagnation d'eau. Toutes les mesures doivent être prises pour empêcher les stagnations d'eau au pied des andains
- la plate-forme de stockage doit être en pente légère (de l'ordre de 3 %), pour permettre l'écoulement des eaux de percolation vers l'extérieur. Elle doit en outre être munie de rigoles ou de fossés
- les engins de chantier ne doivent pas rouler sur le stock, notamment lors de sa constitution. En effet, leurs passages successifs contribuent à un compactage destructurant le sol, qui perd alors sa fertilité physique. De plus, la compaction crée des conditions anaérobies qui conduisent à une fermentation de la matière organique (odeur caractéristique)
- si l'on souhaite maintenir une faible teneur en eau des matériaux décapés, les andains doivent être bâchés avec une bâche imperméable (bâche agricole utilisée pour l'ensilage par exemple). Dans le cas où les matériaux terreux sont stockés non bâchés, il est conseillé de prévoir un système de drainage ou de noue en pied d'andain
- si la durée de stockage le permet, il est recommandé de semer l'andain avec une plante herbacée (phacélie, gazon...). Cette technique permet d'éviter l'érosion de l'andain, de limiter l'infiltration, de bénéficier d'une évapotranspiration en période estivale et de limiter la compaction et l'érosion. Cette pratique limite également l'invasion par des plantes adventices.

Important : Il est préconisé d'utiliser des engins types pelles mécaniques à bras articulés, de manière à constituer un stock sans rouler sur l'andain. Par ailleurs, pour circuler sur les surfaces à décapage, il est préconisé d'utiliser des engins sur chenilles et non sur pneus.

Les tableaux 11 et 12 synthétisent les recommandations relatives aux hauteurs de stocks et aux durées maximales de stockage en fonction des différents cas de figures qui peuvent être rencontrés. Ces tableaux concernent uniquement les situations où les terres ne sont pas compactées lors de la mise en œuvre des andains (ce qui nécessite le recours à une pelle hydraulique depuis le pied des andains). Si les terres sont compactées, il est nécessaire de réaliser une remédiation des terres stockées (cf. § 3.4.2.4).

Tableau 11. Hauteur de l'andain et durée maximale de stockage pour des terres ressources issues de couches de surface et dont le taux de matière organique est supérieur à 1 %

Humidité de la terre par rapport à la limite de plasticité	Texture dominante de la terre	Hauteur de l'andain recommandée	Durée maximale de stockage
H° < LP	sableuse	< 6 m	< 2 ans
	non sableuse	< 4 m	< 2 ans
H° > LP	sableuse	< 4 m	< 1 an
	non sableuse	< 2 m	< 6 mois

Tableau 12. Hauteur de l'andain et durée maximale de stockage pour des terres ressources issues de couches sous-jacentes et dont le taux de matière organique est inférieur à 1 %

Humidité de la terre par rapport à la limite de plasticité	Texture dominante de la terre	Hauteur de l'andain recommandée	Durée maximale de stockage
H° < LP	sableuse	< 6 m	sans objet
	non sableuse	< 4 m	sans objet
H° > LP	sableuse	< 4 m	sans objet
	non sableuse	< 2 m	< 6 mois

Lorsque la hauteur de l'andain ou la durée maximale de stockage n'est pas conforme aux valeurs des tableaux 11 et 12, il est nécessaire de réaliser une remédiation des terres stockées (cf. § 3.4.2.4).

3.4.2.3. Déstockage

Lors du déstockage d'un andain, il est nécessaire de vérifier que les matériaux stockés l'ont été selon les préconisations de la partie 3.4.2.2. Lorsque ces préconisations n'ont pas été respectées, il est nécessaire de réaliser une remédiation des terres stockées.

Le non respect des préconisations des tableaux 11 et 12 doit soit résulter d'une exception, soit être imposé par le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre. En effet, parce que les opérations de remédiation sont souvent coûteuses et parfois difficiles à mettre en œuvre pour obtenir un résultat satisfaisant, il faut les éviter autant que faire se peut.

Ainsi, le déstockage est suivi soit directement d'un atelier de mise en œuvre, soit d'un atelier de remédiation puis d'un atelier de mise en œuvre.

3.4.2.4. Remédiation

La remédiation des terres suite à un déstockage est obligatoire lorsque :

- la hauteur de l'andain est supérieure à la hauteur maximale préconisée (cf. tableaux 11 et 12)
- la durée de stockage est supérieure à la durée maximale préconisée (cf. tableaux 11 et 12)
- les terres ont été compactées.

Les opérations de remédiation ne peuvent avoir lieu que lorsque le taux d'humidité de la terre est inférieur à la limite de plasticité LP.

La remédiation à réaliser dépend de la destination finale des terres ressources déstockées (couches de surface ou couches sous-jacentes). Les tableaux 13 et 14 synthétisent les différents cas de figures qui peuvent être rencontrés.

Tableau 13: Opérations de remédiation à réaliser pour des terres ressources destinées à constituer des couches de surfaces			
Origine des terres ressources	Humidité de la terre au moment du stockage	Texture dominante de la terre	Opérations de remédiation à réaliser
couches de surface (MO>1 %)	H° < LP	sableuse	- Déstockage - Amendements organiques optionnels
		non sableuse	- Déstockage - Emiettage mécanique - Amendements organiques optionnels
	H° > LP	sableuse	- Déstockage - Séchage - Amendements organiques optionnels
		non sableuse	- Déstockage - Séchage - Emiettage - Amendements organiques optionnels
couches sous-jacentes (MO<1 %)	H° < LP	sableuse	- Déstockage - Amendements organiques obligatoires
		non sableuse	- Déstockage - Emiettage mécanique - Amendements organiques obligatoires
	H° > LP	sableuse	- Déstockage - Séchage - Amendements organiques obligatoires
		non sableuse	- Déstockage - Séchage - Emiettage - Amendements organiques obligatoires

Les apports organiques recommandés pour la reconstitution de couches de surface sont des composts ou des fumiers.

Tableau 14: Opérations de remédiation à réaliser pour des terres ressources issues de couches de surface ou de couches sous-jacentes et destinées à constituer des couches sous-jacentes		
Humidité de la terre	Texture dominante de la terre	Opérations de remédiation à réaliser
H° < LP	sableuse	« Simple » déstockage (hors cadre de la remédiation)
	non sableuse	- Déstockage - Emiettage mécanique
H° > LP	sableuse	- Déstockage - Séchage
	non sableuse	- Déstockage - Séchage - Emiettage

Après le travail d'aération et de nivellement des terres, il est souvent nécessaire de procéder à un semis de phacélies (si semis au printemps) ou de moutarde (si semis en été). Cette opération protège le sol pendant la durée de repos contre l'invasion de plantes adventices et contre le lessivage et/ou la sécheresse, permet un apport d'engrais vert et favorise le repeuplement du sol en micro et macro organismes, indispensables à la reconstruction biologique du sol.

Points de contrôle

Observations et consignation des conditions de stockage (cf. annexe P.C.1-A7-R0 pour un exemple de fiche de stock).

Des prélèvements à la tarière manuelle peuvent être effectués sur le stock pendant la période de stockage, ainsi que des prélèvements issus de profils à la pelle mécanique au cœur du tas pour constituer un ou des échantillons composites à analyser.

3.4.2.5. Décompactage du fond de forme

Avant la mise en œuvre des terres dans un objectif de plantation, il est nécessaire de décompacter les fonds de forme, afin de faciliter l'enracinement des futures plantations.

On crée ainsi un horizon de transition décompacté, sur une épaisseur convenue dans le cadre du projet. Sa compacité est telle qu'elle ne dépasse pas 80 à 90 % de l'Optimum Proctor normal (OPN, cf. § 2.11.14). Par ailleurs, ce décompactage ne doit pas nuire à la portance générale de l'aménagement. Il faut toutefois préciser que, dans le cadre de la mise en œuvre de supports de plantation, les exigences liées à l'exécution de terrassements généraux pour la mise en place d'une construction ou d'un ouvrage de génie civil ne s'appliquent pas.

Le décompactage est réalisé sur toute la surface du fond de forme d'un sol reconstitué et systématiquement au

droit d'une fosse de plantation. Le drainage de la fosse est obligatoire si l'encaissant est peu perméable. A défaut, il y a risque d'engorgement des fosses de plantation.

3.4.2.6. Mise en place des sols reconstitués

3.4.2.6.1. Conditions d'humidité

Le travail du sol dépend des caractéristiques mécaniques liées à son humidité. L'humidité du sol propice à un travail de préparation de la plantation est inférieure à celle de la limite de plasticité LP. En effet, la fabrication d'agrégats de petites tailles et de terre fine est maximum lorsque le sol est à l'état cohérent. Au contraire, lorsqu'un sol a une humidité supérieure à limite de plasticité, il est facilement soumis au compactage et à la prise en masse.

La méthode suivante permet de déterminer la limite de plasticité des matériaux utilisés :

- lorsque la terre peut être agglomérée en un "boudin", il s'agit d'un état plastique. Dans ce cas, il faut s'arrêter de travailler
- lorsqu'une motte s'effrite entre le pouce et l'index, la terre se situe en-dessous de sa limite de plasticité et peut être travaillée.

3.4.2.6.2. Éléments à prendre en compte

Les conditions de travail de la terre tiennent compte :

- de la nature de la terre, et en particulier de sa granulométrie et de sa texture. Les contraintes de travail d'une terre sableuse sont par exemple moins fortes que celles de terres limoneuses ou argileuses
- de l'humidité de la terre, qui influence considérablement la sensibilité de la terre à la compaction pendant le travail. L'humidité de la terre est fonction des événements pluvieux et du degré de ressuyage du sol. Cette humidité influence considérablement l'état de compaction du sol pendant le travail
- des conditions météorologiques. Il est par exemple déconseillé de mettre en place des sols reconstitués par temps pluvieux. Au-delà d'une certaine intensité, il est même interdit de le faire. En outre, il convient de vérifier que les sols sont ressuyés avant de reprendre le travail suite à une interruption pour cause de pluie ou de gel
- de la période climatique. En France métropolitaine, il est recommandé de procéder à la reconstitution des sols en période sèche (du 15 mai au 15 octobre environ). En plein hiver, lorsque les sols sont gorgés d'eau ou lors d'une période de dégel, les sols ne peuvent pas être travaillés. En période de gel, il n'est possible de travailler que si la profondeur du gel permet de supporter sans risque la charge des engins. Dans le cas de travaux de décapage, il faut s'assurer que le gel ne fige pas deux horizons successifs de sols afin de ne pas les mélanger, faute de pouvoir les dissocier
- de la présence d'arbres ou non dans l'emprise des travaux
 - si l'aménagement est exécuté à proximité d'arbres existants à préserver, des précautions particulières doivent être prises sur toute la zone de projection du houppier à terre (cette zone correspond à l'emprise occupée par le système racinaire). Il faut interdire, dans la mesure du possible, tout passage d'engins et de véhicules dans cette zone ainsi que tout stockage de matériaux afin d'éviter la compaction des sols. Tout terrassement en déblais ou en remblais dans cette emprise doit être proscrit
 - si des travaux d'installation de réseaux secs s'imposent sans autre choix dans cette zone, ils doivent être exécutés en veillant à ne pas sectionner de racines d'un diamètre supérieur à 5 cm (fonçage, terrassement par aspiration ou terrassement manuel)

La protection mécanique du tronc est par ailleurs indispensable. Elle est réalisée de préférence avec des planches verticales intimement liées sur toute la périphérie du tronc sur une hauteur minimum de 2 m et séparées de l'écorce par 4 ou 5 anneaux de gaine PVC ou par un drain de diamètre 80 mm enroulé autour du tronc

- de la pente

- dans le cas de mise en œuvre de terres sur des pentes importantes (supérieures à 40 %), il est fortement conseillé de préparer le fond de forme en gradines. Cela consiste à créer une succession de zones plus ou moins horizontales (« bèches d'ancrage »), parallèles aux courbes de niveaux et raccordées par des talus les plus courts possibles. L'objectif est de constituer un ancrage stable pour les terres d'apport et de limiter les risques de glissement de cette couche supérieure. Ce travail doit être effectué uniquement en déblais pour ne pas affecter la stabilité de l'ouvrage. Malgré tout, lorsque c'est possible, il faut prendre soin de décompacter superficiellement le sol support (fond de forme) pour créer un horizon de transition et favoriser l'infiltration de l'eau. En aucun cas il ne faut lisser la paroi du fond de forme, faute de quoi les eaux s'accumulent et ruissellent à l'interface des deux couches, favorisant ainsi le glissement de la couche supérieure

- dans les cas les plus difficiles, le recours à la mise en œuvre des nappes tridimensionnelles alvéolaires est indispensable. Ces structures sont fabriquées à partir de bandes continues de géotextile thermolié perméable, permettant de réaliser par collage des alvéoles d'un diamètre de 25 à 45 cm et de 10 à 20 cm de profondeur. Leur mise en œuvre doit se faire sur un talus stable parfaitement nettoyé et nivelé de façon à permettre le parfait placage de la nappe sur le support.

Cette nappe est ancrée en crête de talus dans une tranchée d'au moins 30 à 50 cm de profondeur.

Sur le talus lui-même, le recours à des piquets d'ancrage positionnés en partie haute des cellules est indispensable pour assurer la bonne géométrie de la nappe avant et pendant son remplissage. La densité de ces piquets d'ancrage est variable en fonction du modèle de natte retenu. Le remplissage se fait à partir du pied de talus en remontant progressivement par lignes horizontales successives vers le haut de la pente, les cellules étant remplies de façon régulière en tenant compte du foisonnement.

- d'autres systèmes existent sur le marché. Il s'agit :
 - des structures tridimensionnelles en nappe de quelques mm à 1 cm d'épaisseur constituées d'entrelacs de fibres de polyéthylène (PE) pour limiter les phénomènes d'érosion de surface et renforcer le système racinaire de la végétation en cours d'implantation
 - des structures métalliques type treillis soudés associées à une nappe en toile de jute et ancrées par un système de tirants dans la partie non remblayée du corps de talus. Ce type d'ouvrage permet de conforter des talus presque verticaux sous réserve que les eaux de ruissellement et d'infiltration soient correctement gérées en amont de l'ouvrage
 - les structures PE ou béton type dalles alvéolaires utilisées pour la création de parkings verts peuvent également permettre de renforcer un talus.

Dans tous les cas, il est interdit d'effectuer une reconstitution de sol avec des matériaux dont le taux d'humidité du sol est supérieur à la limite de plasticité.

La conservation des matériaux à faible humidité et sous une bâche permet d'accompagner plus efficacement les variations climatiques durant le travail de reconstitution des sols. Ainsi, quand on prend les précautions nécessaires, il est possible de reconstituer les sols en période hivernale en disposant de matériaux suffisamment secs.

3.4.2.6.3. Choix des engins à utiliser

Il est recommandé d'utiliser des engins diminuant la portance au sol par unité de surface, par exemple des engins sur chenille et des engins équipés en pneus basse pression. Les engins à pneus ne sont pas proscrits dans la mesure où ils ne montent pas sur les matériaux. Aucun engin ne doit rouler sur le matériau tout juste mis en œuvre. Le chemin d'accès est unique et marqué sur le plan. Il doit être décompacté en reculant.

La mise en place des sols reconstitués à la pelleteuse s'effectue par couche de faibles épaisseurs sans tassement.

Le calendrier de reconstitution des sols doit prévoir le temps nécessaire à la disparition du foisonnement. Il est interdit d'accélérer le tassement des sols par apport d'eau au moment de la reconstitution de sol. Le sol doit se remettre en place naturellement avant plantation.

Remarque : L'entrée en plasticité d'un sol se fait pour des humidités plus faibles si les engins utilisés sont très lourds. Dans ce cas, l'humidité du matériau doit être plus éloignée de la limite de plasticité LP (< 80 %).

Point de contrôle

Réalisation au minimum de sondages à la tarière manuelle pour contrôler les épaisseurs en place et estimer la compacité du sol reconstitué.

3.4.2.7. Réalisation des fosses de plantation

3.4.2.7.1. Nécessité de la fosse de plantation

La fosse de plantation est un volume de sol fertile, reconstitué dans un sol encaissant de moindre qualité agronomique. Elle a pour fonction de faciliter la reprise à court et moyen terme du système racinaire de l'arbre planté. Elle constitue donc pour les racines un volume de transition depuis la motte vers le sol encaissant.

Les caractéristiques du sol encaissant, qui conditionnent à long terme le développement et l'espérance de vie de l'arbre, restent les principaux critères d'adaptation pour le choix de l'essence plantée. Ainsi, la qualité du sol encaissant et le contexte de terrassement du chantier déterminent si les fosses de plantation sont utiles ou pas et permettent de préciser les volumes et les matériaux de substitution nécessaires au sol en place encaissant.

Enfin, la taille de l'arbre à la plantation peut être un critère de dimensionnement. Planter un arbre jeune (tige 10/12 à 18/20 par exemple) d'une essence qui peut coloniser rapidement le sol encaissant nécessite un volume de fosse plus réduit que si l'on plante un arbre plus vieux (tige 20/25 à 40/45 par exemple) de la même essence dont la reprise est plus longue et difficile avant de se développer au-delà de sa fosse.

Par exemple, planter un arbre tige en 30/35 en bordure de

rue dans une zone très urbanisée dont les sols encaissants sont défavorables implique l'aménagement d'un volume fertile spécifique important, permettant le développement racinaire pendant les premières années, tandis que planter une jeune tige en 14/16 dans un parc dont le sol en place est favorable ne nécessite pas d'apporter des matériaux fertiles pour réaliser une fosse de plantation de petit volume avec les matériaux en place car les caractéristiques agronomiques de l'encaissant sont bonnes. Cependant, dans les deux cas, il est essentiel de vérifier si l'espèce plantée est bien adaptée au sol en place.

Il est donc nécessaire de caractériser le sol encaissant (cf. § 3.3) avant la réalisation de la fosse et le choix de l'essence à planter. En fonction du diagnostic des capacités de développement racinaire de l'essence et de la force à la plantation choisies dans le sol en place, on peut réaliser deux types de fosses :

- dans un sol en place et encaissant favorable : les fosses de plantation sont réalisées à partir des matériaux des sols en place et sont travaillées sur 2 à 4 m³ environ, en prenant soin de déblayer puis de remblayer les matériaux issus du sol en place et de bien décompacter le fond et les parois de la fosse. L'intérêt est de contribuer ainsi à aérer les matériaux par brassage et à optimiser la porosité du sol dans la fosse pour la circulation de l'air et de l'eau. Dans ce cas, l'ordre des horizons du sol initial est strictement conservé lors de leur remise en place par couches successives
- dans un sol en place et encaissant défavorable : les fosses de plantation reconstituées peuvent être rendues nécessaires lorsque les matériaux du site sont de mauvaise qualité et que l'encaissant n'a pas de propriétés agronomiques suffisantes pour permettre le bon développement des plantes. La fosse de plantation aura une taille de 10 à 20 m³, elle est reconstituée soit avec réutilisation partielle des matériaux de déblais (amendés pour améliorer leurs propriétés agronomiques), soit avec leur remplacement total par des matériaux fertiles extérieurs au site.

3.4.2.7.2. Préparation d'une fosse de plantation et prise en compte du sol encaissant

La fosse de plantation devant permettre le développement racinaire d'arbres, il est nécessaire non seulement de bien reconstituer le sol, mais aussi de connaître les caractéristiques du matériau dans lequel la fosse est creusée. Le volume réduit des fosses de plantation ne permet pas à moyen et long terme de fournir aux plantes l'ancrage mécanique et les besoins en eau et en éléments nutritifs nécessaires au développement d'un arbre adulte. Les racines des arbres doivent donc avoir la possibilité de sortir de la fosse et de coloniser le sol encaissant.

Une observation du sol encaissant sur les parois de la fosse afin d'évaluer la porosité, la perméabilité et la compacité du sol, est nécessaire pour connaître les conditions de colonisation racinaire. Selon que le milieu est favorable ou hostile, la dimension de la fosse de plantation varie.

Un milieu « hostile » présente les caractéristiques suivantes :

- un milieu compact, imperméable, non poreux. Les racines ne peuvent le pénétrer et l'eau infiltrée s'écoule difficilement
- en période pluvieuse, dans le cas de sols encaissants imperméables, la fosse de plantation a tendance à se remplir d'eau, ce qui peut être à l'origine du dépérissement des végétaux. Des drains doivent être placés en point bas du fond de la fosse, incliné d'une pente de 1 % vers l'exutoire. Ce dispositif peut être complété d'une couche drainante de 5 à 10 cm d'épaisseur.

Note : Certaines espèces d'arbres présentant un système racinaire à fort développement (peupliers, aulnes, saules, frênes par exemple) sont capables d'envahir rapidement les drains et d'entraîner un colmatage du système de drainage à court ou moyen terme. Il est préférable d'opter pour des tranchées drainantes pour ce type d'espèces.

Le creusement de la fosse peut être à l'origine de lissage sur les parois. Cette pellicule lissée empêche les racines de passer et les eaux de circuler. Un griffage des parois est nécessaire pour éviter ce phénomène.

Le milieu encaissant peut être stérile au sens qu'il présente une très faible fertilité physique, chimique et biologique. C'est notamment le cas de zones de remblaiement avec des matériaux géologiques ou anthropiques particulièrement compacts ou grossiers. Dans ces cas extrêmes, il faut concevoir et réaliser des sols fertiles reconstitués dont le volume est nettement plus important (de l'ordre de 30 à 50 m³ par arbre) lorsque ce sont des arbres à grand développement qui sont plantés.

Points de contrôle

Avant le remplissage de la fosse par les matériaux fertiles, il est indispensable de s'assurer de la nature drainante du fond de forme et que les parois ont bien été décompactées et sont poreuses.

3.4.2.8. Reconstitution de sol en mélange terre-pierres

3.4.2.8.1. Constitution et usages du mélange terre-pierres

En associant le « squelette minéral » d'un granulat d/D de pierres avec une terre fertile qui remplit les vides entre les pierres, on réalise un Mélange terre-pierres (MTP) :

- dont les propriétés mécaniques assurent une portance du sol adapté à des usages de stationnement de véhicules légers, de circulations douces, de trottoirs, de places ou de voies piétonnes
- dont les revêtements peuvent être minéraux (enrobés, stabilisés, pavages, dallages, etc.) ou végétaux (gazons, prairie, couvre-sol)
- dont les propriétés agronomiques assurent le développement des racines, en particulier celles des arbres ou des arbustes associés à ces surfaces minérales
- dont la perméabilité peut contribuer à l'infiltration des eaux de surfaces.

Les MTP varient selon la qualité des pierres et des terres. Il est nécessaire d'utiliser des pierres résistantes à l'écrasement et à l'usure, si possible également poreuses, et d'utiliser des terres limoneuses sans excès de sables ou d'argiles offrant une forte disponibilité en eau utile et des conditions de travail peu difficiles.

On peut utiliser les MTP pour reconstituer des sols sur des surfaces importantes continues (parking, places publiques, pelouses circulées, etc.), en linéaires continus (voies vertes, tranchées fertiles d'alignement sur trottoirs, etc.) ou bien en fosses de plantation communes à plusieurs arbres ou pour des arbres isolés.

3.4.2.8.2. Dispositions générales de mise en œuvre

Soit un volume V_m de mélange terre-pierres à réaliser, il faut approvisionner le même volume V_p de pierres en granulats d/D (V_p = V_m). Selon la forme et les dimensions du d/D (exemple 40/80 mm ou 60/120 mm), on constate un volume maximal de vide entre les pierres, le plus souvent compris entre 35 et 45 %. Il faut donc approvisionner, en plus du volume V_p de pierres, un volume de terre foisonnée (V_t) le plus proche possible du volume de vide entre les pierres

$$\text{soit } 0,35 \times V_p < V_t < 0,45 \times V_p$$

En pratique, on considère que V_t = 40 % V_m.

Ainsi, un volume V_m de MTP à réaliser nécessite un volume de pierres V_p = 100 % V_m et un volume de terre V_t = 40 % V_m. On doit donc approvisionner 140 % de matériaux pour réaliser 100 % du volume car, après mise en œuvre, le volume de terre se loge dans les vides du volume de pierres.

Attention : Ne pas commettre l'erreur d'approvisionnement 65 % de pierres et 35 % de terre car dans ce cas le volume de mélange sera insuffisant. En outre, les proportions entre pierres et terres conduiront à un excès de terre et donc à son compactage entre les pierres (contraire à l'objectif de fertilité) et à une faible portance (contraire à l'objectif mécanique).

Deux proportions de MTP sont possibles :

- trois volumes de pierres pour un volume de terre qui donnent trois volumes de mélange
- cinq volumes de pierres pour deux volumes de terre qui donnent cinq volumes de mélange.

La terre doit occuper le vide existant entre les pierres sans être compactée lors de la mise en œuvre du mélange.

La difficulté de mise en œuvre est double :

- il s'agit d'une part d'assurer une bonne proportion du mélange en tout point alors qu'il y a une forte tendance à la ségrégation entre les pierres et la terre dès que le mélange est déplacé
- il s'agit d'autre part de réaliser un compactage suffisant et homogène par couches successives d'épaisseur limitée sans que la terre ne soit elle-même compactée, ce qui nécessite de justes proportions et une faible humidité de la terre (dont l'état physique doit être cohérent, non plastique).

Le compactage se fait à l'aide d'un rouleau vibrant ou d'une plaque vibrante définis ci-après selon la classification des engins de compactage établie dans le Guide technique routier (GTR). Les matériaux ne sont mis en œuvre qu'en conditions non pluvieuses et en utilisant des matériaux secs (teneur en eau de la terre inférieure à 90 % de sa limite de plasticité). Tout « plombage » à l'eau est exclu.

Compte tenu de la très forte sensibilité du MTP à la ségrégation, liée à la difficulté de maîtriser l'humidité de la terre lors de sa mise en œuvre, on distingue deux types de mise en œuvre qui dépendent de l'organisation du chantier :

- la méthode « in situ » (directement dans la fosse d'arbre) : la terre est incorporée en plusieurs phases successives dans une épaisseur de pierres déjà mise en place (30 à 40 cm). C'est la méthode la plus fiable car elle évite toute ségrégation, le mélange étant réalisé directement lors de sa mise en œuvre. En outre, pour cette méthode, le contrôle de l'humidité est limité au stock de terre.
- la méthode « sur stock » : le MTP est réalisé sur un emplacement différent de la zone de mise en œuvre (à

proximité sur le chantier ou sur une plate-forme extérieure). Cette méthode exige un contrôle de l'humidité des stocks de MTP en amont et une reprise du mélange lors de sa mise en œuvre afin d'assurer l'homogénéité des proportions avant compactage.

Avertissement : Le MTP ne doit être remanié en aucun cas au cours du chantier. Si on doit intervenir de nouveau, les actions ponctuelles nécessitent la réhabilitation de la surface concernée sans réutiliser les matériaux extraits. Il est indispensable de reconstituer le MTP avec des matériaux nouveaux.

3.4.2.8.3. MTP réalisé in situ

3.4.2.8.3.1. Contrôle d'humidité de la terre

Les stocks de terre et les sols en cours de réalisation doivent être bâchés dès que les conditions deviennent pluvieuses. Celles-ci entraînent l'arrêt du chantier.

3.4.2.8.3.2. Matériel exclusif

Le tableau 15 reprend la liste exclusive du matériel à utiliser pour chaque fonction. Tout autre engin est exclu.

Tableau 15. Matériel à utiliser pour réaliser un MTP in situ	
Engin	Fonction
Camion	Approvisionnement en terre ou pierres
Chargeur	Approvisionnement en terre ou pierres
Pelle mécanique	Approvisionnement et régalinge
Tractopelle avec godet et bras articulé	Approvisionnement et régalinge
Plaque vibrante PQ3 ou PQ4*	Compactage
Rouleau vibrant PV3 ou PV4*	Compactage

* Les performances de compactage des plaques vibrantes et des petits rouleaux vibrants sont détaillées dans le Guide des terrassements routiers (GTR).

3.4.2.8.3.3. Mise en œuvre, épaisseur des couches et compaction

La méthode consiste à mettre en place le volume de pierres nécessaire à la réalisation de la première couche sur une épaisseur constante (épaisseur de pierres : $E_p = 30$ à 40 cm) directement dans la tranchée ou fosse de plantation à réaliser. Sur cette couche de pierres seules, on apporte une épaisseur constante de terre (épaisseur de terre : $E_t = 0,4 \times E_p$ ou $E_t = 0,33 \times E_p$) nécessaire à la réalisation de la première couche de mélange. L'épaisseur de terre est incorporée dans l'épaisseur de pierres par un léger brassage avec les dents du godet de la pelle mécanique. Lors de ce brassage, le chauffeur de l'engin doit veiller à ne pas modifier l'état de la couche sous-jacente (sous-sol de la fosse ou couche précédente de MTP). On obtient une couche de mélange terre-pierres (Em) dont l'épaisseur est égale à l'épaisseur de pierres ($E_m = E_p$).

Une fois réalisée dans la fosse elle-même, la couche de mélange est compactée par six passes de plaque vibrante (PQ3 ou PQ4) ou de rouleau (PV3 ou PV4), de façon à obtenir les performances minimales de portance souhaitées.

L'opération se répète autant de fois que nécessaire pour réaliser l'épaisseur totale de sol reconstitué en MTP. Par exemple, pour reconstituer 90 cm de sol de MTP, l'opération est renouvelée trois fois avec à chaque fois une épaisseur E_p de 30 cm dans laquelle on incorpore une épaisseur E_t de 10 à 12 cm de terre.

Note : En pratique, le repérage des épaisseurs de pierres et de terre de chaque couche s'opère facilement soit par des piquets de niveau, soit par des traces sur les parois des tranchées ou des fosses. On constate une surépaisseur du mélange non compacté après incorporation de la terre de MTP de l'ordre de 5 cm, laquelle disparaît au compactage.

3.4.2.8.4. MTP réalisé sur stock

3.4.2.8.4.1. Contrôle d'humidité de la terre et des mélanges

Lors de la réalisation sur stock, lors du stockage puis lors du transport et jusqu'à la mise en œuvre du MTP, l'humidité de la terre doit être inférieure à 90% de sa limite de plasticité. Les stocks de terres de mélange, les tas de pré-mélanges ainsi que les tranchées ou fosses en cours de réalisation doivent être bâchés dès que les conditions deviennent pluvieuses. Celles-ci entraînent l'arrêt du chantier.

3.4.2.8.4.2. Matériel exclusif

Le tableau 16 reprend la liste exclusive du matériel à utiliser pour chaque fonction. Tout autre engin est exclu.

Tableau 16. Matériel à utiliser pour réaliser un MTP en dehors de la fosse	
Engin	Fonction
Chargeur	Pré-mélange, mélange, stockage et chargement pour approvisionnement
Pelle mécanique	Pré-mélange, mélange, stockage, chargement, régalinge des épaisseurs de mélange
Tractopelle avec godet et bras articulé	Pré-mélange, mélange, stockage, chargement, régalinge des épaisseurs de mélange
Plaque vibrante PQ3 ou PQ4*	Compactage
Rouleau vibrant PV3 ou PV4*	Compactage

* Les performances de compactage des plaques vibrantes et des petits rouleaux vibrants sont détaillées dans le Guide des terrassements routiers (GTR).

3.4.2.8.4.3. Mise en œuvre, épaisseur des couches et compaction

La méthode consiste à approvisionner trois volumes (godets) de pierres sur l'aire en un tas. Sur ce tas on apporte un volume (godet) de terre, lequel est gerbé en haut du tas. Ce pré-mélange sert à approvisionner directement les fosses. Le chauffeur de l'engin doit veiller à charger son godet en pied de tas et à gerber son godet en milieu de fosse.

Une fois dans la fosse, le MTP est régalingé par couche de 35 cm environ. Chaque couche successive est compactée par au moins six passes de plaque vibrante (PQ3 ou PQ4) ou de rouleau (PV3 ou PV4) de façon à obtenir les performances minimales de portance souhaitées. L'opération se répète autant de fois que nécessaire pour réaliser l'épaisseur totale de sol reconstitué en MTP. Par exemple, pour reconstituer

90 cm de sol de MTP, l'opération est renouvelée trois fois avec à chaque fois une épaisseur de 30 cm de mélange après compactage.

Note : En pratique, le repérage des épaisseurs de pierres et de terre de chaque couche s'opère facilement soit par des piquets de niveau, soit par des traces sur les parois des tranchées ou des fosses. On constate une surépaisseur du mélange non compacté après incorporation de la terre de MTP de l'ordre de 5 cm, laquelle disparaît au compactage.

3.4.2.8.5. Dispositions particulières pour les fosses de plantation d'arbres

Le volume minimal d'une fosse de MTP à prévoir pour chaque arbre est supérieur aux recommandations de fosses en terre simple. Le volume de terre étant limité entre 1/3 et 2/5 dans la proportion de mélange, on considère que le volume de référence de 10 à 20 m³ par fosse d'arbre doit être augmenté de 50 % à 100 %, soit 15 à 40 m³ de MTP par arbre selon les conditions du sol encaissant. En cas de sols stériles alentour, ce volume peut être augmenté jusqu'à 50 à 70 m³/arbre.

Points de contrôle

Contrôle pédologique du profil

Le creusement d'un sondage à la pelle mécanique constitue le moyen de contrôle pédologique du sol reconstitué en mélange terre-pierres. Sont évaluées :

- la répartition homogène entre la terre et les pierres, sur tout le volume
- l'absence de compactage de la terre sur l'ensemble du profil.

Le contrôle pédologique peut à lui seul justifier de la non-conformité. Il faudra alors évacuer les matériaux et reprendre les travaux.

Contrôle mécanique de la portance des sols

Les mesures de portance peuvent s'effectuer à la plaque ou à la dynaplaque (cf. § 2.11.12). Un nombre suffisant de mesures est nécessaire pour juger de la qualité de l'ensemble des réalisations de façon représentative.

Les classes de portance (d'après le Guide technique routier - GTR) exigées dépendent de l'utilisation envisagée des surfaces créées :

- circulation de piétons : classe de plate-forme PF1 (EV2 ≥ 20MPa)
- circulation de piétons et de vélos, une circulation légère ou un parking : classe de plate-forme PF2 (EV2 ≥ 50MPa).

L'expérience montre qu'un MTP correctement réalisé sur environ 1 m d'épaisseur donne des résultats EV2 compris entre 35 et 60 MPa avec une moyenne comprise entre 45 et 50 MPa et des rapports de modules EV2/EV1 le plus souvent compris entre 1,2 et 2,2, pour une moyenne inférieure à 2.

Note : La portance des MTP peut varier également en fonction de la portance et du régime hydrique du sol sous-jacent. Pour les zones sensibles où la classe PF2 doit être strictement obtenue, il convient de vérifier la portance du fond de forme pour l'améliorer si nécessaire avant de réaliser les épaisseurs de MTP.

Attention : Des valeurs très élevées de portance peuvent parfois traduire un compactage excessif des mélanges pouvant nuire à leur fertilité (compactage de la terre entre les pierres, faible porosité, faible perméabilité).

Le contrôle mécanique peut à lui seul justifier de la non-conformité de l'ouvrage par le maître d'œuvre. L'entreprise s'engage alors à effectuer le compactage nécessaire pour atteindre les objectifs de densification. Si les résultats de portance ne sont toujours pas atteints, il faudra alors évacuer les matériaux et reprendre les travaux.

3.4.2.9. Mise en œuvre de substrats de plantation circulables

Les substrats de plantation circulables requièrent pour l'essentiel les mêmes préconisations de mise en œuvre et obligations de résultats que les mélanges terre-pierres.

Il faut cependant noter une différence essentielle : compte tenu de leur structure et leur mode de fabrication, ils présentent très peu de sensibilité à la ségrégation mais peuvent par contre être sujets à un excès de compacité.

Il faut donc être très attentif lors du compactage à la teneur en eau, au type de matériels utilisés et au nombre de passes de l'engin de compactage. Il est vivement recommandé de procéder à un essai préalable, validé par un contrôle de portance (essai de plaque) avant la mise en œuvre de grandes quantités de substrat.

En règle générale, le mélange est régalé par couches successives de 30 cm, compactées chacune par au moins six passes vibrées de plaque vibrante (classe PQ3 ou PQ4) ou de rouleau vibrant (classe PV3 ou PV4).

Pour des quantités et des surfaces traitées importantes, ou dans le cas de création de parkings et voies engazonnées, la mise en œuvre peut se faire à la niveleuse sans risque de ségrégation.

Lors de la mise en œuvre de ces substrats, il est important de tenir compte du coefficient de tassement qui est de l'ordre de 20 à 25 % (par exemple, pour une fouille d'arbre de 16 m³, le volume entrant de substrat avant compactage est de 16 x 1,25 = 20 m³).

Concernant leur fabrication, ils doivent être impérativement préparés par une unité de production offrant toutes les garanties du bon dosage des granulats et des éléments nutritifs qui les composent, ainsi que leur homogénéité (centrale de production de graves par exemple).

La production de ces substrats, lorsqu'il s'agit de volumes importants (supérieurs à 1 000 m³), peut être faite exceptionnellement sur le chantier à condition de déplacer tout le matériel nécessaire au bon dosage et à la parfaite homogénéité du mélange.

Cette solution peut s'avérer économiquement et écologiquement indispensable compte tenu de la proximité ou non des granulats par rapport à l'unité de fabrication.

Il est possible de stocker ces substrats de façon prolongée et de les transporter sans risque de ségrégation des matériaux. Malgré tout, en cas de sécheresse prolongée ou de forte pluie, il est recommandé de bâcher les stocks pour maintenir la teneur en eau correspondant à la teneur en eau à l'optimum Proctor normal.

Pour les parties des fosses destinées à être revêtues (pavés, dalles, enrobés, etc.), la couche de finition d'une granulométrie plus fine (2/4, 4/6 ou 0/6 à 0/16), destinée à parfaire les formes définitives et/ou à constituer le

lit de pose peut être réduite à 10 ou 5 cm selon les cas (cf. règles professionnelles de l'axe 2 relatif aux constructions paysagères).

Pour une classe de plateforme PF2, les mesures de portance sont faites avant la mise en œuvre du lit de pose sur la partie supérieure du substrat, qui doit présenter à l'essai de plaque de type LCPC, un module de déformation EV2 supérieur ou égal à 50 MPa et un coefficient de compactage $K < 2$.

3.4.2.10. Préparation de la fouille pour la plantation dans un MTP ou dans un mélange de plantation circulaire

Afin de garantir la compacité en tout point, il est interdit de laisser un emplacement dans le support de plantation correspondant au volume de la future fouille pour la plantation de l'arbre. La fouille pour la plantation de l'arbre doit être faite par extraction ponctuelle du substrat en place. Le diamètre de la fouille doit être environ 20 à 30 % supérieur à celui de la motte (ou de l'espace occupé par les racines dans le cas d'une plantation en racines nues). Ce volume résiduel entre la motte et la paroi de fouille est comblé par un mélange tassé au pied composé de 50 % du substrat extrait préalablement, et de 50 % de terres ressources.

Attention : La motte est posée sur le mélange terre-pierres et non pas sur de la terre fine.

Se référer aux règles professionnelles P.C.2-R1 « Travaux de plantation des arbres et arbustes » pour les contrôles liés à la vérification de la bonne mise en œuvre des plantes.

3.5. Préparation des sols pour la plantation des massifs et gazons

3.5.1. Massifs d'arbustes (strate arbustive)

L'itinéraire technique est le même que celui requis pour la plantation d'arbres à la différence près que l'horizon exploitable par les racines est de moindre épaisseur. Les fosses continues pour la création d'un massif arbustif ou les fosses en tranchée dans le cas des haies sont recommandées. Les investigations sur le sol encaissant sont donc les mêmes en terme de perméabilité et de qualités physico-chimiques afin de permettre aux racines de coloniser les horizons adjacents.

Pour un sol encaissant défavorable, la profondeur moyenne de l'encaissement doit être de 60 cm minimum et de 80 cm de large minimum dans le cas d'une haie sur une ligne. Il faudra bien sûr veiller à la bonne perméabilité du sol encaissant avant le remblai en terre support et/ou en terre végétale. Dans le cas d'une perméabilité très faible de l'encaissant, un drain devra être placé au fond de l'encaissement et raccordé à un exutoire.

En présence d'un sol favorable (jardin ou parc existant par exemple) mais d'un sous-sol compact, il est fortement conseillé de décaper l'horizon superficiel de terre fertile afin de procéder au décompactage de l'horizon inférieur sur une profondeur de 30 à 40 cm minimum. Les terres décapées doivent être reprises et amendées si nécessaire avant régalage. Dans certains cas, le passage d'une sous-soleuse à action profonde (1 m) peut être envisagé. La fragmentation des mottes par le passage d'un tracteur ou d'un motoculteur équipé d'une fraise rotative, préparateur de sol, herse alternative ou rotative facilite les opérations de nivellement définitif et de plantation (cf. règles professionnelles P.C.2-R1 « Travaux de plantation des arbres et des arbustes » et

P.C.3-R0 « Travaux de plantation des massifs »).

3.5.2. Gazons, prairies et massifs de plantes couvre-sol et vivaces (strate herbacée)

L'horizon exploitable par les racines est de 20 à 30 cm pour les gazons et de 30 à 40 cm maximum pour les plantes couvre-sol et les vivaces. Il est donc possible dans la plupart des cas où les sols en place permettent cet enracinement d'apporter les corrections nécessaires sans décaper et exporter les terres.

Il est nécessaire de connaître l'état physico-chimique de l'horizon de surface et du sol sous-jacent avant travaux pour définir le mode opératoire et les amendements éventuels en fonction de la destination de l'ouvrage et des résultats d'analyses. Il peut être éventuellement judicieux d'apporter des fertilisants afin de favoriser une bonne implantation de la végétation, surtout si les sols sont peu fertiles.

Dans le cas de sols compacts sur une épaisseur supérieure à 40 cm, il est fortement conseillé de procéder à un sous-solage croisé (à l'aide d'un ripper ou d'une sous-soleuse agricole). Dans le cas de surfaces plus restreintes, ce décompactage peut se faire à la pelle hydraulique sur une profondeur équivalente à condition de ne pas retourner le sol en enfouissant le sol fertile sous les terres de sous-couche. Il faut aussi vérifier qu'il n'y a pas d'engorgement temporaire hivernal nécessitant des opérations de drainage.

Dans les cas où les sous-couches sont compatibles avec l'aménagement et favorables en terme de perméabilité, un simple labour sur une épaisseur de 20 à 30 cm maximum est suffisant. La rotobèche est l'outil idéal pour exécuter cette tâche car cet équipement présente l'avantage de ne pas former de « semelle de labour ». Pour les petites surfaces, ce décompactage superficiel peut être fait à la mini-pelle.

Les amendements et fertilisants éventuels seront alors mis en œuvre par épandage avant de procéder à leur incorporation et à la fragmentation des mottes (tracteur ou motoculteur équipé d'une fraise rotative, préparateur de sol, herse alternative ou rotative).

Pour les opérations d'amendement et de fragmentation des mottes, il est indispensable de travailler avec les engins les plus légers possibles et/ou équipés en pneus basse pression afin de ne pas compacter les couches sous-jacentes.

Dans le cas d'amendements minéraux importants (apport de grandes quantités de sable pour un sol sportif par exemple), il est fortement conseillé de décaper les terres support et d'incorporer les amendements par reprises successives des andains.

Dans tous les cas de figure, les travaux sont réalisés à une humidité inférieure à la limite de plasticité et doivent être interrompus dès lors que cette limite de plasticité risque d'être atteinte.

Remarque : D'une façon générale, et ce notamment pour les travaux préparatoires à l'engazonnement, toutes les précautions doivent être prises pour éviter les tassements différentiels ultérieurs liés aux passages des engins. Dans certains cas, il est même fortement conseillé de procéder à plusieurs opérations de roulage (100 kg/ml de génératrice maximum) et de reprise de la planimétrie avant de finaliser la préparation du lit de semence ou de la pose du gazon de placage (cf. règles professionnelles P.C.4-R0 « Travaux de mise en œuvre des gazons (hors sols sportifs) »).

4. Glossaire

Actions réalisées sur les matériaux terreux.....	14
Activité biologique.....	12
Amendements minéraux.....	9
Amendements minéraux « granulaires ».....	9
Amendements minéraux basiques.....	9
Amendements organiques.....	8
Andain.....	14
Boues d'épuration urbaines.....	8
Caractérisation des sols en place.....	9
Compacité.....	11
Complexe adsorbant et CEC.....	13
Conductivité.....	13
Couleur.....	10
Décapage.....	14
Engrais.....	9
Enracinement.....	14
Essais à la dynaplaque.....	11
Essais à la plaque.....	11
Fertilité.....	5
Fertilité biologique.....	5
Fertilité chimique.....	5
Fertilité physique.....	5
Foisonnement.....	14
Fonds de forme.....	14
Granulométrie.....	9
Horizon.....	9
Humidité à la capacité au champ (HCC).....	10
Humidité au point de flétrissement (HPF).....	10
Humidités caractéristiques et pF.....	10
Hydromorphie.....	11
Matières organiques.....	12
Mélanges terre-pierres.....	6
Optimum Proctor.....	12
Perméabilité.....	11
PH.....	13
Porosité.....	10
Portance.....	11
Préparation microbienne.....	9
Profil pédologique.....	9
Propriétés chimiques.....	13
Propriétés mécaniques des matériaux terreux.....	12
Rapport C/N.....	13
Réserve utile (RU).....	11
Sol en place.....	5
Solution du sol.....	13
Structure.....	10
Substrats de plantation circulables (ou substrats fertiles portant circulables).....	7
Tarière.....	9
Teneur en matière organique du sol.....	13
Terre végétale et terre support.....	6
Terres de bruyère.....	6
Terres ressources.....	5
Texture.....	10

5. Bibliothèque de référence

Association Ecrin, Cheverry C., Gascuel C. (coordination) : 2009, *Sous les pavés la terre, connaître et gérer les sols urbains*, Editions omniscience, 207p

AFES (Association française de l'étude des sols) : 2008, *Référentiel pédologique*, Editions Quae, 405p

Baize D. : 2004, *Petit lexique de pédologie*, Editions INRA, 272p

Baize D. : 2000, *Guide des analyses en pédologie*, Editions Quae, 266p

Baize D., Jabiol B. : 1995, *Guide pour la description des sols*, Editions INRA, collection Techniques et pratiques

BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) : 2012, *Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement*, Editions BRGM, référence BRGM/RP-60013-FR, 53p

Denoroy P. : 2004, *Regifert : interpréter les résultats des analyses de terre*, Editions INRA, 129 p

Duchaufour P. : 1997, *Abrégé de pédologie, (sol, végétation, environnement)*, Editions Masson, 292p

Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J., Morel J.L. (coordination) : 2011, *Sols et environnement*, 2^{ème} édition, Editions Dunod, 896p

Girard M.C., Schwartz C., Jabiol B. : 2011, *Etude des sols - Description, cartographie, utilisation*, Editions Dunod, 404p

Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. : 2003, *Le sol vivant. Base de pédologie, biologie des sols*, 2^{ème} édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 568p

Gros A. : 1992, *Engrais, guide pratique de la fertilisation*, Editions la maison rustique, 430p

IDF (Institut pour le développement forestier), Drenou C. (coordination). : 2006, *Les racines, faces cachées des arbres*, Editions IDF

Lozet J., Mathieu C. : 1997, *Dictionnaire de Science du Sol*, 3^{ème} édition

Laboratoire central ponts et chaussées (LCPC), Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA), *Guide des terrassements routiers (GTR), réalisation des remblais et des couches de formes*, édité en 1992 et réédité en 2000

Morel R. : 1996, *Les Sols cultivés*, Editions Lavoisier, collection Technique et documentation

Soltner D. : *Les bases de la production agricole*, Editions Soltner, collection Sciences et techniques agricoles
- tome 1 (2005, 24^{ème} édition), *Le sol*, 472p
- tome 2 (2007, 9^{ème} édition) *Le climat*, 352p

UNEP : 1999, *Le sol support de nos plantations*, Editions UNEP

Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Calcul d'un bilan humique

N°: **P.C.1-A1-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Association des Ingénieurs Territoriaux de France



FFP



Hortis
Les responsables
d'espaces nature en ville

Annexe 1 : Calcul d'un bilan humique

1. Calcul du stock de Matières organiques humifiées stables (MOS) dans le sol

Le taux de carbone organique (C.org) est donné par le résultat d'analyse, généralement en g/kg. La formule permettant de calculer le stock de Matières organiques humifiées stables (MOS) à partir du taux de carbone organique dans le sol est la suivante :

$$\text{MOS} = 1,72 \times \text{C.org}$$

Le stock de MOS se calcule par ha, par m² ou par tonne.

Exemple : Si MOS = 20 g/kg (soit 2 %), C.org = 11,62 g/kg et MOS = 20 kg/t.

On considère en général qu'un sol en place a une densité apparente de 1,3 environ et que son épaisseur est de 30 cm. Il y a donc par hectare environ 4 000 t de terre et 80 t de MOS dans la couche cultivée. Cela représente 400 kg de terre et 8 kg de MOS par m².

2. Evolution du stock de MOS

2.1. Coefficient iso-humique K1

Le coefficient K1 est le coefficient de transformation de la matière organique fraîche en « humus » ou MOS. Celui-ci varie en fonction de la nature de la matière organique fraîche (cf. tableau 1).

Tableau 1. Valeurs du coefficient K1 pour différentes sources de matière organique

Source de MO	Matière sèche (%)	K1	kg humus produit/t de produit frais
Fumier de ferme bien décomposé	20	0,4 à 0,5	80 à 100
Paille	85	0,1 à 0,2	85 à 170
Engrais verts	20	0,04 à 0,08	8 à 16
Compost urbain	25	0,25	62
Boues de station d'épuration	20	0,2 à 0,5	40 à 100
Humus industriel	55	0,5	275
Compost vert	Variable (entre 30 et 50)	0,5 à 0,7	150 à 350

Remarque : L'obtention des valeurs de K1 du modèle Hénin-Dupuis est longue et coûteuse car elle exige la mise en place de sites expérimentaux sur plusieurs années. Pour pallier ce défaut, d'autres modèles ont été proposés pour estimer K1 grâce à des mesures de laboratoire. Il s'agit de l'ISB (Indice de stabilité biologique; Linères et Djakovitch, 1993) et plus récemment de l'ISMO (Indicateur de stabilité de la matière organique). Pour en savoir plus, se reporter au paragraphe 5 de cette annexe.

2.2. Coefficient iso-humique K2

Le coefficient K2 est le coefficient de destruction annuel de la MOS. Hénin et Dupuis ont proposé des valeurs de ce coefficient en fonction de la texture, du pH et du calcaire (cf. tableau 2). Dans ce modèle, 1 à 2 % de la MOS est détruite chaque année. Ainsi, si l'on reprend l'exemple précédent, entre 800 et 1 600 kg/ha de MOS (soit entre 80 à 160 g/m²) seraient détruits chaque année.

Tableau 2. Valeurs du coefficient K2 selon le modèle Hénin-Dupuis pour différents types texturaux de terre

Exemple de type textural de terre	Argile g/kg	Calcaire g/kg	pH	Coefficient K2 selon le modèle Hénin-Dupuis
Sableux neutre	50	0	7,0	0,02
Sableux acide	50	0	5,0	0,01
Sableux calcaire	50	100	8,0	0,017
Limon moyen	150	0	7,5	0,016
Limon argileux	220	0	7,5	0,013
Limon calcaire	100	300	8,1	0,009
Argile	380	0	7,5	0,01
Argilo-calcaire	300	150	8,0	0,007

D'autres auteurs donnent les valeurs suivantes pour le coefficient K2 (cf. tableau 3).

Tableau 3. Valeurs du coefficient K2 selon le modèle AMG pour différents types texturaux de terre

Exemple de type textural de terre		Modèle Hénin-Dupuis	Modèle AMG
Sols très calcaires > 50%		0,004 à 0,005	0,04
Sols calcaires entre 15 et 50%		0,006 à 0,008	0,06
Sols non ou peu calcaires	• Argileux	0,010	0,04
	• Limoneux, argilo-sableux, argilo-limoneux, sablo-argileux	0,014 à 0,015	0,07
	• Sableux	0,020 à 0,025	non renseigné
	• Sablo-limoneux	0,020	0,09

Le modèle AMG donne des valeurs du coefficient K2 entre 4 et 10 fois plus fortes que celui du modèle Hénin-Dupuis. Selon le modèle AMG, la destruction annuelle du stock de MOS est de 4 à 9 %, ce qui représente pour l'exemple précédent entre 3 800 et 7 200 kg/ha ou 380 à 720 g/m².

3. Apports de matières organiques

Pour maintenir un taux de 2 % de MOS, il faut apporter régulièrement de la matière organique fraîche. Considérant par exemple qu'il se détruit 2 t de MOS par hectare et par an, il est nécessaire d'apporter :

- soit 20 t de fumier frais par hectare (ce qui équivaut à 2 kg de fumier frais par m²)
- soit 10 t de compost vert frais par hectare (ce qui équivaut à 1 kg de compost vert par m²).

Pour augmenter un taux de matières organiques (humus - MOS) du sol de 0,5 % (soit 5 g/kg), il faut apporter :

- soit 200 t de fumier frais par hectare (ce qui équivaut à 20 kg de fumier frais par m²)
- soit 100 t de compost vert frais par hectare (ce qui équivaut à 10 kg de compost vert par m²).

4. Bibliographie spécifique pour le calcul d'un bilan humique

- Agro-Transfert R&D et Chambre d'Agriculture de Picardie : 2007, *Mémento sols et matières organiques*
- Duparque A., Tomis V., Mary B., Boizard H., Damay N. : *Le bilan humique AMG, pour une démarche de conseil fondée sur des cas types régionaux*, 10^{ème} rencontre COMIFER-GEMAS, Reims, 23 – 24 novembre 2011, <http://www.comifer.asso.fr/index.php/actualite/34-10emes-rencontres-de-la-fertilisation-et-de-lanalyse.html>
- Hénin et Dupuis : 1945, *Essai de bilan de la matière organique du sol*. *Annales Agronomiques*, p15, 17-29
- Linères et Djakovitch : 1993, *Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique*, Editions INRA, 15 p
- http://wiki.laboratoirelca.com/index.php/ISB/CBM_devient_ISMO

5. Précisions sur l'ISB et l'ISMO

Ces indicateurs sont calculés à partir du fractionnement biochimique de la matière organique (cf. norme XPU 44-162, 2009). L'ISMO fait intervenir en plus une donnée issue de la minéralisation du carbone organique au cours d'incubations en conditions contrôlées (cf. norme XPU 44-163, 2009). Leurs valeurs varient entre 0 et 1 (ou 0 et 100 %). Ils représentent la proportion de matière organique stabilisée des matières organiques qui est susceptible de s'incorporer à la matière organique du sol. Ils servent pour estimer leur valeur amendante sur le long terme.

Ces indicateurs permettent d'évaluer la proportion de la matière organique résistante à la dégradation, qui est susceptible d'enrichir durablement le sol en matière organique. Les indicateurs ne donnent pas des résultats identiques en termes de valeur et de classement des matières organiques. L'ISMO semble donner des valeurs surélevées par rapport à l'ISB.

Les formules de calcul des indicateurs sont les suivantes :

$$\text{ISB} = 2,112 - 0,02009 \text{ SOL} - 0,02378 \text{ HEM} - 0,02216 \text{ CEW} + 0,00840 \text{ LIC}$$

$$\text{ISMO} = 44,5 + 0,5 \text{ SOL} - 0,2 \text{ CEL} + 0,7 \text{ LIC} - 2,3 \text{ Cm}^3$$

Avec :

- LIC : lignines + cutines
- CEL : celluloses
- HEM : hémicellulose
- SOL : substances solubles, exprimées en % de la MO (fractionnement Van Soest)
- CEW : celluloses extraites du fractionnement Wend
- MOT : matière organique totale (% MS)
- MM : Matière minérale (% MS)
- Cm³ : pourcentage de C organique minéralisé au bout de 3 mois (incubation en conditions contrôlées en laboratoire)

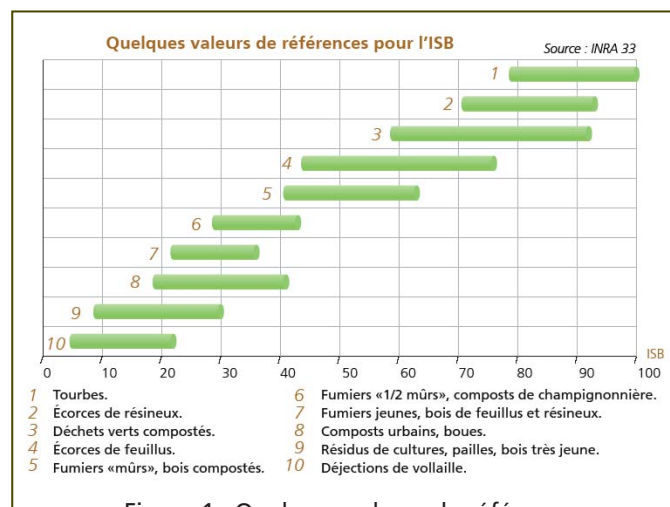


Figure 1 : Quelques valeurs de référence pour l'ISB (source : Monique Linères de l'INRA 33 / graphisme : laboratoire LCA)

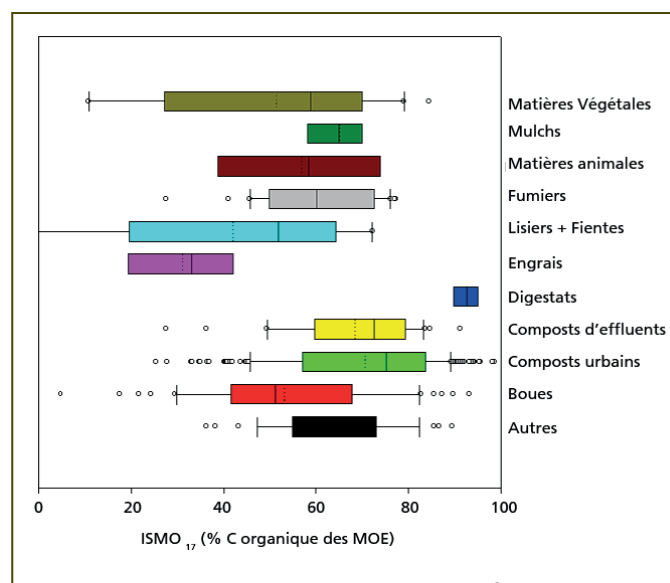


Figure 2 : Quelques valeurs de référence pour l'ISMO (source : Houot et al, 2009 Innovations agronomiques 5,69-81)

Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Exemple de carte des ressources
: en matériaux fertiles

N°: **P.C.1-A2-R0** | Création : décembre 2012



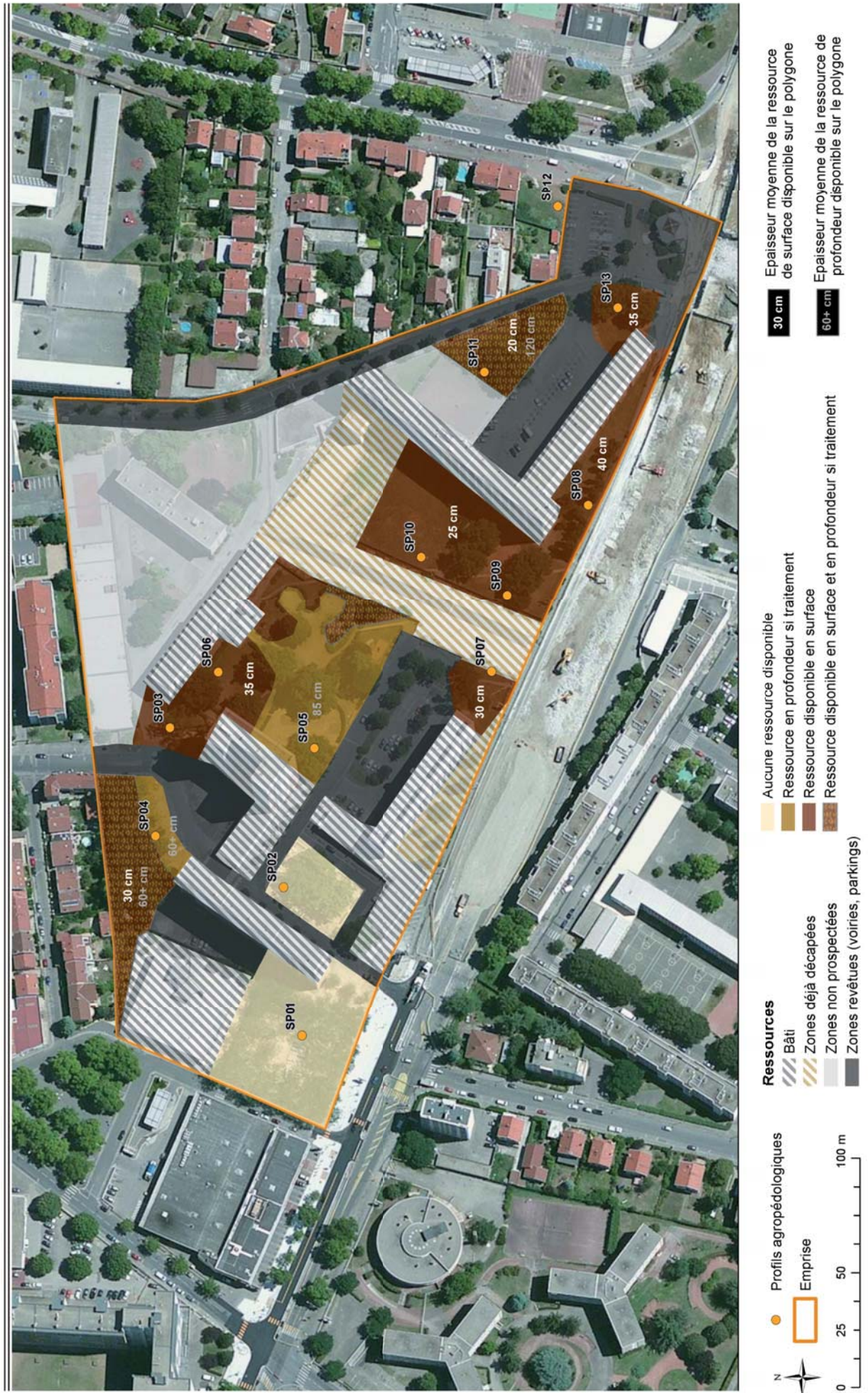
les entreprises
du paysage



Association des Ingénieurs Territoriaux de France



Exemple de carte des ressources en matériaux fertiles



© Sol Paysage, 2012

Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Exemples de fiches de sondage
et de profil

N°: **P.C.1-A3-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Association des Ingénieurs Territoriaux de France



Exemple de fiche de sondage

Site :

Date dernière mise à jour :

Rédacteur :

Localisation et description globale

Coordonnées GPS	Latitude Nord :		Longitude Est :
Date observation		Observateur(s)	
Pente	0%	Zone	au nord-ouest du bassin, entre deux marronniers, à 1,50m du tronc de l'arbre le plus proche
Couvert végétal	pelouse (non entretenue (mousse, graminées))		
Aspect de surface	peu perturbé, nombreux graviers de galets et silex en surface		

Description générale

Sondage sur tranchée de plantation (entre deux marronniers) : limon argileux en surface et couche de remblai caillouteux sur sable calcaire et remblais profonds

Description par horizon (en grisé, les horizons fortement remaniés)

Horizon	Prof. cm	Texture	Humidité	Couleur	Hydromorphie	Test HCl	Commentaire
H1	0-25	La	frais	10YR4/4	0	2	rare EG naturels : 3% de graviers, cailloux (galets divers) ; peu compact, structure polyédrique
H2	25-45	S	frais	10YR2/1	0	4	nombreux EG naturels : 30% de graviers, cailloux (silex, calcaire, galets, meulière) ; plusieurs EG anthropiques (débris de verre, brique, machefer) ; compact, structure particulière
H3	45-60	SA	sec	10YR3/2	0	3	quelques EG naturels : 10% de graviers, cailloux (silex, galets) ; quelques EG anthropiques (machefer) ; assez compact, structure polyédrique
H4	60-90+	S	sec	10YR4/3	0	3	rare EG naturels : 2% de graviers, cailloux (silex, calcaire) ; peu compact, structure polyédrique à particulière

© Sol Paysage, 2012



♦ *S001 : localisation*



♦ *S001 : ensemble du sondage*



♦ *S001 : horizon H1*



♦ *S001 : horizon H2*



♦ *S001 : horizon H3*



♦ *S001 : horizon H4*

Exemple de fiche de profil

Site :

Date dernière mise à jour :

Rédacteur :

Localisation et description globale

Coordonnées GPS	Latitude Nord :		Longitude Est :	
Date observation		Observateur(s)		
Pente		Zone		
Couvert végétal	pelouse (et plantation de chênes)			
Aspect de surface	-			

Description générale

Sol du parc Sud

Sol profond limono-sableux de plantation sur remblai de graves sableuses

Description par horizon (en grisé, les horizons fortement remaniés)

N°	Prof.cm	Texture	Humidité	Couleur	Hydro-morphie	Test HCI	Structure	Porosité	Comp	Commentaire
H1	0-15	LS	frais	10YR3/3	0	0	POLY	3 - BIO	PC	nombreux vers de terre, nombreuses galeries ; plusieurs racines (1mm à 1cm) ; quelques EG naturels : 7% de graviers, cailloux (galets divers) ; aucun EG anthropiques
H2	15-85	SL	frais	7,5YR4/4	0	0	POLY	2 - BIO	PC	aucun vers de terre, nombreuses galeries ; nombreuses racines (>1cm) ; plusieurs EG naturels : 10% de cailloux, graviers (galets divers) ; rares EG anthropiques (débris de plastique, brique)
H3	85-110	SLa	frais	7,5YR3/4	0	0	POLY	2 - EG	C	aucun vers de terre, quelques galeries ; nombreuses racines (1mm à 1cm) ; nombreux EG naturels : 30% de cailloux, graviers (galets divers) ; aucun EG anthropiques
H4	110-130+	S	frais	2,5Y6/2	0	0	PART	3 - TEX	PC	aucun vers de terre ; rares racines (<1mm) ; très nombreux EG naturels : 60% de cailloux, pierres, graviers (galets divers) ; aucun EG anthropiques



♦ *P006 : Localisation*



♦ *P006 : Ensemble du profil*



♦ *P006 : Horizon H1*



♦ *P006 : Horizon H2*



♦ *P006 : Horizons H3 et H4*



♦ *P006 : Détail des matériaux composant les horizons*

Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Exemples de schémas des profils
et de typologie des sols

N°: **P.C.1-A4-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Association des Ingénieurs Territoriaux de France

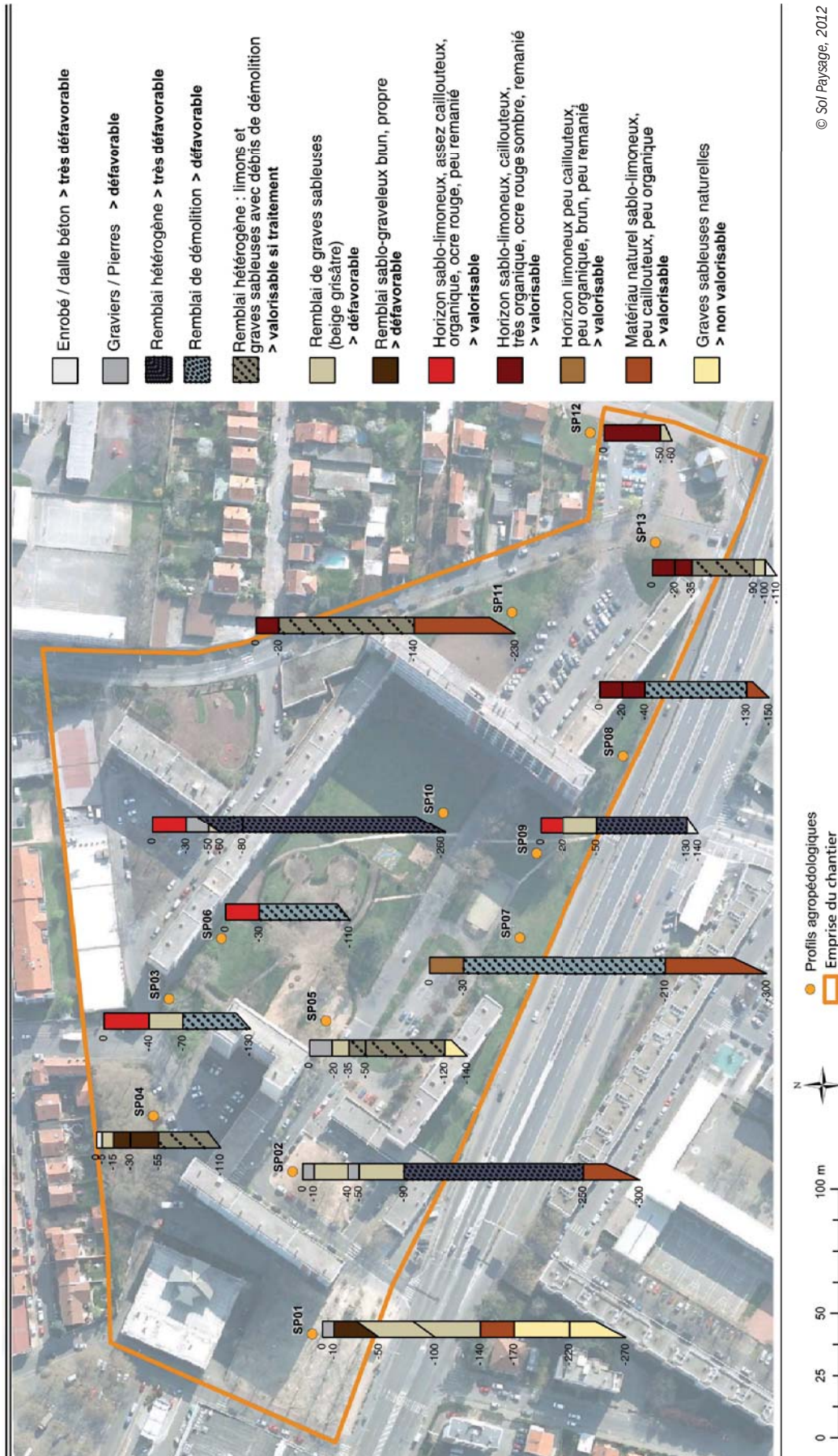


FFP



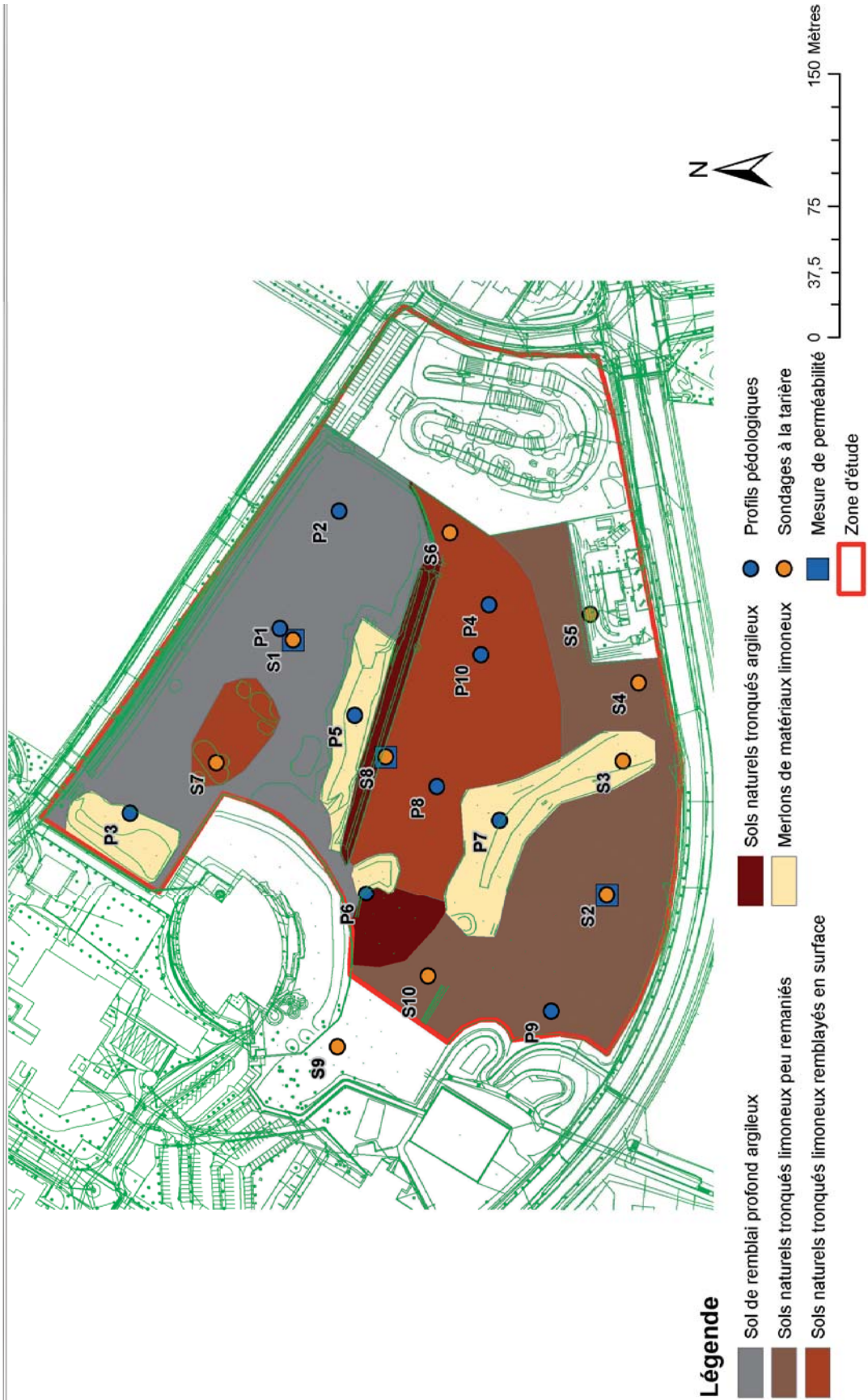
Hortis
Les responsables
d'espaces nature en ville

Exemple de schéma des profils



© Sol Paysage, 2012

Exemple de typologie des sols



Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Exemples d'analyses de sol

N°: **P.C.1-A5-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Association des Ingénieurs Territoriaux de France



Exemple 1 d'analyse de sol

Vos résultats d'analyses

DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

DESTINATAIRE

PARCELLE

Référence	E1
Surface	
X/Long	Y/Lat

Coordonnées GPS

CARACTÉRISTIQUES DU SOL

Type de sol			
Densité apparente (T/m ³)		Pctentiel racinaire	
Masse de sol (T/ha)		Sol humide	
Profondeur de prélèvement (cm)		Sol drainé humide	
Couleur		Travail du sol difficile	NON



N° RAPPORT

Date de réception	
Début d'analyse	
Début d'interprétation	
Date d'édition	

ÉTAT PHYSIQUE

Granulométrie (pour mille)

Argiles (< 2 µm) :	147
Limons fins (2 à 20 µm) :	142
Limons grossiers (20 à 50 µm) :	182
Sables fins (50 à 200 µm) :	245
Sables grossiers (200 à 2000 µm) :	284

Refus à 2 mm : 38,0 %

ÉTAT HUMIQUE

Matières organiques (g/kg)*		43,5	17 / 25	Elevé
-----------------------------	--	------	---------	-------

* MO=carb.org × 1.72

Souhaitable

Azote total (g/kg) : 0,94

Rapport C/N		26,9	7,5 / 12	Elevé
-------------	--	------	----------	-------

Décomposition de la MO:

Rapide

Lente

Souhaitable

Estimation du coefficient k2 :

Stock en matières organiques (MO) :

Stock minimal souhaitable en MO :

Estimation des pertes annuelles en MO:

Estimation de l'azote minéralisable :

Potentiel Biologique : 48 / Faible



N° RAPPORT

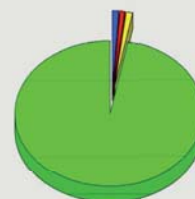
RÉFÉRENCE

STATUT ACIDO-BASIQUE

pH eau		8,0
pH KCl		
Calcaire total (g/kg)	3	
Calcaire Actif (g/kg)		
CaO (g/kg)	4,07	
CEC Metson (cmol+/kg)	10,9	

Taux d'occupation de la CEC (%)

K/CEC : 5,5
Mg/CEC : 11,1
Na/CEC : < 1
Ca/CEC : > 100



Taux de saturation S/CEC (%) * :

Actuel : > 100
Optimal : > 100

* S = Somme des cations échangeables

MILIEUX NUTRITIF ET ENVIRONNEMENTAL

Eléments majeurs assimilables ou échangeables

Eléments	Seuils d'interprétation		Situation vis à vis de la culture
	L1	L2	
P ₂ O ₅ (g/kg) - Méthode Joret Hébert	0,140	0,270	0,528 Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Impasse possible
K ₂ O (g/kg)	0,132	0,206	0,285 Pouvoir fixateur du sol : Stratégie de fertilisation : Impasse possible
MgO (g/kg)	0,092	0,158	0,243 Stratégie de fertilisation : Impasse possible

Oligo-éléments (mg/kg)

Risque de
carenceRisque de
toxicité

Cuivre EDTA

Zinc EDTA

Manganèse EDTA

Fer EDTA

Bore soluble

Autres résultats

Sodium (Na ₂ O g/kg)	< 0,01		Souhaitable
Conductivité (mS/cm)	0,10		< 0,100
Pt. de flétrissement (%)		9,96	0,2 / 0,8

Eléments traces métalliques totaux

Valeurs limites réglementaires selon le tableau 2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 8 janvier 1998

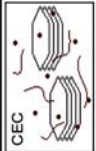
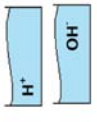
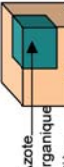
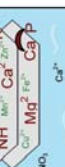
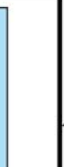
	Teneur (mg/kg)	Valeur limite réglementaire	Appr.
Cadmium (Cd)	0,25	2	OK
Chrome (Cr)	29,00	150	OK
Cuivre (Cu)	15,00	100	OK
Mercure (Hg)	0,050	1	OK
Nickel (Ni)	19,00	50	OK
Plomb (Pb)	20,00	100	OK
Zinc (Zn)	48,00	300	OK
Sélénium (Se)			
Aluminium (Al)			
Arsenic (As)			
Bore (B)			
Fer (Fe)			
Cobalt (Co)			
Manganèse (Mn)			
Molybdène (Mo)			

Normes utilisées : Humidité résiduelle : NF ISO 11465 / pH : NF ISO 10390 / Calcaire total : NF ISO 10693 / Calcaire actif : NF X 31-106 / Granulométrie : X 31-107 / Bases échangeables : NF X 31-108 / Carbone organique : NF ISO 14235 / Azote total : NF ISO 13878 / Conductivité électrique : NF ISO 11265 / Phosphore Dyer : NF X 31-160 / Phosphore Joret-Hébert : NF X 31-161 / Phosphore Olsen : NF ISO 11263 / Cuivre, manganèse et zinc : NF X 31-120 / Bore : NF X 31-122 / CEC : NF X 31-130 / Mise en solution métaux lourds : IT/TER10 / Dosage métaux lourds : NF EN ISO 11885 / IPC : FDX 31-146 / Éléments extraits au DTPA : NF X 31-121.

© Laboratoire LCA, 2012

Exemple 2 d'analyse de sol

Comprendre l'analyse de sol

CEC	Définition, valeurs limites, rôle, acbén de redressement	Pictogramme
Capacité d'échange cationique	Proviens de l'argile et l'humus. Indispensable pour connaître la taille du réservoir à éléments. C'est la CEC qui permet de définir les tenues souhaitables pour les éléments minéraux et la matière organique. Connaissant la CEC, on connaît la fréquence à laquelle il faut apporter des engrais. La CEC est la somme de la capacité d'échange cationique des argiles, des colloïdes humiques et des colloïdes organiques ou silicates.	
pH eau	Mesure l'acidité du sol. Le pH est l'opposé du logarithme de la concentration en ions H+. Le pH KCl est l'acidité corrigée du pH eau. Le pH eau est l'acidité corrigée du pH KCl. Le pH eau est l'acidité corrigée du pH KCl. Le pH eau est l'acidité corrigée du pH KCl.	
pH KCl	1) Pour augmenter le pH, le chauffage (leport de carbonate) est obligatoire. La dose est liée au pouvoir tampon du sol (taillé de la CEC). 2) Pour baisser le pH, on utilise des acides. La dose est liée à la dose de 30M2 trois fois par an. L'objectif du soufre est de décomposer les carbonates. Si le sol est calcaire, seule la solution du sol sera temporairement acidifiée. Si le sol n'est pas calcaire malgré un pH basique, il est possible de faire baisser progressivement et durablement le pH.	
Calcaire total	Le calcaire total correspond à la mesure des carbonates totaux. Le calcaire actif est la part réactive du calcaire. Le calcaire total est la somme du calcaire actif et du calcaire latent.	
Calcaire actif	Une fois que le calcaire a été réactivé, il est possible de le mesurer. L'indice du pouvoir chlorosant prend en compte le calcaire actif et le fer.	
Matière organique	Le calcul de la matière organique se fait par la détermination du carbone organique (MO) à 172°C org. Avec l'azote organique, on élabore le rapport C/N. Si le C/N est < 10, la matière évolue normalement. Dans le cas contraire, l'évolution est lente, conséquence d'une vie microbienne limitée. La matière organique joue un rôle capital dans la rétention en eau et en éléments, la stabilité structurale et la biologie des micro-organismes. L'apport de matière organique bien décomposée doit se faire en incorporation. L'azote est le moteur de la végétation, intervient dans la formation de tous les organes, sans oublier les racines. L'augmentation d'azote des sols entraîne l'excès de l'azote et l'excès de l'azote entraîne l'excès de l'azote.	
Azote	Le phosphore participe à la croissance racinaire, aux transferts d'énergie lors de la photosynthèse et à la respiration. Suivant le pH, les méthodes d'extraction changent (Dyer pour les sols acides, Joret hebert pour les sols basiques et Olsen pour tout pH).	
Rapport C/N	Le potassium est un régulateur de la pression osmotique. Améliore donc la résistance aux maladies, au froid, au gel à la sécheresse et au piétinement. Le magnésium est le noyau central de la chlorophylle. Sa carence provoque une décoloration sur les vieilles feuilles. Le calcium est le ciment des membranes des cellules, donc améliore la rigidité de la plante. Il est libre sur la CEC ou solution du sol contenant aux carbonates.	
Phosphore	Oligo-éléments dont les plantes ont besoin en toute petite quantité. Leurs rôles sont multiples et complexes. Le fer intervient dans la synthèse de la chlorophylle et des protéines, la photosynthèse, la respiration, la fixation de l'azote. Le cuivre comme le manganèse retrouve dans de nombreuses enzymes. Le zinc intervient dans le métabolisme des autres.	
Potassium	Le bore intervient dans la croissance méristématique, le métabolisme des glucides, la synthèse des protéines. Le soufre est indispensable à la synthèse des protéines.	
magnésium	La granulométrie : La texture	
Calcium	Consiste à séparer la partie minérale de la terre en catégories classées d'après la dimension des particules inférieures à 2mm. La fraction la plus fine est l'argile colloïdale (constitue la plus grande partie de la CEC, la capacité de rétention, la stabilité structurale sa teneur est inférieure à 2 µm). La fraction intermédiaire est formée par les limons (pour un effet négatif sur le sol entraînant un phénomène de battance et d'apport de limons). Les tailles sont comprises entre 2 et 20 µm. La fraction grossière (les sables) sont de tailles entre 50 µm et 2 mm) permet l'aération du sol et la circulation de l'eau. La combinaison des différentes fractions constitue la structure.	
Fer		
Cuivre		
Zinc		
Manganèse		
Bore		
Chlore		
Soufre		
Sables grossiers		
Sables fins		
Limons grossiers		
Argiles		

Nom
Adresse
CP
Ville

Analyse de sol

ESPACES VERTS : Gazon & Plantation

Date arrivée
Date sortie



«Un paysan serait mort de faim plutôt que de ramasser dans son champ une poignée de terre et de la porter à l'analyse d'un chimiste, qui lui aurait dit ce qu'elle avait de trop ou de pas assez, la fumure qu'elle demandait...»
La terre : Emile ZOLA, 1887

Nom
Terre

 N° 2.9
Terre

Menu TT1	Eléments	Résultat	Teneurs souhaitables	Interprétations - conseils	Schématisation	Menu TT1
Etat acidité	CEC (meq/kg) (Telle du réservoir à minéraux)	260,32	50 130	Fort capacité d'échange de minéraux.	CEC	Gazon & Plantation Commentaires de l'analyse Etat d'acidité: Fortement basique avec un sol calcaire. Attention aux risques de chloroses de type ferrique. Etat organique: De faible niveau, à redresser. Apporter un amendement d'origine végétale pour augmenter le niveau d'humus. Etat minéral: Attention au bon équilibre du rapport K2O/MgO. Etat physique: Attention aux risques d'excès d'eau. Vérifier le drainage. L'apport de sable permet de diluer les éléments fins. Etat de fertilité Organique Minéral Physique acido basique
	Saturation (%)	>100	50 100	Largement saturée par le calcium.	pH	
	pH eau	8,16	6,6 7,1	Sol fortement basique.	OH ⁻	
	pH kcl acidité de réserve	7,45	6,1 6,6	Fort basicitée potentielle.	Colonne "saturé"	
	Calcaire total (g/Kg)	129,61		Horizon calcaire.	Colonne "total"	
Etat organique	Calcaire actif (g/Kg)	33,75		Risque de blocage d'éléments nutritifs.	Etat organique	Gazon & Plantations Plan de fertilisation Kg/ha Base 0,8% N minéralisé P205 K2O MgO Mat org Réserves ou Déficit Kg/ha Action annuelle de redressement ou de minoration en Kg/ha Equilibre de fertilisation de la culture Besoin annuel de la culture en Kg/ha Plan 1^{er} année Plan 2^{ème} année Plan 3^{ème} année Nombre de passages: 2 Utiliser un engrais avec de l'azote non lessivable.
	Matières organiques (g/Kg)	17,65	25,00 35,00	Faible. A redresser pour accroître le niveau d'humus.	Azote organique	
	Azote N organique (g/Kg)	1,21	0,86 1,28	Pourvu.	Matière organique	
	CIN (Corg / N org)	8,48	9 11	Evolution un peu rapide de la matière organique.	= humus	
	IAM (intensité d'activité microbienne)	6	12 18	Très faible activité microbienne.	Etat minéral	
Etat minéral	Conductivité (mS/cm)	0,14	0,06 0,15	Disponibilité de minéraux dans la solution du sol correcte.		Granulométrie 5 fractions avec triangle des textures Sables grossiers % Sables fins % Limons grossiers % Limons fins % Argiles % Indice de battance RFU LIM2
	Phosphore P205 Joret (g/Kg)	0,23	0,23 0,27	D = 23 Kg/ha Moyennement pourvu.		
	Potassium K2O (g/Kg)	0,38	0,25 0,30	R = 120 Kg/ha Bien pourvu.		
	Magnésium MgO (g/Kg)	0,60	0,18 0,25	R = 525 Kg/ha Largement pourvu.		
	K2O/MgO	0,63	1,00 3,00	Déséquilibré. Manque de potassium par rapport au magnésium.		
Etat oligos	Calcium CaO (g/Kg)	11,60	8,27 11,34	R = 390 Kg/ha Bien pourvu.		Le Responsable du Laboratoire Base: 1500 T/ha Post-traitement du résultat (point rouge): sur une échelle normalisée des teneurs indiquées (concentration de 10% de stock par m²)
	Fer (mg/Kg)	23,70	30 150	D = 99 Kg/ha Un peu faible		
	Cuivre (mg/Kg)	37,00	1,70 2,40	R = 52 Kg/ha Largement pourvu.		
	Zinc (mg/Kg)	3,20	2,60 3,80	D = 0 Kg/ha Moyennement pourvu.		

Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Exemple de plan des sols fertiles

N°: **P.C.1-A6-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Association des Ingénieurs Territoriaux de France



Travaux

de mise en
oeuvre et
d'entretien
des plantes

Règles professionnelles

Travaux des sols,
supports de paysage

ANNEXE : Exemple de fiche de stock

N°: **P.C.1-A7-R0** | Création : décembre 2012



les entreprises
du paysage



Exemple de fiche de stock

Numéro du stock sur le site : **A**

Date dernière mise à jour : _____				Rédacteur : _____		Nombre de pages : _____	
Localisation							
Coordonnées GPS							
							
Caractérisation							
Volume	1000 m ³		Dimensions	Surface : 200 m ² Hauteur : 4 m			
Couvert végétal Aspect de surface	sol nu sec et assez peu compact		Forme	Tas			
Commentaires	Peu de résidus végétaux, plusieurs mottes d'argiles très compactes en pied de stock et quelques mottes de limon profond très sec en surface. Déstockage en cours						

Diaporama photographique



▪ Stock A : vue d'ensemble



▪ Stock A : vue d'ensemble



▪ Stock A : vue d'ensemble



▪ Stock A : vue d'ensemble



▪ Stock A : vue du dessus



▪ Stock A : vue du dessus