

Matériaux naturels avec matières organiques

Mise à jour de la version : juin 2006

1	Définition	1
2	Textes spécifiques de référence.....	1
3	origine, formation et élaboration	2
4	Caractéristiques physico-chimiques	5
5	Caractéristiques géotechniques	7
6	Caractéristiques environnementales	12
7	Aspects sanitaires	13
8	Utilisations dans les infrastructures routières	13
9	Bibliographie.....	16
10	Auteurs et relecteurs	18

1 Définition

On entend par produits naturels renfermant des matières organiques tous les matériaux contenant de la matière organique n'ayant subi aucune manipulation anthropique. A titre d'exemple, cette définition :

- intègre la terre végétale, les limons organiques, les vases ou les tourbes à l'état originel;
- exclut les boues de curages ou les stériles miniers (qui sont pris en compte dans d'autres rubriques de l'observatoire).

Ces matériaux sont donc rencontrés dans leur état naturel et sont caractérisés par la présence de matière organique sous forme plus ou moins décomposée. Cette matière organique a une influence notable sur le comportement du matériau et donc sur l'emploi qui peut en être fait. Pour cette raison, il doit faire l'objet d'une caractérisation géotechnique et environnementale particulière. L'impact de ce matériau sur son environnement et les possibilités de réutilisations potentielles et répertoriées sont présentés dans cette rubrique.

2 Textes spécifiques de référence

2.1 Normes

L'emploi des matériaux naturels avec matière organique en technique routière est directement lié à la teneur en matières organiques qu'ils renferment. Les principaux textes de référence font donc appel aux méthodes à employer pour déterminer la teneur en matière organique.

Parmi ces textes de référence, on peut noter les normes suivantes :

- norme NF P 11-300, 1992 : « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières » ;
- norme XP P 18-540, 1997 : « Granulats – Définitions, conformité, spécification » ; la norme française XP P18 540 est remplacée par un ensemble de normes européennes XP P 18 545 « Granulats. Eléments de définition, conformité et codification. » ;

- norme XP P 94-047, 1998 : « Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau. Méthode par calcination »;
- norme NF P 94-055, 1993 : « Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol. Méthode chimique »;
- norme NF P 94-068, 1998 : « Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache » ;
- norme NF P 94-100, 1999 : « Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement ».

2.2 Textes de spécifications

Outre les normes, il existe des textes de spécification :

- LCPC – SETRA, 2000: « Guide technique. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » (appelé **GTS** dans le réseau du ministère de l'équipement);
- LCPC – SETRA, 2000 2^{ème} édition: « Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme » (appelé **GTR** dans le réseau du ministère de l'équipement) ;
- Préfecture d'Ile-de-France, Conseil Régional d'Ile-de-France, UNICEM, SPRIR Ile-de-France, Contrat de Plan interrégional du Bassin parisien, SYCTOM, SVDU, 1998 : « Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile de France (MatIdF, 1998) ».

3 origine, formation et élaboration

3.1. La matière organique : synthèse et différentes formes

La matière organique originelle ou fraîche peut se transformer selon deux processus :

- a) la minéralisation complète, libérant des éléments gazeux tels que CO_2 et NH_3 ainsi que des anions du type NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} très mobiles ;
- b) l'humification formant des complexes **humiques** plus résistants au phénomène de minéralisation provoqué par les bactéries.

Dans un sol organique, on trouvera ainsi en mélange :

- des débris peu dégradés à structure fibreuse ou cellulaire ;
- des produits intermédiaires tels que la lignine, libérée par la minéralisation plus rapide de la cellulose ;
- des complexes colloïdaux formés par synthèse microbienne;
- des composés solubles, se minéralisant plus ou moins rapidement.

3.2. Principaux matériaux naturels contenant de la matière organique

3.2.1. La terre végétale

La terre végétale est située dans la partie supérieure des matériaux en place. Son épaisseur est variable, comprise entre 10 cm et, exceptionnellement, 1 mètre, mais plus généralement entre 30 et 40 cm. Les processus de formation de ces matériaux découlent directement de la formation des sols. Il s'agit de la dégradation

par les microorganismes du sol de la matière organique morte, de sa lente minéralisation et de son incorporation aux matériaux minéraux issus de l'altération de la roche mère. La terre végétale se distingue des couches inférieures par la présence d'humus qui lui confère une teinte plus sombre.

En chantier, par nécessité, une couche de 30 cm, voire souvent plus, est décapée. Ce décapage (Arnal et Chevassu, 1982) entame souvent les horizons peu organiques profonds et provoque un appauvrissement du stock en éléments nutritifs (préjudiciable en cas d'utilisation en engazonnement de talus routier (ADEME, 1995). Le Cahier des Clauses Techniques Générales, fascicule 35, indique que le décapage des terres végétales est fait en prenant toutes dispositions pour éviter de les contaminer par incorporation de matériaux étrangers. Ce décapage n'est pas obligatoire et est seulement motivé par l'intérêt de la terre végétale pour une réutilisation ultérieure sur les talus de remblai et déblai.

3.2.2. Les limons organiques

Le terme général de limons désigne des sols fins caractérisés par la prépondérance d'une fraction $2 \mu\text{m} / 50 \mu\text{m}$. Il s'agit généralement soit de limons éoliens (loess) soit de limons alluvionnaires.

Les limons éoliens, très répandus dans la moitié Nord de la France, peuvent constituer localement dans ces régions la première formation rencontrée sous la terre végétale. Ainsi, dans la partie supérieure de la couche de limon, la quantité de matière organique peut être non négligeable, sans pour autant que l'on puisse qualifier le matériau de terre végétale. Outre la matière organique, on trouve principalement dans cette formation, en quantités et proportions variables, des particules d'argiles, calcaires, siliceuses et silicatées. Les particules proviennent de l'érosion des massifs anciens par les grands glaciers au cours du Quaternaire, après avoir été transportées sur de longues distances par le vent, elles se sont déposées sous forme de loess, en couches d'une épaisseur comprise entre 1 et 5 mètres. Il est rare que la teneur en matière organique de cette formation dépasse quelques pourcents. La teneur en eau de ce type de matériau est généralement inférieure à sa limite de plasticité (cf. NF P 94 051, 1993).

Les limons alluvionnaires sont déposés par les cours d'eau et font partie des alluvions dites récentes (ou fines). Ils peuvent être constitués de particules minérales d'origine extrêmement variée ainsi que de matière organique en proportion variable. Leur quantité de matière organique peut être importante et atteindre 30%. Leur teneur en eau peut être très élevée (de 0% à 75% selon la saison).

3.2.3. Les vases alluvionnaires

La vase est le résultat de la formation d'un dépôt en eau douce ou salée. Sa formation est favorisée lors de la rencontre d'eaux douces et d'eaux salées. Au contact de l'eau salée, les substances en suspension dans l'eau douce s'agglomèrent en colloïdes et décantent, formant ainsi la vase. Les estuaires, les ports recevant des collecteurs pluviaux sont ainsi souvent propices à la formation de vase. On la rencontre également au niveau des barrages (naturels ou artificiels) où la diminution du courant favorise également la formation de dépôts. Les particules couvrent une gamme granulométrique étendue jusqu'à 0,2 mm avec une majorité comprise entre 1 et $2 \mu\text{m}$. Elles sont formées de deux constituants : un squelette (généralement minéral) et un liant (matières organiques, monosulfure de fer, êtres vivants...). Aux constituants minéraux (issus de la roche mère en place ou de l'apport tellurique), s'ajoutent des

éléments organiques tels que *frustules* de diatomées, grains de pollen et débris végétaux divers.

La distinction entre argile et vase se fait par la mesure de la teneur en matières organiques, qui est comprise entre 2 et 10 % pour une vase (alors que l'argile en contient peu ou pas) et par la valeur de teneur en eau qui peut atteindre 300 % (voir paragraphe « Caractéristiques géotechniques »).

Cette très forte teneur en eau est due principalement à la présence de matière organique qui fixe l'eau, et aussi, bien entendu, à l'origine alluviale de la vase.

3.2.4. Les tourbes

Une tourbière, par définition, est une zone humide, colonisée par la végétation, dont les conditions écologiques particulières ont permis la formation d'un sol constitué d'un dépôt de tourbe. Une tourbière est considérée comme un écosystème, qui se caractérise par un sol saturé en permanence d'une eau stagnante ou très peu mobile. Les micro-organismes (bactéries et champignons) responsables de la décomposition et du recyclage de la matière organique sont ainsi privés de l'oxygène nécessaire à leur métabolisme. Dans ces conditions asphyxiantes (anaérobiose), la litière végétale ne se minéralise que très lentement et très partiellement. Elle s'accumule alors, progressivement, formant un dépôt de matière organique mal ou non décomposée : la tourbe.

Formation de la tourbe

Véritable roche végétale fossile, la tourbe est donc un sol organique issu de la dégradation incomplète de débris végétaux dans un milieu saturé en eau. Elles sont les moins transformées des roches combustibles et les plus récentes sont même encore en cours de formation. Elle contient au moins 20 % de carbone (30 % dans le cas de tourbes riches en argiles) et peut s'accumuler sur plusieurs mètres d'épaisseur, au rythme moyen de 0,2 à 1 mm par an. La plupart des tourbières s'étant formées après le retrait de la dernière glaciation (glaciation du Würm, il y a environ 12 000 ans), les dépôts de tourbe généralement observés ont une épaisseur comprise entre 50 cm et 5 à 10 m mais ces accumulations prennent parfois des proportions exceptionnelles comme à la Grande Pile (70) où le dépôt atteint 19 m. L'épaisseur du dépôt tourbeux permet d'ailleurs de séparer les tourbières stricto sensu, dont l'épaisseur de tourbe est d'au moins 40 cm, des milieux para-tourbeux qui ont une épaisseur de tourbe inférieure.

Les végétaux édificateurs de la tourbe, essentiellement des bryophytes (les *sphaignes* notamment) et diverses plantes herbacées, sont qualifiés de tourbogènes ou turfigènes. Une tourbière est active tant que se poursuivent les processus d'élaboration et d'accumulation de la tourbe à partir de ces végétaux. Si ces processus cessent, la tourbière devient inactive... mais est parfois susceptible de se régénérer

Sur le terrain, la tourbe apparaît comme une masse végétale qui, vivante en surface, mortifiée et brunie immédiatement sous cette surface, subit une lente altération et se transforme peu à peu en profondeur en une substance molle, brune ou noirâtre plus ou moins spongieuse. Elle devient en plus grande profondeur une substance plus brune ou plus noire, dans laquelle les débris végétaux finissent par perdre pour la plupart leurs caractères morphologiques et même histologiques

(Mankour, 1995). La tourbe est caractérisée aussi par une texture fibreuse et une odeur très marquée, qui la différencie nettement des autres matériaux naturels.

Il existe deux types fondamentaux de tourbières :

- a. les tourbières plates (de formation centripète) sont le résultat du lent processus de comblement des plans d'eau de faible profondeur, aux eaux riches en sels minéraux dissous, favorisant le développement de la végétation aquatique. La tourbière « meure » lorsque la cuvette est comblée et asséchée. Elle est parfois envahie par une végétation forestière. L'épaisseur de ces tourbières est en général de 2 à 3 mètres ;
- b. les tourbières comporte des cellules spéciales percées de pores favorisant l'ascension bombées (de formation centrifuge) sont édifiées par des sphaignes dont le tissu cellulaire et la conservation de l'eau. Leur teneur en eau peut ainsi atteindre 4000% (40 fois leur propre poids sec). Leur hauteur peut atteindre 10 mètres.

Classification des tourbières

Il existe plusieurs classifications permettant d'identifier et de décrire les tourbières, qui font référence à certains de leurs caractères. La plus intéressante tient compte à la fois leur origine et le mode d'alimentation hydrique.

On trouve ainsi les différents types de tourbes suivantes :

- Ombrogène : alimentées principalement par les eaux météoriques, peu chargées en ion, elles sont toujours bombées ou de couverture ;
- Soligène : elles se rencontrent au niveau de pentes moyennes au niveau desquelles ruissellent des sources ;
- Topogène : se trouvent en général en fond de vallées où les remontées de la nappe alluviale sont fréquentes ;
- Limnogène : Elles prennent naissance au niveau d'étangs ou de lacs, aux endroits où les atterrissements sont favorisés souvent par le système racinaire des plantes aquatiques.

4 Caractéristiques physico-chimiques

4.1. La fraction minérale

La fraction minérale contenue dans un matériau renfermant des matières organiques provient en général de l'altération de la « roche mère » sur laquelle ils sont présents (cas de la terre végétale et des limons aériens).

On distingue ainsi :

- les minéraux primaires, directement hérités de la roche génératrice ;
- les minéraux secondaires, issus de l'altération des minéraux primaires.

La figure 1 montre les différents processus de transformation des minéraux primaires en minéraux secondaires.

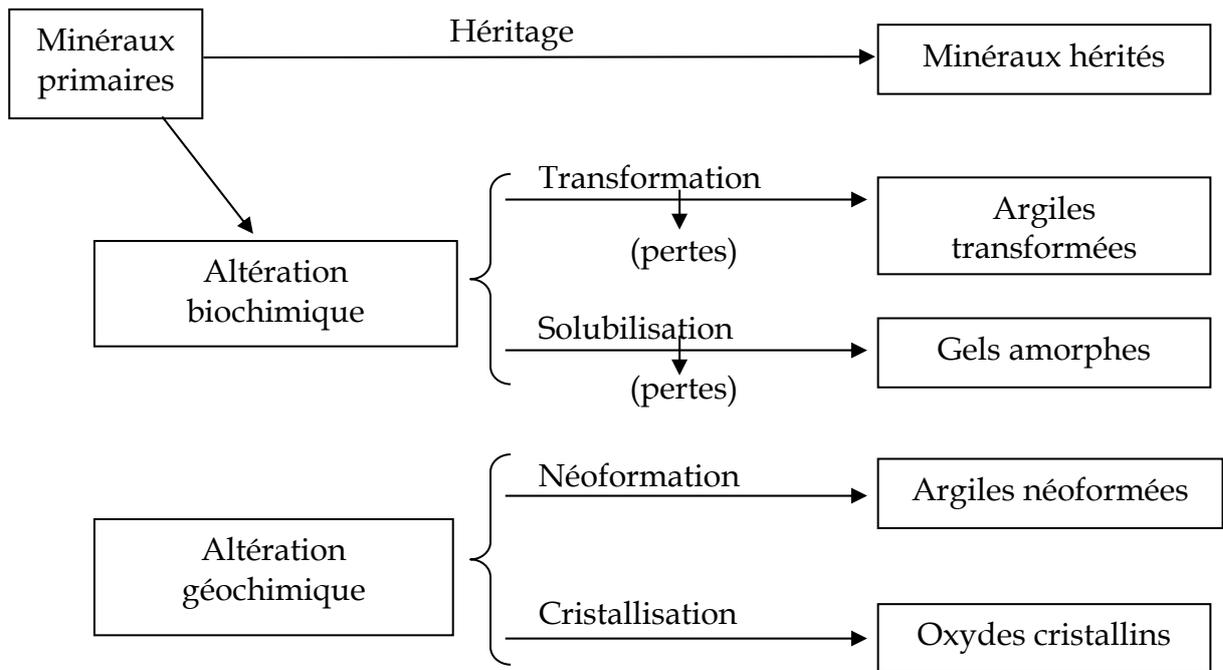


Figure 1 : Les différents processus de formation des minéraux secondaires

Il est à noter que la matière organique joue le plus souvent un rôle important dans les processus de transformation et de solubilisation (altération biochimique), et intervient peu dans les processus de néoformation (altération géochimique).

4.2. La fraction organique

- **Composition chimique** : les matières organiques présentes dans les sols sont constituées essentiellement par des produits animaux et végétaux à différents stades de décomposition, ce qui aboutit à des mélanges complexes. Par simplification, deux groupes de substances sont définis :

- la Matière Organique Fraîche ou substances non humiques. (MOF), fraction organique encore peu transformée, d'origine végétale ou animale ;
- l'humus ou substances humiques, fraction organique colloïdale qui crée des liens étroits avec l'argile et les oxydes libres.

La MOF constitue la matière première de l'humus. la figure 2 représente schématiquement les phénomènes d'humification et de minéralisation.

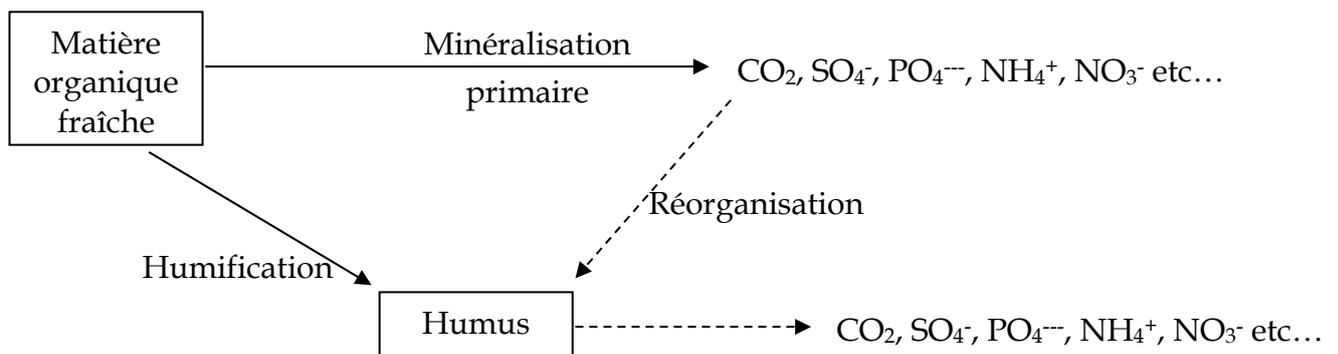


Figure 2 : décomposition de la matière organique fraîche : humification et minéralisation

La quantité de matière organique du sol peut être estimée de manière approximative par le dosage du carbone organique (XP P 94-047, 1998). Dans les matières organiques, il y a des molécules de carbone C₁₂, dit carbone organique, qui, une fois dosé, représente 1/2 du poids total de la matière organique, pour les sols à végétation permanente comme les forêts, et 1/1,72 pour les sols cultivés.

Vitesse de minéralisation

La vitesse de minéralisation du carbone s'évalue en général, au laboratoire, par incubation d'un échantillon de sol humifère, dans des conditions optimales de température et d'humidité. On obtient ainsi une courbe cumulative d'émission de CO₂ qui permet de calculer le taux de minéralisation par unité de temps. Ceci permet de savoir si le carbone organique va rapidement se transformer en carbone minéral et ainsi faire baisser le taux de matière organique dans le sol, il s'agit d'une cinétique de réaction chimique.

• **Composition biologique** : tout matériau renfermant de la matière organique est « vivant ». Il renferme en effet une biomasse microbienne, qui est composée non seulement de la microflore (bactéries, champignons) mais aussi de la faune du sol. La biomasse microbienne représente en moyenne 2 à 5 % de la matière organique totale. *Ce pourcentage peut augmenter en cas d'ajout de matière organique fraîche :*

a) les bactéries. Elles prolifèrent dans les milieux peu acides. Il existe une multitude de types de bactéries : citons les bactéries du cycle de l'azote, du cycle du soufre, du cycle du fer. Elles ont un rôle essentiel dans l'évolution des constituants du sol ;

b) les actinomycètes et les champignons. Ces deux familles, de constitution assez voisine, jouent également un rôle important dans la minéralisation de la matière organique. Leur principale action se situe dans la décomposition de la matière organique fraîche ;

c) la faune du sol. Cette faune est très diversifiée. On y trouve ainsi des protozoaires, des acariens, et, bien entendu, toute la famille des lombrics. Là encore, la faune joue un rôle important dans la transformation de la matière organique fraîche et agit en relation étroite avec la microflore.

5 Caractéristiques géotechniques

Les matériaux renfermant des matières organiques sont généralement très hétérogènes du point de vue de leurs caractéristiques géotechniques (ce qui leur confère un lourd handicap pour les usages routiers). Cette variabilité s'observe bien évidemment entre deux matériaux différents, mais également pour un même matériau. La multiplication des essais sur un sol donné peut donner des résultats très dispersés. A cela s'ajoute une variabilité dans le temps : un matériau organique renferme en effet souvent des organismes vivants (bactéries, microorganismes, champignons...) dont la composition évolue.

Dans une approche géotechnique de ces matériaux, il est convenu de différencier leur caractéristique de nature et d'état d'une part, et leurs caractéristiques de comportement d'autre part. C'est ce qui distingue respectivement les essais d'identification des essais de comportement, parmi lesquels nous présenterons ici ceux qui sont les plus pertinents pour caractériser les matériaux contenant des matières organiques. Nous préciserons aussi les exigences particulières de ces essais, dont l'observation permet de prendre en compte au mieux les caractéristiques très spécifiques de la matière organique.

Les essais d'identification sont utilisés par les classifications de sols dont nous présenterons ici les règles qui concernent les sols organiques.

5.1. Essais d'identification

- Classifications géotechniques des sols organiques

En France, on peut citer deux classifications qui répondent à ce besoin et intéressent le domaine routier :

- la classification LPC, qui date de 1965 (Schön, 1965) et est tirée de la classification américaine USCS ;
- la classification du GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition) qui est affiliée à la première mais qui concerne le domaine particulier des terrassements.

Les Figure 3 et Figure 4 illustrent la position des seuils de teneur en matière organique dans ces deux classifications (GTR, 2000).

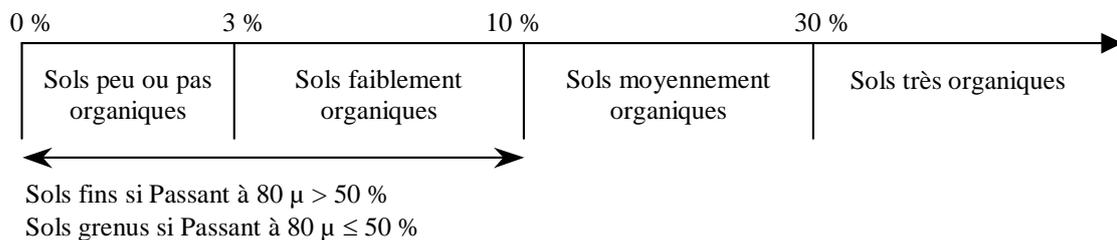


Figure 3 : Seuils de teneur en matière organique dans la classification LPC

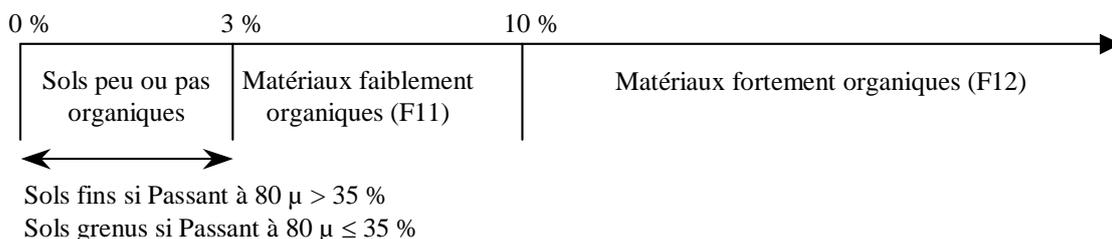


Figure 4 : Seuils de teneur en matière organique dans la classification GTR

Dans la classification LPC, les matériaux moyennement et fortement organiques font l'objet d'une sous classification déterminée par l'essai Von Post (XP P 94-058, 1993 ; M. Lagrange, J. Perrin, J-P Magnan, 1980). La classification GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition) ne va pas jusqu'à ce degré de précision, car la réutilisation de matériaux contenant de la matière organique dans le domaine des terrassements est restée anecdotique jusqu'à présent.

On notera dans ces sols l'impossibilité de quantifier la fraction argileuse et de distinguer dans cette fraction la proportion d'argile et de matière organique.

- La teneur en matière organique

La teneur en matière organique d'un sol est le rapport entre la masse de matière organique et la masse sèche totale du sol. Deux méthodes sont utilisées pour la quantifier :

- méthode par calcination (XP P 94-047, 1998) : elle consiste à brûler la matière organique de la fraction 0/2 mm d'un échantillon de sol ;
- méthode chimique (NF P 94-055, 1993) : elle consiste à doser par oxydation le carbone présent dans la fraction 0/20 mm d'un échantillon de sol.

Dans la pratique, on préfère généralement utiliser la méthode par calcination, qui est plus rapide. Toutefois, les deux méthodes conduisent au même ordre de grandeur de la teneur en MO.

- Le test d'humification de Von Post

Les études sur les matériaux renfermant de la matière organique ont montré l'influence du degré d'humification sur les caractéristiques géotechniques (Perrin, 1974). Ces observations ont conduit à la mise au point d'un essai visant à quantifier ce degré d'humification : c'est l'essai Von Post (norme XP P 94-058, 1993).

L'essai consiste à comprimer le sol sous une contrainte donnée et à apprécier de manière sommaire la quantité de matière organique présente dans le liquide ainsi obtenu. On en déduit une classe de décomposition désigné par H1 (état fibreux, pas ou peu décomposé) à H10 (état amorphe, très décomposé).

- La masse volumique des particules solides ou « masse volumique des grains »

La masse volumique des particules solides (NF P 94-054, 1991) est utilisée en géotechnique pour déterminer l'indice des vides du sol à partir de la masse volumique sèche. Pour les sols organiques, c'est aussi un moyen de détecter la présence de matière organique puisque la masse volumique des particules solides est de l'ordre de 1,4 t/m³ pour la matière organique et de l'ordre de 2,7 t/m³ pour les espèces minérales présentes dans les sols et roches. Par conséquent, la masse volumique des particules solides d'un sol organique est comprise entre 1,4 et 2,7 t/m³.

Dans le cas des sols organiques, la réalisation de cet essai selon la norme NF P 94-055 (NF P 94-055, 1993) pose un problème car la matière organique est peu dense et les particules de matière organique peuvent ainsi avoir tendance à flotter dans le pycnomètre ce qui perturbe la réalisation de l'essai. Dans ce cas, il peut être préférable de réaliser l'essai avec un fluide plus léger (White Spirit par exemple), mais c'est une dérogation à la norme. Ceci impose une atmosphère constante en température et un étalonnage préalable de la densité du fluide avec la température.

- La courbe granulométrique

La matière organique présente l'inconvénient d'être potentiellement répartie dans toutes les fractions granulométriques, d'avoir une masse volumique spécifique (masse volumique des particules solides) faible et variable et des éléments constitutifs dont la morphologie est difficile à apprécier par le tamisage (les particules organiques n'ont pas toutes la même taille et la même forme, ni le même poids moléculaire ce qui les rends difficile à isoler en vue d'une caractérisation précise). Pour toutes ces raisons,

Perrin (1974) recommandait d'effectuer un tamisage par voie humide (XP P 94-041, 1995) sur le matériau non séché, afin de déterminer la valeur du pourcentage d'éléments inférieurs à 80 µm, paramètre-clé dans les classifications géotechniques des sols. Cette valeur doit évidemment être considérée avec précaution lorsque la matière organique est fibreuse et constituée d'éléments de grande taille.

La granulométrie entre 1 et 80 µm est quasiment impossible à obtenir de manière rigoureuse pour les sols contenant de la matière organique, car la méthode par sédimentométrie repose sur une homogénéité de masse volumique des particules solides, qui ne peut être vérifiée dans ces matériaux. La granulométrie par diffraction laser, très imprécise pour ces tailles de particules, reste cependant la méthode de référence pour décrire la granularité du sol dans ces fractions inférieures à 80 µm.

- La teneur en eau

La teneur en eau, est mesurée par un essai normalisé qui nécessite l'emploi d'une étuve (NF P 94-050, 1995), d'un four à micro-onde (NF P 94 049-1, 1996) ou de plaques chauffantes (NF P 94-049-2, 1996). Dans les matériaux renfermant des matières organiques, elle peut être très élevée : elle se situe généralement dans l'intervalle 50% - 1500%.

La difficulté rencontrée dans la mesure de teneur en eau réside dans le fait qu'il s'agit d'un paramètre qui permet de suspecter la présence de matière organique. Mais lorsque la présence de matière organique est suspectée, le séchage doit être réalisé à 50°C au lieu de 105 °C. C'est un paramètre clé dans la classification GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition) pour déterminer les conditions de mise en œuvre appropriées.

- Les limites d'Atterberg

La mesure des limites d'Atterberg n'est valable que pour les sols classés H6 à H10 par l'essai Von Post (XP P 94-058, 1993). Elle nécessite de plus la précaution de ne pas dessécher les matières organiques avant l'essai et de travailler avec une coupelle rugueuse pour la limite de liquidité (Perrin, 1974).

Les limites de plasticité et de liquidité sont déterminées par des essais normalisés (NF P 94-051, 1993 ; NF P 94-052-1, 1995). La plage de teneur en eau contenue entre ces deux limites donne un paramètre géotechnique caractéristique, **l'indice de plasticité**, qui est utilisé de manière très généralisée dans les classifications de sol, et en particulier dans le GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition).

- La valeur au bleu de méthylène

La valeur au bleu de méthylène caractérise la surface spécifique des sols. C'est un essai normalisé (NF P 94-068, 1998) dont le principe est de recouvrir la surface des particules solides avec des molécules de bleu de méthylène. Ce paramètre intervient dans la classification GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition), pour caractériser les sols fins peu plastiques (A1, VBS ≤ 2,5) et pour distinguer les différentes familles de sols sablo-graveleux selon leur argilosité (classe B).

Les relations entre la teneur en matière organique et la valeur au bleu sont complexes car la surface spécifique du sol et sa capacité d'échange en cations sont conditionnées par son degré d'humification.

5.2. Les essais de comportement

Les essais de comportement appropriés sont ceux qui peuvent apporter des caractéristiques intrinsèques pour le dimensionnement, en vue du réemploi des matériaux renfermant de la matière organique, principalement dans les corps de remblai. Sont à étudier : l'aptitude au traitement, la compressibilité et la résistance au cisaillement.

- L'aptitude au traitement :

L'aptitude au traitement des sols est déterminée par un essai normalisé (NF P 94 100, 1999). Pour le traitement à la chaux, il s'agit de quantifier le gonflement volumique généré par la réaction de la chaux avec les constituants du sol. Cependant, dans le cas des matériaux contenant de la matière organique, le problème vis-à-vis du traitement n'est pas tant le gonflement que la neutralisation de la chaux par la matière organique. Aussi, il se peut que l'aptitude au traitement soit jugée correcte selon cet essai, mais que le traitement soit en fait peu efficace dans l'amélioration des propriétés géotechniques du sol.

Une étude de traitement rigoureuse de ces matériaux pour une réutilisation en remblai passera donc plutôt par une étude de formulation visant à quantifier l'effet du traitement sur la compactabilité et l'indice portant immédiat (GTS, 2000, Partie B).

- La compressibilité

La compressibilité est le principal défaut des matières organiques. Un sol est dit compressible en géotechnique routière s'il subit une déformation plastique sous l'effet du poids des terres. Concrètement, pour un sol employé en corps de remblai, il est nécessaire de prévoir ses variations de volume lorsqu'il est soumis au poids des terres sus-jacentes. Il est du ressort du concepteur de définir un seuil de déplacement dû à la consolidation au-dessus duquel le réemploi est jugé inadapté.

La compressibilité d'un sol est habituellement caractérisée par l'essai oedométrique (norme XP P 94-090-1, 1996) qui permet de déterminer pour un sol saturé l'évolution de l'indice des vides avec la contrainte verticale appliquée. Un des paramètres caractéristiques du sol saturé est la pente de la droite dans le plan (indice des vides, indice de compression).

Pour une réutilisation de sols en corps de remblai, la norme n'est pas adaptée, puisque les sols n'y sont généralement pas saturés. Pour palier ce problème, il peut être envisagé de déroger à la norme en réalisant cet essai oedométrique sur un sol remanié à la teneur en eau naturelle et à une masse volumique sèche déterminée (à l'optimum Proctor par exemple), et en s'assurant qu'il n'y a pas d'échange d'eau au cours de l'essai entre l'échantillon et l'air ambiant, par l'emploi d'un film plastique imperméable (P. Delage, J-J. Fry, 2000).

- La résistance au cisaillement

Une autre faiblesse mécanique identifiée de la matière organique est sa faible résistance au cisaillement, qui peut générer des ruptures de talus très importantes. Pour quantifier cette résistance, il est approprié de réaliser un essai à l'appareil triaxial de révolution (NF P 94-074, 1994) afin de déterminer la cohésion, notée c , et l'angle de frottement, noté φ , du sol en conditions non-drainées (essais dits CU + U, approche à court terme) et drainées (essais dits CU+U, approche à long terme).

Sur la base de ces paramètres c et φ , des logiciels courants de calcul à la rupture permettent de déterminer les caractéristiques géométriques de l'ouvrage afin de maintenir un coefficient de sécurité acceptable.

6 Caractéristiques environnementales

6.1. Transfert vers l'air

L'atmosphère d'un sol bien aéré contient un peu moins d'oxygène que l'atmosphère extérieure qui en contient 20% environ, mais par contre plus de CO₂ (deux fois plus en moyenne).

Par ailleurs, les possibilités de transfert de substances chimiques vers l'air avec des matériaux naturels renfermant des matières organiques sont réduites. Elle concernent les émissions de CO₂ et surtout de NH₃. Des poussières sont susceptibles de se répandre dans l'air lors de la manipulation de ces matériaux. Ces dernières dont la toxicité de certaines est avérée pour la santé humaine, sont sans danger pour l'environnement.

6.2. Transfert vers l'eau

Les sources principales d'eau dans de tels sols remaniés, sont l'eau de précipitation et selon les cas, l'eau souterraine. Les précipitations donnent naissance à :

- l'eau de ruissellement, qui lors de sa circulation, entraîne latéralement les particules les plus fines (limons, argiles et matière organique). Ce ruissellement sera d'autant plus important que la pente du matériau en place sera forte ;
- l'eau de percolation, qui circule au sein du massif de matériaux dans les pores grossiers et moyens (supérieurs à 10 µm).

En cas de pente très faible, voire nulle, et de faible perméabilité des horizons profonds, l'ensemble des pores du matériau est alors occupé par de l'eau et il se forme une nappe superficielle (ou nappe perchée) temporaire.

Pour l'environnement, une éventuelle pollution organique peut avoir lieu lors du stockage et de la mise en place de ces matériaux en cas de lessivage avec entraînement de fines, qui se retrouvent alors dans le milieu récepteur (rivière, mare...). Il est donc recommandé, lors de ces deux étapes, de s'assurer de la non-contamination des eaux de ruissellement. Une fois en place, si l'on s'assure que le ruissellement est limité, les risques de contamination sont quasi nuls.

6.3. Transfert vers le sol

Les matériaux naturels renfermant des matières organiques ne sont pas l'objet à l'état naturel de transferts de substances chimiques vers leur assise (sauf éventuellement pour quelques sols issus de roches mères riches en cadmium (Baize et al., 1999, « Affleurements calcaires du jurassique ») ; certains matériaux naturels contiennent également du plomb, de l'arsenic, du mercure et même de l'uranium. Le transfert de substances vers le sol est donc possible (échanges de minéraux, transfert de fines...) mais sont en général sans conséquences pour le sol récepteur. En

revanche, les sols superficiels biologiquement actifs peuvent jouer un rôle considérable dans la biodégradation de pollutions d'origine externe.

La matière organique contenue dans un matériau protège l'environnement par la fixation des polluants (tant organiques, comme les pesticides, que minéraux, comme les métaux lourds ou l'aluminium).

La stabilisation des MOS (Matières Organiques Solubles) dans les sols résulte de différents processus :

- récalcitrance chimique intrinsèque;

-protection chimique, ralentissement de la biodégradation qui résulte de complexations MO-cations ou MO-MO;

- protection physique, provoquée par l'adsorption de composés organiques sur les colloïdes minéraux du sol ainsi que par la localisation des MO dans des pores des agrégats du sol inaccessibles aux microorganismes décomposeurs ou défavorables à leur activité (anoxie).

7 Aspects sanitaires

Du point de vue biologique et plus précisément bactériologique, il est conseillé d'éviter le contact à mains nues, surtout si elles comportent des plaies.

Pour les riverains, les risques de contamination proviennent des même causes que pour l'environnement, c'est à dire en cas de lessivage avec entraînement de fines, qui se retrouvent alors dans le milieu récepteur (rivière, mare...).

Au niveau de la tourbe, le risque d'incendie n'est pas à écarter lors d'un stockage hors sol ; il y a alors un risque lié à une exposition à des substances chimiques soit qui se formeraient dans de telles conditions, soit qui se volatiliserait à partir d'une certaine température.

8 Utilisations dans les infrastructures routières

8.1. Végétalisation

Ce type d'utilisation est actuellement pratiqué.

L'emploi en végétalisation (figure 4) concerne essentiellement la terre végétale. Les fonctions de cette couche de terre végétale sur les talus de remblais et de déblais sont multiples. Elles ont été bien décrites par Henensal (1993) et on retiendra les fonctions suivantes :

- développement de la végétation ;
- absorption de l'énergie de la pluie, qui permet d'éviter l'érosion du talus ;
- ralentissement de la vitesse de ruissellement, en particulier après que la végétation se soit développée, qui permet de limiter le ravinement ;
- filtration du ruissellement, grâce aux tiges et résidus végétaux en surface qui permet d'éviter le transport de particules ;
- fonction esthétique.



Figure 4 : La végétalisation de sites dégradés avec utilisation de déchets organiques : l'expérience savoyarde. (Photo extraite de ADEME et al, 1996).

Pour un simple engazonnement, l'épaisseur à mettre en place devra être de 10 à 15 cm. En cas de plantations arbustives, l'épaisseur devra être portée à environ 30 cm. La composition moyenne d'une terre végétale pour engazonnement routier devra être approximativement de 12 à 18% d'argiles, de 20 à 30% de limons, de 45 à 70% de sables et au minimum de 2% de matière organique (Note LCPC-SETRA, 1974).

Des amendements, même s'ils sont rares, peuvent être réalisés :

- l'amendement granulométrique, très rare car coûteux ;
- l'amendement organique : les amendements organiques permis sont présentés dans la norme NF U 44-051 et correspondent à des matières organiques d'origine végétale (compost, fumier, tourbe...) ;
- l'amendement calcaire : pratiqué seulement en cas de pH faible.

D'un point de vue géotechnique, l'utilisation de terre végétale en recouvrement de talus ne nécessite généralement pas d'étude géotechnique particulière car les contraintes mécaniques auxquelles est soumise la couche sont très faibles. Cependant, la question d'une étude géotechnique particulière peut se poser lorsqu'il s'agit de végétaliser les pentes de bassins de rétention sur un dispositif d'étanchéité par géomembranes. Dans ce cas, l'eau peut submerger la couche de terre végétale et remettre en cause sa stabilité.

8.2. Utilisation en merlons

Ce type d'utilisation est envisageable à condition que le sol soit faiblement organique et qu'une étude sur ses caractéristiques mécaniques soit réalisée.

La réutilisation en merlons de matériaux contenant de la matière organique est envisageable pour les sols faiblement à moyennement organiques (terre végétale, limons organiques), bien que des déformations soient possibles. Dans le cas de matériaux contenant plus de 10 % de matière organique, il est nécessaire cependant d'étudier le comportement mécanique de l'ensemble pour éviter des déformations trop importantes et des ruptures de talus.

8.3. Utilisation en remblai

L'utilisation en remblai est théoriquement possible pour les sols contenant jusqu'à 10 % de matières organiques en France (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition). On constate cependant que les autres pays européens sont beaucoup plus restrictifs en la matière (Havard, 2003) :

- 1 % pour la Belgique et la Suisse ;
- 2 % pour l'Italie ;
- 5 % pour l'Espagne ;
- 6 % pour la Croatie.

Les craintes portent sur :

- le tassement du remblai sous son poids propre par consolidation, le phénomène pouvant être aggravé par l'évolution de la matière organique dans le temps;
- le risque de rupture de talus dû à la faible résistance au cisaillement des matériaux constitutifs.

Dans ce sens, l'utilisation de la terre végétale ou de limons éoliens organiques est possible, moyennant la quantification de la matière organique, une étude éventuelle de traitement et une étude sur les risques de tassements. On exclura cependant l'emploi de tels matériaux en Partie Supérieure des Terrassements.

L'utilisation de limons alluvionnaires ou de vases n'est pas totalement impossible, mais il faut surmonter l'obstacle de leur très forte teneur en eau, ce qui peut nécessiter du temps et des moyens spécifiques (aération par exemple, ou traitement à la chaux). La quantification de la matière organique et l'identification complète du matériau peuvent permettre de le placer dans la classification GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition), afin de définir les conditions de réutilisation. Une étude de traitement peut être envisagée, si cette solution est économiquement réaliste pour le sol considéré.

Lorsque la proportion de matière organique est faible ($MO < 3 \%$), les limons, souvent classés en A1 ou A2 par le GTR (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition), sont considérés comme de bons matériaux en terrassements, et peuvent même faire l'objet d'un traitement pour une utilisation en couches de chaussées. Lorsque la matière organique est présente en quantité non négligeable, ils doivent être considérés avec plus d'attention pour un emploi éventuel en terrassement.

L'utilisation de tourbes en remblai paraît très improbable et déconseillée du fait des forts risques d'évolution.

8.4. Utilisation en couches de forme et de chaussées

L'hétérogénéité et les risques d'évolution de ces matériaux excluent quasi-automatiquement toute utilisation en couche de forme (LCPC-SETRA, 2000 2^{ème} édition) et *a fortiori* en couches de chaussées. Il faut de plus considérer que la matière organique inhibe le traitement à la chaux, ce qui limite d'autant l'intérêt économique et technique de la solution.

L'utilisation en couche de forme et de fondation ne semble pas pratiquée, dans l'état actuel de nos connaissances.

9 Bibliographie

12.1. Publications

Arnal et Chevassu, 1982. « Problèmes posés par le décapage et le stockage de la terre végétale. » Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. p 53 à 55.

Blaize et al, 1999. « Affleurements calcaires du jurassique. »

Delage P., Fry J.J., 2000. « Comportement des sols compactés : apports de la mécanique des sols non saturés. » Revue française de géotechnique, n °92, 3^e trim. 2000, pp 17-29.

Duchaufour, 2001. « Introduction à la science du sol (sol, végétation, environnement). » éd Dunod, 313 p.

Hénensal P., 1993. « Lutte contre l'érosion avant, pendant, et après les travaux. Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes. » Collection Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, série géotechnique, GT 54, LCPC, Paris.

Lagrange M., Perrin J., Magnan J.P., 1980. « Classification géotechnique des sols. 2- Mécanisation du test de Von Post pour les sols organiques. » Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 105, pp 53-56.

Lamathe, 1977. « Action des acides humiques sur la prise d'une grave laitier, leur dosage dans un sable. » Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°91, p 45 à 48.

Magnan J.P., 1980. « Classification géotechnique des sols. 1- A propos de la classification LPC. » Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 105, pp 49-52.

Perrin J., 1974. « Classification des sols organiques. » Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 69, pp39-47.

Schön, 1965. « Classification géotechnique des sols basée sur la classification USCS. » Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers n°16, pp 3-5/3-16.

Seigneurie C., Lemesle J-P., Maillet J-M., 2002. « Recyclage des déchets, valorisation en voirie urbaine. » Revue Générale des Routes et Aéroports n° 21, 19p.

12.2. Documents techniques

ADEME, 1995. « Utilisation des boues d'épuration pour l'engazonnement des talus routiers. » 37p.

ADEME, Chambre d'Agriculture de la Savoie, Conseil Général de Savoie, 1996. « La végétalisation de sites dégradés avec utilisation de déchets organiques : l'expérience savoyarde. » plaquette n° 2523, 6p.

Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile de France, 1996.

Havard H., 2003. « Limites d'emploi des sols naturels, spécifications et contrôles dans les travaux de terrassements. » Rapport AIPCR, Comité technique 12, Sujet n°1 – Matériaux naturels hors spécifications courante et pertinence du contrôle des travaux de terrassements, janvier 2003, 90 p.

LCPC SETRA, 1974. « Engazonnement de l'emprise routière. Règles d'emploi de la terre végétale. » Note d'information technique LCPC SETRA.

Mankour, 1995. « Traitement de limons par cendres de foyer de centrale thermique à lit fluidisé. » synthèse des essais LRPC de Nancy

12.3. Normes

NF P 94-049-1, février 1996. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Partie 1 : méthode de la dessiccation au four à micro-onde.

NF P 94-049-2, février 1996. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Partie 2 : méthode à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants.

NF P 94-050, septembre 1995. Détermination de la teneur en eau pondérale des sols. Méthode par étuvage

NF P 94-051, mars 1993, reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P 94-052-1, novembre 1995, reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration.

NF P 94-054, octobre 1991. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.

NF P 94-056, mars 1996. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P 94-057, mai 1992. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.

NF U 44-051, décembre 1981, Amendements organiques. Dénominations et spécifications.

XP P 94-041, décembre 1995. Identification granulométrique. Méthode de tamisage par voie humide

XP P 94-058, octobre 1993. Détermination de l'état de décomposition (humification) des sols organiques.

NF P 94-074, octobre 1994, reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution. Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai (UU) non consolidé non drainé - Essai (Cu+U) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai (CD) consolidé drainé.

XP P 94 090-1, décembre 1997. Essai oedométrique. Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux quasi saturés avec chargement par paliers.

10 Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Gérard Foulon (CETE Ouest- LR d'Angers)
Relecture d'experts OFRIR1	Yves Brosseaud (LCPC), François de Larrard (LCPC), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (LCPC), Vincent Lédée (LCPC), Patrice Piantone (BRGM), Michel Legret (LCPC)
Relecture comité de pilotage	Pierre Dupont (SETRA), Jean-Pierre Lemesle (FNTP), Frédéric Leray (Ministère de l'environnement), Jean-Jacques Vecoven (UNPG/HOLCIM), Alain Millotte (ADP), Agnès Jullien (LCPC)
Date de mise en ligne, version finale	Avril 2005, révision Décembre 2005, mars 2006