

Technosol Terra Preta

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

1. Table des matières

1.	Table des matières	2
2.	Propriétés physiques normatives pour le technosol terra preta 70 % (tp70)	4
2.1.	Méthodes et valeurs seuil	4
3.	Conditions générales	5
4.	Protocoles & valeurs seuils	6
4.1.	Prise d'échantillons	6
4.2.	Distribution granulométrique des agrégats	6
4.3.	Conductivité hydraulique à saturation	6
4.4.	Stabilité des agrégats	7
4.5.	Rétention en eau	9
5.	Synthèse	12
6.	Détermination de normes physiques pour le Technosol TP 70	13
6.1.	Rapport d'étude	13
6.2.	Contexte	13
7.	Principes expérimentaux	15
8.	Lots de Technosols utilisés	16
9.	Observations initiales	17
10.	Méthodes testées	20
11.	Distribution de la taille des agrégats	21
12.	Les limites d'Atterberg	22
12.1.	Limite de liquidité	23
12.2.	Pénétrromètre à cône	24

12.3.	Limite de plasticité	25
12.4.	Test du boudin	26
13.	Conductivité hydraulique à saturation sur colonne avec anneau de garde	27
14.	Stabilité des agrégats dans l'eau	28
15.	Capacité de rétention en eau	29
16.	Résultats	30
16.1.	Distribution granulométrique des agrégats	30
17.	Limites d'Atterberg	31
17.1.	Limite de plasticité	31
17.2.	Limite de liquidité	33
17.3.	Résistance au cisaillement par scissomètre	34
17.4.	Résultats des Limites d'Atterberg	34
18.	Conductivité hydraulique à saturation	35
18.1.	Résultat de conductivité hydraulique à saturation	35
19.	Stabilité des agrégats	37
19.1.	Résultats de stabilité des agrégats dans l'eau	38
20.	Capacité de rétention en eau	39
20.1.	Résultats des rétentions en eau:	40
21.	Conclusion	41
22.	Bibliographie	42

2. Propriétés physiques normatives pour le technosol terra preta 70 % (tp70)

2.1. Méthodes et valeurs seuil

Mandat réalisé par le groupe Sols et Substrats – Agronomie – Institut Terre Nature et environnement. Haute École du Paysage, de l'Ingénierie et de l'Architecture – (HEPIA) HES-SO Genève Direction Professeur Pascal Boivin. Réalisation Marie Palman collaboratrice scientifique.

Le présent document décrit les protocoles de mesure et les valeurs seuils associées pour garantir la qualité d'un Technosol dénommé TP70. Les résultats ont été obtenus par mandat de la Direction du logement, de l'environnement et de l'architecture et Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne. Les expérimentations correspondantes sont exposées dans un rapport de recherche des mêmes auteurs, accessible sur demande.

*Mandat réalisé par le groupe Sols et Substrats – Agronomie – Institut Terre Nature et Environnement.

Haute École du Paysage, de l'Ingénierie et de l'Architecture - (HEPIA) HES-SO Genève.
Professeur Pascal Boivin – pascal.boivin@hes-so.ch

Version 1. Le 24.08.2022. Mise à jour novembre 2023.

Modifications apportées par cette mise à jour :

La norme ci-dessous est révisée pour apporter certaines clarifications essentielles à la réalisation des mesures des propriétés physiques du Technosol TP70. Deux points principaux ont été modifiés. Le premier comprend une clarification du protocole de mesure de stabilité des agrégats sans en changer les valeurs seuils définies initialement. Le second traite des mesures de rétention en eau et revoit le protocole associé et les valeurs seuils permettant une meilleure appréciation de la qualité du Technosol. Le critère se fait désormais au travers de la mesure de disponibilité en air dudit Technosol.

3. Conditions générales

Pour être reconnu comme Technosol "TP70" le produit, outre sa composition (70% de biochars certifiés *European Biochar Certification* (EBC) compostés avec des fumiers frais¹), doit satisfaire aux valeurs seuils **de 4 mesures physiques indépendantes**. Ces valeurs seuils classent les Technosols de « très satisfaisant » à « très défectueux ». Pour acceptation, le Technosol TP70 doit atteindre la valeur seuil définie pour chacune des quatre méthodes décrites ci-dessous.

¹ Se reporter au document détaillant la « Composition et Préparation du TP70 » – Groupe Sols et Substrats HEPIA

4. Protocoles & valeurs seuils

4.1. Prise d'échantillons

La prise d'échantillon doit se faire de façon aléatoire dans le lot testé préalablement homogénéisé. Lors des différentes mesures décrites ci-dessous, le substrat n'est ni broyé ni émietté.

4.2. Distribution granulométrique des agrégats

Méthode

La distribution granulométrique des agrégats est réalisée par tamisage selon la norme ISO 11464:2006. Pour cela, un sous échantillon représentatif du lot est récupéré afin d'obtenir cinq cent (500) grammes de TP70 sec à l'air (étuve 40°C jusqu'à poids constant). L'échantillon ne subit aucun traitement (ex. broyage ou séparation d'éléments). L'échantillon est ensuite tamisé dans un tamis de 1 mm jusqu'à poids constant.

Valeur seuil

La moyenne de trois répétitions de la distribution granulométrique des agrégats doit atteindre ou dépasser 40% d'agrégats supérieur à 1 mm.

4.3. Conductivité hydraulique à saturation

Méthode:

Cette méthode permet la détermination de la conductivité hydraulique K_{Sat} du Technosol par application d'une charge hydraulique constante sur une colonne de Technosol, après saturation. Ce système utilise en outre le principe du double anneau pour limiter les effets de bordure.

Le Technosol frais est placé, par couches de 5 cm, dans une colonne de 15.5 cm de diamètre et 40 cm de haut (Figure 1) dont le fond est tapissé d'une maille de 2 mm. L'écoulement est libre à la base de la colonne. Une lame d'eau d'épaisseur constante (1 cm) est maintenue sur l'ensemble de la colonne. Pour la partie externe (dite de garde) l'eau est apportée en circuit fermé et en continu, avec un dispositif de débordement. Un second

anneau, gradué de 7x15 cm (\varnothing x h), est inséré au centre de la colonne. L'eau est introduite manuellement dans l'anneau central en maintenant une lame constante de 1 cm à l'aide d'un bécher gradué. La quantité infiltrée est lue sur le bécher.

Après atteinte du régime permanent (débit constant), la conductivité à saturation est le résultat de la lame infiltrée dans l'anneau intérieur en mm en une minute en maintenant une charge constante.



Figure 1 – Méthode du double anneau pour mesure de perméabilité à saturation

Valeur seuil:

La conductivité hydraulique K_{Sat} du Technosol en moyenne de trois répétitions sur des colonnes différentes doit être supérieure ou égale à 2000 mm/h.

4.4. Stabilité des agrégats

Méthode

Ce dispositif de tamisage humide (*wet sieving apparatus (WSA)*- Eijkelkamp®) est utilisé pour déterminer la stabilité des agrégats d'un sol. Il s'agit d'un système d'agitation par va et vient dans l'eau. Il convient de se référer au protocole d'utilisation fourni par Eijkelkamp® (*Wet sieving apparatus Manual 08.13, 06-2022*), disponible sur leur site pour une bonne compréhension des manipulations.

Le protocole est ici repris et néanmoins légèrement modifié pour correspondre aux particularités du Technosol soit :

- Les tamis de 250 microns sont remplis de 4 grammes (poids sec 40°C) d'agrégats de taille supérieure à 5 mm de diamètre obtenus par tamisage ;
- Les agrégats sont légèrement réhumectés au pulvérisateur. On attend 5-10 min avant de les submerger ;
- Les tamis et récipients de pesée numérotés sont disposés dans le WSA ;
- Abaisser le support des tamis et ajouter de l'eau désionisée en suffisance de tel sorte que les agrégats soient complètement immergés ;
- Les agrégats subissent une lente agitation de 3 x 3 minutes dans de l'eau désionisée. Les agrégats instables se délitent, la fraction < 250 micromètres passe au travers des mailles du tamis et est collectée dans les récipients de pesée placés au-dessous ;
- Relever le support de tamis. Une fois que l'eau ne s'écoule plus, récupérer et conserver le set de récipients de pesées.
- Le processus est ensuite relancé dans 100 ml de solution de dispersion contenant 2g.l⁻¹ d'hexametaphosphate (Sd) (on utilise pour cela le 2^{ème} set de récipients de pesée numéroté) jusqu'à ce qu'il ne reste que des particules > 250 microns (ex : sable, racines, biochar) dans le tamis. Si nécessaire, fragmenter les agrégats restant à la main ou avec une tige à embout en caoutchouc. Il n'y a pas de temps de réaction standard pour cette procédure ;
- Relever le support de tamis. Une fois que la solution de dispersion ne s'écoule plus, récupérer les récipients de pesées.
- Les 2 sets de récipients ainsi que les éléments supérieurs à 250 microns (restés dans le tamis- pour bilan de masse) sont récoltés et séchés à 105°C jusqu'à poids constant.
- Le poids des matériaux sec est ensuite mesuré.
- La stabilité des agrégats est ensuite déterminée selon Eq. 1 et 2 :

La première étape vise à retirer 0.2 g du poids obtenu dans chacun des récipients contenant la solution de dispersion, soit ;

$$Sdf = Sd - 0.2 \quad (\text{Eq 1})$$

Avec : Sdf le poids de la solution de dispersion final, Sd : poids obtenu dans la solution de dispersion

$$Fs = \frac{Sdf}{Sdf + SH_2O} \quad (\text{Eq 2})$$

Avec : Fs : fraction stable, Sdf : poids final obtenu dans la solution de dispersion, SH_2O : poids obtenu dans la solution de H_2O



Figure 2 – Dispositif Eijklkamp de tamisage humide (WSA) pour la détermination de la stabilité des agrégats

Valeur seuil:

Les valeurs de stabilité (Fs) des agrégats doivent atteindre un seuil moyen supérieur à 0.90 pour trois répétitions.

4.5. Rétention en eau et disponibilité en air

Méthode

Le matériel utilisé est celui décrit dans la norme NF 13041 utilisée pour les supports de culture à laquelle il convient de se reporter pour un descriptif complet. L'échantillon de substrat est placé dans un cylindre (composé de deux anneaux assemblés ; ci-après anneaux inférieur/supérieur) dont la tare et le volume sont notés ($V1$). Le remplissage du cylindre se fait en veillant à empêcher la formation de vides d'air artificiels. Pour cela, remplir 2-3 cm du

cylindre puis soulever le cylindre de 4-5 cm et la lâcher à plat sur une table (5x).
Recommencer jusqu'à ce que tout le cylindre soit rempli.

Une fois rempli, l'échantillon est saturé en eau. Pour ce faire, le cylindre est placé dans un bac ensuite rempli progressivement d'eau jusqu'au niveau se situant 1 cm en dessous de l'anneau supérieur (il convient que le remplissage prenne environ 30 min). L'échantillon est laissé, en maintenant un niveau d'eau constant, durant 24 heures (maximum 36 heures). Le cylindre est ensuite retiré du bac et est placé sur une surface plane et stable. L'anneau supérieur est retiré avec précaution en le soulevant verticalement. À l'aide d'un couteau ou d'une règle, mettre à niveau avec le haut de l'anneau d'échantillon sans provoquer de compactage. Enregistrer la masse à saturation (m_2) contenue dans l'anneau inférieur. Placer ensuite ce même échantillon sur un bac à désorption à une pression de -10 hPa (pF1) de hauteur d'eau, mesurée à partir du milieu de l'anneau inférieur. S'assurer que le fond de l'anneau soit bien en contact avec le sable. Laisser l'échantillon durant 48h et noter m_3 . L'échantillon est ensuite séché à l'étuve (40°C) jusqu'à poids constant (m_1).

La teneur en eau à saturation est ensuite déterminée selon l'équation suivante :

$$W_s = \left(\frac{m_2 - m_1}{V_1} \right) * 100 \quad (\text{Eq 3})$$

La teneur en eau à pF1 est déterminée selon l'équation suivante :

$$W_p = \left(\frac{m_3 - m_1}{V_1} \right) * 100 \quad (\text{Eq 4})$$

La disponibilité en air est mesurée selon :

$$A_v = W_s - W_p \quad (\text{Eq 5})$$

A_v , disponibilité en air en pourcentage volumique, W_s : Teneur en eau volumique à saturation, W_p : Teneur en eau volumique après équilibrage à pF1, m_2 : masse à saturation, m_3 : masse après équilibrage à pF1, m_1 : masse sèche à l'air (40°C), V_1 : volume du cylindre inférieur

Valeur seuil

La différence de teneur en eau entre W_s et W_p , soit la disponibilité en air (A_v), doit être supérieure ou égale à 10% sur une moyenne de trois échantillons.

5. Synthèse

Tableau 1. Synthèse des valeurs seuil à atteindre pour chacune des 4 mesures physiques décrites.

Méthodes	Valeurs seuil
Distribution granulométrique des agrégats	≥ 40% d'agrégats supérieur à 1 mm
Conductivité hydraulique à saturation	≥ 2000 mm/h
Stabilité des agrégats	≥ 0.90
Disponibilité en air	≥ 10%

6. Détermination de normes physiques pour le Technosol TP 70

6.1. Rapport d'étude

Un mandat de la Ville de Lausanne via son Service des parcs et domaines traité par le groupe Sols et Technosols - Agronomie Haute École du Paysage, de l'Ingénierie et de l'Architecture - (HEPIA) HES-SO Genève

Responsable du projet: Pascal Boivin, Professeur

Réalisation: Marie Palman - collaboratrice scientifique

6.2. Contexte

Le Technosol TP70 est un sol artificiel (Technosol) mis au point pour différentes applications: support de culture, support de plantations, infiltration et épuration des eaux. Il est réalisé par compostage de biochars (à proportion de 70% v/v à la préparation) et d'engrais de ferme. Ce procédé permet d'activer les biochars, de donner au Technosol une structure lui offrant stabilité, réserve en eau et en air, et très grande perméabilité. La conception s'inscrit dans une logique vertueuse de recyclage des matériaux organiques, le carbone organique des biochars est stabilisé et les matières compostables permettent de charger en fertilisants d'origine naturelle le Technosol (pas de recours aux fertilisants minéraux).

Le TP70 a été d'abord conçu pour des applications d'épuration des eaux. Les études menées par la HES-SO (groupe Sols et Technosols de HEPIA et partenaires) ont montré que le TP70 présente une perméabilité de 2500 à 5000 mm h⁻¹, ainsi qu'une capacité remarquable de rétention des particules et des polluants dissous (ETM et organiques). Des applications variées apparaissent qui nécessitent de gros volumes et donc une filière de production adaptée.

Le principal intérêt de ce Technosol réside dans ses qualités physiques (perméabilité, faible gonflement, aération et stabilité physique au contact de l'eau). Si la qualité chimique est facilement déterminable par des analyses de routine et peut partiellement être garantie par

l'approvisionnement en matériaux normés, le protocole de fabrication doit également permettre d'atteindre la qualité physique attendue. Or il a été constaté après délégation de la fabrication à des tiers que des erreurs de préparation pouvaient entraîner de graves défauts de qualité physique. Dans une perspective d'industrialisation de la production, il est donc indispensable de disposer de valeurs de référence des propriétés physiques attendues, s'appuyant sur des méthodes de détermination suffisamment simples et démocratisées, permettant de valider ou rejeter la qualité d'un produit dénommé TP70.

La détermination de ces méthodes et valeurs est l'objet de ce travail, demandé et soutenu par la ville de Lausanne dans le cadre d'utilisation de TP70 en zone urbaine, pour des fosses de plantation infiltrantes, en visant une multifonctionnalité: contrôle des crues urbaines, épuration des eaux de chaussée et soutien au développement des plantations d'arbres.

7. Principes expérimentaux

Pour arriver à ces fins nous avons choisi d'utiliser une gamme de TP70 allant de «très satisfaisant» à «très défectueux» conservés de plusieurs préparations. Puis nous avons sélectionné les protocoles de mesures physiques susceptibles de permettre de bien discriminer les qualités ou défauts observés.

Les observations de défauts étaient les suivantes:

- Perméabilité bien en deçà des valeurs attendues
- Comportement très plastique du matériau au voisinage de la saturation: déstructuration, effondrement et tassement.

8. Lots de Technosols utilisés

Dans cette étude, six lots de TP70 ont été testés. Ces derniers sont présentés dans la Figure 1: LZ (A); A18 (B); A16 (C); CF (D); NoC0 (E); NoC1 (F).

9. Observations initiales

Les premiers problèmes ont été observés par un test de fluage dans une bassine. Ce test non normé permet d'évaluer la tenue dans l'eau du Technosol et illustre bien le problème posé. 500 g de TP70 non tamisé sont placés dans une bassine de dimensions 18 x 14 cm (diamètre x h). De l'eau est progressivement ajoutée jusqu'à saturation complète du Technosol. La bassine est ensuite inclinée à plus de 45° et le comportement du Technosol observé. Deux comportements nettement différenciés sont visibles sur la Figure 2: soit le Technosol maintient sa forme et sa position au fond du récipient dont seule l'eau s'écoulera lors de l'inclinaison (Figure 2A), soit le Technosol flue comme de la boue et s'écoule vers le bas de la bassine. Selon ce premier test, les différents Technosols se sont vus attribués des notes de 1 à 3 selon les critères suivants:

- Bonne stabilité (cat1): bonne tenue du Technosol, celui-ci, une fois incliné se maintient et seul l'eau s'écoule;
- Stabilité moyenne (cat2): qualité intermédiaire;
- Mauvaise Stabilité (cat3): le Technosol se transforme rapidement en boue, ne se maintient pas dans la pente et «ravine».

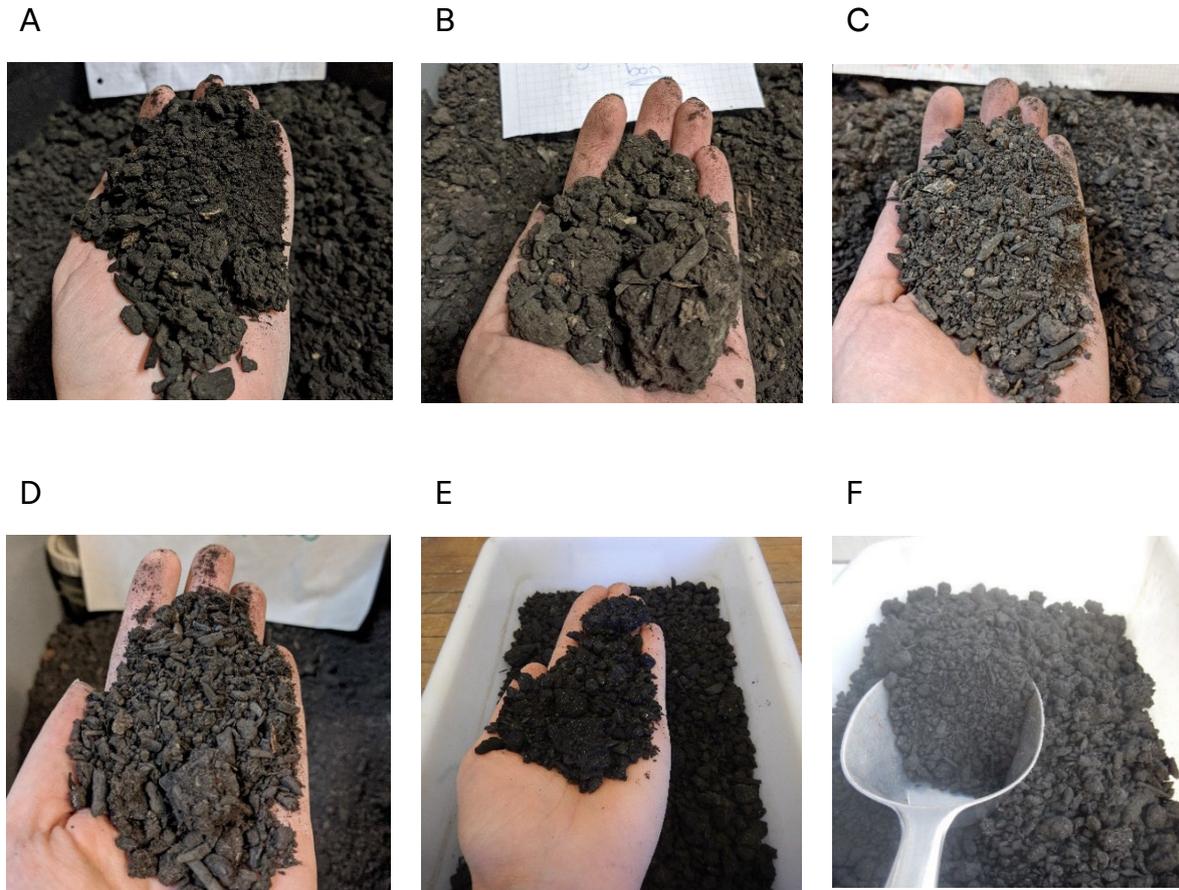


Figure 3 – Echantillons test de Technosol. A LZ; B A18; C A16; D CF; E NoC0 et F NoC1

Le Tableau 1 présente la catégorisation et les observations des 6 Technosols étudiés selon le test de la bassine.

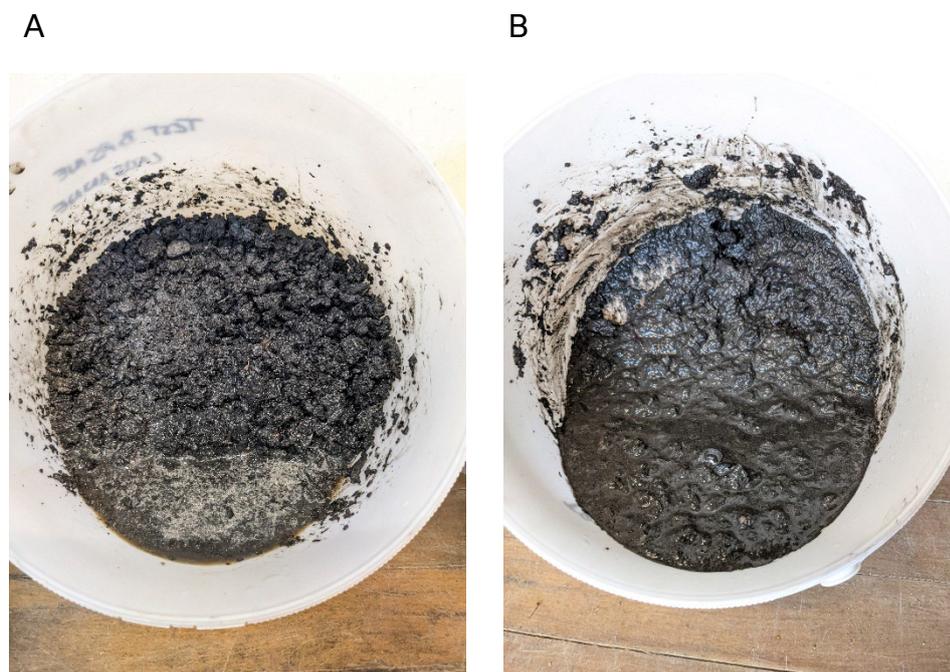


Figure 4 – Test bassin. A: le Technosol se maintient et seule l’eau s’écoule dans la pente (catégorie 1), en B: le Technosol flue et coule (catégorie 3)

Tableau 1 Classification des TP70 selon test de la bassin et observation liées

Lots

	Stabilité	Agrégation
LZ	Cat.1	Bonne
A16	Cat.2	Faible
A18	Cat.2	Faible
CF	Cat.3	Faible
NoC-0	Cat.1	Bonne
NoC -1	Cat.1	Bonne

10. Méthodes testées

Les méthodes testées devaient (i) être susceptibles de quantifier le comportement physique en relation avec les objectifs (perméabilité et stabilité) et les défauts observés (fluage, effondrement et dispersion), (ii) être suffisamment vulgarisées pour être employées par des laboratoires techniques et non pas être réservées à une expertise scientifique, (iii) de coût raisonnable et (iv) présenter des résultats clairement discriminants.

Les protocoles de physique des sols ou des matériaux non consolidés retenus ont été les suivants: distribution de taille des agrégats, stabilité des agrégats dans l'eau, limites d'Atterberg (plusieurs protocoles), rétention en eau, conductivité hydraulique à saturation.

11. Distribution de la taille des agrégats

Une courbe granulométrique de chaque Technosol a été réalisée par tamisage afin d'obtenir la distribution de taille de agrégats (ISO 11464:2006). Pour ce faire, 500g d'un sous échantillon représentatif, non broyé avant tamisage, sont séchés à l'étuve (40°C) jusqu'à poids constant puis tamisés dans une colonne de tamis selon 6 seuils: 0.04, 0.063, 0.125, 0.5, 1 et 2 mm. L'expérimentation est répétée trois fois.

12. Les limites d'Atterberg

Selon leur teneur en eau pondérale, les sols peuvent avoir différents états: solide, liquide ou plastique. La classification établie par Atterberg (1911) détermine les limites de liquidité (W_L), de plasticité (W_P) et de retrait (W_R) sur un sol tamisé à 400 μm (Figure 3).

L'indice de plasticité (I_p) est calculé en soustrayant la limite de plasticité à la limite de liquidité (Eq.1). Il permet d'évaluer la capacité du sol à changer de forme sans varier de volume. Il répond à la texture du sol: un I_p élevé est signe d'un excès d'argile dans le sol, une grande compressibilité et également une forte plasticité. L' I_p est généralement très influencé par W_L qui a la plus grande variation selon les types de sol (Cf, diagramme de plasticité de Casagrande 1953). L' I_p est exprimé en pourcentage pondéral, tout comme W_L et W_P

$$I_p = W_L - W_P \quad (\text{Eq.1})$$

12.1. Limite de liquidité

Le bol de Casagrande:

Cette technique est décrite dans les normes ISO 17892-12 (Organisation internationale de normalisation (ISO) 2017) et ASTM D 4318 (ASTM International 2000a). Le Technosol, tamisé (400 µm) et humidifié au préalable, est étalé dans la coupelle en une fine couche (10 mm) (Figure 4). L'outil à rainurer est ensuite utilisé pour réaliser une rainure dans la pâte de sol. Le bol est ensuite tapé contre le socle via une manivelle électronique. La limite de liquidité est égale à la teneur en eau provoquant une fermeture de la rainure après à 25 coups. Au minimum quatre teneurs en eau différentes sont testées pour établir la courbe.

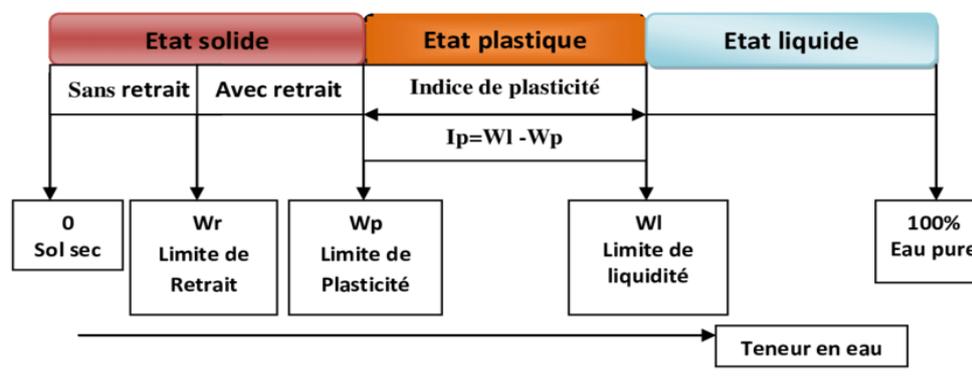


Figure 5 – Etats d'un sol selon sa teneur en eau et les limites d'Atterberg



Figure 6 – Détermination de la limite de liquidité: Bol de Casagrande

12.2. Pénétromètre à cône

La norme française NF P 94-052-1 (Association Française de Normalisation (AFNOR) 1995) ainsi que la norme ISO décrivent le protocole de détermination de la limite liquidité pour le pénétromètre à cône. Celle-ci consiste à mesurer l'enfoncement d'un cône (d'angle au sommet de 30°), sous son propre poids, dans un échantillon de sol remanié (tamisé à 400 microns) en un temps donné (5 s ± 1 s). La différence entre les deux positions (initiale et finale) définit son enfoncement. Cette manipulation est à faire plusieurs fois à un taux d'humidité différent afin de tracer une droite d'ajustement permettant ensuite de déterminer la teneur en eau à laquelle le cône de 30° s'enfonce de 17 mm (NF) ou 20 mm (ISO) en 5 s ± 1. C'est la norme ISO qui a été testée dans le cadre de cette étude. Ce test a été effectué sur 4 des 6 Technosols (A16, A18, CF et LZ).

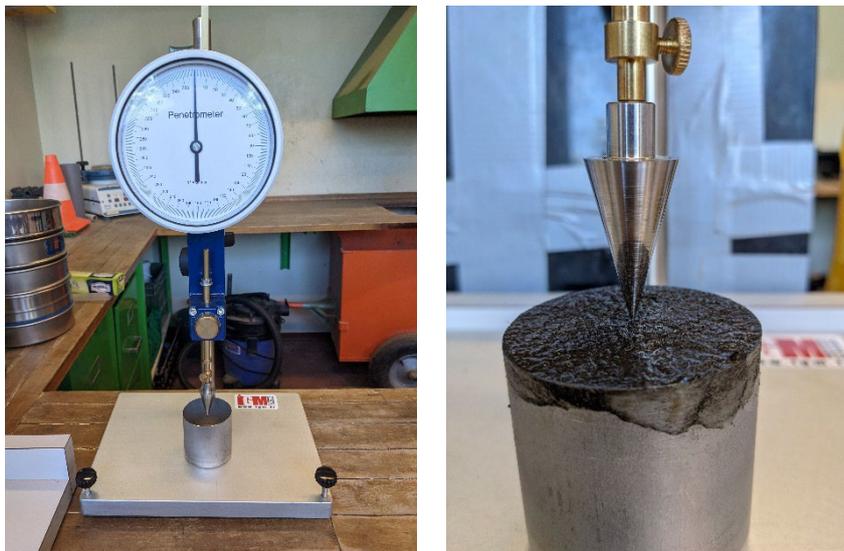


Figure 7 – Détermination de la limite de liquidité: Essais de mesure au pénétromètre à cône

12.3. Limite de plasticité

Résistance au cisaillement par scissomètre:

La norme américaine ASTM D4648 (ASTM International 2000b) et la norme anglaise BS 1377-7 (British Standards Institution (BSI) 1990) décrivent l'utilisation du scissomètre de laboratoire pour définir la résistance au cisaillement des sols. La lame de l'appareil (12.7 x 12.7 mm) est insérée dans un cylindre (50 x 45 mm) rempli de Technosol tamisé à 400 microns préalablement porté à pF 1 (potentiel matriciel de -10 hPa). Il s'agit ensuite de tourner la manivelle entraînant la lame dans l'échantillon jusqu'à ce que la rupture se fasse dans le sol (rotation de la lame). La vitesse de rotation de la lame, à un régime constant, doit être de 6° à 12° par minute selon la norme anglaise et de 60° à 90° par minute d'après la norme américaine. Le couple nécessaire au cisaillement est relevé puis la résistance résiduelle est ensuite soustraite du résultat qui est converti en résistance au cisaillement (kPa) grâce au coefficient spécifique au modèle de lame utilisé. Trois répétitions ont été effectuées par échantillon.

La résistance τ est obtenue grâce à la formule (Eq.2) avec K calculé en (Eq.3):

$$\tau(kPa) = (1000 * T)/K \quad (\text{Eq.2})$$

$$K(m^3) = \frac{\pi D^2 H}{2 * 10^9} \left[1 + \frac{D}{3H} \right] = 4,29010^{-6} m^3 \quad (\text{Eq.3})$$

Où T est le couple, résultant de la multiplication de la rotation angulaire maximale du ressort et du facteur de correction du ressort utilisé, K est une constante dépendant des dimensions de la lame, D est le diamètre mesuré de la lame (mm) et H est sa hauteur (mm).

12.4. Test du boudin

Les normes américaines ASTM D 4318 (ASTM International 2000a) et AASHTO T 90 00 (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2004) décrivent la méthode standard afin de déterminer la limite de plasticité d'un sol par la réalisation de boudins. La méthode consiste à humidifier le Technosol de sorte qu'il ne colle ni au bol dans lequel on fait le mélange, ni aux mains. Puis, le matériau (env. 1.5 g à 2 g) est roulé sous la forme d'un petit rouleau (boudin Figure 7) de 3 mm de diamètre entre la paume de la main et une surface plane et non poreuse. Ce dernier est progressivement asséché par les mesures de roulement et cassera une fois sa limite de plasticité atteinte. On note le poids de l'échantillon (M1). Ce dernier est ensuite séché à l'étuve (105°C jusqu'à poids constant-M2). La limite de plasticité est calculée selon la formule suivante (Eq.4):

$$\frac{M1 - M2}{M2} * 100 \quad (\text{Eq.4})$$

Le protocole a dû être légèrement adapté pour correspondre au comportement du Technosol TP70. Le diamètre accepté avant fissuration est de 5 mm environ. Vingt boudins sont réalisés sur chaque Technosol avec 3 répétitions (soit 60 boudins/Technosol au total) pour en définir la limite de plasticité. L'essai a été répété trois fois par le même opérateur puis effectué une fois par un autre dans le but d'observer la variabilité des résultats. Les valeurs aberrantes (plus de 2x l'écart-type) sont retirées du jeu de données.



Figure 8 – Limite de plasticité: Test du boudin

13. Conductivité hydraulique à saturation sur colonne avec anneau de garde

Cette méthode permet la détermination de la conductivité hydraulique à saturation K_{Sat} du Technosol par application d'une charge hydraulique constante sur une colonne de Technosol, après saturation. Ce système utilise en outre le principe du double anneau pour limiter les effets de bordure. Le Technosol frais est placé, par couches de 5 cm, dans une colonne de 15.5 cm de diamètre et 40 cm de haut (Figure 9) dont le fond est assuré par une grille à maille de 2 mm. L'écoulement est libre à la base de la colonne. Une lame d'eau d'épaisseur constante (1 cm) est maintenue sur l'ensemble de la colonne. Pour la partie externe (dite de garde) l'eau est apportée en circuit fermé et en continu, avec un dispositif de débordement. Un second anneau, gradué de 7x15 cm (\emptyset x h), est inséré au centre de la colonne. L'eau y est introduite manuellement en maintenant une lame constante de 1 cm à l'aide d'un bécher gradué. La quantité infiltrée au cours du temps est lue sur le bécher. Après atteinte du régime permanent (débit constant), la conductivité à saturation est le résultat de la lame infiltrée dans l'anneau intérieur en mm en une minute en maintenant une charge constante. Trois répétitions sur des colonnes différentes ont été réalisées sur chacun des Technosols (hormis NoC1).



Figure 9 – Méthode du double anneau pour mesure de perméabilité à saturation

14. Stabilité des agrégats dans l'eau

Ce dispositif de tamisage humide (*wet sieving apparatus (WSA)*- Eijkelkamp®) est utilisé pour déterminer la stabilité des agrégats d'un sol. Il s'agit d'un système d'agitation par va et vient dans l'eau. Le protocole d'utilisation fourni par Eijkelkamp® est légèrement modifié pour correspondre aux particularités du Technosol soit:

- Les tamis de 250 microns sont remplis de 4 grammes (poids sec 40°) d'agrégats de taille supérieure à 5 mm de diamètre obtenus par tamisage. Après avoir été légèrement réhumectés au pulvérisateur, ces agrégats sont disposés dans le tamis.
- Chaque tamis est disposé dans le WSA et les agrégats subissent une lente agitation de 3 x 3 minutes dans de l'eau désionisée. Les agrégats instables se délitent, la fraction < 250 micromètres passe au travers des mailles du tamis, et est collectée dans les récipients remplis d'eau placé au-dessous (on note SH₂O). Le processus est ensuite relancé pour 15 minutes dans une solution de dispersion de 2g/l d'hexametaphosphate (Sd). Les 2 sets de récipients ainsi que les éléments supérieurs à 250 microns (restés dans le tamis) sont récoltés et séchés à 105°C jusqu'à poids constant. La stabilité des agrégats est ensuite déterminée selon (Eq 5):

$$F_s = \frac{S_d}{S_d + SH_2O} \quad (\text{Eq 5})$$

Avec F_s : fraction stable, S_d : poids obtenu dans la solution de dispersion, SH_2O : poids obtenu dans la solution de H₂O



Figure 10 – Dispositif Eijkelkamp de tamisage humide pour la détermination de la stabilité des agrégats

15. Capacité de rétention en eau

Le matériel utilisé est celui décrit dans la norme NF 13041 utilisée pour les supports de culture à laquelle il convient de se reporter pour un descriptif complet. Brièvement, l'échantillon de Technosol est placé dans un cylindre (composé de deux anneaux assemblés ; ci-après anneaux inférieur et supérieur, respectivement) dont la tare et le volume sont notés (V_1). Le remplissage du cylindre, se fait en veillant à empêcher la formation de vides d'air artificiels. Pour ce faire, remplir 2-3 cm du cylindre puis soulever le cylindre de 4-5 cm et la lâcher à plat sur une table (5x). Recommencer jusqu'à ce que tout le cylindre soit rempli. Une fois rempli, l'échantillon est saturé en eau. Pour ce faire, le cylindre est placé dans un bac ensuite rempli progressivement d'eau jusqu'au niveau se situant 1 cm en dessous du cylindre supérieur. L'échantillon est laissé, en maintenant un niveau d'eau constant, durant un maximum de 36 heures. Le cylindre est ensuite retiré du bac et est placé sur une surface plane et stable. L'anneau supérieur est retiré avec précaution en le soulevant verticalement. À l'aide d'un couteau ou d'une règle, mettre à niveau avec le haut de l'anneau d'échantillon sans provoquer de compactage. Enregistrer la masse à saturation m_2 contenue dans l'anneau inférieur. Laisser ensuite ressuyer ce même échantillon durant 12h et mesurer la nouvelle masse, après ressuyage, m_3 . L'échantillon est ensuite séché à l'étuve (40°C) jusqu'à mesure d'un poids constant m_1 . Deux répliques par ont été effectués pour cette mesure.

La teneur en eau à saturation est ensuite déterminée selon l'équation suivante:

$$W_s = \left(\frac{m_2 - m_1}{V_1} \right) * 100 \quad (\text{Eq 6})$$

La teneur en eau après ressuyage est déterminée selon l'équation suivante:

$$W_r = \left(\frac{m_3 - m_1}{V_1} \right) * 100 \quad (\text{Eq 7})$$

Avec W_s : Teneur en eau à saturation, W_r : Teneur en eau après ressuyage, m_2 : masse à saturation, m_3 : masse après ressuyage, m_1 : masse sèche à l'air (40°C), V_1 : volume du cylindre inférieur

16. Résultats

16.1. Distribution granulométrique des agrégats

Les Figure 9 A et B présentent les résultats de la distribution granulométrique des agrégats des 6 Technosols testés. Nous pouvons noter:

- LZ et NoC 0 et 1 sont trois Technosols qui se distinguent des autres par une forte teneur en éléments > 1 mm (moyenne de 76%). Ce qui n'est pas le cas des autres Technosols qui présentent plutôt une répartition inverse avec 30% d'éléments supérieur à 1mm;
- Les Technosols CF, A16 et A18 ont une répartition granulométrique inverse avec une moyenne d'éléments supérieurs à 1mm de 66.8%.

Les Technosols LZ et NoC présentent une meilleure agrégation en comparaison des autres Technosols. La granulométrie des agrégats permet de séparer les lots de cat.1 des deux autres par la limite minimale de 40% d'agrégats supérieurs à 1 mm.

17. Limites d'Atterberg

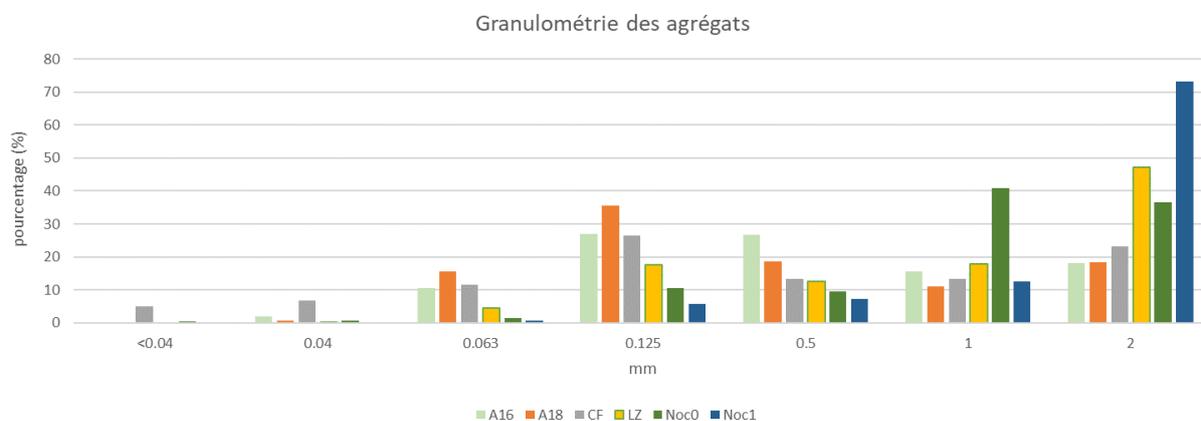
17.1. Limite de plasticité

Test du boudin:

Ces essais montrent des résultats concluants et cohérents. Cinq des six Technosols ont été testés: CF, LZ, A16, A18 et NoC0- (le lot NoC1 n'ayant pas encore été livré lors de l'analyse). Le nombre d'échantillons réalisés par TP70 et la moyenne de teneur en eau à laquelle les boudins se rompent est détaillé dans le Tableau 2.

Tableau 2 - Test du boudin: nombre d'échantillons réalisés par TP70 et médiane et teneur en eau gravimétrique obtenue en %

TP70	N échantillons	Moyenne (%)	Ecart-type
A16	44	70.59%	1.824
A18	93	65.73%	3.305
CF	96	89.01%	6.608
LZ	88	99.64%	4.539
NoC- 0	36	99.34%	4.127



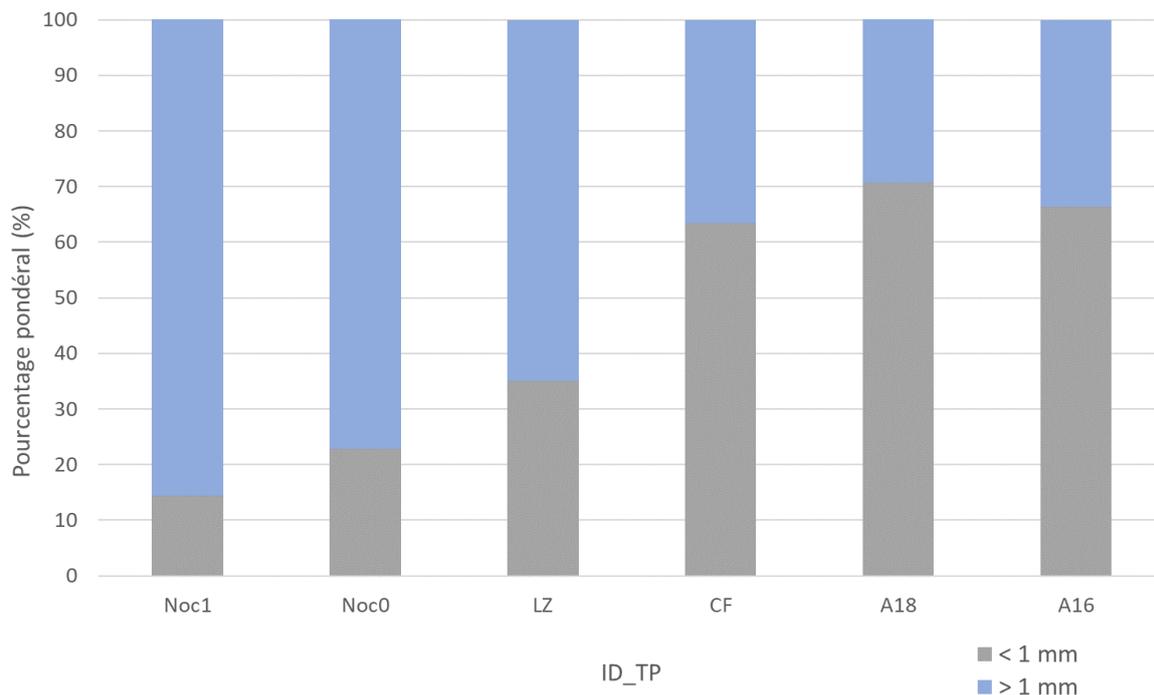


Figure 11 – Granulométrie de cinq différents Technosols selon, A: 7 tailles granulométriques (<0.04, 0.04, 0.063, 0.125, 0.5, 1 et 2 mm), B: réparti plus grand ou plus petit que 1mm.

La Figure 11 illustre, par une boîte à moustache, les limites de plasticité par test du boudin des différents Technosols. Ces dernières oscillent entre 58.9 et 107.7% (min et max). On peut noter:

- Les Technosols LZ et NoC0 se démarquent par une limite de plasticité supérieur à 99%;
- CF, montre une moyenne intermédiaire de 89%;
- Les Technosols A16 et A18 présentent quant à eux une moyenne relativement basse entre 65 et 70%.

Les médianes sont statistiquement différentes les unes des autres (Test non paramétrique Kruskal-Wallis, $p=0.000$) hormis celles de LZ et Noc0 (Mann-Whitney $p= 0.787$). Les résultats montrent cependant dans leur majorité des différences significatives entre les opérateurs (Test de Dunn).

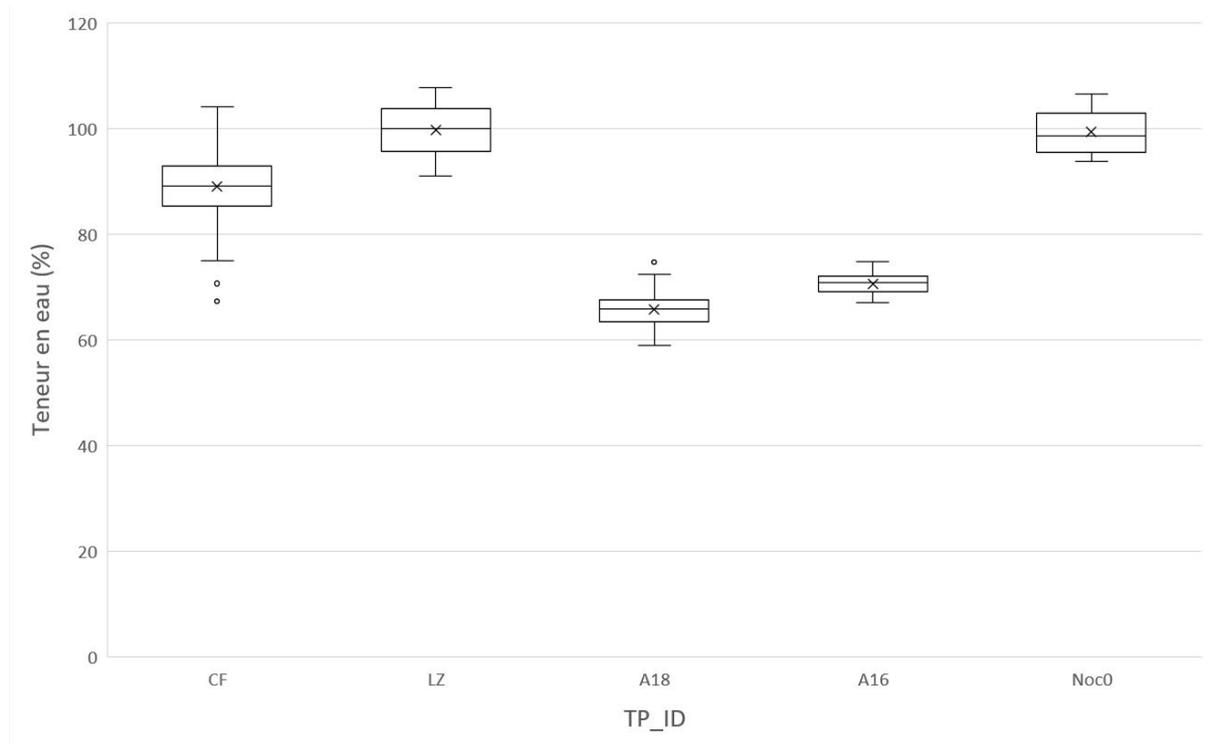


Figure 12 – Limite de plasticité, test du boudin sur cinq Technosols: CF, LZ, A16 et A18 Noc-0-

Si la méthode plasticité au boudin ne permet pas de retrouver le classement réalisé par le test de la bassine, un seuil de plasticité supérieur à 99% permettra néanmoins de séparer les lots cat1 des autres Technosols. Cependant les écarts demeurent faibles et la technique demande beaucoup de pratique pour être maîtrisée.

17.2. Limite de liquidité

Tant la méthode du pénétromètre à cône que le bol de Casagrande n’ont pas donné de résultats concluants. La raison principale est un comportement thixotrope du Technosol. Ce phénomène est un passage de l’état solide (au repos) à liquide sous l’effet d’une contrainte mécanique (Figure 13). Ce comportement a eu pour conséquence de rendre particulièrement difficile le tracé de la droite d’ajustement ($R^2 < 1$, hormis sur Agri16 avec r^2 0.77) pour la méthode au cône de pénétration. En ce qui concerne le bol de Casagrande, les résultats ne sont pas reproductibles. Ces deux méthodes ont été rejetées et ne sont pas détaillées ici.



Figure 13 – TP70 montrant un comportement thixotrope après vibration

17.3. Résistance au cisaillement par scissomètre

Cette méthode de qualification n'a donné aucun résultat concluant sur des Technosols tamisés à 400 μ m ou à 2 mm. La vitesse de rotation selon la norme Anglaise n'a pas permis de détecter de décrochement de la lame dans les échantillons et la norme Américaine ne montre pas de résultats reproductibles (sur le même échantillon ou entre les différents cylindres de même TP). La droite d'ajustement présente elle aussi un R2 très faible, ne permettant aucune détermination du seuil. Le comportement thixotrope en est probablement la cause. La méthode du scissomètre a été rejetée.

17.4. Résultats des Limites d'Atterberg

Les méthodologies utilisées dans détermination des limites d'Atterberg n'ont pas apporté de résultats probants. Seule la limite de plasticité, via le test du boudin, donne des résultats acceptables. Les limites de liquidité n'ont pas pu être déterminées notamment en raison du fort comportement thixotrope du Technosol. Empêchant ainsi la détermination d'un indice de plasticité. Ces analyses ont montré la nécessité de travailler sur un matériau non tamisé.

18. Conductivité hydraulique à saturation

Les mesures de conductivité hydraulique à saturation montrent de très larges écarts entre les Technosols. Les moyennes (3 répétitions) varient de 298 mm/h (Agri18) à plus de 7000 mm/h pour le Technosol LZ (Figure 12). Les valeurs mesurées sur le Technosol LZ sont particulièrement élevées (bien au-delà des valeurs attendues). Ce Technosol, largement composé de gros agrégats, permet une infiltration de l'eau très rapide (large présence de vides). Rappelons que les Technosols sont placés « intacts » dans le dispositif de mesure (pas de tamisage ni de tassement), et donc la présence de gros agrégats engendre des pores grossiers entre les agrégats. Sa forte perméabilité se différencie statistiquement de tous les autres Technosols (A). Les Technosols Noc0, Noc1 et A16 sont regroupés sous la même lettre (B) et ne montre pas de différences significatives en eux. Un troisième groupe (C), avec une moyenne inférieure à 1000 mm/h est composé des Technosols CF et A18.

Une limite de 2000 mm/h représente une infiltration au moins 200 fois supérieur à celle d'une prairie de qualité. En utilisant ce seuil, trois Technosols se démarquent, soit NoC (lot 0 et 1) et LZ. A16 n'est pas loin avec une moyenne globale de 1684.8 mm/h. A18 et CF sont sous le seuil des 1000 mm/h avec une moyenne respectivement de 298.3 et 712.4 mm/h.

18.1. Résultat de conductivité hydraulique à saturation

La mesure de la conductivité hydraulique à saturation permet de classer sans ambiguïté et de manière relativement simple la qualité des lots TP70. La valeur seuil entre les bons lots et les autres est placée à 2000 mm/h.

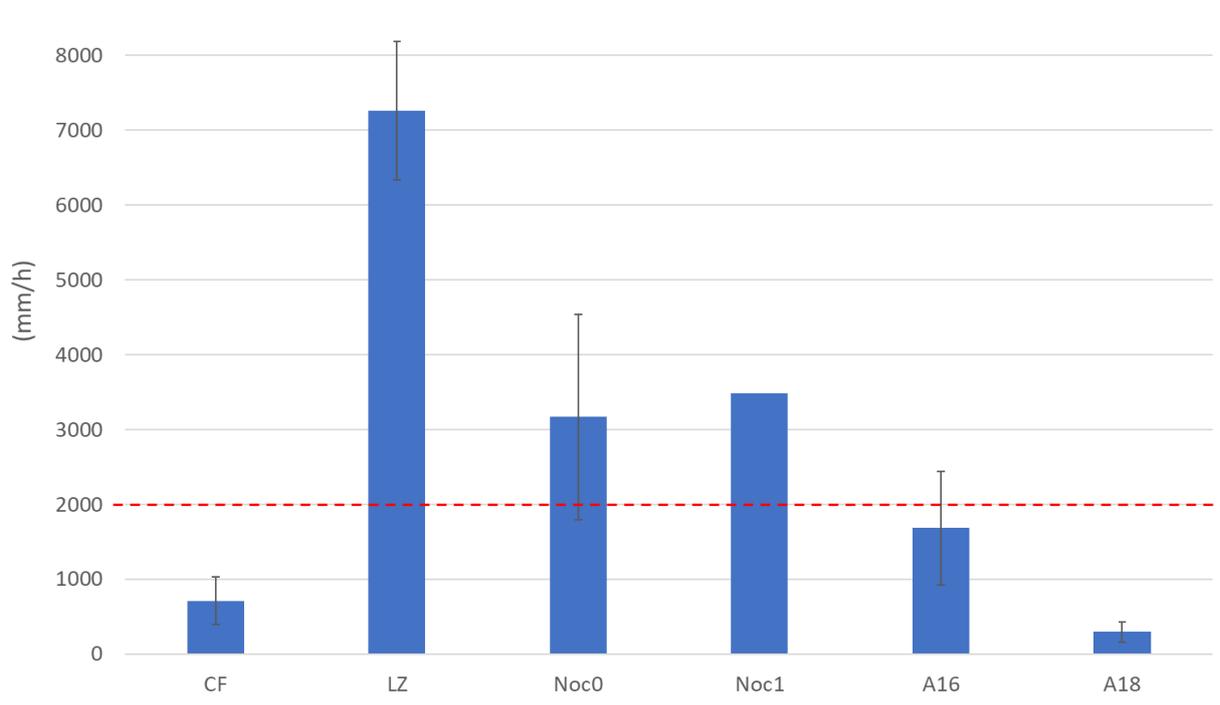


Figure 14 – Perméabilité à saturation basée sur la méthode du double anneau, des 6 Technosols tests. Les groupes ne partageant pas les mêmes lettres montrent des différences significatives (Tuckey, 95% de niveau de confiance).

19. Stabilité des agrégats

La mesure de la stabilité des agrégats est présentée en Figure 13 sous la forme de boîte à moustache. L'indice de stabilité est en moyenne de 0.81, 0.72, 0.89, 0.95, 0.98 et 0.93 pour A16, A18, CF, LZ NoC1 et NoC0, respectivement. Les analyses statistiques (Kruskal-Wallis: $P=0.028$), montrent des moyennes statistiquement différentes les unes des autres (Tuckey, niveau de confiance 95%). Deux groupes se distinguent, A16/A18 et CF (B) et LZ, CF, Novo 1 et 2.

Les Technosols NoC1 et 0 présentent une moyenne supérieure à 0.9 puis CFF, avec 0.89 n'est pas loin. Ce dernier cas est intéressant car cette valeur, relativement élevée, est probablement liée à la présence (ajout) de billes d'argile (bentonite – encore visible) dans le Technosol CF. Ces dernières sont encore présentes sous forme d'agrégats solides dans le Technosols et influence ainsi les valeurs déterminées, bien que leur présence ne soit pas souhaitable. Les barrières analytiques doivent dans ce cas faire office de tri notamment en ce qui concerne le taux d'argile présent dans les Technosols.

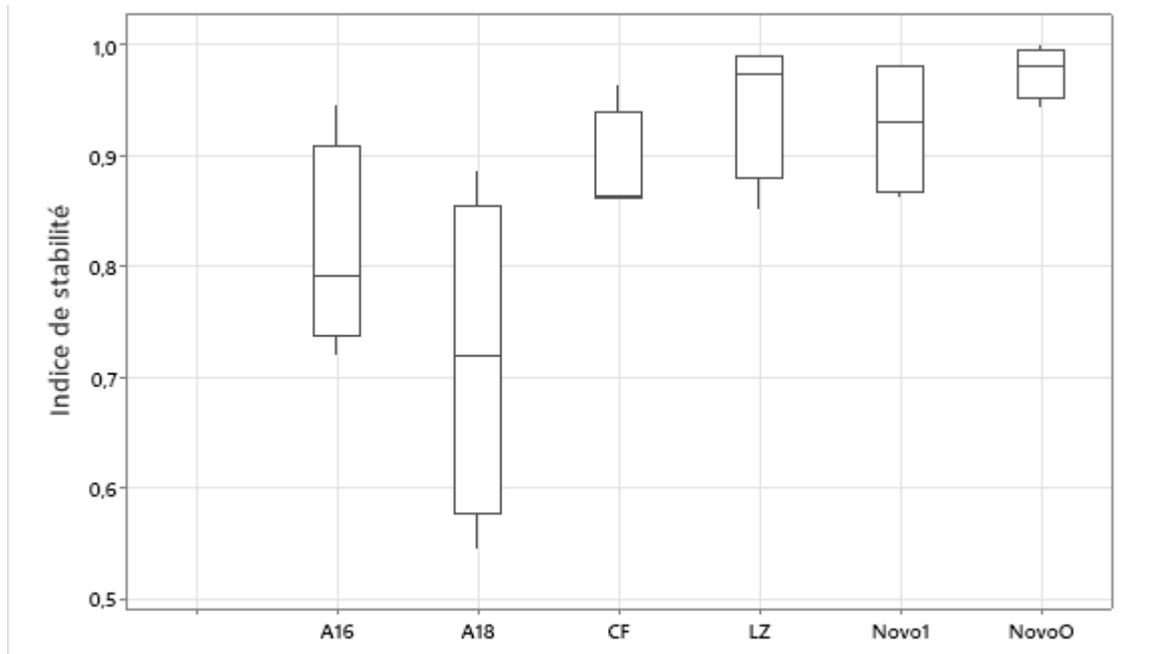


Figure 15 – Mesure de l'indice de stabilité des agrégats sur 6 Technosols TP70.

19.1. Résultats de stabilité des agrégats dans l'eau

Suite à ces tests, un seuil médian supérieur à 0.90 permet de séparer les qualités des Technosols.

20. Capacité de rétention en eau

La Figure 14 présente les teneurs en eau à saturation ainsi que celles après ressuyage des différents TP70 sous la forme de boîte à moustache. Les teneurs en eau moyenne à saturation varient de 67.82 à 77.36% et celles après ressuyage affichent des valeurs de 58.84 à 67.82%.

Cette méthode met en évidence les Technosols ayant du mal à se ressuyer et restant fortement engorgé. Nous nous concentrerons donc sur les valeurs de rétention en eau après ressuyage. La Figure 14B permet aisément la distinction de deux groupes. Un premier montrant des valeurs de teneur en eau après ressuyage inférieures à 65% et un second avec des valeurs au-delà de ce seuil.

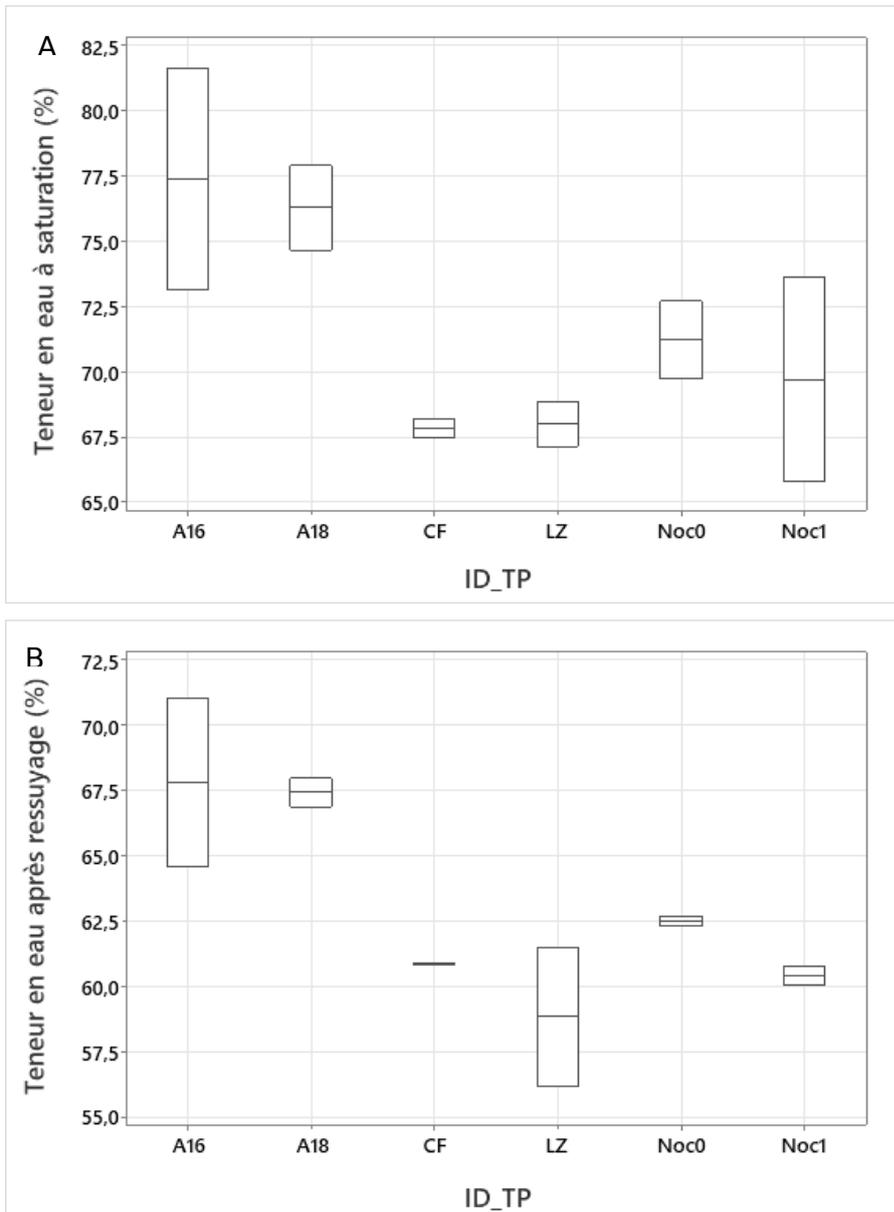


Figure 16 – Teneur en eau volumique à saturation (A) et après ressuyage (B) sur les 6 Technosols TP70.

20.1. Résultats des rétentions en eau:

Suite à ces résultats, nous proposons un seuil de teneur en eau après ressuyage égale ou inférieure à 65% avec un écart-type inférieur à 5.

21. Conclusion

Compte tenu des résultats obtenus, il est proposé pour garantir la qualité et donc l'acceptabilité d'un Technosol dénommé TP70, outre les propriétés de composition (70% de biochars certifiés European Biochar Certification (EBC) compostés avec des fumiers et déchets végétaux frais¹), que produit obtenu satisfasse aux valeurs seuil **de 4 mesures physiques indépendantes**. Ces valeurs seuils classent les Technosols de « très satisfaisant » à « très défectueux ». Pour acceptation, le Technosol TP70 doit atteindre la valeur seuil définie pour chacune des quatre méthodes décrites ci-dessous.

Distribution granulométrique des agrégats (ISO 11464:2006). La distribution granulométrique des agrégats doit atteindre ou dépasser en moyenne de trois répétitions 40% d'agrégats supérieurs à 1 mm sur trois répétitions.

Conductivité hydraulique à saturation (méthode sur colonne saturée avec anneau de garde). La conductivité hydraulique à saturation du Technosol en moyenne de trois répétitions doit être supérieure ou égale à 2000 mm/h.

Stabilité des agrégats (dispositif de tamisage humide – *wet sieving apparatus (WSA)*- Eijkelkamp®). La valeur de stabilité des agrégats doit atteindre pour trois répétitions un seuil médian supérieur à 0.90.

Rétention en eau norme NF 13041. La teneur en eau après ressuyage doit être égale ou inférieure à 65%. L'écart-type sur la moyenne de l'échantillon doit être inférieur à 5.

22. Bibliographie

Atterberg, A. (1911). Die Plastizität der Tone. Int.Mitt. Bodenk. Verlag für Fachliteratur, Berlin: 10 – 43

Casagrande L. (1953) Electro-osmosis in soils, geotechnique, Vol. 3, N°1

ⁱ Se reporter au document détaillant la «Composition et Préparation du TP70» – Groupe Sols et Substrats
HEPIA