

TEST DE L'EFFICACITÉ DE TROIS PISTES DE PROTECTION DES SOLS SUR CHANTIER À PRÉSERVER LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS

RAPPORT TECHNIQUE



Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Département de la
construction, Génie Civil

Fabienne Favre Boivin, professeur HES

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, hepia,
Groupe Sols et Substrats

Frédéric Lamy, collaborateur scientifique

Lionel Chabbey, chargé d'enseignement

Nicolas Freyre, assistant

Pascal Boivin, professeur HES

Cette étude est une étude conjointe des hautes écoles de suisse occidentales de Fribourg et de Genève, Haute Ecole d'ingénieurs et d'architectes, département de la construction, Génie Civil et Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, hepia, Groupe Sols et Substrats.

Cette étude a été réalisée avec le soutien des organismes suivants :

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Alpiq

Armasuisse

Fédération Fribourgeoise des Entrepreneurs (FFE)

Gaznat

Entreprise JPF

Entreprise Sagerime SA

Entreprise Terra Firma System LTD

Table des matières

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Résumé..... | 4 |
| Objectifs..... | 5 |
| Matériel et méthodes..... | 5 |
| Site d'étude | 5 |
| Protocole | 5 |
| Analyses..... | 6 |
| Résultats et discussion | 8 |
| Contrôle de l'état hydrique | 8 |
| Etat initial : caractéristiques de la parcelle..... | 8 |
| Etat final : Impacts du passage des engins de chantier sur les propriétés des sols | 9 |
| Interprétation et Conclusions..... | 17 |
| Recommandations..... | 17 |
| Bibliographie..... | 18 |
| Annexes | 18 |

Résumé

L'efficacité à préserver les propriétés physiques des sols sous piste de chantier de trois systèmes, la piste Durabase[®], la piste en rondins et la piste en grave, a été déterminée sur un essai de roulement en charge. Le test a été conduit sur un sol agricole en bon état et de faible densité apparente initiale. Les impacts sur la densité apparente, la porosité et la réserve en eau du sol ont été observés, après le passage d'engins de chantier sur chacune des pistes de protection, en fonction de la profondeur (deux profondeurs, 5 et 25 cm) et de l'état d'humidité du sol (quatre potentiels matriciels). Les résultats montrent une légère compaction identique quelle que soit la piste de protection utilisée, sachant que la charge sous rondins était environ 10x inférieure. Dans les conditions de l'expérience, l'humidité du sol n'a pas eu d'influence sur le degré de compaction. La variabilité spatiale de la teneur en matière organique sur la parcelle expérimentale permet de mettre en évidence que la matière organique est un facteur prépondérant de la résistance à la compaction du sol, la compaction étant inversement proportionnelle à la teneur en carbone organique (humus).

Objectifs

Les objectifs de cette étude sont de tester trois types de pistes de protection des sols pour engins de chantier tel qu'ils sont utilisés couramment dans la pratique: 1) la piste de grave (50 cm d'épaisseur de grave 2 après roulement, qui fait référence aujourd'hui dans les milieux de la protection des sols), 2) la piste DURABASE[®], et 3) la piste en rondins. Les deux premières pistes sont utilisées par tout type d'engins alors que le troisième type est utilisé essentiellement par des engins à chenille et donc avec des charges plus faibles. L'évaluation sera effectuée par rapport au degré de compaction du sol après passage d'engins de chantier sur les trois pistes. Le degré de compaction sera déterminé en fonction de la profondeur (5 et 25 cm) et de l'humidité initiale du sol (mesurée par le potentiel matriciel du sol). Pour l'interprétation on tiendra compte des variations des teneurs en constituants fins (argile, limon et matière organique).

Matériel et méthodes

Site d'étude

L'étude a été réalisée sur une parcelle agricole située dans le canton de Fribourg (Suisse), à Grangeneuve. Il s'agit d'un sol brun sur dépôts alluviaux dont l'horizon de surface est de texture limono-sableuse (17.6 % d'argile, 21.1 % de limons fins, 13.9 % de limons grossiers, 24.5 % de sables fins et 22.9 % de sables grossiers) et ayant une teneur en matière organique moyenne de 4.2 %. Le sol contient 8 % (v/v) d'éléments grossiers en moyenne. Il ne présente pas de signes de compaction hormis des ornières de roulement peu profondes dont le tracé a été relevé.

Protocole

Trois bandes de 40 mètres de long sur 5 mètres de large, délimitées sur la parcelle, ont servi de surface d'essai. Chaque bande a été séparée en 4 zones portées à 4 humidités différentes (Figure 1), ce qui fait 12 modalités. Les trois bandes correspondent aux trois systèmes de pistes de chantier: 1) Grave (G), 2) Durabase[®] (D) et 3) Rondins (R). Les 4 zones d'humidité sont obtenues par des irrigations successives pour atteindre des valeurs de potentiel matriciel aussi proches que possible de: 1) >-1.5 cb, 2) -10 cb, 3) -20 cb et 4) -30 cb. Elles sont notées respectivement zone 0, 1, 2 et 3. Les observations sont effectuées à deux profondeurs, 5 et 25 cm.

Trois échantillons de sol non remanié ont été prélevés pour chacun des 12 modalités avant le passage des engins (état initial), soit 72 échantillons au total pour les deux profondeurs.

Le sol des parcelles a été porté à l'état hydrique souhaité par des irrigations successives. L'état hydrique de la parcelle est caractérisé par son potentiel matriciel suivi à l'aide de tensiomètres (disposés sur chaque zone à 5 et 25 cm de profondeur) et par des sondes d'humidité Watermark[®] (disposées à 25 cm de profondeur). Un tensiomètre par zone et par profondeur a été installé et 3 sondes Watermark[®] par zone à 25 cm de profondeur uniquement. Une fois la valeur cible de potentiel matriciel atteinte, les parcelles ont été couvertes jusqu'au passage des machines pour éviter le dessèchement. Les tensiomètres ont été

enlevés avant l'installation des pistes en grave et Durabase®. Les sondes Watermark®, moins fragiles, ont été maintenues durant toute l'expérimentation sur les trois parcelles.

Les ornières pré existantes (dues aux derniers travaux agricoles) ont été repérées et cartographiées, de façon à éviter ces zones lors des prélèvements initiaux et post-roulement.

Les pistes de chantier ont été posées dans les règles de l'art, sans passage d'engins sur le sol non protégé. Les plaques en polyéthylène qui constituent le système Durabase® ont été solidarisées par deux goupilles sur quatre disponibles. Les matelas de rondins étaient lâches, chaque rondin étant distant d'environ 20 cm du suivant. La piste de grave 2 déposée sur un géotextile, faisait 50 cm d'épaisseur après roulement, selon les règles en vigueur dans les milieux de la protection des sols.

Un camion Man de 3 essieux, chargé à 26 tonnes a effectué 6 allers-retours sur les pistes Durabase® et en grave. Sur la piste en rondin, a priori non dédiée aux engins à roues, une pelleteuse Liebherr sur chenilles de 23,4 tonnes a effectué 6 allers-retours.

La pression exercée au sol sous les chenilles de la pelleteuse tient compte du poids propre de l'engin sans bras de levier exercé par le soulèvement d'une charge dans le godet. Elle est de 0.48 kg.cm^{-2} .

Les pressions exercées au sol par le camion varient d'un essieu à l'autre et selon le type de pneumatique utilisé. Le camion Man utilisé pour les tests est équipé de la façon suivante : 2 roues à l'avant (385/55 R22.5 (largeur 385mm, 1012mm diamètre nominal, 967mm diamètre sous charge) gonflée à 9 bars de pression, 4 roues à l'essieu du milieu (même type qu'à l'avant) gonflée à 8.5 bars de pression, et 2 roues à l'essieu arrière 315/70 R22.5 (largeur 315 mm, 1032 mm diamètre nominal, 986mm diamètre sous charge) gonflée à 9 bars de pression. Les charges maximales pouvant être reprises par les essieux (sous l'hypothèse d'un camion pleinement chargé) sont de 9 tonnes sur l'essieu avant, 13 tonnes sur l'essieu du milieu et 7.5 tonnes sur l'essieu arrière.

Le calcul de la répartition des charges au sol sous engins à roue selon le guide édicté par l'office fédéral de l'environnement (OFEFP, 2001) montre que les pressions exercées sur le sol par le camion Mann chargé à 26 tonnes sont de 4.5 kg.cm^{-2} dans le cas le plus défavorable.

Après le passage des engins de chantier, deux échantillons de sol non remaniés ont été prélevés sur chaque placette correspondant à une modalité (état final), aux deux profondeurs, soit 48 échantillons. Ces deux échantillons ont été prélevés à 1 mètre de distance du lieu de prélèvement initial. Les analyses ont donc porté sur 120 échantillons au total.

Analyses

Sur chacun des échantillons, les courbes de retrait ont été analysées, et les paramètres suivants ont donc été déterminés : 1) Densité apparente à -10 hPa (appelée ici densité apparente), 2) Densité apparente à l'état sec, 3) Teneur en eau à -10 hPa, 4) Teneur en air à -10 hPa, 5) Distribution de taille des pores et 6) Teneur en matière organique (par analyse au dichromate de Potassium). La granulométrie 5 fractions a aussi été déterminée sur un échantillon de l'état initial de chacun des 24 s.

Les densités apparentes sont déterminées à un potentiel matriciel identique pour chaque échantillon et donc chaque (-10 hPa). Ce qui permet de s'affranchir des phénomènes de gonflement-retrait des sols liés à l'état d'humidité pour comparer les s entre eux.

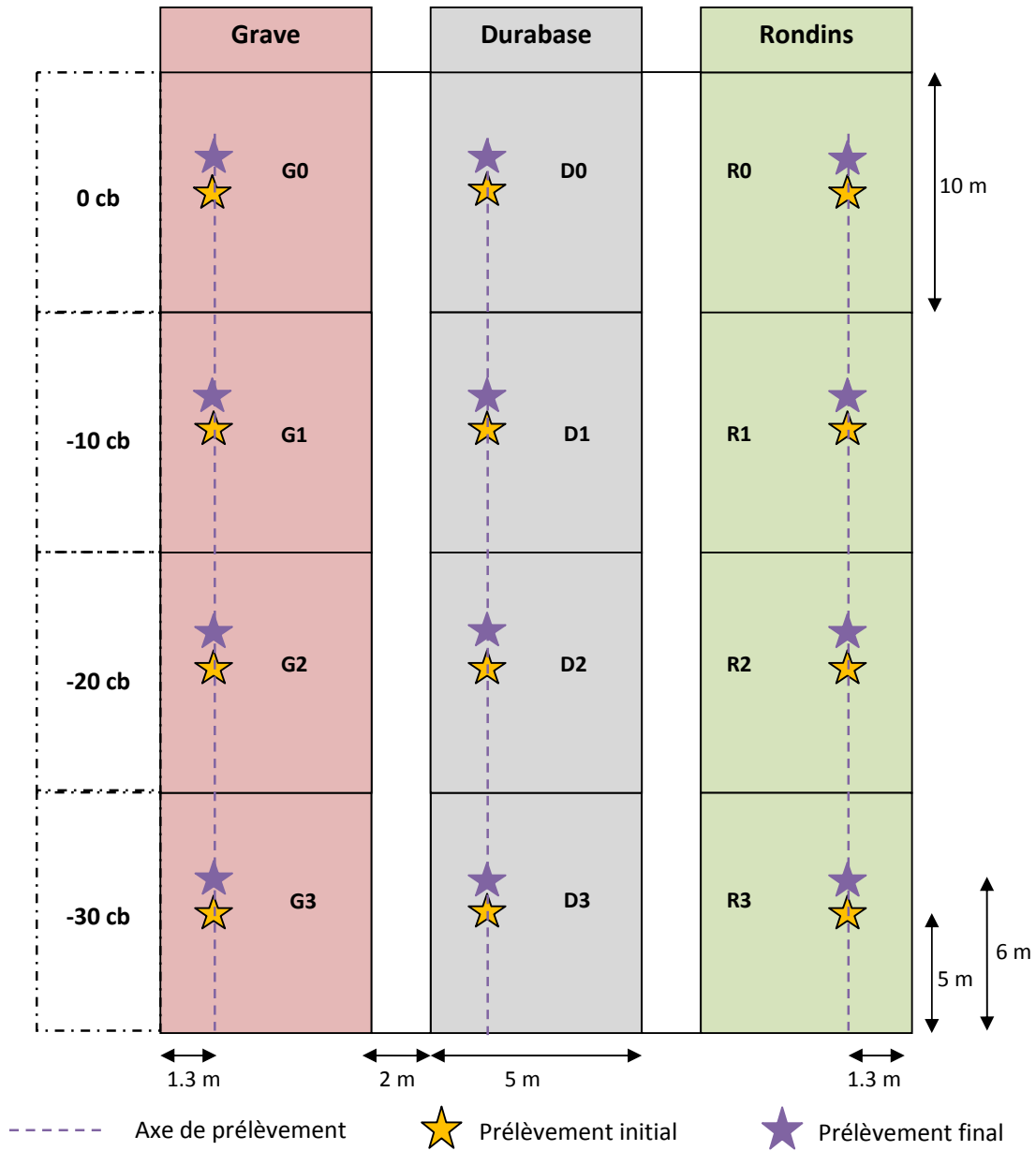


Figure 1. Plan du dispositif expérimental et des zones de prélèvement des échantillons de sols.

Résultats et discussion

Contrôle de l'état hydrique

Le suivi de la préparation de l'état hydrique du sol a été assuré à l'aide des tensiomètres et des sondes d'humidité Watermark®. Les tensiomètres ont été enlevés une semaine avant le passage des engins sur les pistes Grave et Durabase® et la veille sur la piste Rondins. Les valeurs de potentiel matriciel le jour du passage des engins ont donc été estimées par les sondes Watermark®. Ces sondes font une mesure indirect, sont moins précises, et affichent en général un biais. Leurs mesures ont donc été corrigées à partir de la corrélation observée entre les mesures Watermark® et les relevés tensiométriques au cours des semaines précédentes.

L'état d'humidité du sol estimé de cette façon le jour du passage des engins est présenté dans le tableau 1 sous forme de valeurs de potentiel matriciel (succion). La piste Grave présente les valeurs de potentiel hydrique suivantes : -3, -4, -26 et -41 cb, la piste Durabase® des valeurs de potentiel hydrique de 0, -12, -21 et -34 cb et la piste rondins les valeurs suivantes : -3, -5, -15 et -9 cb.

Tableau 1. Potentiel matriciel mesuré au moment des essais.

| Piste | Parcelle | Potentiel matriciel en cb mesuré | |
|----------|----------|----------------------------------|---------|
| | | à 5 cm | à 25 cm |
| Grave | G0 | -3 | -2 |
| | G1 | -4 | -8 |
| | G2 | -41 | -10 |
| | G3 | -26 | -16 |
| Durabase | D0 | 0 | -6 |
| | D1 | -12 | -5 |
| | D2 | -21 | -16 |
| | D3 | -34 | -16 |
| Rondins | R0 | -3 | -1 |
| | R1 | -5 | -3 |
| | R2 | -15 | -13 |
| | R3 | -9 | -36 |

Etat initial : caractéristiques de la parcelle

Les analyses ont révélé une relative hétérogénéité de la parcelle au niveau de la teneur en matière organique, où les variations à l'intérieur d'une même modalité peuvent être importantes, de même qu'entre les prélèvements de l'état initial et l'état final (Figure 2), ce qui illustre une variation à courte échelle spatiale. A 25 cm, les variations au sein d'une même modalité sont moins importantes mais restent élevées entre les modalités. On observe aussi un léger gradient d'argile dans le sens de l'axe d'humidité (i.e. au long des pistes), surtout sur la piste Rondins (Figure 3), mais il n'y pas de variations entre les

prélèvements effectués à l'état initial et final pour une même modalité. Les textures des deux horizons ne présentent pas de différences significatives.

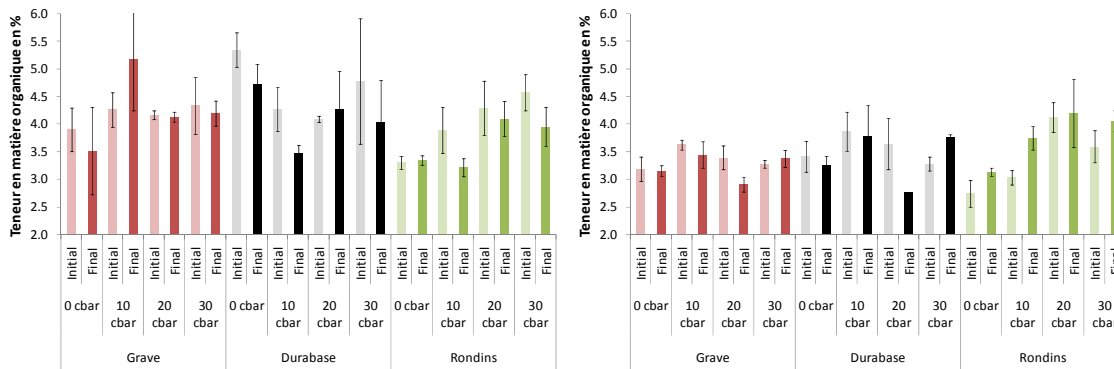


Figure 2. Teneur en matière organique des échantillons de surface (5 cm, à gauche) et de profondeur (25 cm, à droite) à l'état initial et final pour les différentes modalités. En rouge la piste Grave, en noir la piste Durabase® et en vert la piste Rondins.

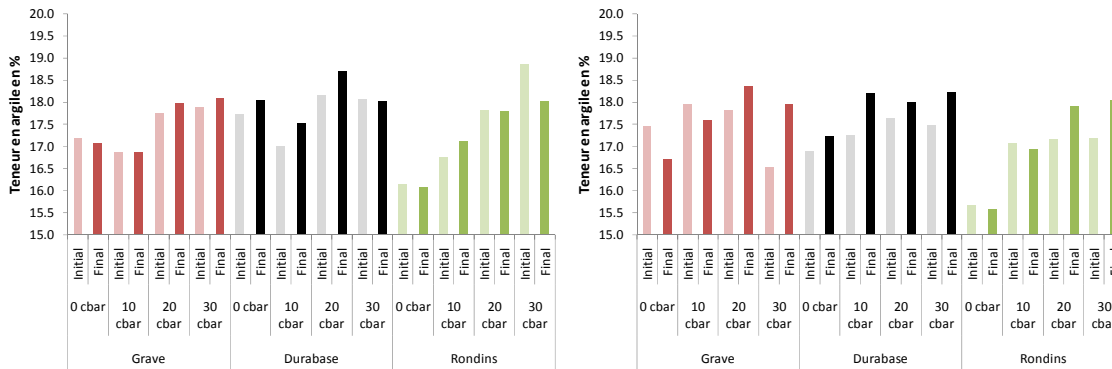


Figure 3. Teneur en argile des échantillons de surface (5 cm, à gauche) et de profondeur (25 cm, à droite) à l'état initial et final. En rouge la piste Grave, en noir la piste Durabase® et en vert la piste Rondins.

Etat final : Impacts du passage des engins de chantier sur les propriétés des sols

Un impact du roulement sur les propriétés des sols a été observé sous les trois pistes de protection et quelle que soit l'humidité. Ainsi la densité apparente a fortement augmenté à 5 cm après le passage des engins et cette augmentation est aussi visible à 25 cm mais dans une moindre mesure (Figure 4). Si l'augmentation de densité est très nette en surface, le faible nombre d'observation par modalité ne permet cependant pas de les différencier statistiquement au seuil de 95%.

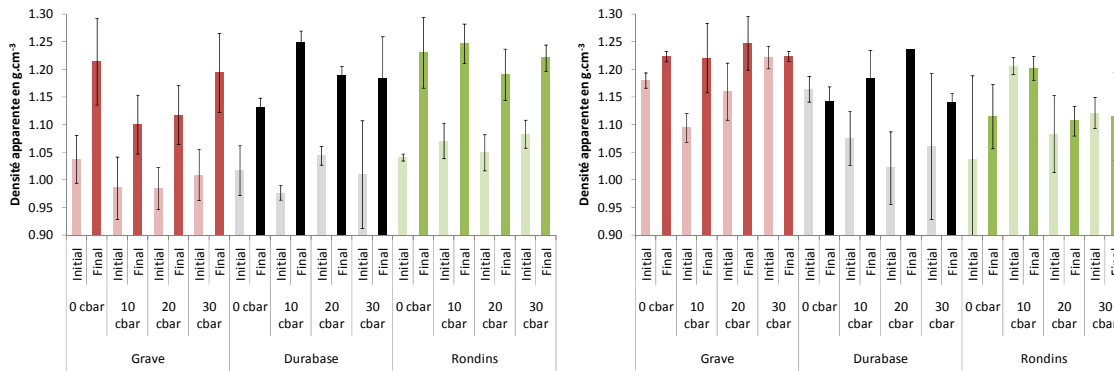


Figure 4. Densité apparente pour les différentes modalités en surface (5 cm, à gauche) et en profondeur (25 cm, à droite) à l'état initial et final.

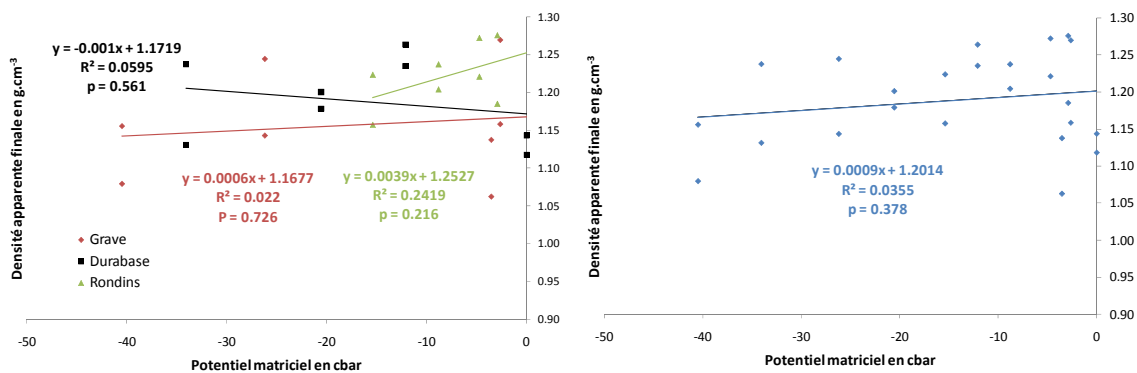


Figure 5. Relation entre état d'humidité du sol et densité apparente finale pour les trois pistes (à gauche) et toutes pistes confondues (à droite) à 5 cm.

La relation entre densité apparente après roulement et humidité du sol sous chaque piste (Figure 5) est considérée comme nulle (pente proche de 0) et le facteur humidité ne peut être considéré comme une variable explicative. Il n'y a donc pas d'influence de l'état d'humidité du sol sur la densité apparente après roulement. Par conséquent les échantillons d'une même modalité ont été regroupés pour analyser leur évolution causée par le passage des engins (ci-après).

Si les valeurs de densité apparente finale ne sont pas corrélées à l'état d'humidité du sol, elles le sont en revanche à la teneur en matière organique. Pour les échantillons prélevés en surface, une corrélation significative est mise en évidence entre densité apparente après essai et teneur en matière organique (coefficients de détermination et probabilités en Figure 6). Une relation unique peut être proposée toutes pistes confondues (Figure 6). Par contre, cette relation est faiblement déterminée pour les échantillons prélevés à 25 cm (Figure 7).

On voit ici nettement que si la matière organique n'influencerait pas la densité apparente avant le passage des engins, les valeurs mesurées après passage des engins sont elles directement liées aux teneurs en matières organiques.

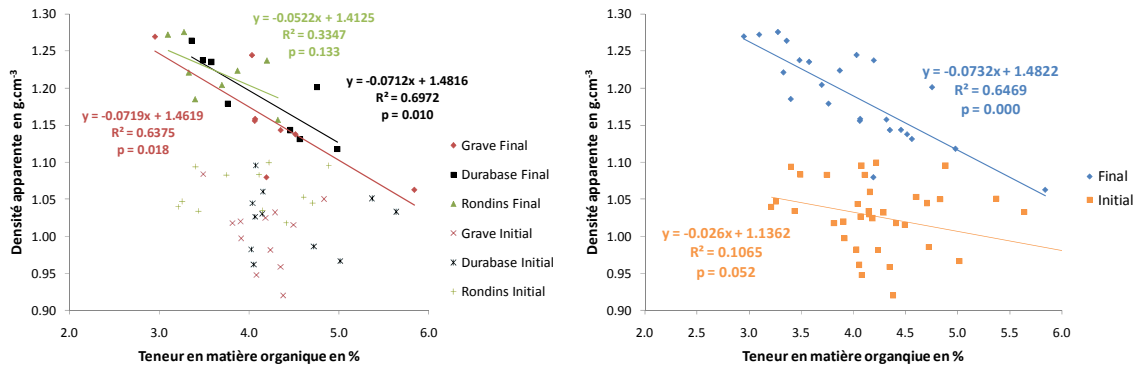


Figure 6. Relation entre teneur en matière organique et densité apparente à l'état initial et final pour chacune des pistes (à gauche) et toutes pistes confondues (à droite) à 5 cm.

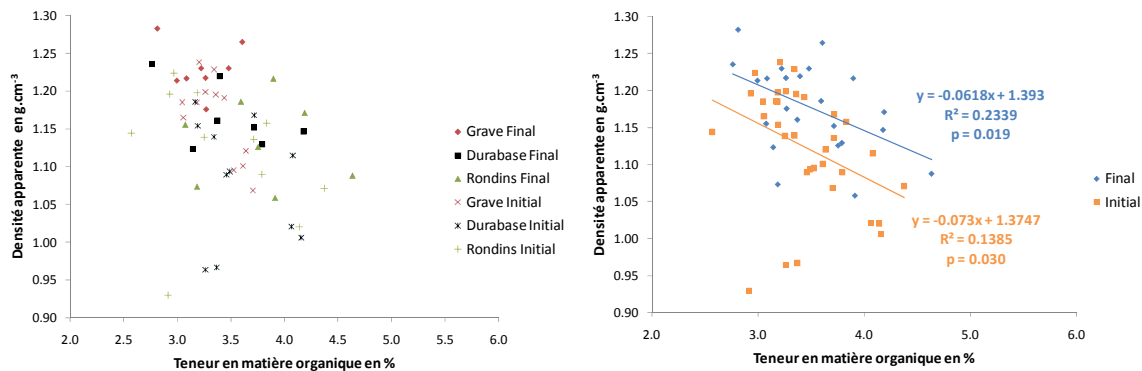


Figure 7. Relation entre teneur en matière organique et densité apparente à l'état initial et final pour les échantillons provenant de chacune des pistes (à gauche) et toutes pistes confondues (à droite) à 25 cm.

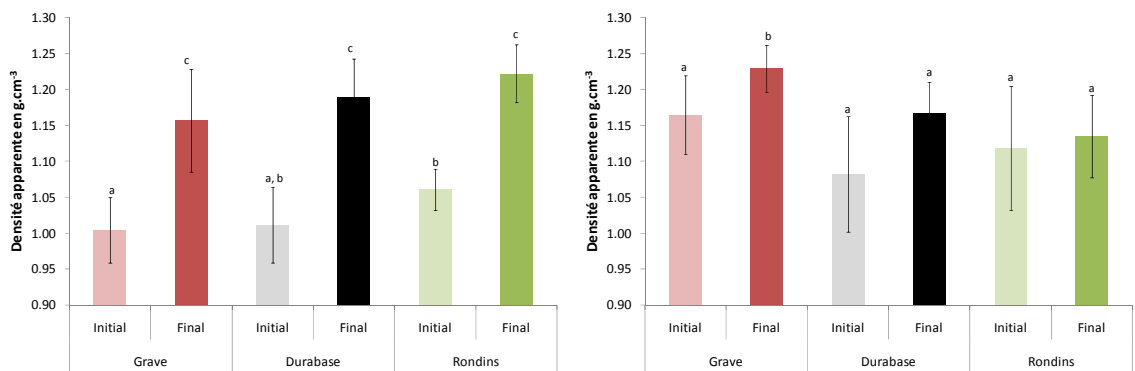


Figure 8. Densité apparente des échantillons de surface (5 cm, à gauche) et de profondeur (25 cm, à droite) à l'état initial et final, moyenne des différents s d'humidité. Différence statistiquement significatives pour $p < 0.010$.

Les valeurs moyennes des paramètres mesurés pour chaque type de piste sont présentées dans le Tableau 2. Ceci permet de mettre en évidence une augmentation de la densité apparente après roulement pour chacune des trois pistes à 5 cm (Figure 8). Par contre, aucune différence significative (Test T à 2 échantillons) n'est visible entre les trois pistes. Si la valeur moyenne de densité apparente sous Rondins paraît plus élevée, la relation établie en Figure 6 montre que cette différence est due aux teneurs en matière organique des échantillons prélevés à l'état final, plus faibles sous cette piste (Figure 6 et Figure 9).

La Figure 9 met en évidence les relations entre la teneur en matière organique et la densité apparente au sein d'une même modalité, et fait apparaître les écarts types de ces mesures. Il semble que plus la variabilité de la teneur en matière organique est importante, plus la variabilité de la densité apparente après sera importante (ex : Grave et inversement Rondins).

Tableau 2. Propriétés moyennes des trois pistes à l'état initial et final. MO : teneur en matière organique ; W_{-10hPa} : teneur en eau de l'échantillon à -10 hPa ; DA_{Sec} : densité apparente de l'échantillon à l'état sec ; DA_{-10hPa} : densité apparente de l'échantillon à un potentiel matriciel de -10hPa ; AIR_{-10hPa} : teneur en air de l'échantillon à un potentiel matriciel de -10 hPa.

| Piste | Etat | Profondeur cm | | Argile | Limons Fins | Limons Grossiers | Sables fins | Sables Grossiers | MO | $W_{-10 hPa}$ | DA_{Sec} | $DA_{-10 hPa}$ | $Air_{-10 hPa}$ |
|----------|---------|------------------|------------|--------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|-----|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | | | | % | % | % | % | % | % | $cm^3 \cdot g^{-1}$ | $g \cdot cm^{-3}$ | $g \cdot cm^{-3}$ | $cm^3 \cdot g^{-1}$ |
| Grave | Initial | 5 | Moyenne | 17.4 | 22.4 | 12.7 | 24.7 | 22.7 | 4.2 | 0.431 | 1.05 | 1.00 | 0.189 |
| | | | Ecart type | 0.5 | 2.6 | 2.4 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 0.020 | 0.03 | 0.05 | 0.055 |
| Durabase | Initial | 5 | Moyenne | 17.7 | 21.4 | 13.9 | 24.6 | 22.3 | 4.6 | 0.431 | 1.06 | 1.01 | 0.182 |
| | | | Ecart type | 0.5 | 0.8 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.046 | 0.05 | 0.05 | 0.055 |
| Rondins | Initial | 5 | Moyenne | 17.4 | 20.8 | 14.3 | 24.4 | 23.1 | 4.0 | 0.418 | 1.11 | 1.06 | 0.148 |
| | | | Ecart type | 1.2 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 0.6 | 0.038 | 0.04 | 0.03 | 0.031 |
| Grave | Final | 5 | Moyenne | 17.5 | 21.1 | 14.1 | 24.7 | 22.7 | 4.3 | 0.382 | 1.23 | 1.16 | 0.108 |
| | | | Ecart type | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 0.036 | 0.06 | 0.07 | 0.050 |
| Durabase | Final | 5 | Moyenne | 18.1 | 20.2 | 14.5 | 24.8 | 22.4 | 4.1 | 0.391 | 1.24 | 1.19 | 0.075 |
| | | | Ecart type | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 0.6 | 0.035 | 0.07 | 0.05 | 0.006 |
| Rondins | Final | 5 | Moyenne | 17.3 | 20.7 | 13.9 | 23.8 | 24.2 | 3.6 | 0.371 | 1.29 | 1.22 | 0.070 |
| | | | Ecart type | 0.9 | 1.2 | 1.1 | 1.4 | 2.3 | 0.4 | 0.026 | 0.04 | 0.04 | 0.026 |
| Grave | Initial | 25 | Moyenne | 17.4 | 21.0 | 14.1 | 24.3 | 23.1 | 3.4 | 0.368 | 1.22 | 1.16 | 0.115 |
| | | | Ecart type | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.2 | 0.018 | 0.06 | 0.05 | 0.032 |
| Durabase | Initial | 25 | Moyenne | 17.3 | 20.7 | 14.3 | 24.1 | 23.6 | 3.6 | 0.397 | 1.14 | 1.08 | 0.155 |
| | | | Ecart type | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.8 | 0.8 | 0.4 | 0.039 | 0.09 | 0.08 | 0.059 |
| Rondins | Initial | 25 | Moyenne | 16.8 | 20.4 | 14.0 | 23.9 | 24.9 | 3.4 | 0.394 | 1.16 | 1.12 | 0.128 |
| | | | Ecart type | 0.7 | 0.6 | 1.0 | 0.7 | 1.4 | 0.6 | 0.039 | 0.09 | 0.09 | 0.060 |
| Grave | Final | 25 | Moyenne | 17.7 | 20.8 | 14.4 | 24.4 | 22.8 | 3.2 | 0.340 | 1.28 | 1.23 | 0.096 |
| | | | Ecart type | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.8 | 0.3 | 0.027 | 0.04 | 0.03 | 0.031 |
| Durabase | Final | 25 | Moyenne | 18.4 | 20.0 | 14.3 | 23.8 | 23.4 | 3.5 | 0.361 | 1.23 | 1.17 | 0.120 |
| | | | Ecart type | 1.3 | 1.2 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.030 | 0.05 | 0.04 | 0.019 |
| Rondins | Final | 25 | Moyenne | 17.1 | 20.7 | 13.2 | 25.2 | 23.8 | 3.8 | 0.399 | 1.21 | 1.13 | 0.107 |
| | | | Ecart type | 1.1 | 1.4 | 1.1 | 1.5 | 1.0 | 0.5 | 0.032 | 0.05 | 0.06 | 0.045 |

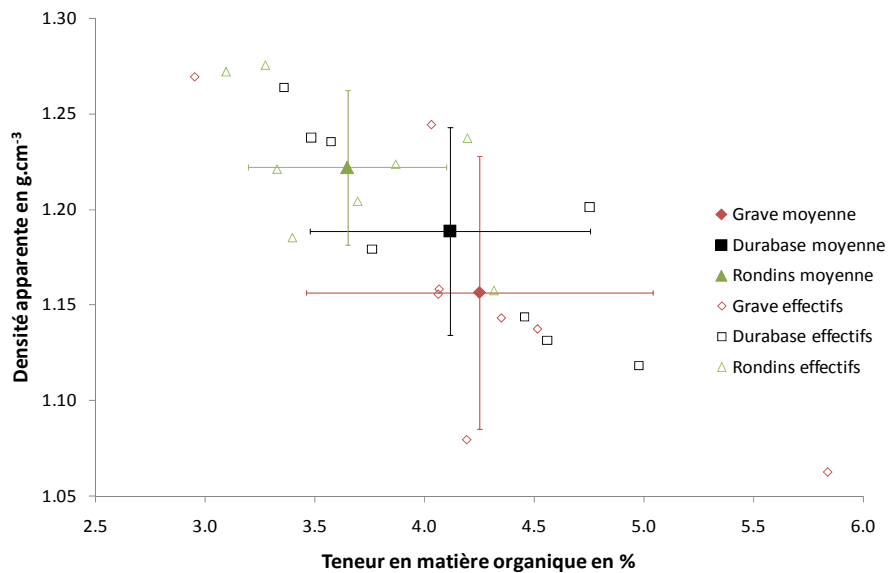


Figure 9. Relation entre teneur en matière organique et densité apparente après roulement pour les échantillons obtenus sur chacune des pistes. Valeurs moyennes avec écarts types X et Y, et effectifs.

Pour s'affranchir de l'effet matière organique lors de l'interprétation des résultats, nous avons procédé à une analyse statistique de type modèle linéaire généralisé (aussi appelée ANCOVA). Cette analyse utilise la teneur en matière organique comme covariable. L'analyse permet ainsi de montrer que les régressions entre teneur en matière organique et densité apparente (Figure 6) sont parallèles pour les trois pistes. En supprimant l'effet de la covariable teneur en matière organique, on obtient une valeur de densité apparente moyenne après roulement pour chacune des pistes indépendante de la teneur en matière organique. Ces valeurs de densités apparentes moyennes sont respectivement de 1.173, 1.196 et 1.197 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pour les pistes Graves, Durabase et Rondins et il n'y a pas de différences significatives entre ces trois valeurs ($p=0.381$). La compaction observée correspond, à la profondeur 5 cm, à une perte de volume apparent à saturation (-10 hPa) d'environ $0.14 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ pour les trois pistes.

À 25 cm, seule la piste Grave a subi une augmentation de la densité apparente statistiquement significative (Figure 8). Mais là encore cela est très probablement dû aux teneurs en matières organiques plus faibles sous cette piste (Figure 7). Néanmoins, contrairement aux échantillons à 5 cm, il n'a pas pu être mis en évidence une influence de la teneur en matière organique statistiquement significative, les variances au sein des modalités et les différences entre état initial et final étant plus faibles.

La compaction, observée par l'intermédiaire de la densité apparente, a aussi un impact sur la teneur en air et en eau des échantillons. On observe ainsi une diminution de la teneur en air et en eau à -10 hPa pour les différentes pistes, surtout en surface (Figure 10 et Figure 11).

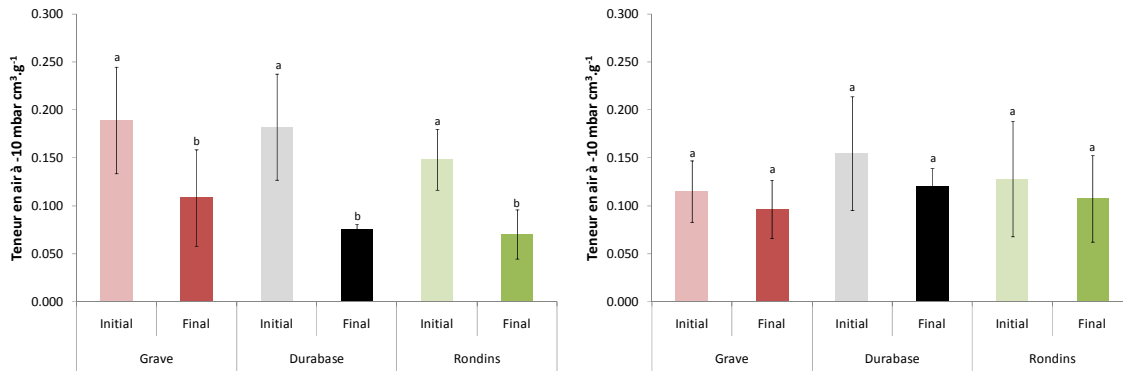


Figure 10. Teneur en air à -10 hPa des échantillons de surface (5 cm, à gauche) et de profondeur (25 cm, à droite) à l'état initial et final, moyenne des différentes humidités. Différence statistiques pour $p < 0.010$.

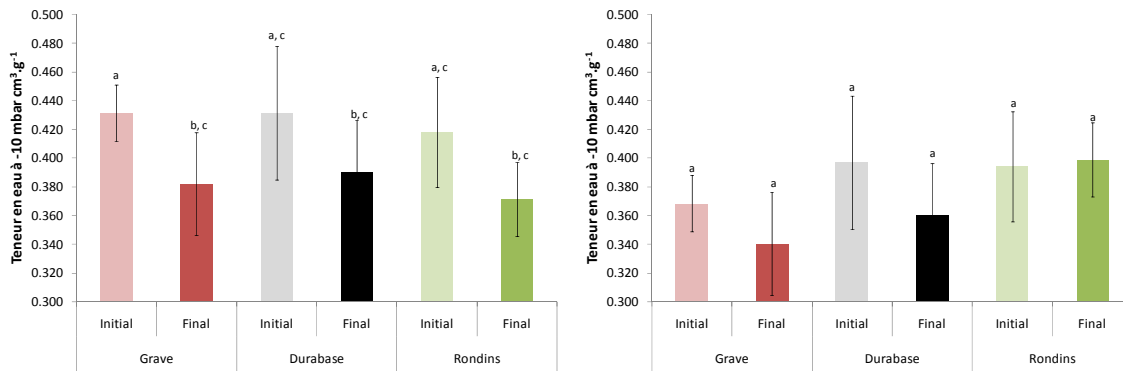


Figure 11. Teneur en eau à -10 hPa des échantillons de surface (5 cm, à gauche) et de profondeur (25 cm, à droite) à l'état initial et final, moyenne des différentes humidités. Différence statistiques pour $p < 0.010$.

La teneur en air à -10 hPa correspond a la porosité de rayon supérieur à 150 microns. En surface, cette perte de porosité peut être estimée à $0.080 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ toutes pistes confondues (pas de différence significative entre les pistes), soit plus de 50% de la perte de volume apparent observée : ce sont les pores les plus grossiers qui ont été atteints.

La mesure de la courbe de désorption des échantillons permet de déterminer la distribution de taille des pores dans une gamme allant de 3 à 100 microns de rayon. Les courbes de désorption des échantillons sont présentées sur la Figure 12.

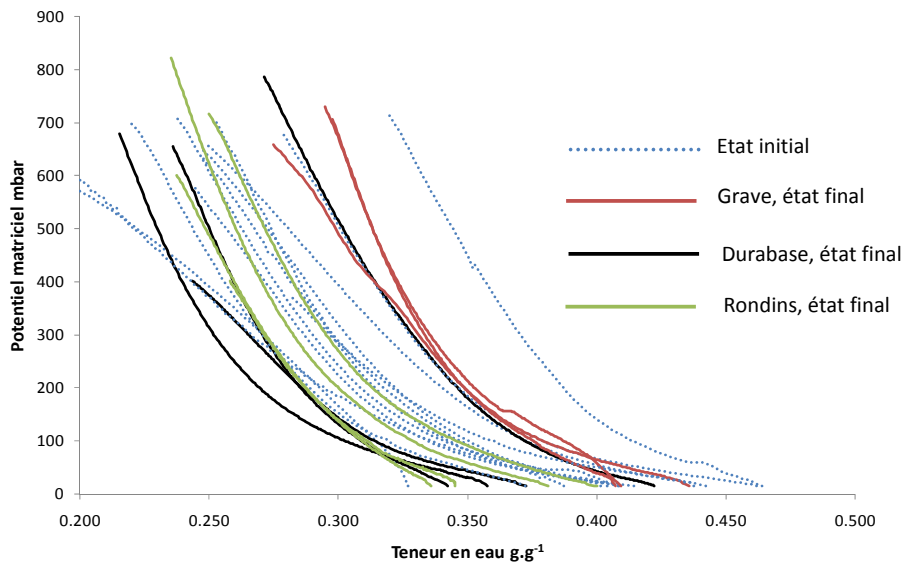


Figure 12. Courbe de désorption des échantillons de surfaces (5 cm) à l'état initial (en pointillés) et à l'état final (en trait plein, rouge : grave, noir : Durabase et vert : Rondins)

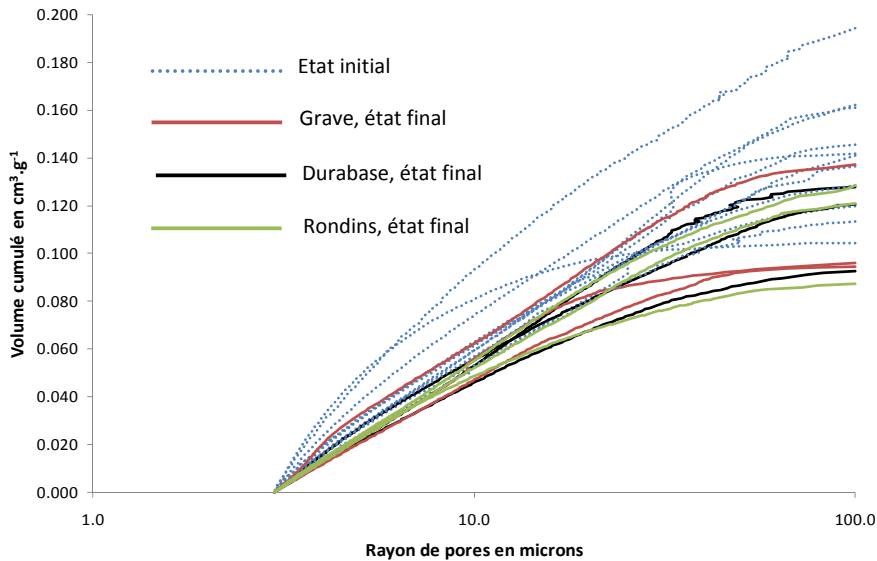


Figure 13. Volume poral cumulé des échantillons de surface (5 cm) de 3 à 100 microns de rayons à l'état initial (en pointillés) et à l'état final (en trait plein, rouge : grave, noir : Durabase et vert : Rondins)

On convertit le potentiel matriciel mesuré en tailles de pores en utilisant la loi de Jurin-Laplace ($h=0.15/r$ avec h hauteur de colonne d'eau en cm, équivalent au potentiel matriciel en mbar ou hPa, et r rayon de pores en cm). Les courbes de désorption ont été analysées dans le domaine -15 à -500 hPa soit dans des tailles de pores allant respectivement de 100 à 3 microns de rayon. La Figure 13 montre le volume poral cumulé des échantillons de surface. Plus la pente est forte plus le volume de pores dans les rayons correspondants est important. On peut observer une forte hétérogénéité entre les échantillons à l'état initial (en pointillés bleus) et à l'état final (en traits pleins).

On remarque que certains échantillons ont, après roulement, des volumes poraux de la classe porale de rayon entre 3 et 100 microns inférieurs aux échantillons initiaux, mais le volume poral perdu reste faible par rapport au volume poral perdu dans la classe de pores de rayons supérieurs à 150 microns (environ $0.080 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$). La perte de porosité est donc essentiellement concentrée sur la porosité grossière, soit des classes de pores supérieurs à 150 microns de rayon.

Interprétation et Conclusions

Les trois pistes de protection des sols montrent un impact identique de compaction sur les sols, correspondant à une perte de $0.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ de porosité, les pores de rayon supérieur à 100-150 microns étant principalement impactés. Il faut toutefois rappeler que la charge sous les rondins était près de 10 fois inférieure à celle sous les autres pistes. Dans les conditions de cette expérience, l'état d'humidité du sol n'a pas influencé le degré de compaction. La matière organique, elle, est la variable expliquant le degré de compaction quel que soit l'état d'humidité du sol. Malgré l'humidité du sol, la compaction observée est faible dans l'absolu : un travail superficiel du sol et une année de culture permettront de récupérer la porosité perdue.

La protection du sol par les pistes peut donc être considérée comme bonne, et équivalente pour les systèmes Durabase et Grave. Le sol expérimenté avait une faible densité apparente initiale, donc de ce point de vue était susceptible à la compaction. En revanche, il a une teneur assez élevée en sables et en matière organique, et était partiellement enherbé, ce qui lui donne une certaine résistance à la compaction et sans doute une bonne résilience.

Le système Durabase et le système grave diffèrent par leur couverture du sol du point de vue du poids et de la perméabilité. Ceci peut conduire à des effets différents à long terme. En particulier, en cas de fortes pluies prolongées le sol peut se saturer sous la grave, comme cela avait été observé dans le cas d'Expo02.

Recommandations

Les trois méthodes de protection des sols peuvent être recommandées dans des conditions équivalentes à celle de cette expérimentation :

1. Sols limono-sableux à fortes teneurs en matières organiques (> 3%)
2. Durée courte n'impliquant pas de risque d'engorgement sous les pistes par accumulation des eaux ruisselées et infiltrées après une succession de précipitations
3. Utilisation d'engins induisant des pressions au sol similaires.

On notera en particulier que la piste Durabase® est efficace si la solidarité des plaques les unes par rapport aux autres est assurée. Cela nécessite un goupillage régulier (minimum une goupille sur deux dans les successions de plaques linéaires).

Bibliographie

OFEPF, 2001. Construire en préservant les sols, Guide de l'environnement n° 10.

Annexes

Annexe 1 : résultats analytiques

| Piste | Etat | Potentiel matriciel théorique | Profondeur | Potentiel matriciel réel 5 cm | Potentiel matriciel réel 25 cm | Argile | Limons Fins | Limons Grossiers | Sables fins | Sables Grossiers | MO | W _{-10 hPa} | DA _{Sec} | DA _{-10 hPa} | Air _{-10 hPa} |
|----------|---------|-------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|-------------|------------------|-------------|------------------|------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|
| | | cb | cm | cb | cb | % | % | % | % | % | % | cm ³ .g ⁻¹ | g.cm ⁻³ | g.cm ⁻³ | cm ³ .g ⁻¹ |
| Grave | Initial | 0 | 5 | -3 | -2 | 17.2 | 25.8 | 9.2 | 24.3 | 23.5 | 3.9 | 0.408 | 1.07 | 1.00 | 0.217 |
| Grave | Initial | 0 | 5 | -3 | -2 | | | | | | 4.29 | 0.434 | 1.06 | 1.03 | 0.157 |
| Grave | Initial | 0 | 5 | -3 | -2 | | | | | | 3.49 | 0.424 | 1.13 | 1.08 | 0.122 |
| Grave | Initial | 10 | 5 | -4 | -8 | 16.9 | 22.9 | 13.5 | 24.8 | 22.0 | 4.4 | 0.414 | 1.00 | 0.92 | 0.295 |
| Grave | Initial | 10 | 5 | -4 | -8 | | | | | | 3.9 | 0.442 | 1.05 | 1.02 | 0.161 |
| Grave | Initial | 10 | 5 | -4 | -8 | | | | | | 4.49 | 0.427 | 1.05 | 1.02 | 0.181 |
| Grave | Initial | 20 | 5 | -41 | -10 | 17.7 | 20.5 | 13.9 | 25.4 | 22.4 | 4.1 | 0.409 | 1.01 | 0.95 | 0.269 |
| Grave | Initial | 20 | 5 | -41 | -10 | | | | | | 4.18 | 0.422 | 1.07 | 1.02 | 0.176 |
| Grave | Initial | 20 | 5 | -41 | -10 | | | | | | 4.23 | 0.418 | 1.01 | 0.98 | 0.224 |
| Grave | Initial | 30 | 5 | -26 | -16 | 17.9 | 20.2 | 14.3 | 24.5 | 23.0 | 4.3 | 0.463 | 1.04 | 0.96 | 0.203 |
| Grave | Initial | 30 | 5 | -26 | -16 | | | | | | 4.83 | 0.465 | 1.07 | 1.05 | 0.110 |
| Grave | Initial | 30 | 5 | -26 | -16 | | | | | | 3.81 | 0.451 | 1.06 | 1.02 | 0.155 |
| Durabase | Initial | 0 | 5 | 0 | -6 | 17.7 | 22.3 | 13.6 | 24.8 | 21.5 | 5.4 | 0.327 | 1.10 | 1.05 | 0.247 |
| Durabase | Initial | 0 | 5 | 0 | -6 | | | | | | 5.64 | 0.480 | 1.08 | 1.03 | 0.111 |
| Durabase | Initial | 0 | 5 | 0 | -6 | | | | | | 5.02 | 0.466 | 1.07 | 0.97 | 0.192 |
| Durabase | Initial | 10 | 5 | -12 | -5 | 17.0 | 21.5 | 14.1 | 25.3 | 22.1 | 4.0 | 0.402 | 1.02 | 0.98 | 0.239 |
| Durabase | Initial | 10 | 5 | -12 | -5 | | | | | | 4.72 | 0.498 | 1.02 | 0.99 | 0.139 |
| Durabase | Initial | 10 | 5 | -12 | -5 | | | | | | 4.06 | 0.473 | 1.00 | 0.96 | 0.189 |
| Durabase | Initial | 20 | 5 | -21 | -16 | 18.2 | 20.5 | 14.1 | 24.3 | 22.9 | 4.1 | 0.404 | 1.08 | 1.03 | 0.193 |
| Durabase | Initial | 20 | 5 | -21 | -16 | | | | | | 4.04 | 0.442 | 1.09 | 1.04 | 0.139 |
| Durabase | Initial | 20 | 5 | -21 | -16 | | | | | | 4.16 | 0.400 | 1.08 | 1.06 | 0.166 |
| Durabase | Initial | 30 | 5 | -34 | -16 | 18.1 | 21.4 | 13.6 | 24.2 | 22.7 | 6.1 | 0.442 | 0.96 | 0.90 | 0.287 |
| Durabase | Initial | 30 | 5 | -34 | -16 | | | | | | 4.08 | 0.430 | 1.13 | 1.10 | 0.105 |
| Durabase | Initial | 30 | 5 | -34 | -16 | | | | | | 4.15 | 0.413 | 1.07 | 1.03 | 0.180 |
| Rondins | Initial | 0 | 5 | -3 | -1 | 16.1 | 21.7 | 15.6 | 25.8 | 20.7 | 3.4 | 0.395 | 1.10 | 1.03 | 0.195 |
| Rondins | Initial | 0 | 5 | -3 | -1 | | | | | | 3.26 | 0.469 | 1.07 | 1.05 | 0.108 |
| Rondins | Initial | 0 | 5 | -3 | -1 | | | | | | 3.21 | 0.406 | 1.07 | 1.04 | 0.178 |
| Rondins | Initial | 10 | 5 | -5 | -3 | 16.7 | 20.5 | 13.9 | 24.2 | 24.6 | 3.4 | 0.372 | 1.14 | 1.09 | 0.164 |
| Rondins | Initial | 10 | 5 | -5 | -3 | | | | | | 4.15 | 0.414 | 1.07 | 1.03 | 0.175 |
| Rondins | Initial | 10 | 5 | -5 | -3 | | | | | | 4.11 | 0.398 | 1.13 | 1.08 | 0.147 |
| Rondins | Initial | 20 | 5 | -15 | -13 | 17.8 | 20.8 | 13.9 | 23.7 | 23.8 | 4.7 | 0.437 | 1.11 | 1.05 | 0.142 |
| Rondins | Initial | 20 | 5 | -15 | -13 | | | | | | 4.41 | 0.510 | 1.09 | 1.02 | 0.095 |
| Rondins | Initial | 20 | 5 | -15 | -13 | | | | | | 3.75 | 0.415 | 1.10 | 1.08 | 0.131 |
| Rondins | Initial | 30 | 5 | -9 | -36 | 18.9 | 20.0 | 14.0 | 23.9 | 23.2 | 4.9 | 0.387 | 1.19 | 1.10 | 0.148 |
| Rondins | Initial | 30 | 5 | -9 | -36 | | | | | | 4.6 | 0.395 | 1.09 | 1.05 | 0.177 |
| Rondins | Initial | 30 | 5 | -9 | -36 | | | | | | 4.22 | 0.418 | 1.13 | 1.10 | 0.114 |

| Piste | Etat | Potentiel matriciel théorique | Profondeur | Potentiel matriciel réel 5 cm | Potentiel matriciel réel 25 cm | Argile | Limons Fins | Limons Grossiers | Sables fins | Sables Grossiers | MO | W _{-10 hPa} | DA _{Sec} | DA _{-10 hPa} | Air _{-10 hPa} |
|----------|-------|-------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|-------------|------------------|-------------|------------------|------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|
| | | cb | cm | cb | cb | % | % | % | % | % | % | cm ³ .g ⁻¹ | g.cm ⁻³ | g.cm ⁻³ | cm ³ .g ⁻¹ |
| Grave | Final | 0 | 5 | -3 | -2 | 17.1 | 20.9 | 14.1 | 25.6 | 22.3 | 4.1 | 0.323 | 1.21 | 1.16 | 0.163 |
| Grave | Final | 0 | 5 | -3 | -2 | | | | | | 2.95 | 0.357 | 1.32 | 1.27 | 0.054 |
| Grave | Final | 10 | 5 | -4 | -8 | 16.9 | 21.4 | 15.0 | 24.2 | 22.5 | 5.8 | 0.365 | 1.15 | 1.06 | 0.198 |
| Grave | Final | 10 | 5 | -4 | -8 | | | | | | 4.52 | 0.392 | 1.17 | 1.14 | 0.110 |
| Grave | Final | 20 | 5 | -41 | -10 | 18.0 | 22.0 | 12.4 | 24.1 | 23.6 | 4.1 | 0.407 | 1.26 | 1.16 | 0.080 |
| Grave | Final | 20 | 5 | -41 | -10 | | | | | | 4.19 | 0.436 | 1.19 | 1.08 | 0.113 |
| Grave | Final | 30 | 5 | -26 | -16 | 18.1 | 19.9 | 14.8 | 24.9 | 22.3 | 4.4 | 0.409 | 1.26 | 1.14 | 0.088 |
| Grave | Final | 30 | 5 | -26 | -16 | | | | | | 4.03 | 0.367 | 1.30 | 1.24 | 0.059 |
| Durabase | Final | 0 | 5 | 0 | -6 | 18.1 | 20.4 | 14.5 | 23.6 | 23.5 | 4.5 | 0.422 | 1.21 | 1.14 | 0.076 |
| Durabase | Final | 0 | 5 | 0 | -6 | | | | | | 4.98 | 0.437 | 1.13 | 1.12 | 0.080 |
| Durabase | Final | 10 | 5 | -12 | -5 | 17.5 | 19.7 | 15.2 | 25.1 | 22.4 | 3.4 | 0.343 | 1.34 | 1.26 | 0.072 |
| Durabase | Final | 10 | 5 | -12 | -5 | | | | | | 3.58 | 0.369 | 1.29 | 1.24 | 0.063 |
| Durabase | Final | 20 | 5 | -21 | -16 | 18.7 | 20.4 | 14.2 | 25.4 | 21.2 | 4.8 | 0.373 | 1.28 | 1.20 | 0.083 |
| Durabase | Final | 20 | 5 | -21 | -16 | | | | | | 3.76 | 0.396 | 1.22 | 1.18 | 0.075 |
| Durabase | Final | 30 | 5 | -34 | -16 | 18.0 | 20.2 | 14.0 | 25.1 | 22.6 | 3.5 | 0.358 | 1.28 | 1.24 | 0.073 |
| Durabase | Final | 30 | 5 | -34 | -16 | | | | | | 4.56 | 0.428 | 1.18 | 1.13 | 0.078 |
| Rondins | Final | 0 | 5 | -3 | -1 | 16.1 | 21.6 | 14.9 | 25.2 | 22.2 | 3.3 | 0.336 | 1.35 | 1.28 | 0.071 |
| Rondins | Final | 0 | 5 | -3 | -1 | | | | | | 3.4 | 0.344 | 1.26 | 1.19 | 0.122 |
| Rondins | Final | 10 | 5 | -5 | -3 | 17.1 | 21.9 | 14.3 | 22.8 | 24.0 | 3.1 | 0.345 | 1.33 | 1.27 | 0.064 |
| Rondins | Final | 10 | 5 | -5 | -3 | | | | | | 3.33 | 0.380 | 1.25 | 1.22 | 0.061 |
| Rondins | Final | 20 | 5 | -15 | -13 | 17.8 | 19.7 | 14.3 | 24.8 | 23.4 | 4.3 | 0.400 | 1.26 | 1.16 | 0.087 |
| Rondins | Final | 20 | 5 | -15 | -13 | | | | | | 3.87 | 0.398 | 1.31 | 1.22 | 0.042 |
| Rondins | Final | 30 | 5 | -9 | -36 | 18.0 | 19.6 | 12.3 | 22.6 | 27.5 | 3.7 | 0.381 | 1.26 | 1.20 | 0.072 |
| Rondins | Final | 30 | 5 | -9 | -36 | | | | | | 4.2 | 0.387 | 1.35 | 1.24 | 0.044 |

| Piste | Etat | Potentiel matriciel théorique | Profondeur | Potentiel matriciel réel 5 cm | Potentiel matriciel réel 25 cm | Argile | Limons Fins | Limons Grossiers | Sables fins | Sables Grossiers | MO | W _{-10 hPa} | DA _{Sec} | DA _{-10 hPa} | Air _{-10 hPa} |
|----------|---------|-------------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|-------------|------------------|-------------|------------------|------|----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| | | cb | cm | cb | cb | | | | | | | | | | |
| Grave | Initial | 0 | 25 | -3 | -2 | 17.5 | 21.1 | 13.6 | 24.0 | 23.9 | 3.1 | 0.350 | 1.27 | 1.19 | 0.116 |
| Grave | Initial | 0 | 25 | -3 | -2 | | | | | | 3.44 | 0.362 | 1.24 | 1.19 | 0.100 |
| Grave | Initial | 0 | 25 | -3 | -2 | | | | | | 3.06 | 0.366 | 1.20 | 1.16 | 0.115 |
| Grave | Initial | 10 | 25 | -4 | -8 | 17.9 | 20.5 | 14.0 | 24.9 | 22.5 | 3.5 | 0.373 | 1.17 | 1.10 | 0.163 |
| Grave | Initial | 10 | 25 | -4 | -8 | | | | | | 3.7 | 0.414 | 1.11 | 1.07 | 0.145 |
| Grave | Initial | 10 | 25 | -4 | -8 | | | | | | 3.64 | 0.385 | 1.15 | 1.12 | 0.130 |
| Grave | Initial | 20 | 25 | -41 | -10 | 17.8 | 20.8 | 14.0 | 24.6 | 22.7 | 3.6 | 0.360 | 1.15 | 1.10 | 0.171 |
| Grave | Initial | 20 | 25 | -41 | -10 | | | | | | 3.36 | 0.367 | 1.22 | 1.20 | 0.092 |
| Grave | Initial | 20 | 25 | -41 | -10 | | | | | | 3.18 | 0.373 | 1.24 | 1.18 | 0.093 |
| Grave | Initial | 30 | 25 | -26 | -16 | 16.5 | 21.7 | 14.8 | 23.7 | 23.3 | 3.3 | 0.360 | 1.29 | 1.20 | 0.098 |
| Grave | Initial | 30 | 25 | -26 | -16 | | | | | | 3.21 | 0.366 | 1.28 | 1.24 | 0.064 |
| Grave | Initial | 30 | 25 | -26 | -16 | | | | | | 3.34 | 0.344 | 1.30 | 1.23 | 0.093 |
| Durabase | Initial | 0 | 25 | 0 | -6 | 16.9 | 20.8 | 14.4 | 23.7 | 24.3 | 3.2 | 0.350 | 1.27 | 1.19 | 0.116 |
| Durabase | Initial | 0 | 25 | 0 | -6 | | | | | | 3.72 | 0.390 | 1.25 | 1.17 | 0.089 |
| Durabase | Initial | 0 | 25 | 0 | -6 | | | | | | 3.34 | 0.404 | 1.19 | 1.14 | 0.097 |
| Durabase | Initial | 10 | 25 | -12 | -5 | 17.3 | 20.8 | 14.4 | 25.0 | 22.5 | 4.1 | 0.356 | 1.15 | 1.11 | 0.164 |
| Durabase | Initial | 10 | 25 | -12 | -5 | | | | | | 4.07 | 0.464 | 1.05 | 1.02 | 0.139 |
| Durabase | Initial | 10 | 25 | -12 | -5 | | | | | | 3.46 | 0.423 | 1.12 | 1.09 | 0.118 |
| Durabase | Initial | 20 | 25 | -21 | -16 | 17.6 | 20.9 | 14.1 | 23.1 | 24.3 | 4.2 | 0.451 | 1.08 | 1.01 | 0.166 |
| Durabase | Initial | 20 | 25 | -21 | -16 | | | | | | 3.26 | 0.419 | 1.02 | 0.96 | 0.241 |
| Durabase | Initial | 20 | 25 | -21 | -16 | | | | | | 3.49 | 0.379 | 1.14 | 1.09 | 0.158 |
| Durabase | Initial | 30 | 25 | -34 | -16 | 17.5 | 20.3 | 14.3 | 24.4 | 23.4 | 3.4 | 0.374 | 1.02 | 0.97 | 0.282 |
| Durabase | Initial | 30 | 25 | -34 | -16 | | | | | | 3.19 | 0.357 | 1.21 | 1.15 | 0.132 |
| Durabase | Initial | 30 | 25 | -34 | -16 | | | | | | | | | | |
| Rondins | Initial | 0 | 25 | -3 | -1 | | | | | | 2.9 | 0.404 | 0.96 | 0.93 | 0.294 |
| Rondins | Initial | 0 | 25 | -3 | -1 | 15.7 | 20.8 | 14.0 | 24.5 | 25.0 | 2.57 | 0.390 | 1.17 | 1.14 | 0.107 |
| Rondins | Initial | 0 | 25 | -3 | -1 | | | | | | | | | | |
| Rondins | Initial | 10 | 25 | -5 | -3 | 17.1 | 20.7 | 15.0 | 22.9 | 24.3 | 2.9 | 0.348 | 1.26 | 1.20 | 0.111 |
| Rondins | Initial | 10 | 25 | -5 | -3 | | | | | | 2.97 | 0.347 | 1.26 | 1.22 | 0.092 |
| Rondins | Initial | 10 | 25 | -5 | -3 | | | | | | 3.19 | 0.352 | 1.24 | 1.20 | 0.106 |
| Rondins | Initial | 20 | 25 | -15 | -13 | 17.1 | 20.6 | 14.5 | 24.3 | 23.5 | 4.1 | 0.446 | 1.08 | 1.02 | 0.157 |
| Rondins | Initial | 20 | 25 | -15 | -13 | | | | | | 3.83 | 0.416 | 1.21 | 1.16 | 0.071 |
| Rondins | Initial | 20 | 25 | -15 | -13 | | | | | | 4.38 | 0.428 | 1.11 | 1.07 | 0.129 |
| Rondins | Initial | 30 | 25 | -9 | -36 | 17.2 | 19.5 | 12.7 | 23.8 | 26.9 | 3.7 | 0.376 | 1.17 | 1.14 | 0.127 |
| Rondins | Initial | 30 | 25 | -9 | -36 | | | | | | 3.79 | 0.454 | 1.13 | 1.09 | 0.086 |
| Rondins | Initial | 30 | 25 | -9 | -36 | | | | | | 3.25 | 0.374 | 1.17 | 1.14 | 0.127 |

| Piste | Etat | Potentiel matriciel théorique | Profondeur | Potentiel matriciel réel 5 cm | Potentiel matriciel réel 25 cm | Argile | Limons Fins | Limons Grossiers | Sables fins | Sables Grossiers | MO | W _{-10 hPa} | DA _{Sec} | DA _{-10 hPa} | Air _{-10 hPa} |
|----------|-------|-------------------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|
| | | cb | cm | cb | cb | % | % | % | % | % | % | cm ³ .g ⁻¹ | g.cm ⁻³ | g.cm ⁻³ | cm ³ .g ⁻¹ |
| Grave | Final | 0 | 25 | -3 | -2 | 16.7 | 21.5 | 13.8 | 24.1 | 23.9 | 3.1 | 0.278 | 1.27 | 1.22 | 0.166 |
| | Final | 0 | 25 | -3 | -2 | | | | | | 3.22 | 0.349 | 1.27 | 1.23 | 0.087 |
| Grave | Final | 10 | 25 | -4 | -8 | 17.6 | 20.6 | 14.5 | 24.5 | 22.9 | 3.6 | 0.336 | 1.34 | 1.26 | 0.077 |
| | Final | 10 | 25 | -4 | -8 | | | | | | 3.27 | 0.364 | 1.20 | 1.18 | 0.109 |
| Grave | Final | 20 | 25 | -41 | -10 | 18.4 | 20.3 | 15.0 | 24.1 | 22.3 | 2.8 | 0.332 | 1.31 | 1.28 | 0.071 |
| | Final | 20 | 25 | -41 | -10 | | | | | | 3 | 0.353 | 1.24 | 1.21 | 0.093 |
| Grave | Final | 30 | 25 | -26 | -16 | 18.0 | 20.8 | 14.2 | 24.9 | 22.1 | 3.3 | 0.353 | 1.28 | 1.22 | 0.091 |
| | Final | 30 | 25 | -26 | -16 | | | | | | 3.48 | 0.358 | 1.30 | 1.23 | 0.078 |
| Durabase | Final | 0 | 25 | 0 | -6 | 17.2 | 21.5 | 14.5 | 23.2 | 23.6 | 3.1 | 0.371 | 1.19 | 1.12 | 0.142 |
| | Final | 0 | 25 | 0 | -6 | | | | | | 3.37 | 0.358 | 1.21 | 1.16 | 0.126 |
| Durabase | Final | 10 | 25 | -12 | -5 | 18.2 | 20.6 | 14.4 | 24.2 | 22.5 | 3.4 | 0.321 | 1.29 | 1.22 | 0.122 |
| | Final | 10 | 25 | -12 | -5 | | | | | | 4.18 | 0.405 | 1.20 | 1.15 | 0.090 |
| Durabase | Final | 20 | 25 | -21 | -16 | 18.0 | 20.5 | 14.0 | 24.0 | 23.5 | 2.8 | 0.332 | 1.31 | 1.24 | 0.100 |
| | Final | 20 | 25 | -21 | -16 | | | | | | | | | | |
| Durabase | Final | 30 | 25 | -34 | -16 | 18.2 | 19.5 | 14.2 | 23.9 | 24.1 | 3.7 | 0.352 | 1.22 | 1.15 | 0.139 |
| | Final | 30 | 25 | -34 | -16 | | | | | | 3.79 | 0.387 | 1.19 | 1.13 | 0.121 |
| Rondins | Final | 0 | 25 | -3 | -1 | 15.6 | 22.7 | 13.9 | 25.3 | 22.5 | 3.2 | 0.366 | 1.14 | 1.07 | 0.189 |
| | Final | 0 | 25 | -3 | -1 | | | | | | 3.08 | 0.351 | 1.21 | 1.16 | 0.137 |
| Rondins | Final | 10 | 25 | -5 | -3 | 16.9 | 20.6 | 13.8 | 24.6 | 24.1 | 3.6 | 0.387 | 1.27 | 1.19 | 0.078 |
| | Final | 10 | 25 | -5 | -3 | | | | | | 3.9 | 0.383 | 1.26 | 1.22 | 0.061 |
| Rondins | Final | 20 | 25 | -15 | -13 | 17.9 | 20.1 | 13.5 | 23.6 | 24.9 | 4.6 | 0.429 | 1.17 | 1.09 | 0.113 |
| | Final | 20 | 25 | -15 | -13 | | | | | | 3.76 | 0.435 | 1.21 | 1.13 | 0.076 |
| Rondins | Final | 30 | 25 | -9 | -36 | 18.0 | 19.3 | 11.7 | 27.1 | 23.8 | 3.9 | 0.429 | 1.17 | 1.06 | 0.139 |
| | Final | 30 | 25 | -9 | -36 | | | | | | 4.19 | 0.410 | 1.24 | 1.17 | 0.067 |