

PROJET PIF

(Plantations Innovantes en Forêt)

Tâche 4.3

Compte rendu d'expérimentation : Impacts de la préparation mécanisée du site sur la structure des sols

21/02/2023

Chloé Agro (INRAE), Malaurie Puyal (INRAE), Florian Vast (INRAE), Violette Gautier (INRAE), Catherine Collet (INRAE).



© Travail du sol et profil cultural, Malaurie Puyal



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural
L'Europe investit dans les zones rurales



L'Europe s'invente chez nous



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement les agents de l'ONF de l'unité territoriale de Lamarche, les conducteurs des pelles qui ont réalisé la préparation mécanisée du site, ainsi que les différentes personnes qui ont participé activement à la mise en place de ce dispositif expérimental, à la réalisation des mesures, à l'analyse des données et à la rédaction de ce document :

- Emila AKROUME (ONF)
- Margaux ARMAND (ONF)
- Kenza BAKOURI (INRAE)
- Frédéric BORDAT (INRAE)
- Catherine COLLET (INRAE)
- Sébastien DAVILLER (ONF)
- Jules DEFRANOUX (INRAE)
- Marie-Odile DIB (ONF)
- Noé DUMAS (INRAE)
- Violette GAUTIER (INRAE)
- Lindsay GODART (INRAE)
- Fanny JOURNAUX (INRAE)
- Jean-Baptiste MAYET (AgroParisTech)
- Benoit PECHEUX (ONF)
- Jonathan PITAUX (ONF)
- Malaurie PUYAL (INRAE)
- Virginie RICHERT (ONF)
- Didier ROSSELER (ONF)
- Florian ROUX (ONF)
- Florian VAST (INRAE)
- Nicolas VIRY (ONF)
- Christophe ZAFFARONI (ONF)

SOMMAIRE

1. CONTEXTE	4
2. SCHEMA EXPERIMENTAL	4
3. CARACTERISATION DU SITE	6
3.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES	6
3.2. CARACTERISATION DES SOLS	9
3.2.1. <i>Compaction des sols</i>	9
3.2.2. <i>Humidité pondérale</i>	10
3.2.3. <i>Structure des horizons superficiels du sol</i>	11
4. MESURES APRES TRAVAIL DU SOL	14
4.1. COMPACTION DES SOLS	14
4.2. PROFILS CULTURAUX.....	15
4.2.1. <i>Méthodologie</i>	15
4.2.2. <i>Analyse statistique</i>	16
4.2.3. <i>Résultats</i>	18
4.2.3.1. La profondeur du travail du sol	18
4.2.3.2. La hauteur du billon.	19
4.2.3.3. Le nombre de traces de dents.....	19
4.2.3.4. La surface de chaque groupe de qualité : estimation des effets croisés « pelle » et « session ».....	20
4.2.3.5. La surface de chaque groupe de qualité : comparaison au témoin non travaillé	24
4.2.3.6. Dimension des polygones décrits pour chaque groupe de qualité.....	27
5. CONCLUSION	31
6. SOURCES	33
7. ANNEXES	33
7.1. DESCRIPTION DES PELLES HYDRAULIQUES ET OUTILS UTILISES POUR LA PMS SUR LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	33
7.2. CARTOGRAPHIE DE L'UNITE EXPERIMENTALE INSTALLEE SUR LA PARCELLE 47, EMPLACEMENT DES MODALITES ET POINTS DE MESURE.....	36
7.3. CARTOGRAPHIE DE L'UNITE EXPERIMENTALE INSTALLEE SUR LA PARCELLE 48-49, EMPLACEMENT DES MODALITES ET POINTS DE MESURE.	36
7.4. RESISTANCE A LA PENETRATION AVANT PMS PAR PARCELLE.....	37
7.5. RESISTANCE A LA PENETRATION AVANT PMS SUR LA PARCELLE 47, PAR MODALITE ET SONDEGE.	37
7.6. RESISTANCE A LA PENETRATION AVANT PMS SUR LA PARCELLE 48-49, PAR MODALITE ET SONDEGE.	37
7.7. RESISTANCE A LA PENETRATION APRES PMS PAR PARCELLE.....	38
7.8. RESISTANCE A LA PENETRATION APRES PMS SUR LA PARCELLE 47, PAR MODALITE ET SONDEGE.	38
7.9. RESISTANCE A LA PENETRATION APRES PMS SUR LA PARCELLE 48-49, PAR MODALITE ET SONDEGE	38
7.10. RESISTANCE A LA PENETRATION APRES PMS SUR LA PARCELLE 47, MOYENNE ET ECART-TYPE PAR MODALITE.....	39
7.11. RESISTANCE A LA PENETRATION APRES PMS SUR LA PARCELLE 48-49, MOYENNE ET ECART-TYPE PAR MODALITE.....	39
7.12. VISUALISATION ET ANALYSE DES 30 PROFILS CULTURAUX REALISES.....	39

1. Contexte

Le travail de préparation mécanisée des sites (PMS) est une étape qui peut être réalisée avant plantation. Ses principaux objectifs sont l'élimination de la végétation compétitrice et/ou la décompaction des sols afin d'améliorer la survie et la croissance des plants. Les difficultés d'organisation des chantiers et de disponibilité du matériel, peuvent entraîner une réalisation de ces travaux dans des conditions non optimales d'humidité du sol. D'autre part, les pelles utilisées aujourd'hui pour le travail de PMS sont de plus en plus grosses car considérées comme plus ergonomiques et confortables pour les conducteurs et avec une productivité horaire plus forte.

Une évaluation multicritère du travail du sol, a été menée dans le cadre du projet PIF (Plantations Innovantes en Forêt). Les objectifs de cette étude sont d'évaluer différents types de pelles hydrauliques utilisées pour les travaux préparatoires du site, mises en œuvre dans différentes conditions d'humidité du sol, selon différents critères :

- L'ergonomie du poste de conduite ;
- La productivité horaire du travail ;
- L'impact sur la structure des sols ;
- L'impact sur la reprise des plants.

Ce rapport présente l'analyse des impacts de la préparation mécanisée des sites (PMS) sur la structure des sols.

2. Schéma expérimental

Pour réaliser cette étude, un dispositif expérimental a été installé en mars 2021 en forêt domaniale de Morimond à proximité de la commune de Lamarche (88320) dans les Vosges. Une zone expérimentale a été définie sur la parcelle 47 et la seconde sur les parcelles 48 et 49 (Tableau 1), pour une superficie totale d'environ 3,7 ha. Par la suite chaque zone expérimentale sera nommée par le numéro de la (des) parcelle(s) sur laquelle elle est installée.

Tableau 1 : Description de chaque zone expérimentale

	Parcelle 47	Parcelles 48 et 49
<i>Coordonnées</i>	48.05137, 5.745877	48.047961, 5.75172
<i>Altitude</i>	479 m	490 m
<i>Pente</i>	< 10% orienté Nord-Ouest vers la route	-
<i>Peuplement précédent</i>	Hêtraie chênaie à gros bois	Chênaie hêtraie à très gros bois avec une matrice résineuse d'épicéa par bouquets
<i>Date dernière coupe</i>	2020 (coupe définitive)	2021 (coupe définitive)
<i>Sylvoécocorégion</i>	C 30 : Plaines et dépressions argileuses du Nord-Est (source IGN)	
<i>Station forestière</i>	IV : Chênaie sur limons mal drainés et VII : Chênaie sur limons drainés épais.	
<i>Unité cartographique des sols (UCS)</i>	N°3206 : Massifs forestiers sur grès du Rhétien parsemés de limons peu épais du plateau lorrain. Sols limoneux à sableux, plus ou moins hydromorphes, acides. (Maillant et al., 2016)	
<i>Texture</i>	Limono-sableuse en surface et jusqu'à 40 cm de profondeur puis principalement argilo-limono-sableuse.	Prédominance de limons-sableux en surface et jusqu'à 30 cm, parfois jusqu'à 60 cm de profondeur puis principalement des limons argilo-sableux.
<i>Éléments grossiers</i>	Présence peu importante.	Présence importante et sur toute la parcelle à une profondeur variant de 10 à 80 cm (profondeur sondée).
<i>Traces de réoxydation</i>	Parfois dès la surface mais généralement à partir de 20 cm de profondeur.	Légères à partir de 10 cm sous la surface, puis augmentation jusqu'à 60 cm.
<i>Traces de décoloration</i>	Parfois dès la surface, mais les zones très décolorées apparaissent généralement vers 20 à 30 cm de profondeur.	Dès 10 cm, puis accentuation jusqu'à au moins 80 cm de profondeur (profondeur sondée).

Chaque parcelle a été délimitée en 3 placettes. Chaque placette correspondait à un niveau d'humidité recherché pour le travail du sol (humide, frais, sec), et donc à une date de l'année pour réaliser ce travail. La première session de travail du sol a été réalisée dans les placettes n°1 en avril 2021. Les conditions météorologiques très pluvieuses cette année-là ne nous ont pas permis d'obtenir les 2 autres niveaux d'humidité recherchés pour le travail du sol (Figure 2). Les 2 autres sessions du travail du sol ont donc été réalisées en 2022. La seconde session a été réalisée dans les placettes n°2 en mars 2022 (conditions humides) et la troisième a été réalisée dans les placettes n°3 en juillet 2022 (conditions sèches). Chaque placette a ensuite été divisée en 4, correspondant aux 3 types de pelle hydraulique et au témoin sans travail du sol.

Pour travailler le sol nous avons utilisé 3 types de pelles hydrauliques une petite (2,7 T), une moyenne (5 T) et une grosse (8,5 T et 9 T). Le poids de la grosse pelle était de 8,5 T lors des 2 premières sessions et de 9 T lors de la 3ème session, pour cause d'indisponibilité de la pelle utilisée lors des 2 premières sessions du travail du sol. Par la suite et pour simplifier, nous attribuerons le poids de 9 T à la grosse pelle peu importe la session de travail du sol. Avec la petite et moyenne pelle nous avons utilisé le sous-soleur multifonctions comme outil de travail du sol, et avec la grosse pelle nous avons utilisé le Modul'D. La description des pelles et des outils qui ont été utilisés est disponible en annexe de ce document (Annexe 1).

Un travail du sol standardisé était demandé aux conducteurs des pelles :

- Décapage de la végétation sur 1,20 m de largeur
- Profondeur de travail du sol à 40 cm
- 3 passes (1 passage sur l'axe de la future ligne de plantation + 2 passages latéraux)
- Billonnage

Avant chaque session de travail du sol il a donc été demandé aux conducteurs de répéter ce travail standardisé au préalable. Par soucis de logistique et de contrainte expérimentale, une parcelle a été attribuée à chaque conducteur de pelle. Sur la parcelle 48-49, le conducteur était le même pour les 3 sessions de travail du sol. Sur la parcelle 47 il y a eu un changement de conducteur entre la session 1 et les sessions 2 et 3, pour cause d'indisponibilité du conducteur. Néanmoins, lors de chaque session de travail du sol le conducteur était bien le même pour les 3 types de pelles dans une même parcelle. Chaque modalité est donc caractérisée par une zone dans le dispositif, une date de réalisation de la PMS et un conducteur.

Etant donné que le travail du sol n'a pas été réalisé la même année et par le même conducteur de pelle pour les 3 sessions nous présenterons dans ce rapport uniquement les résultats obtenus dans les sessions n°2 et n°3. Par ailleurs, suite à un problème technique rencontré sur le terrain, le travail du sol initialement prévu avec la moyenne pelle n'a pas pu être réalisé lors de la 3ème session de travail du sol. La placette définie pour la moyenne pelle a donc été divisée en 2, une moitié a été intégrée dans la placette prévue pour le travail du sol avec la grosse pelle et l'autre dans la zone prévue pour le travail du sol avec la petite pelle. Nous présenterons donc uniquement les résultats obtenus pour la petite et la grosse pelle (Tableau 2).

Tableau 2 : récapitulatif des modalités analysées dans les deux parcelles

<i>Session de travail du sol</i>	Session n°2				Session n°3				Témoin sans travail du sol	
<i>Période de travail du sol</i>	Mars 2022				Juillet 2022					
<i>Condition d'humidité du sol</i>	Humide				Sec					
<i>Type de pelle</i>	Petite		Grosse		Petite		Grosse			
<i>Poids de la pelle</i>	2,7 T		9 T		2,7 T		9 T			
<i>Outil</i>	Sous-soleur multifonctions		Modul'D		Sous-soleur multifonctions		Modul'D			
<i>Parcelle</i>	47	48-49	47	48-49	47	48-49	47	48-49	47	48-49
<i>Conducteur</i>	1	3	1	3	1	3	1	3	-	

3. Caractérisation du site

3.1. Conditions météorologiques

Le climat en forêt domaniale de Morimond est de type océanique dégradé à influence continentale. Un suivi des conditions météorologiques a été réalisé à proximité du dispositif expérimental à l'aide d'une centrale de mesure (Campbell Scientific modèle CR1000) installée en 2019. Nous avons installé sur cette centrale un pluviomètre (Campbell Scientific modèle ARG100), un capteur pour mesurer la température sous abris et l'humidité relative (ROTRONIC HYGROCLIP2 C/W modèle HC2A-S3) et un capteur PAR (Apogée Quantum PAR modèle SQ-110) pour suivre le rayonnement photosynthétique. Les données de la centrale météo ont été récoltées régulièrement tous les mois à partir de mai 2019. En 2022, il a plu 849 mm et la température moyenne mesurée était de 12°C, avec un minimum de -9°C pour le mois de décembre et un maximum de 35°C pour le mois de juillet (Figure 1).

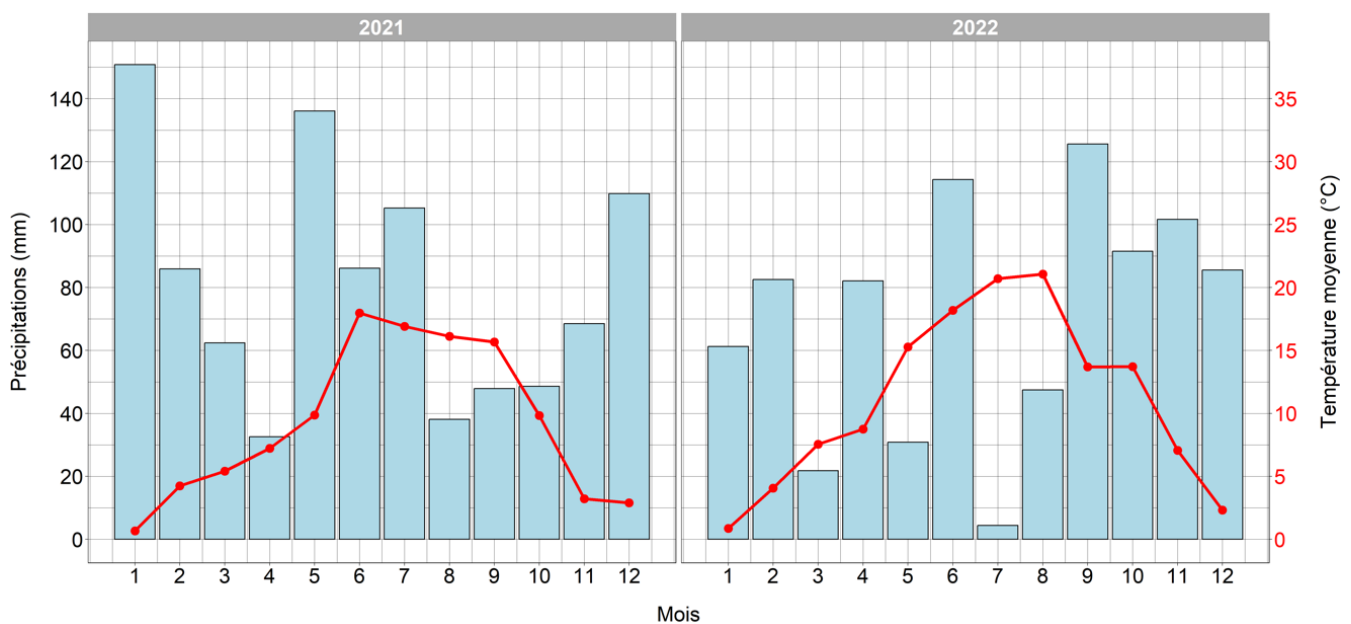


Figure 1 : Diagramme ombrothermique, cumul mensuel des précipitations et températures moyennes mesurées en 2021 et 2022 sur la station météorologique installée en forêt domaniale de Morimond.

En parallèle, nous avons utilisé des sondes TDR de la marque Campbell Scientific (modèle CS616) pour suivre l'évolution de la teneur volumique en eau du sol. Les sondes ont été positionnées dans les 3 zones témoins non travaillées (Annexe 2 et 3) et à 3 profondeurs différentes dans le sol (10, 30, 45 cm). Chaque sonde a été reliée à une centrale de mesure (Campbell Scientific modèle CR1000), pour enregistrer les données en continue. Nous avons installé 3 centrales sur chaque parcelle. Chacune d'elle était reliée à 3 sondes (1 par profondeur sondée), ce qui nous fait en tout 9 sondes par parcelle. Les sondes fonctionnent selon le principe de la réflectométrie temporelle. Cette méthode est basée sur le calcul du temps de propagation d'une onde électromagnétique le long d'une sonde placée dans un matériau, ici le sol. La vitesse de propagation de l'onde dépendra de la permittivité diélectrique du sol, et donc de la permittivité de ses différents constituants (minéraux, matière organique, eau, air). L'eau est le seul constituant du sol qui a une valeur élevée de permittivité diélectrique. C'est aussi le seul composant autre que l'air dont la concentration varie sur la période de temps étudiée. La permittivité diélectrique du sol peut donc être utilisée pour mesurer de manière indirecte la teneur volumique en eau du sol. Ainsi, lorsque nous observons une variation de la permittivité du sol nous pouvons la relier à une variation de la teneur volumique en eau dans le sol.

Nous avons installé des sondes à différentes profondeurs dans le sol (10, 30, 45 cm). On constate sur les 2 parcelles, que la permittivité du sol mesurée varie davantage lorsque la profondeur sondée diminue. La teneur volumique en eau du sol varie donc davantage à 10 et 30 cm de profondeur. Sur la parcelle 47, on note une diminution de 5 à 13% de la permittivité entre mars et juillet 2022 selon la profondeur sondée (Figure 2). Sur la parcelle 48-49 la différence est plus marquée, 10 à 17% de diminution entre mars et juillet 2022 selon la profondeur sondée. Nous avons donc bien enregistré une diminution de la teneur volumique en eau dans le sol entre les 2 sessions de travail du sol sur les 2 parcelles (Figure 3).

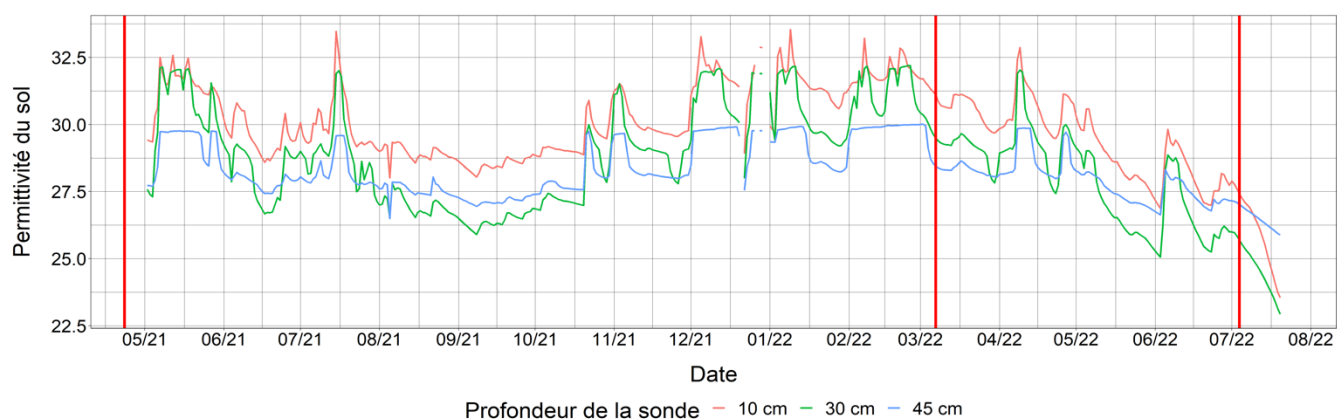


Figure 2 : Permittivité du sol en fonction du temps et de la profondeur sondée, sur la parcelle 47. Nous avons moyenné les valeurs obtenues par jour et par profondeur sondée (3 sondes par profondeur). Les dates des 3 sessions de travail du sol ont été matérialisées par des lignes rouges.

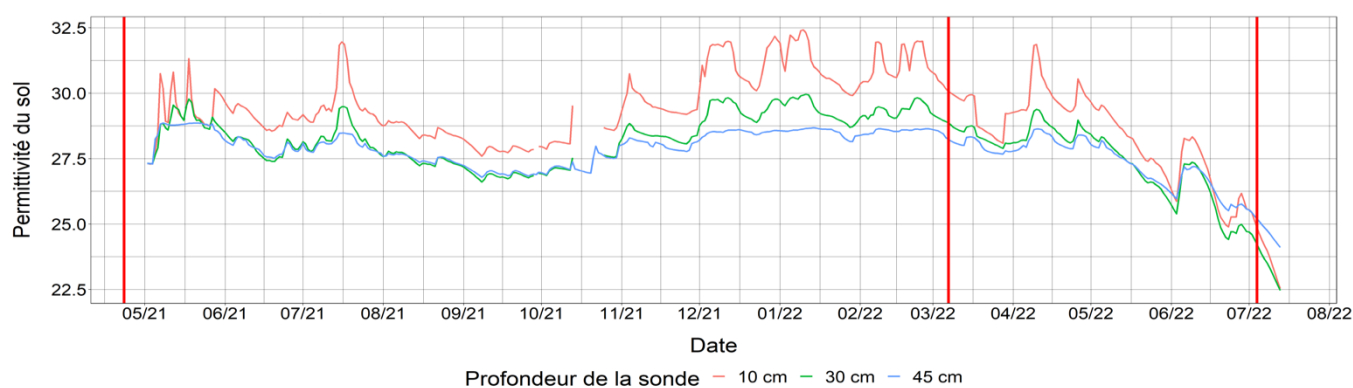


Figure 3 : Permittivité du sol en fonction du temps et de la profondeur sondée, sur la parcelle 47. Nous avons moyenné les valeurs obtenues par jour et par profondeur sondée (3 sondes par profondeur). Les dates des 3 sessions de travail du sol ont été matérialisées par des lignes rouges.

Pour suivre la profondeur de la nappe d'eau dans le sol et donc évaluer la durée et l'intensité de l'engorgement temporaire du sol, nous avons également installé des piézomètres sur chaque parcelle. Ces derniers ont été positionnés de manière systématique au niveau des cloisonnements sylvicoles et dans les zones témoin sans travail du sol, et ont été enfoncés jusqu'à 80 cm de profondeur dans le sol. En tout 9 piézomètres ont été installés sur la parcelle 47 et 6 sur la parcelle 48-49 (Annexe 2 et 3). Le niveau de la nappe a été relevé manuellement dans chaque piézomètre à l'aide d'une sonde piézométrique toutes les deux semaines à partir de la date de leur installation en avril 2021, puis avec un pas de temps mensuel après la dernière session de travail du sol réalisée en juillet 2022.

Nous avons constaté une certaine variabilité du niveau de la nappe sur les 2 parcelles en fonction du piézomètre qui a été utilisé pour la mesure (Figure 4 et 5). Néanmoins, lorsque l'on regarde la valeur médiane, nous observons bien une différence significative entre les 2 sessions de travail du sol sur la parcelle 47 en 2022 (Figure 6). Lors de chaque session de travail du sol il était demandé aux conducteurs des pelles de travailler le sol jusqu'à 40 cm de profondeur. Sur la parcelle 47, la valeur médiane du niveau de la nappe en mars 2022 est d'environ 20 cm de profondeur (Figure 6). Nous étions donc en condition d'engorgement du sol lors de la 2^{ème} session de travail du sol. En juillet 2022 lors de la 3^{ème} session du travail du sol le niveau de la nappe était bien plus bas (médiane à environ 70 cm de profondeur). Sur cette parcelle, nous pouvons donc dire que le sol a bien été travaillé dans les conditions d'humidité recherchées lors des 2 sessions de travail du sol. Sur la parcelle 48-49 on ne note pas de différence significative de la profondeur médiane de la nappe entre les 2 sessions de travail du sol (Figure 6). Sur cette parcelle, nous avons enregistré une diminution du niveau de la nappe d'environ 30 cm sur 3 des 6 piézomètres entre les 2 sessions de travail du sol. Pour les 3 autres piézomètres, cette diminution du niveau de la nappe entre les 2 sessions est inférieure à 8 cm. Nous ne pouvons donc pas affirmer que le travail du sol a bien été réalisé dans des conditions d'humidité différentes entre les 2 sessions de travail du sol sur l'ensemble de la parcelle 48-49.

Compte rendu : Impacts de la PMS sur la structure du sol

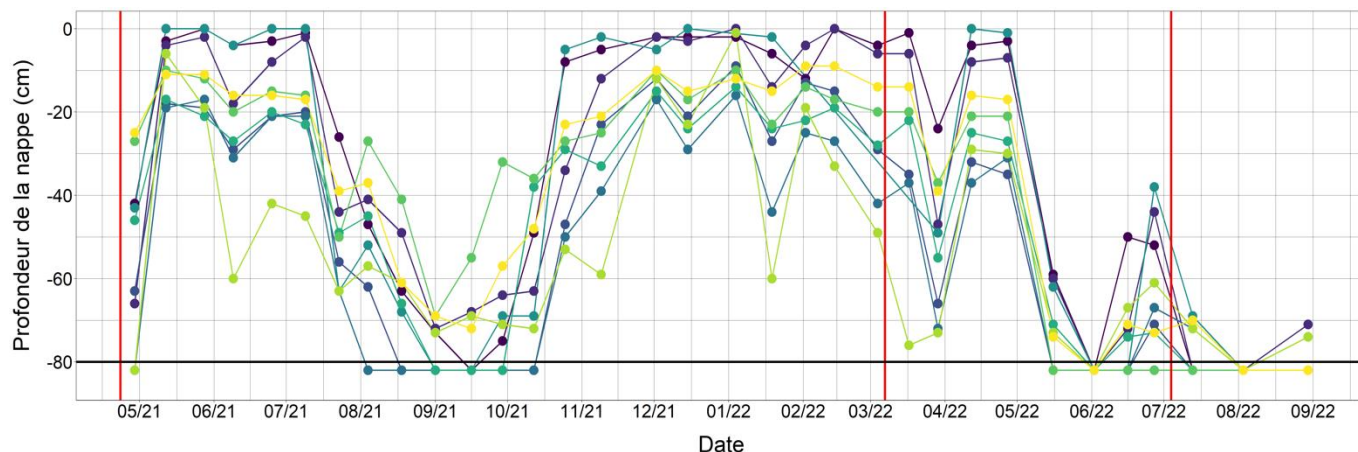


Figure 4 : Profondeur de la nappe d'eau dans le sol, mesurée au niveau de chacun des 9 piézomètres installés sur la parcelle 47 de mai 2021 à novembre 2022. La profondeur maximale sondée est de 80 cm (ligne noire). Lorsque les piézomètres étaient vides, nous avons attribué arbitrairement la profondeur de 82 cm. Les dates des 3 sessions de travail ont été matérialisées par des lignes rouges.

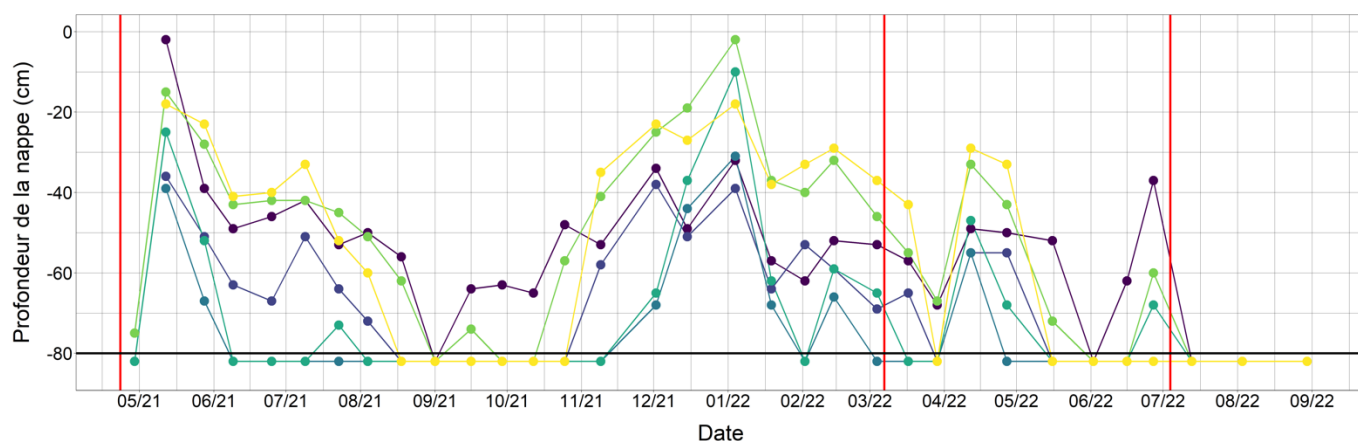


Figure 5 : Profondeur de la nappe d'eau dans le sol, mesurée au niveau de chacun des 6 piézomètres installés sur la parcelle 48-49 de mai 2021 à novembre 2022. La profondeur maximale sondée est de 80 cm (ligne noire). Lorsque les piézomètres étaient vides, nous avons attribué arbitrairement la profondeur de 82 cm. Les dates des 3 sessions de travail ont été matérialisées par des lignes rouges.

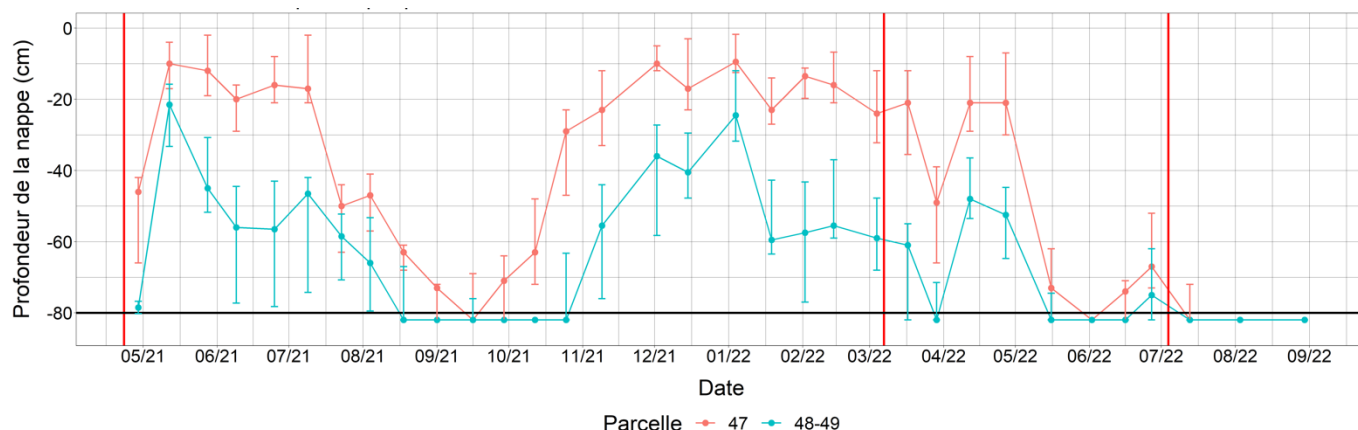


Figure 6 : Profondeur médiane de la nappe d'eau dans le sol et écart interquartile pour chaque parcelle, de mai 2021 à novembre 2022 (parcelle 47 : 9 piézomètres et parcelle 48-49 : 6 piézomètres). La profondeur maximale sondée est de 80 cm (ligne noire). Lorsque les piézomètres étaient vides, nous avons attribué arbitrairement la profondeur de 82 cm. Les dates des 3 sessions de travail ont été matérialisées par des lignes rouges.

3.2. Caractérisation des sols

Des mesures de résistance à la pénétration, d'humidité pondérale et de la structure des horizons superficiels ont été effectuées sur chaque parcelle, pour caractériser le sol et évaluer l'homogénéité spatiale du terrain avant PMS. Pour réaliser ces mesures nous avons défini 8 points de sondage par session de travail du sol et type de pelle. Aucun point de sondage n'a été défini dans les zones témoins (considérés comme identiques aux zones avant travail du sol). Les points de sondage ont été placés au niveau des futures lignes de travail du sol, en conservant une distance minimale de 10 m par rapport aux zones de retournement. Ces derniers ont été positionnés en amont de manière systématique en utilisant le logiciel QGIS pour pouvoir caractériser l'ensemble des parcelles. Certains prélèvements n'ont pas pu être réalisés en raison de fortes densités d'éléments grossiers, de la présence d'une souche ou d'un fossé sur la ligne de plantation.

3.2.1. Compaction des sols

Pour caractériser la résistance à la pénétration sur chaque parcelle nous avons utilisé un pénétromètre PANDA®. Cet appareil permet de mesurer une résistance à la pénétration et donc d'évaluer la compaction du sol. Le taux d'humidité dans le sol, qui influe très fortement sur ces paramètres, doit être mesuré en parallèle le même jour si on veut estimer la compaction du sol standardisée. Les mesures PANDA sont réalisées en enfonçant une tige en métal d'une longueur connue dans le sol, à l'aide d'un maillet. Une pression régulière et modérée est exercée afin d'enfoncer la tige d'environ 10 mm à chaque coup de maillet. Dans le cadre de notre étude, les mesures ont été réalisées au niveau de chaque point de sondage défini précédemment et jusqu'à 50 cm de profondeur, la veille ou le jour du travail du sol avant le passage des pelles.

Comme mentionné précédemment, 8 sondages PANDA ont été réalisés par session et pour chaque type de pelle, soit 32 sondages par parcelle. Lorsque l'on regarde les résultats bruts sans distinguer les zones ou types de pelles, on constate une faible variabilité des résultats obtenus pour la parcelle 47. En effet, environ 95% des valeurs mesurées sont inférieures ou égales à 8 MPa/cm. Pour la parcelle 48-49 on note une variabilité plus importante des résultats avec environ 95% des valeurs comprises entre 0 et 35 MPa/cm, mais aussi des valeurs beaucoup plus importantes jusqu'à 160 MPa/cm, notamment en profondeur (Annexe 4). Il est fort probable que ces valeurs soient directement dues aux éléments grossiers présents dans le sol et/ou à la présence de souches et de rémanents. Ces valeurs extrêmes entraînent un biais dans l'analyse des données. Pour lisser les profils verticaux, nous avons moyenné les valeurs de résistances à la pénétration obtenues par horizon de 5 cm de profondeur. Ce traitement des données sera appliqué à l'ensemble des graphiques représentant la résistance à pénétration en fonction de la profondeur de sol dans ce document.

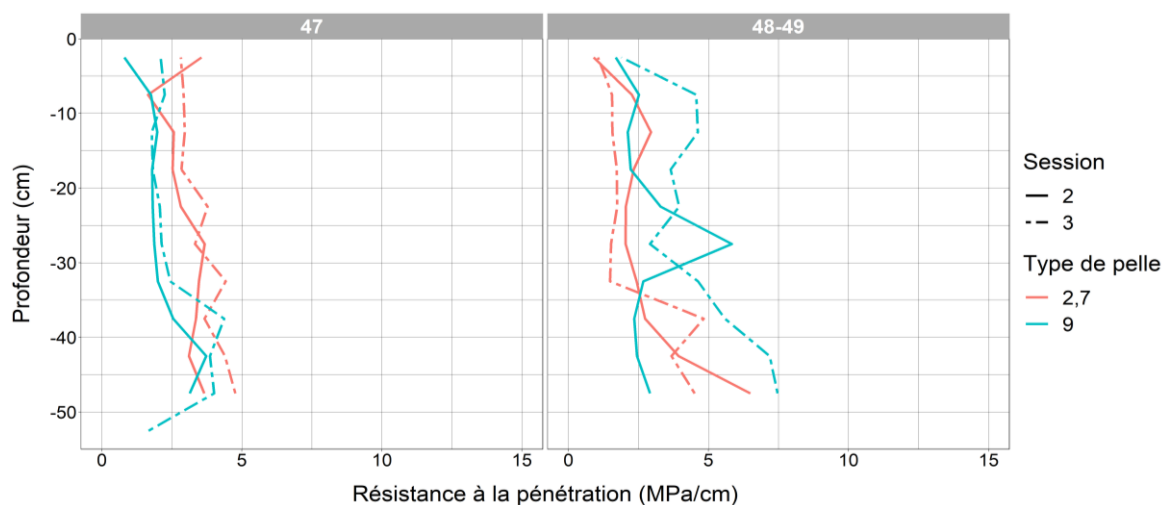


Figure 7 : Résistance à la pénétration mesurée avant les 2 sessions de travail sur chacune des parcelles. Chaque courbe représente la moyenne des valeurs obtenus pour les 8 sondages PANDA réalisés par modalité. Les valeurs ont été moyennées par horizon de 5 cm de profondeur pour lisser les profils.

Lorsque l'on superpose l'ensemble des profils obtenus avant application des modalités, il est difficile d'observer une différence entre les 2 types de pelles et les 2 sessions de travail du sol. Bien que nous ayons moyenné les valeurs obtenues par horizon de 5 cm de profondeur, on note toujours une certaine irrégularité dans les profils sur la parcelle 48-49 (Annexe 5 et 6). Comme mentionné précédemment ces augmentations ponctuelles de la résistance à la pénétration sont très probablement liées à la charge en éléments grossiers dans le sol sur cette parcelle. Pour observer une tendance plus nette, nous avons moyenné les valeurs obtenues par modalité. Lorsque l'on regarde cette fois les profils moyens de résistance à la pénétration, on constate une légère différence entre les mesures qui ont été réalisées dans la zone définie pour le travail de la petite pelle et celle définie pour le travail de la grosse pelle (Figure 7). Néanmoins les écarts-types sont relativement importants pour chacun des profils, nous ne pouvons donc pas conclure quant à une différence significative de la résistance à la pénétration dans ces 2 zones. De la même façon, on ne note pas non plus de différence significative de la résistance à la pénétration entre les 2 sessions de travail du sol et ce peu importe la parcelle (Annexe 10).

3.2.2. Humidité pondérale

Plusieurs paramètres peuvent influencer la résistance à la pénétration comme la texture ou encore l'humidité du sol. Pour évaluer plus précisément la teneur en eau dans le sol, nous avons mesuré l'humidité pondérale (ou teneur en eau massique du sol) au niveau de chaque point de sondage et à 3 profondeurs de sol différentes (10, 30 et 50 cm). Pour ce faire, nous avons prélevé des échantillons de sol à l'aide d'une tarière. Les prélèvements ont été réalisés le même jour que les mesures de résistance à la pénétration avant le passage des pelles. Pour chaque prélèvement, la tarière a été enfoncée jusqu'à environ 70 cm de profondeur afin d'extraire une carotte d'une longueur suffisante pour pouvoir récupérer tous les horizons désirés. Seul 2 échantillons n'ont pas pu être prélevés, car nous n'avons pas réussi à suffisamment enfoncer la tarière dans le sol à cause de la présence d'éléments grossiers. Une fois la carotte de terre extraite il s'agissait de prélever l'horizon compris 5 cm au-dessus et 5 cm en dessous de la profondeur de sol souhaitée. Nous avons ainsi prélevé les horizons compris entre 5 et 15 cm de profondeur, 25 et 35 cm profondeur et 45 et 55 cm profondeur. Chaque horizon a été déposé dans un pilulier préalablement pesé à vide. Les piluliers ont été fermés hermétiquement pour limiter l'évaporation et immédiatement pesés sur le terrain. Pour obtenir la masse de sol humide dans chaque pilulier, nous avons soustrait la masse du pilulier pesé à vide. Les piluliers ont ensuite été passés à l'étuve à une température de 105°C pendant environ 48 h afin d'évaporer l'eau contenue dans chaque échantillon. Une fois les échantillons secs, les piluliers ont été pesés une seconde fois et ce immédiatement à la sortie de l'étuve pour éviter qu'ils ne se réhumidifient. La masse de sol sec dans chaque pilulier a été obtenue en retirant la masse du pilulier pesé à vide. L'humidité pondérale a ensuite été calculée pour chaque échantillon en divisant la masse d'eau contenue dans le sol par la masse de sol sec (Soltner, 2017). Nous avons multiplié cette humidité pondérale par 100 pour l'exprimer en pourcentage.

$$\text{Humidité pondérale} = \left(\frac{\text{Masse sol humide} - \text{Masse sol sec}}{\text{Masse sol sec}} \right) \times 100$$

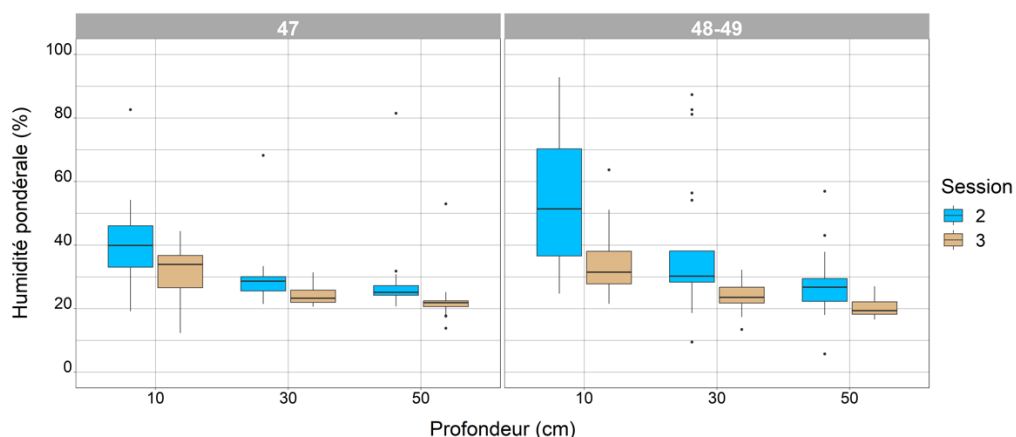


Figure 8 : Humidité pondérale en fonction de la profondeur de prélèvement et de la parcelle. Les prélèvements ont été effectués avant la 2^{ème} et 3^{ème} session de travail du sol, respectivement en mars et juillet 2022.

Dans cette expérimentation nous souhaitons réaliser le travail du sol selon différents niveaux d'humidité du sol. La 2^{ème} session de travail du sol a été programmée en mars pour travailler le sol en conditions humides. La 3^{ème} session de travail du sol a quant à elle été programmée en juillet pour travailler le sol en conditions sèches. On constate que l'humidité pondérale mesurée avant la 2^{ème} session de travail du sol est effectivement plus importante que celle mesurée avant la 3^{ème} session et ce peu importe la parcelle ou la profondeur de prélèvement des échantillons de sol. Cette différence semble significative excepté peut-être lorsque les échantillons ont été prélevés à 10 cm de profondeur. On constate néanmoins une variabilité plus importante dans la parcelle 48-49, et notamment pour les échantillons prélevés en conditions humides (session n°2) à 10 cm de profondeur (Figure 8).

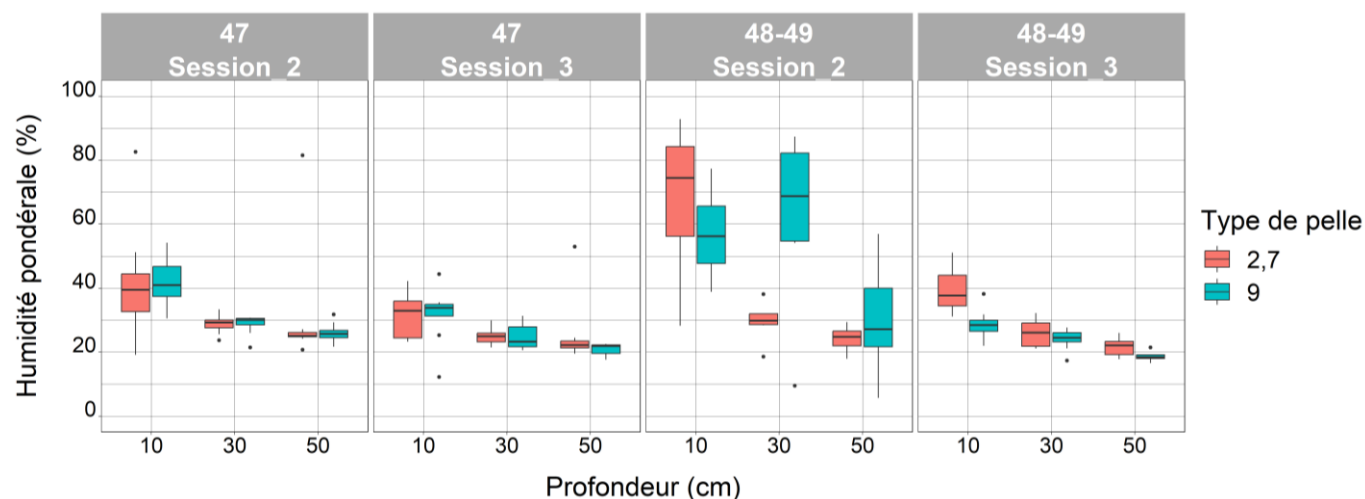


Figure 9 : Humidité pondérale en fonction de la profondeur de prélèvement et de la parcelle. Les prélèvements ont été effectués avant la 2^{ème} et 3^{ème} session de travail du sol, respectivement en mars et juillet 2022 dans la zone définie pour le travail de la grosse et de la petite pelle.

Dans chaque zone nous avons délimité une zone de travail du sol pour chacun des types de pelles utilisées. Sur la parcelle 47, on constate qu'il n'y a pas de différence significative entre l'humidité pondérale mesurée dans la zone définie pour la petite pelle et celle définie pour la grosse pelle, et ce peu importe la session ou la profondeur de prélèvement des échantillons. Sur la parcelle 47, nous pouvons donc dire que pour chaque session de travail du sol, les 2 types de pelles ont bien travaillé dans les mêmes conditions d'humidité du sol. En revanche ce n'est pas toujours le cas sur la parcelle 48-49 (Figure 9). Lorsque l'on regarde les résultats obtenus sur la parcelle 48-49, on note une forte variabilité notamment pour les mesures réalisées avant la 2^{ème} session de travail du sol et pour les échantillons prélevés à 10 cm de profondeur. Pour cette session, lorsque l'on regarde les résultats obtenus à 30 cm de profondeur, l'humidité pondérale mesurée dans la zone définie pour la grosse pelle est 2 fois supérieure à celle mesurée dans la zone définie pour la petite pelle. Sur la parcelle 48-49, nous ne pouvons donc pas affirmer que pour chaque session, les 2 types de pelles ont bien travaillé dans les mêmes conditions d'humidité du sol.

3.2.3. Structure des horizons superficiels du sol

Un des objectifs de l'expérimentation était de tester une méthode de diagnostic, le test bêche, mise au point en contexte de grande culture et qui permet d'apprécier l'état de la structure d'un sol sur les 20 premiers centimètres. Ce test consiste à prélever un bloc de sol à l'aide d'une bêche afin d'établir un diagnostic « rapide » de l'état physique et biologique du sol. La description de chaque bloc de sol se fait en se référant au « Guide méthodique du test bêche, Structure et Action des vers de terre » rédigé par AGRO TRANSFERT (Turillon et al., 2018). Pour chaque test bêche, deux horizons sont décrits (0-10 cm et 10-20 cm) et deux variables sont observées, l'état physique du sol suivant une grille de notation allant d'un état friable (sq1) à un état compact (sq5) et son état biologique noté B- et B pour les structures sq1 et sq2 et B0 à B3 pour les structures de sq3 à sq5.

Dans ce rapport nous ne présenterons pas les résultats concernant l'évaluation de l'état biologique du sol. Dans le guide méthodique, l'état biologique du sol est évalué en fonction de l'activité biologique des vers de terre. Cette

variable n'est peut-être pas ou peu adaptée dans des contextes pédologiques forestiers caractérisés par des sols acides hydromorphes et/ou riches en éléments grossiers, comme c'est le cas dans notre expérimentation. Dans notre contexte, nous avons observé très peu de traces de présence de vers de terre et ce critère a été éliminé de l'analyse. Un autre projet de recherche est actuellement en cours pour trouver d'autres indicateurs de l'activité biologique des sols forestiers (enracinement, traces d'activité d'autres animaux...)

Un test bêche a été réalisé au niveau de chacun des points de sondage définie précédemment, le même jour que les mesures de résistance à la pénétration avant le passage des pelles. Une note qualifiant la structure du sol et son tassement est attribuée, selon 5 niveaux :

- 1 ou « friable » : une structure friable, très poreuse, agrégats < 0,6cm, bien colonisé par les racines → pas de tassement
- 2 ou « intact » : une structure friable, poreuse, agrégats arrondis de 2mm à 7cm, bien colonisé par les racines → pas de tassement.
- 3 ou « ferme » : une structure moins friable, faible porosité, agrégats plutôt arrondis de 2mm à 10cm → tassement léger
- 4 ou « compact » : structure sub-angulaire, très faible porosité, agrégats cubiques et structure lamellaire possible → tassement assez fort
- 5 ou « très compact » : structure angulaire, mottes >10cm, pas ou très peu de porosité, anoxie possible → tassement sévère

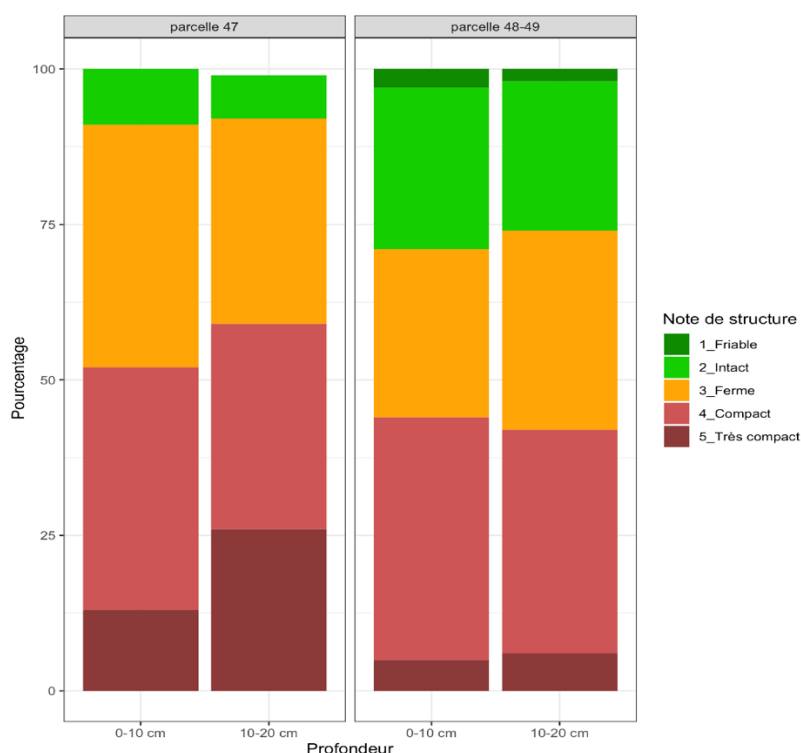


Figure 10 : Proportion des 5 qualités de structure du sol en fonction de la parcelle et de l'horizon décrit.

La figure 10 nous montre que les parcelles présentent une forte proportion (environ 50%) de notes « compact » et 5 « très compact » quelle que soit la profondeur. Cela nous montre l'importance des tassements de surface sur ces deux parcelles. Pour les autres notes, la parcelle 48-49 montre une proportion de notes « friables » et « intactes » plus importantes.

Cela peut s'expliquer par plusieurs points :

- Une charge en éléments grossiers plus importante dans la parcelle 48-49 qui améliore la portance du sol et qui diminue l'effet de tassement lié aux engins qui ont réalisé l'exploitation du peuplement précédent.
- Une texture plus sableuse, plus filtrante et moins sensible au tassement.
- Moins de contraintes liées à l'engorgement.

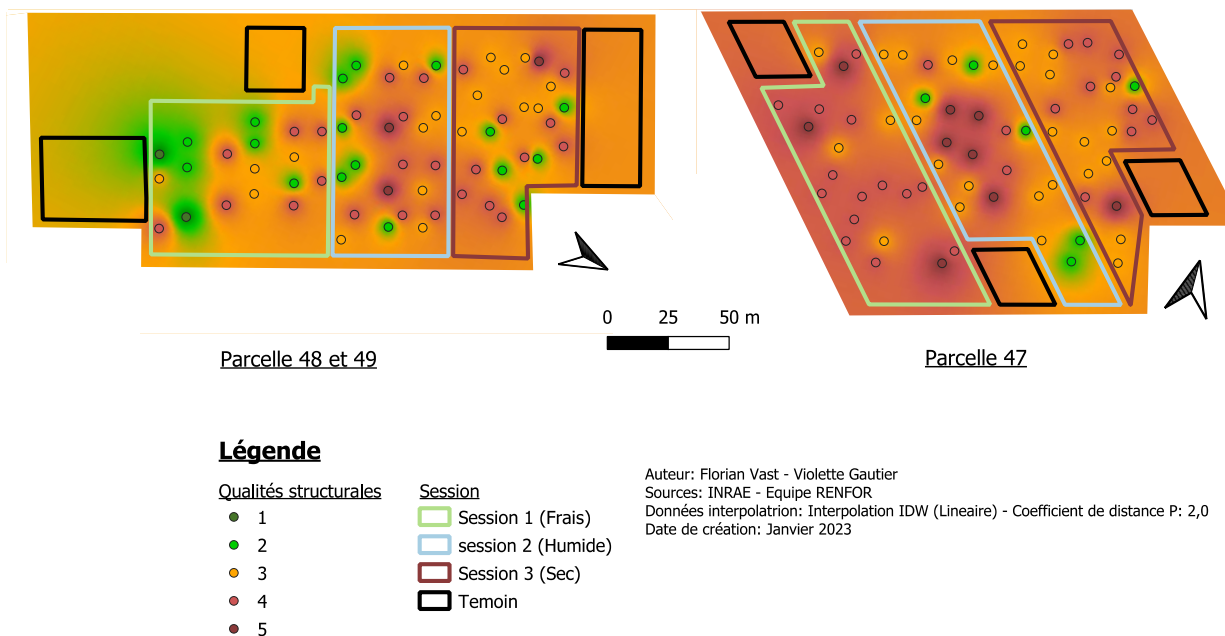


Figure 11 : Cartographie de l'état structural du sol évalué grâce à la méthode du « test bêche », et décrit sur l'horizon compris entre 0 et 10 cm de profondeur.

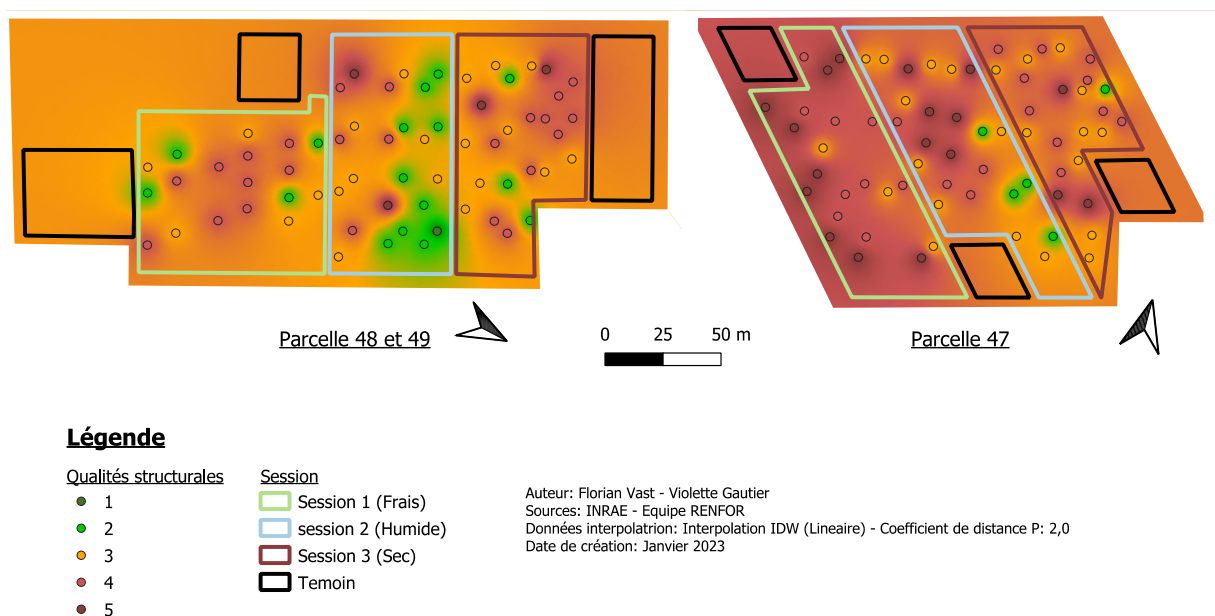


Figure 12 : Cartographie de l'état structural du sol évalué grâce à la méthode du « test bêche », et décrit sur l'horizon compris entre 10 et 20 cm de profondeur.

Les cartes réalisées à partir des tests bêches permettent de mettre en évidence une variabilité intra-parcellaire de l'état structural pour les horizons 0-10 cm et 0-20 cm. Nous pouvons notamment visualiser les zones caractérisées par un tassement plus ou moins sévère sur chacune des parcelles (Figure 12). Cet outil de diagnostic semble donc être une manière efficace et pertinente pour évaluer les dégradations de la structure du sol. L'utilisation de cet outil nous permettrait de cibler les zones qui seront le plus impactées par les tassements lors d'une PMS.

Il pourrait être utilisé pour évaluer la nécessité d'intervenir avec une PMS ou non, cibler certaines zones ou encore ajuster le niveau d'intervention en fonction du degré de dégradation du sol avant PMS. Son utilisation permettrait ainsi de mieux maîtriser les impacts environnementaux mais aussi financiers qui peuvent être engendrés par une PMS.

4. Mesures après travail du sol

L'objectif des mesures réalisées après PMS est d'évaluer l'impact de la PMS sur la structure du sol en fonction du poids de la pelle utilisée et de la teneur en eau du sol au moment de la PMS. Pour décrire les perturbations engendrées, nous avons à nouveau mesuré la résistance à la pénétration mais aussi utilisé une autre méthode, celle du profil cultural qui nous permet d'obtenir non seulement une description quantitative mais aussi qualitative de la structure du sol.

4.1. Compaction des sols

La résistance à la pénétration a été mesurée une seconde fois sur chaque parcelle après PMS. Les mesures ont également été réalisées à l'aide d'un pénétromètre PANDA® mais cette fois jusqu'à 80 cm de profondeur. Bien que la PMS ait été réalisée à des périodes différentes de l'année dans les 2 zones, la résistance à la pénétration a été mesurée le même jour après la dernière session de travail du sol, en septembre 2022. Il est à noter que les points de sondage n'étaient pas les mêmes que ceux définis lors de la campagne de mesures avant PMS et 24 sondages ont été réalisés par modalité au lieu de 8 avant PMS.

Lorsque l'on superpose l'ensemble des profils obtenus par modalité après PMS il est difficile d'observer une différence entre les 2 types de pelles et les 2 sessions de travail du sol. En revanche on peut tout de même observer la même tendance qu'avant travail du sol à savoir que la variabilité des résultats semble plus importante sur la parcelle 48-49 et notamment lorsque le travail du sol a été réalisé en conditions sèches (Annexe 8 et 9). Sur cette parcelle on constate que la résistance à la pénétration est très importante pour certains points de sondage (Annexe 7). Nous pouvons expliquer ces résultats par la forte présence d'éléments grossiers et de souches sur l'ensemble de la parcelle. On constate également que certains sondages n'ont pas été réalisés jusqu'à la profondeur souhaitée de 80 cm (Annexe 9). En effet, des difficultés ont été rencontrées au niveau de certains points de sondages pour enfoncer le pénétromètre dans le sol, notamment lorsque le travail du sol a été réalisé en conditions sèches. Ces difficultés sont surtout liées à présence d'éléments grossiers dans le sol.

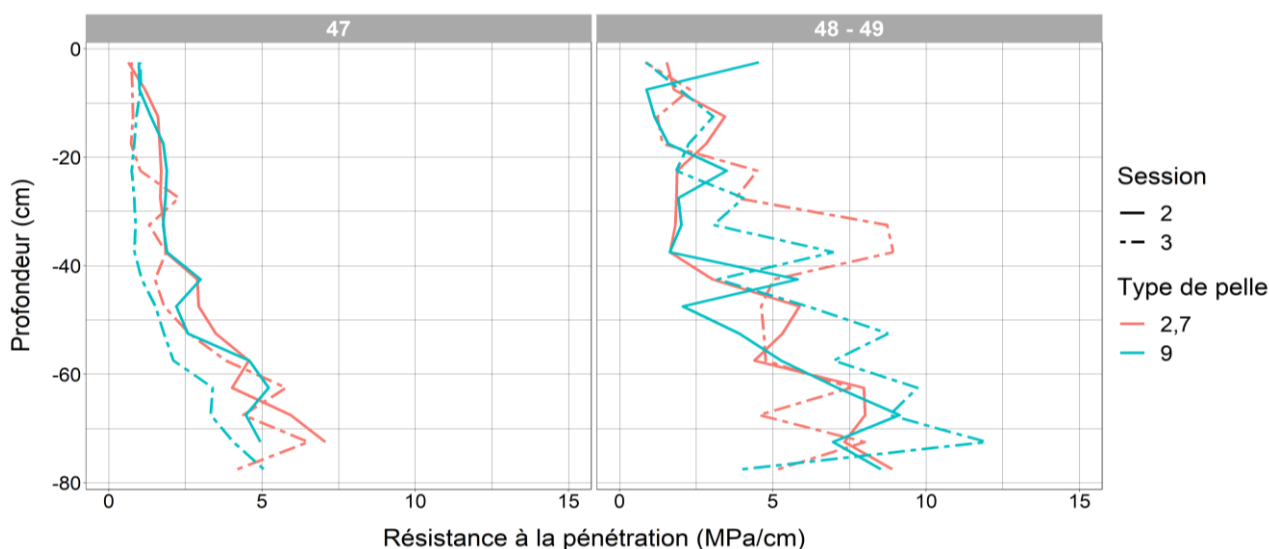


Figure 13 : Résistance à la pénétration mesurée après les 2 sessions de travail du sol en septembre 2022 sur chacune des parcelles. Chaque courbe représente la moyenne des valeurs obtenus pour les 24 sondages PANDA réalisés par modalité. Les valeurs ont été moyennées par horizon de 5 cm de profondeur pour lisser les profils.

Lorsque l'on regarde cette fois les courbes moyennes tracées pour chaque modalité, on note que la résistance à la pénétration n'est pas significativement différente entre les 2 types de pelles et sessions de travail du sol et ce peu importe la parcelle. Les écart-type types calculés pour chacune des modalités se superposent et sont relativement importants notamment sur la parcelle 48-49 (Annexe 11). Comme mentionné précédemment, ces résultats semblent assez peu robustes à cause de la présence d'éléments grossiers. La résistance à la pénétration augmente significativement en présence d'éléments grossiers. De la même façon que pour les mesures réalisées avant travail du sol, nous avons moyenné les valeurs de résistances à la pénétration obtenues par horizon de 5 cm toutefois, nous observons toujours de nombreux pics d'augmentation de la résistance à la pénétration à certaines profondeurs. Cette transformation nous permet de lisser les courbes obtenues mais peut-être pas suffisamment. En effet lorsque l'on observe les données brutes on constate que la résistance à la pénétration peut atteindre jusqu'à 75 MPA/cm dans la parcelle 48-49 (Annexe 7). Ces valeurs extrêmes peuvent donc tirer la moyenne vers le haut et biaiser les résultats. Pour corriger cela il serait nécessaire de fixer un seuil pour lequel on considère que la résistance à la pénétration n'est pas liée à la structure du sol mais bel et bien à la rencontre d'une roche ou d'une souche par exemple. Par ailleurs, bien que les mesures aient été réalisées le même jour dans les 2 zones sur chaque parcelle, la teneur en eau du sol n'était peut-être pas la même au niveau des différents points de sondage. Lors de la caractérisation du sol, nous avons noté une certaine variabilité de la teneur en eau du sol en fonction de la parcelle, mais aussi en fonction de la localisation du point de sondage. La résistance à la pénétration diminue avec l'augmentation de la teneur en eau dans le sol. Pour prendre en compte ce paramètre il aurait donc fallu réaliser des mesures d'humidité pondérale au niveau chaque point de sondage comme cela a été le cas lors de la caractérisation du sol, pour pouvoir standardiser les données de résistance à la pénétration obtenue.

4.2. Profils culturaux

Les impacts de la PMS sur le sol peuvent avoir des conséquences positives ou négatives sur sa structure et par conséquent sur le volume de sol prospectable par les racines du plant lors de son installation. Pour caractériser les impacts de la PMS, nous avons utilisé la méthode du profil cultural. Ce document présente la méthode utilisée pour réaliser les observations et analyser les données, et les résultats obtenus.

4.2.1. Méthodologie

La méthode du profil cultural consiste à observer et à délimiter des zones de structures homogènes directement sur le sol selon un plan vertical. Cette méthode permet d'évaluer les effets engendrés par la PMS sur la structure du sol et donc d'en déduire les impacts potentiels sur la distribution spatiale et le fonctionnement des systèmes racinaires des plants. La description de chaque profil nécessite l'ouverture d'une fosse pédologique au niveau de la ligne de travail du sol. Dans la fosse, le plan du profil doit être positionné perpendiculairement au sens du travail du porte outil, et doit être assez grand pour permettre la description de toute la zone potentiellement impactée par la PMS. La largeur du profil, doit donc être au moins égale à la largeur de l'outil de PMS et du porte outil (tracteur ou pelle mécanique). De même pour la profondeur du profil, qui doit être au moins égale à la profondeur attendue pour le travail de l'outil (Vast et al., 2020). Dans le cadre de notre étude le choix de la taille des profils a été fixé à 100 cm de profondeur et 200 cm de largeur (100 cm de part et d'autre du centre de la ligne de travail du sol). Les fosses ont été ouvertes à l'aide d'une mini-pelle et la face à décrire a été rafraîchie à l'aide d'un couteau. Pour décrire les profils, nous avons matérialisé avec deux double-mètres un repère orthonormé permettant de relever les coordonnées des points d'observation. Le centre du repère a été positionné sur la ligne de travail du sol, au niveau estimé du sol avant perturbation. Chaque zone du profil a été décrite selon les caractéristiques suivantes :

- L'état structural du sol (terre fine, mottes identifiables, zones tassées) ;
- La présence de vides éventuels (naturels ou créés par les outils) ;
- La localisation et l'état des matières organiques ;
- L'hydromorphie ;
- Les surfaces lissées par le passage des outils (principalement dans les argiles et les limons) ;
- La présence de racines

La description des profils nous a permis d'identifier des zones de sol avec une structure homogène. Nous les avons délimitées à l'aide de repères visuels (tees de golf) implantés dans le profil. Au total, 30 profils ont été décrits, 15 pour la parcelle 47 et 15 pour la parcelle 48-49, ce qui correspond à 3 profils par modalité (conditions d'humidité x type de pelle) plus 3 profils dans la zone témoin sans travail du sol.

Pour chaque profil, les différents calculs ont été effectués sur 3 surfaces (rectangles) différentes. Un premier rectangle de 100 cm de longueur et 50 de profondeur (rectangle central) qui représente la partie la plus « impactée » par le travail du sol, un deuxième de 200 cm de longueur et 50 cm de profondeur (rectangle intermédiaire) qui permet de décrire les effets de la PMS et éventuellement les passages du porte outil et enfin un troisième rectangle qui représente la totalité de la surface décrite et par conséquent des zones non impactées par la PMS de 200 cm de largeur et 100 cm de profondeur (rectangle complet) (Figure 14).

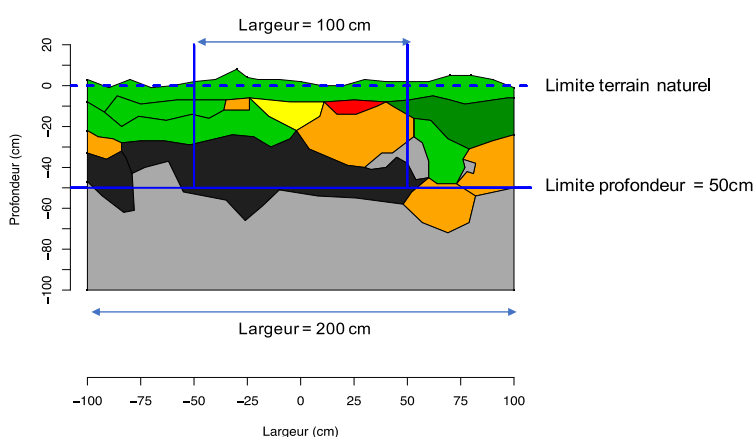


Figure 14 : Photo d'un profil et schéma représentant les limites des différentes surfaces « rectangles » utilisées pour calculer les proportions de chaque type de structure de sol. Profil cultural réalisé sur la parcelle 48-49 dans la zone témoin.

Sur le terrain, pendant les descriptions des profils, après avoir délimité les zones de structure homogène et caractérisé l'état interne de chaque motte, les qualités de structure sont définies selon 8 classes (Figure 15). Pour l'analyse nous avons fait le choix de regrouper certaines classes pour créer deux groupes. Le 1^{er} groupe pour les structures favorables à l'enracinement (Très favorables + Favorable + Assez Favorable) qui sera appelé dans la suite du document : « structures globalement favorables » et un 2^{ème} groupe pour les structures défavorables à l'enracinement (Peu favorable + Défavorable + Très défavorable + Vides + Roche mère/éléments grossiers) qui sera appelé dans la suite du document : « structures globalement défavorables » (Figure 15).

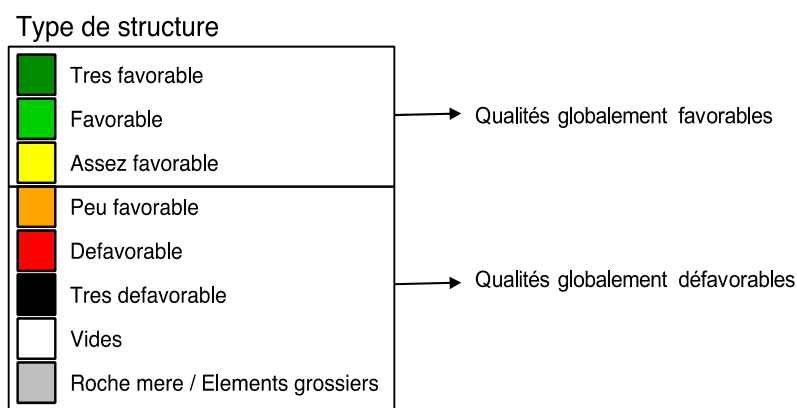


Figure 15 : Liste des différents types de structure du sol définis lors de la description des profils culturaux et regroupements qui ont été fait pour distinguer 2 catégories de qualité de structure du sol.

4.2.2. Analyse statistique

Pour cette analyse nous disposons d'un échantillon de 30 profils répartis selon le tableau suivant :

Parcelle	Session 2		Session 3		Témoin
	Pelle 2,7 T	Pelle 9 T	Pelle 2,7 T	Pelle 9 T	
47	3	3	3	3	3
48-49	3	3	3	3	3
Total	6	6	6	6	6

Pour analyser les données, nous avons choisi d'utiliser trois types de modèles différents, avec un seuil de significativité de 0,05 :

- Un modèle linéaire = Anova.
- Un modèle linéaire généralisé = glm ou régression de Poisson.

Le choix du modèle se fait en fonction de la nature des variables.

Anova 1 :

24 Observations :

- Parcelle 47 -> (3 profils x 2 sessions x 2 pelles) -> 12 profil
- Parcelle 48-49 -> (3 profils x 2 sessions x 2 pelles) -> 12 profils
- Pas de profils TEMOIN

Cette régression linéaire compare les parcelles, les pelles et les sessions entre elles.

3 Variables explicatives :

- La parcelle (47 ou 48-49)
- La session (session 2 ou session 3)
- La pelle (2,7T et 9T)

15 Variables expliquées :

- La profondeur de travail du sol
- La hauteur du billon
- Nb de coups de dents visibles
- La surface de la zone « qualités globalement favorables » pour chacun des 3 rectangles.
- La surface de la zone « qualités globalement défavorables » pour chacun des 3 rectangles.

Anova 2 :

30 Observations :

- Parcelle 47 -> (3 profils x 2 sessions x 2 pelles) + 3 profils TEMOINS -> 15 profils
- Parcelle 48-49 -> (3 profils x 2 sessions x 2 pelles) + 3 profils TEMOINS -> 15 profils

Dans cette régression linéaire les parcelles et les différentes modalités sont chacune comparées aux profils TEMOINS. Une nouvelle variable à 5 facteurs appelé « Modalité » a été créée en regroupant les variables « Pelle » et « Session ».

Les cinq niveaux de cette nouvelle variable sont :

- TEMOIN
- Pelle 2,7T x session 3
- Pelle 2,7T x session 2
- Pelle 9T x session 3
- Pelle 9T x session 2

2 Variables explicatives :

- La parcelle (47 ou 48-49)
- Modalité

12 Variables expliquées :

- La surface des zones de « qualités globalement favorables » pour chacun des 3 rectangles.
- La surface des zones de « qualités globalement défavorables » pour chacun des 3 rectangles.
- Le ratio entre la surface des zones de « qualités globalement favorables » / par le nombre total des zones de cette même surface, pour chacun des 3 rectangles.
- Le ratio entre la surface des zones de « qualités globalement défavorables » / par le nombre total des zones de cette même surface, pour chacun des 3 rectangles.

Modèle linéaire généralisé (glm), régression de Poisson.

Pour analyser les nombres de vides engendrés par la PMS, nous avons opté pour un modèle linéaire généralisé (régression de Poisson).

Les variables utilisées pour l'analyse sont les suivantes :

Pour le modèle linéaire généralisé :

3 Variables explicatives :

- La parcelle (47 ou 48-49)
- La session (Session 2 ou session 3)
- La pelle (2,7T et 9T)

1 Variable expliquée :

- Le nombres de vides engendrés par l'outil

Pour l'analyse, les valeurs des différentes surfaces sont volontairement laissées en valeurs absolues (en cm²) car elles diffèrent d'un profil à l'autre en raison de la taille du billon.

4.2.3. Résultats

Les 30 profils et une analyse de chaque profil sont présentés en annexe 12.

4.2.3.1. La profondeur du travail du sol

Modèle = lm (profondeur atteinte ~ Parcelle + Session + Pelle)
P-value du modèle : 0,003 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,4096

La profondeur moyenne de travail du sol, toutes modalités confondues est de 44 cm.

On constate un effet significatif de la parcelle et de la taille de la pelle sur la profondeur atteinte (Figure 16) :

- Le travail du sol est plus profond sur la parcelle 47 de 9 cm en moyenne (p-value = 0,010).
- Le travail du sol est plus profond avec la pelle de 9T de 10 cm en moyenne (p-value = 0,006).

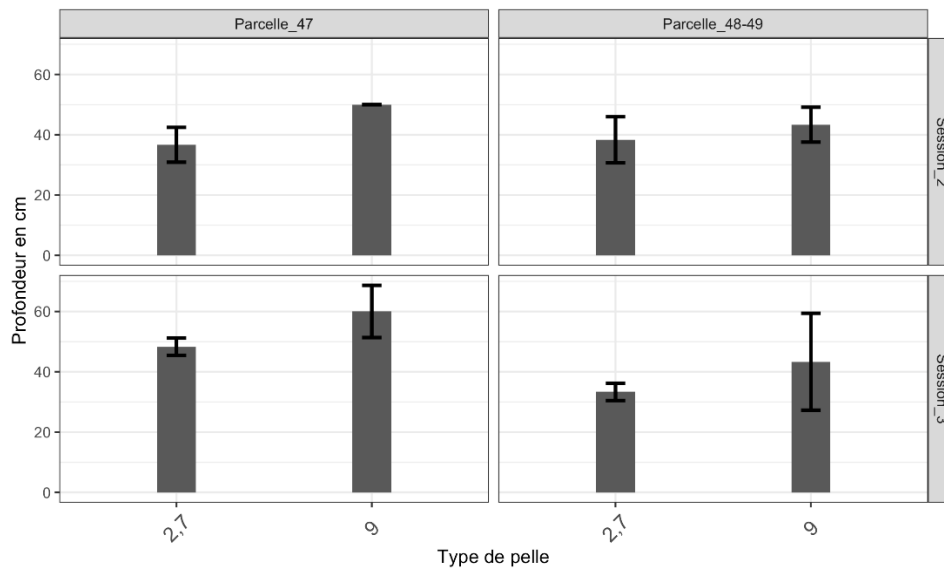


Figure 16 : Profondeur moyenne atteinte lors du travail du sol et écart-type en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

4.2.3.2. La hauteur du billon.

Modèle = lm (Hauteur du billon ~ Parcelle + Session + Pelle)
 P-value du modèle : 0,1587 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,1073

La hauteur moyenne des billons, toutes modalités confondues est de 17 cm.

La p-value du modèle n'est pas très bonne = 0,1587, mais on constate quand même une tendance de l'effet de la session sur la hauteur du billon (Figure 17) :

- Les billons sont plus hauts lors de la session 3 de 9 cm (p-value = 0,033)

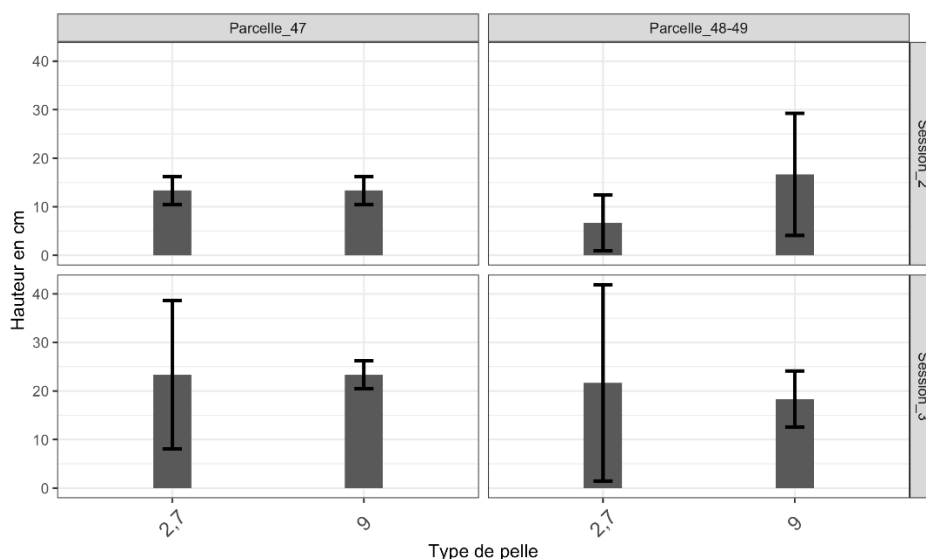


Figure 17 : Hauteur moyenne du billon formé lors du travail du sol et écart-type en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

4.2.3.3. Le nombre de traces de dents.

Modèle = glm (Nombre de vides ~ Parcelle + Session + Pelle, famille = Poisson)

Le nombre moyen du nombre de traces de dents, toutes modalités confondues est de 2.
Il n'y a pas d'effet session, parcelle ou pelle sur le nombre de traces de dents (Figure 18).

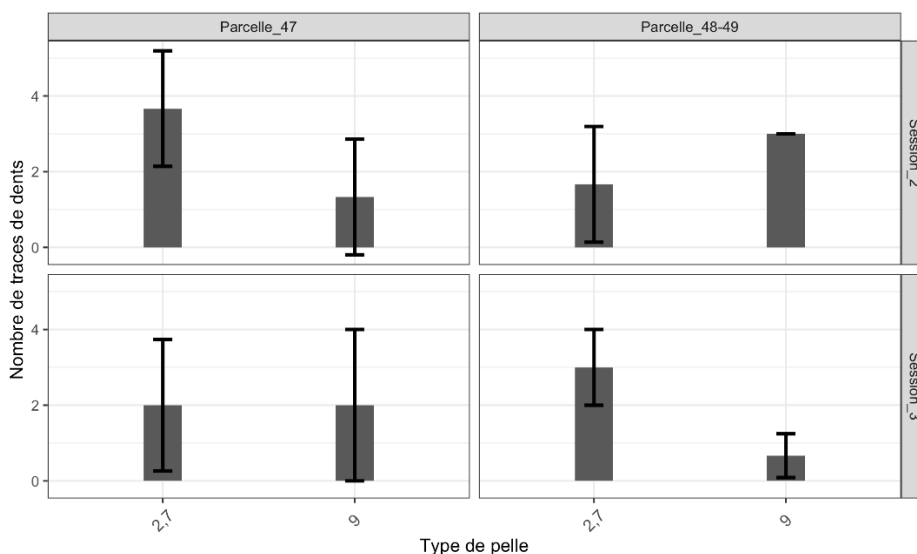


Figure 18 : Nombre moyen du nombre de traces de dents et écart-type en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

4.2.3.4. La surface de chaque groupe de qualité : estimation des effets croisés « pelle » et « session »

Rectangle central, qualités globalement favorables

Modèle = lm (qualités globalement favorables_rectangle_central ~ Parcelle + Session + Pelle)

P-value du modèle : 0,001 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,4733

La surface moyenne des qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 3740 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle et de la session sur les surfaces de qualités globalement favorables (Figure 19) :

- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 1475 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,003).
- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 1537 cm² quand la PMS est réalisée lors de la session 3 (p-value = 0,002).

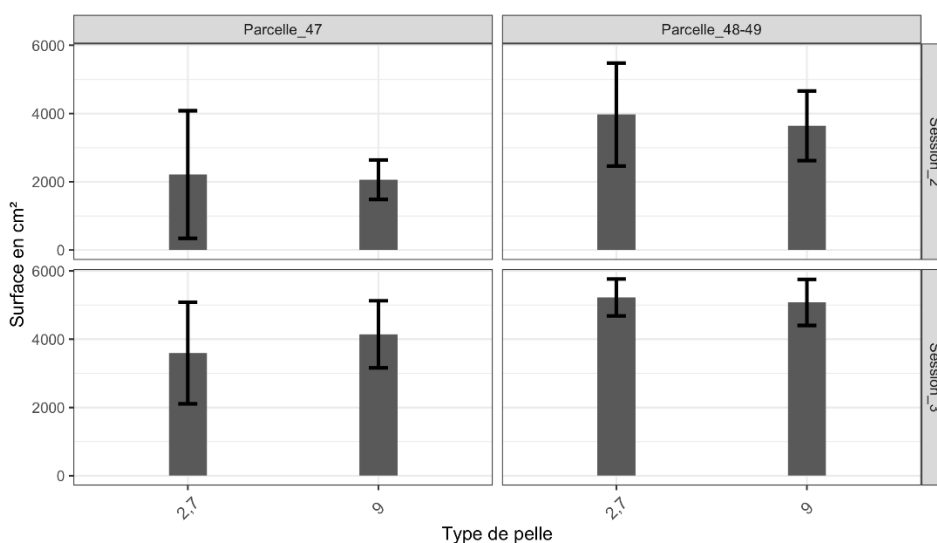


Figure 19 : Surface moyenne des qualités globalement favorables et écart-type pour le rectangle central en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

Rectangle central, qualités globalement défavorables

Modèle = $lm(\text{qualités globalement défavorables_rectangle_central} \sim \text{Parcelle} + \text{Session} + \text{Pelle})$

P-value du modèle : 0,007 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,3618

La surface moyenne des qualités globalement défavorables toutes modalités confondues est de 2005 cm²

Il y a un effet significatif de la parcelle et de la session sur les surfaces de qualités globalement défavorables (Figure 20) :

- Les surfaces des qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 1298 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,007).
- Les surfaces des qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 1163 cm² quand la PMS est réalisée lors de la session 3 (p-value = 0,01).

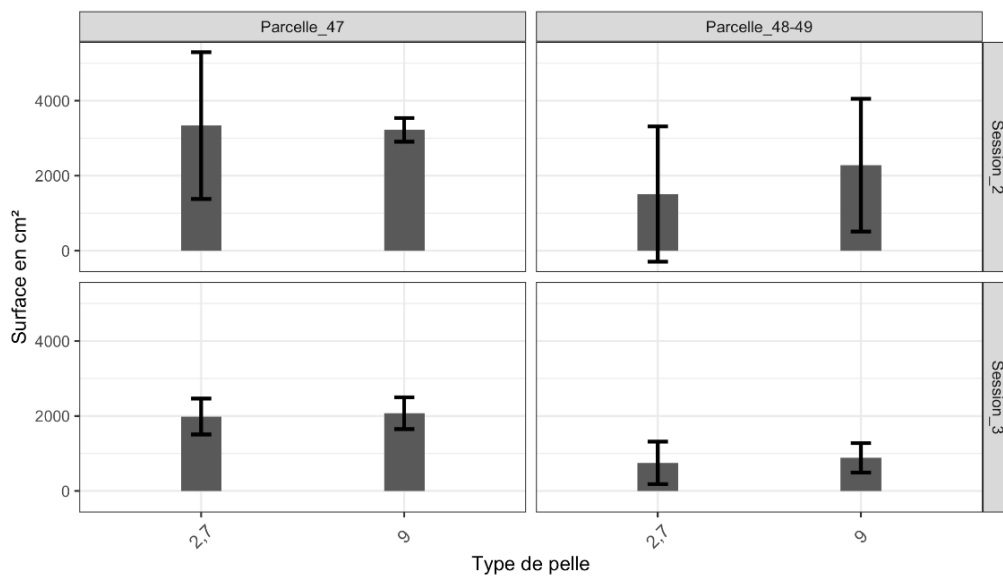


Figure 20 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables et écart-type pour le rectangle central en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

Rectangle intermédiaire, qualités globalement favorables

Modèle = $lm(\text{qualités globalement favorables_rectangle_intermédiaire} \sim \text{Parcelle} + \text{Session} + \text{Pelle})$

P-value du modèle : 0,0017 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,45

La surface moyenne des qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 6352 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle et de la session sur les surfaces de qualités globalement favorables (Figure 21) :

- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 2835 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,001).
- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 1939 cm² quand la PMS est réalisée lors de la session 3 (p-value = 0,016).

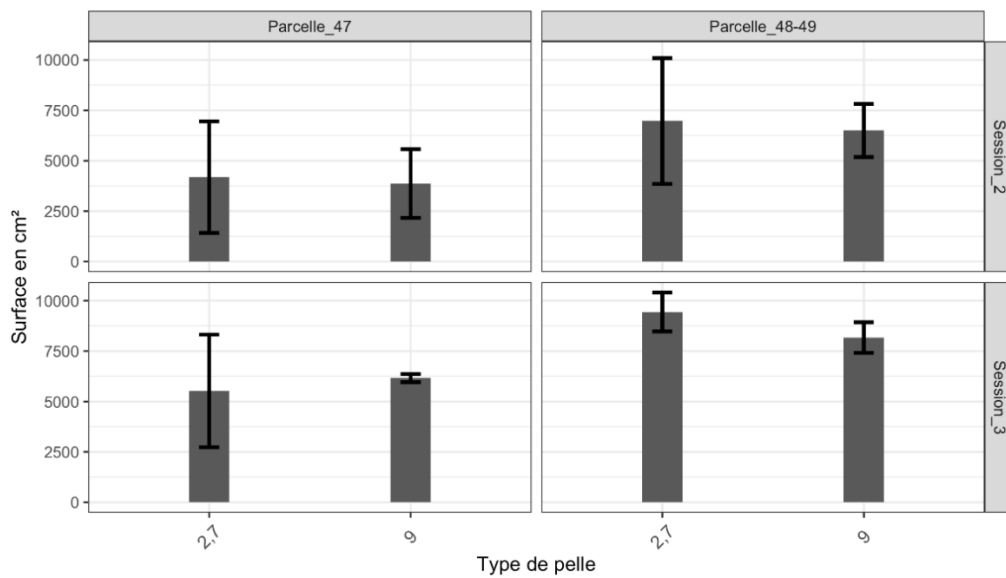


Figure 21 : Surface moyenne des qualités globalement favorables et écart-type pour le rectangle intermédiaire en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

Rectangle intermédiaire, qualités globalement défavorables

Modèle = lm (qualités globalement défavorables_rectangle_intermédiaire ~ Parcelle + Session + Pelle)
 P-value du modèle : 0,0175 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,2987

La surface moyenne des qualités globalement défavorables toutes modalités confondues est de 4245 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle sur les surfaces de qualités globalement défavorables (Figure 22) :

- Les surfaces des qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 2446 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,006).

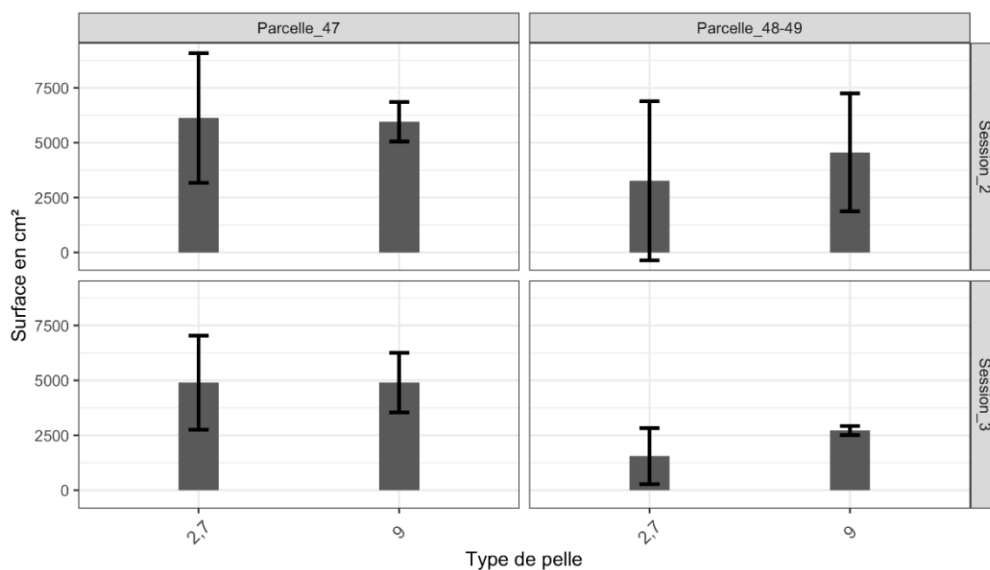


Figure 22 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables et écart-type pour le rectangle intermédiaire en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

Rectangle complet, qualités globalement favorables

Modèle = $\text{lm}(\text{qualités globalement favorables_rectangle_complet} \sim \text{Parcelle} + \text{Session} + \text{Pelle})$
P-value du modèle : 0,5241 ; Adjusted R-squared du modèle : -0,0308

La surface moyenne des qualités globalement défavorables toutes modalités confondues est de 7996 cm².

Il n'y a pas d'effets significatifs de la parcelle, de la session et de la Pelle sur les qualités globalement favorables pour le rectangle complet (Figure 23).

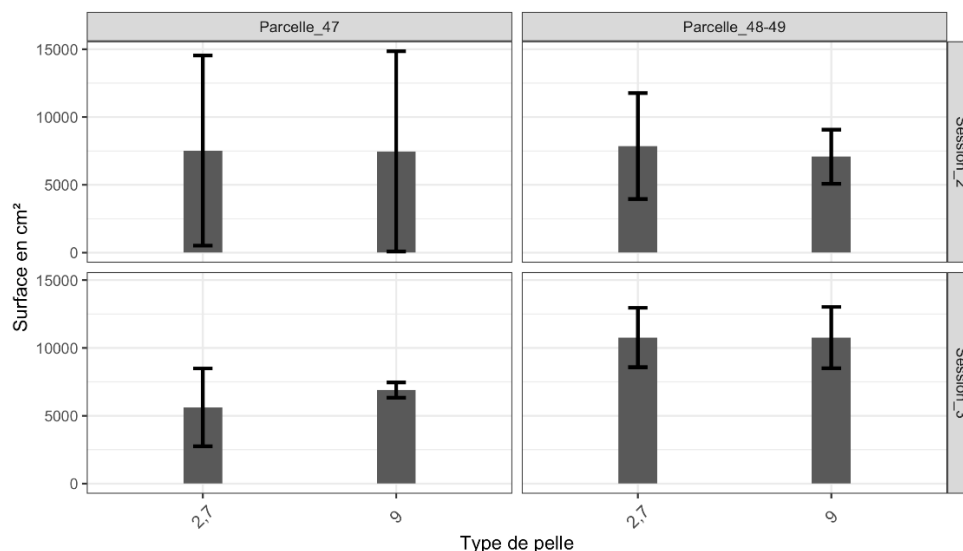


Figure 23 : Surface moyenne des qualités globalement favorables et écart-type pour le rectangle complet en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

Rectangle complet, qualités globalement défavorables

Modèle = $\text{lm}(\text{qualités globalement défavorables_rectangle_complet} \sim \text{Parcelle} + \text{Session} + \text{Pelle})$
P-value du modèle : 0,6627 ; Adjusted R-squared du modèle : -0,0643

La surface moyenne des qualités globalement défavorables toutes modalités confondues est de 12709 cm².

Il n'y a pas d'effets significatifs de la parcelle, de la session et de la Pelle sur les qualités globalement favorables pour le rectangle complet (Figure 24).

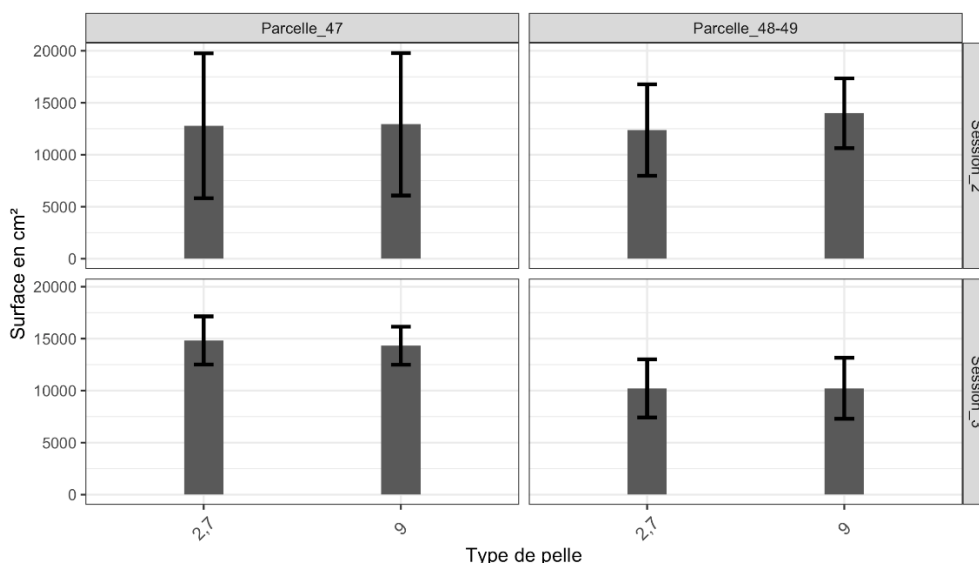


Figure 24 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables et écart-type pour le rectangle complet en fonction de la parcelle, de la session de travail du sol et du type de pelle (n = 3 profils).

4.2.3.5. La surface de chaque groupe de qualité : comparaison au témoin non travaillé

Rectangle central, qualités globalement favorables

Modèle = $\text{lm}(\text{qualités globalement favorables_rectangle_central} \sim \text{Parcelle} + \text{moda})$

P-value du modèle : 0,0002 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,52

La surface moyenne des qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 3453 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle et des modalités 2,7T_Session3 et 9T_session3 sur les surfaces de qualités globalement favorables (Figure 25) :

- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 1383 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,001).
- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 2101 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 2,7 T et lors de la session 3 (p-value = 0,001).
- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 2304 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 9 T et lors de la session 3 (p-value = 0,0007).

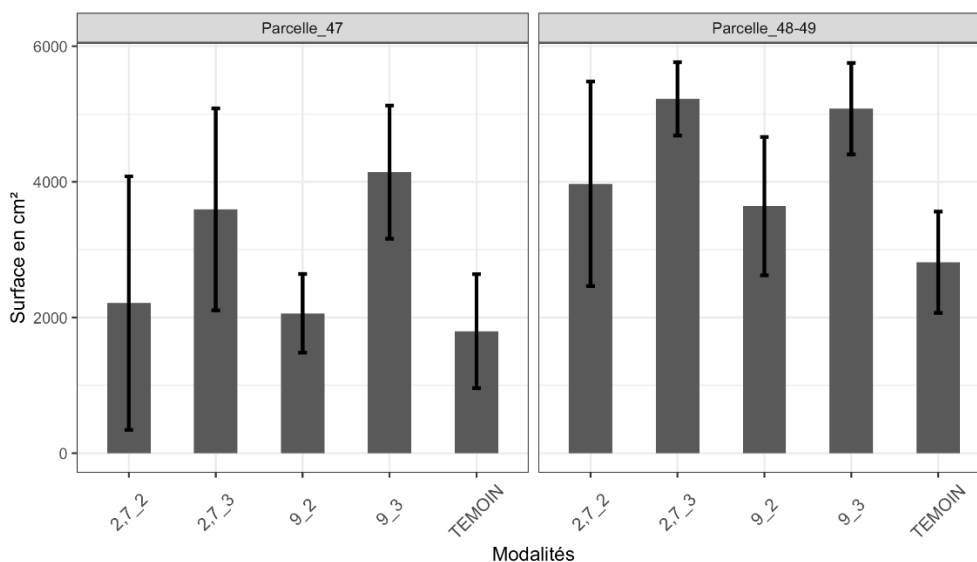


Figure 25 : Surface moyenne des qualités globalement favorables et écart-type pour le rectangle central en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle central, qualités globalement défavorables

Modèle = $\text{lm}(\text{qualités globalement défavorables_rectangle_central} \sim \text{Parcelle} + \text{moda})$

P-value du modèle : 0,012 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,318

La surface moyenne des qualités globalement défavorables toutes modalités confondues est de 2124 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle sur les surfaces de qualités globalement défavorables (Figure 26) :

- Les surfaces des qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 1199 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,005).

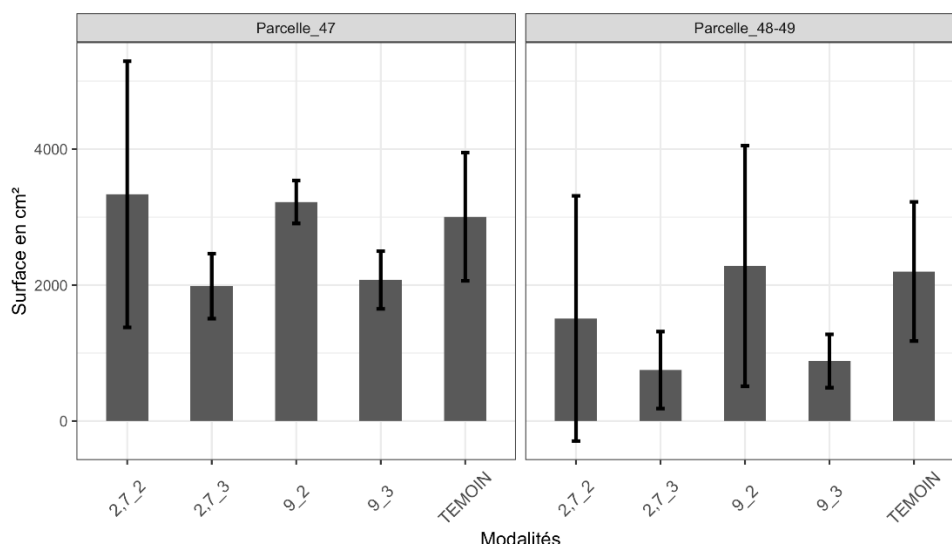


Figure 26 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables et écart-type pour le rectangle central en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle intermédiaire, qualités globalement favorables

Modèle = lm (qualités globalement favorables_rectangle_intermédiaire ~ Parcelle + moda)

P-value du modèle : 0,00006 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,4857

La surface moyenne des qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 5977 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle et des modalités 2,7T_Session3 et 9T_session3 sur les surfaces de qualités globalement favorables (Figure 27) :

- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 2635 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,0002).
- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 3004 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 2,7 T et lors de la session 3 (p-value = 0,005).
- Les surfaces des qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 2688 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 9 T et lors de la session 3 (p-value = 0,01).

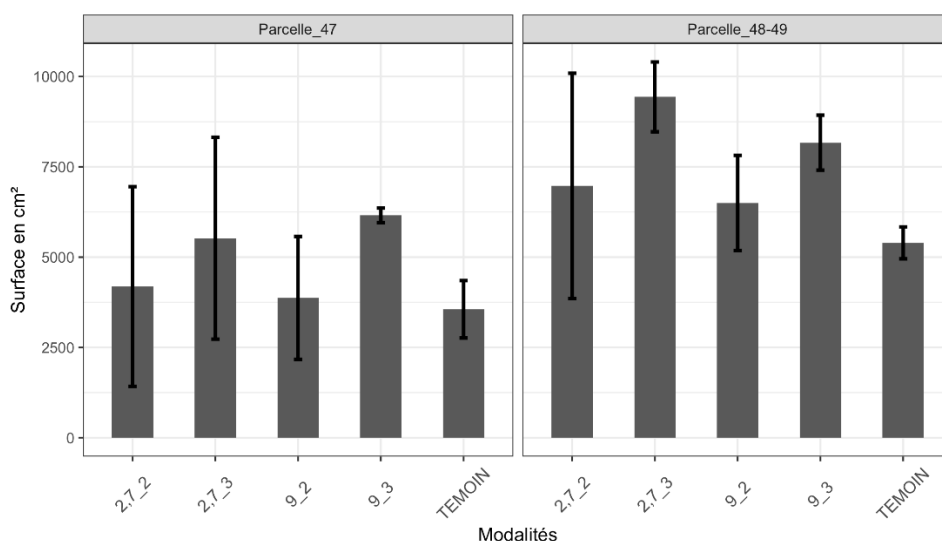


Figure 27 : Surface moyenne des qualités globalement favorables et écart-type pour le rectangle intermédiaire en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle intermédiaire, qualités globalement défavorables

Modèle = Im (qualités globalement défavorables_rectangle_intermédiaire ~ Parcelle + moda)

P-value du modèle : 0,0163 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,3006

La surface moyenne des qualités globalement défavorables toutes modalités confondues est de 7305 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle sur les surfaces de qualités globalement défavorables (Figure 28) :

- Les surfaces des qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 2274 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,005).

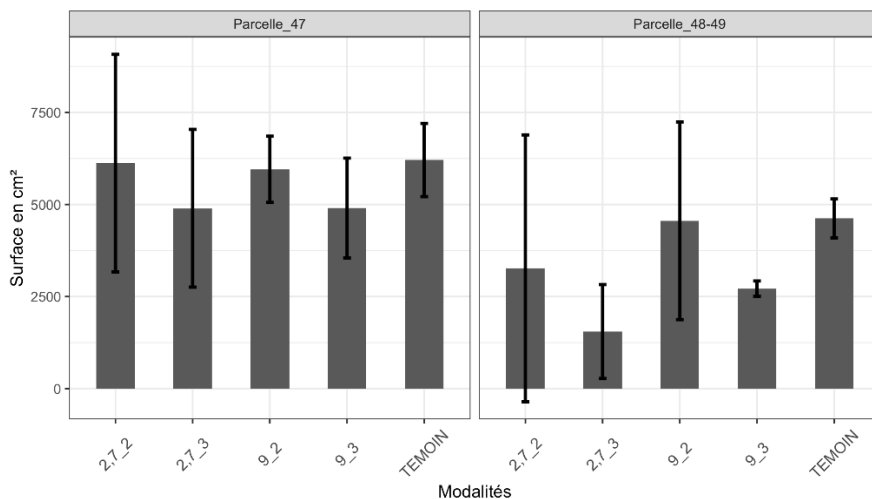


Figure 28 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables et écart-type pour le rectangle intermédiaire en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle complet, qualités globalement favorables

Modèle = Im (qualités globalement favorables_rectangle_complet ~ Parcelle + moda)

P-value du modèle : 0,0163 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,3006

Il n'y a pas d'effets significatifs de la parcelle, et de la modalité sur les qualités globalement favorables pour le rectangle complet (Figure 29).

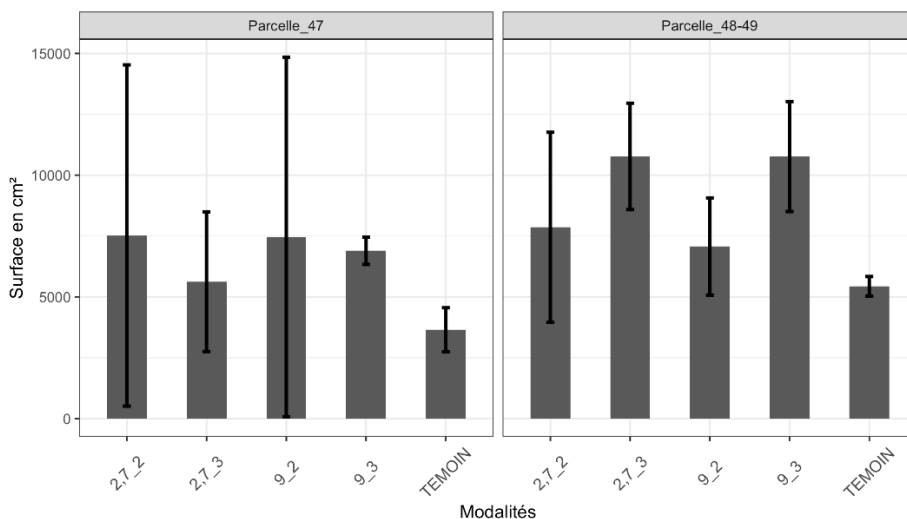


Figure 29 : Surface moyenne des qualités globalement favorables et écart-type pour le rectangle complet en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle complet, qualités globalement défavorables

Modèle = Im (qualités globalement défavorables_rectangle_complet ~ Parcelle + moda)

P-value du modèle : 0,4882 ; Adjusted R-squared du modèle : -0,014

Il n'y a pas d'effets significatifs de la parcelle et de la modalité sur les qualités globalement défavorables pour le rectangle complet (Figure 30).

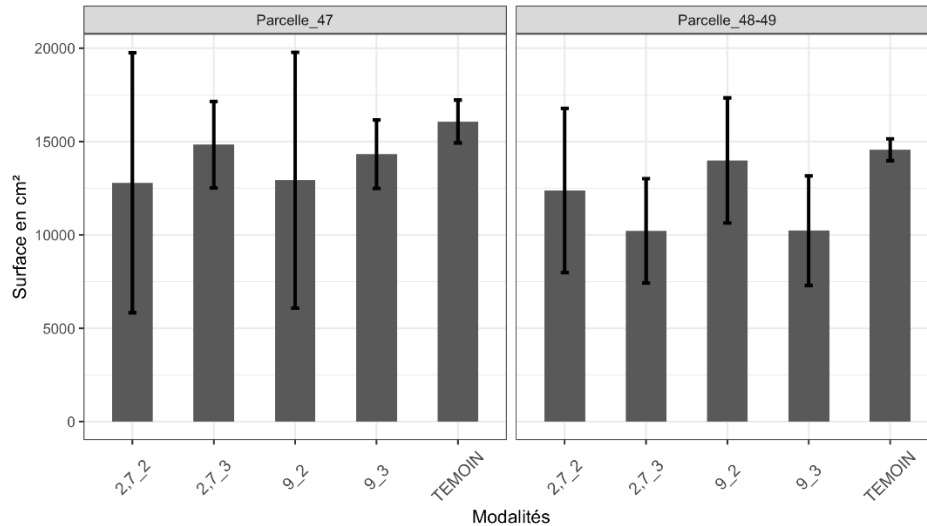


Figure 30 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables et écart-type pour le rectangle complet en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

4.2.3.6. Dimension des polygones décrits pour chaque groupe de qualité

Rectangle central, qualités globalement favorables

La dimension des polygones décrits au sein de chaque groupe de qualité est estimée par le ratio entre le nombre de polygones dans le groupe, et la surface totale du groupe. Cette dimension reflète le fractionnement des mottes dans le groupe de qualité.

Modèle = Im (qualités globalement favorables/nb de zones de qualités globalement favorables ~ Parcelle + modalités)

P-value du modèle : 0,003 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,4044

La surface moyenne des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 818 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle et de la modalité et 9T_session3 (Figure 31).

- Les surfaces des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 502 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,003).
- Les surfaces des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 778 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 9 T et lors de la session 3 (p-value = 0,004).

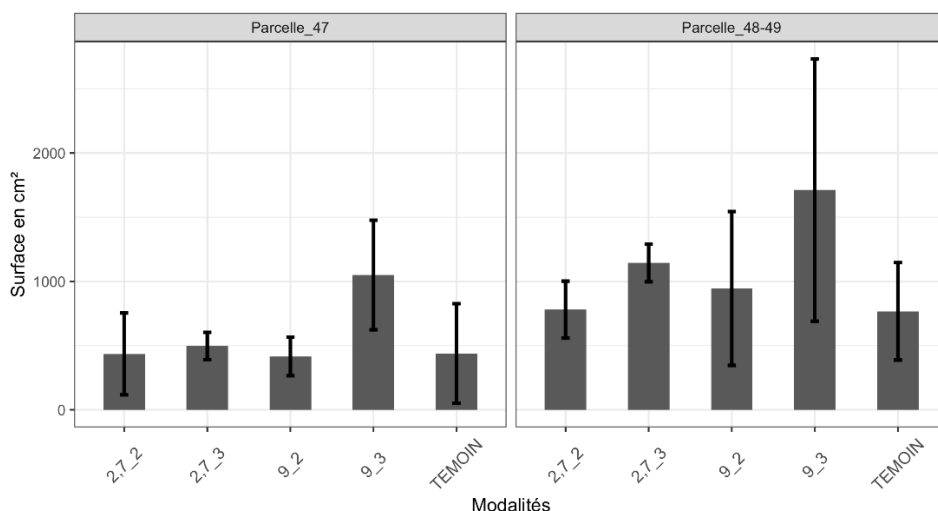


Figure 31 : Surface moyenne des qualités globalement favorables par zones de qualité globalement favorables et écart-type pour le rectangle central, en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle central, qualités globalement défavorables

Modèle = lm (qualités globalement défavorables/nb de zones de qualités globalement défavorables ~ Parcelle + modalités)

P-value du modèle : 0,025 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,2692

La surface moyenne des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 322 cm².

Il y a un effet significatif des modalités 2,7T_session3 et 9T_session3 (Figure 32).

- Les surfaces des qualités globalement défavorables / par le nb de zones de qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 370 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 2,7 T et lors de la session 3 (p-value = 0,001).
- Les surfaces des qualités globalement défavorables / par le nb de zones de qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 286 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 9 T et lors de la session 3 (p-value = 0,012).

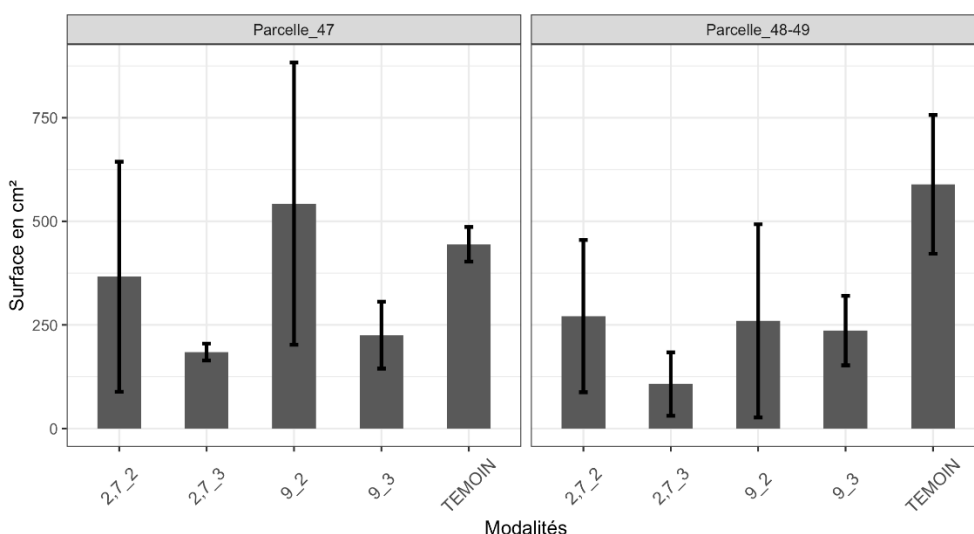


Figure 32 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables par zones de qualité globalement défavorables et écart-type pour le rectangle central, en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle intermédiaire, qualités globalement favorables

Modèle = Im (qualités globalement favorables/nb de zones de qualités globalement favorables ~ Parcelle + modalités)

P-value du modèle : 0,037 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,241

La surface moyenne des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 1016 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle (Figure 33).

- Les surfaces des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 497 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,002).

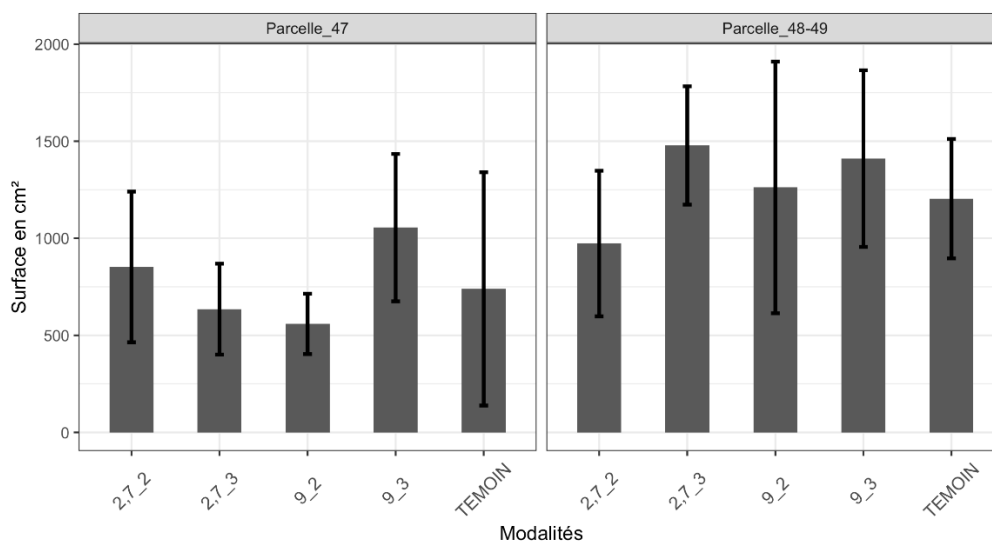


Figure 33 : Surface moyenne des qualités globalement favorables par zones de qualité globalement favorables et écart-type pour le rectangle intermédiaire, en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle intermédiaire, qualités globalement défavorables

Modèle = Im (qualités globalement défavorables/nb de zones de qualités globalement défavorables ~ Parcelle + modalités)

P-value du modèle : 0,025 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,2685

La surface moyenne des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 483 cm².

Il y a un effet significatif des modalités 2,7T_session3 et 9T_session3 (Figure 34).

- Les surfaces des qualités globalement défavorables / par le nb de zones de qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 480 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 2,7 T et lors de la session 3 (p-value = 0,003).
- Les surfaces des qualités globalement défavorables / par le nb de zones de qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 377 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 9 T et lors de la session 3 (p-value = 0,018).

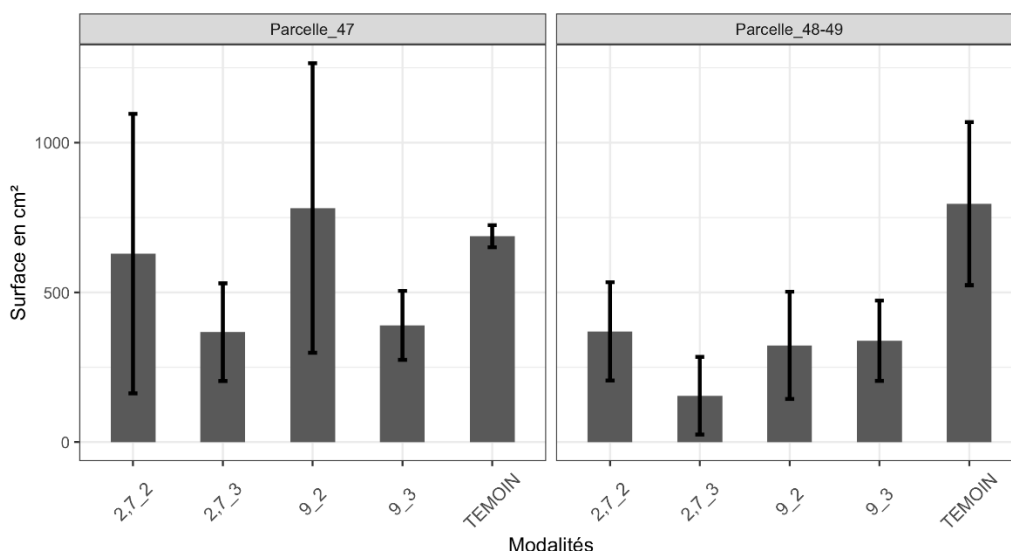


Figure 34 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables par zones de qualité globalement défavorables et écart-type pour le rectangle intermédiaire, en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle complet, qualités globalement favorables

Modèle = $lm(\text{qualités globalement favorables/nb de zones de qualités globalement favorables} \sim \text{Parcelle} + \text{modalités})$

P-value du modèle : 0,1527 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,1201

La surface moyenne des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 1228 cm².

Il y a un effet significatif de la parcelle (Figure 35).

- Les surfaces des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables sont plus importantes en moyenne de 490 cm² dans la parcelle 48-49 (p-value = 0,038).

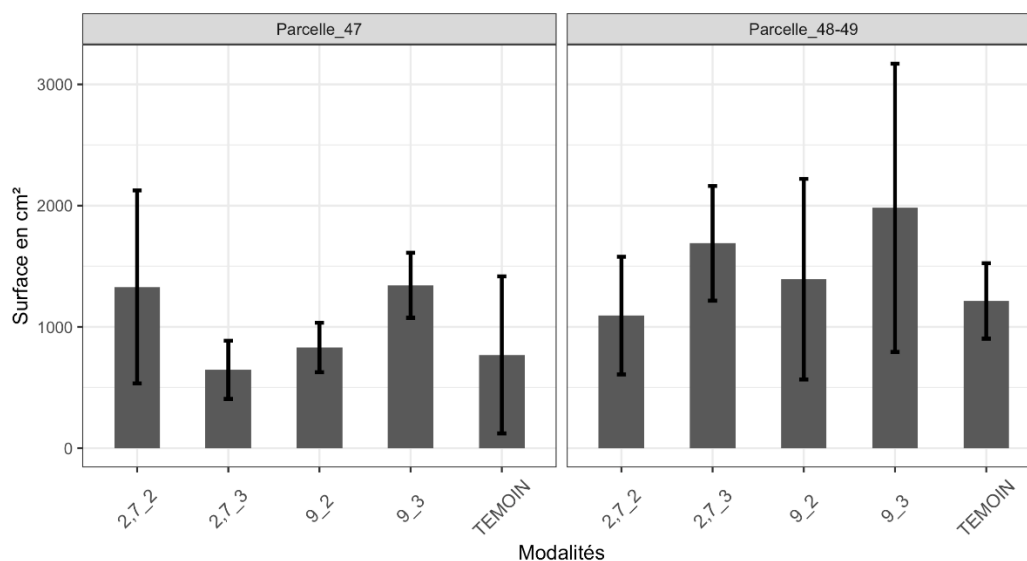


Figure 35 : Surface moyenne des qualités globalement favorables par zones de qualité globalement favorables et écart-type pour le rectangle complet, en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

Rectangle complet, qualités globalement défavorables

Modèle = Im (qualités globalement défavorables/nb de zones de qualités globalement défavorables ~ Parcelle + modalités)

P-value du modèle : 0,2567 ; Adjusted R-squared du modèle : 0,065

La surface moyenne des qualités globalement favorables / par le nb de zones de qualités globalement favorables toutes modalités confondues est de 1492 cm².

Il y a un effet significatif des modalités 2,7T_session3 et 9T_session3 (Figure 36).

- Les surfaces des qualités globalement défavorables / par le nb de zones de qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 885 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 2,7 T et lors de la session 3 (p-value = 0,045).
- Les surfaces des qualités globalement défavorables / par le nb de zones de qualités globalement défavorables sont moins importantes en moyenne de 969 cm² quand la PMS est réalisée avec la pelle de 9 T et lors de la session 3 (p-value = 0,030).

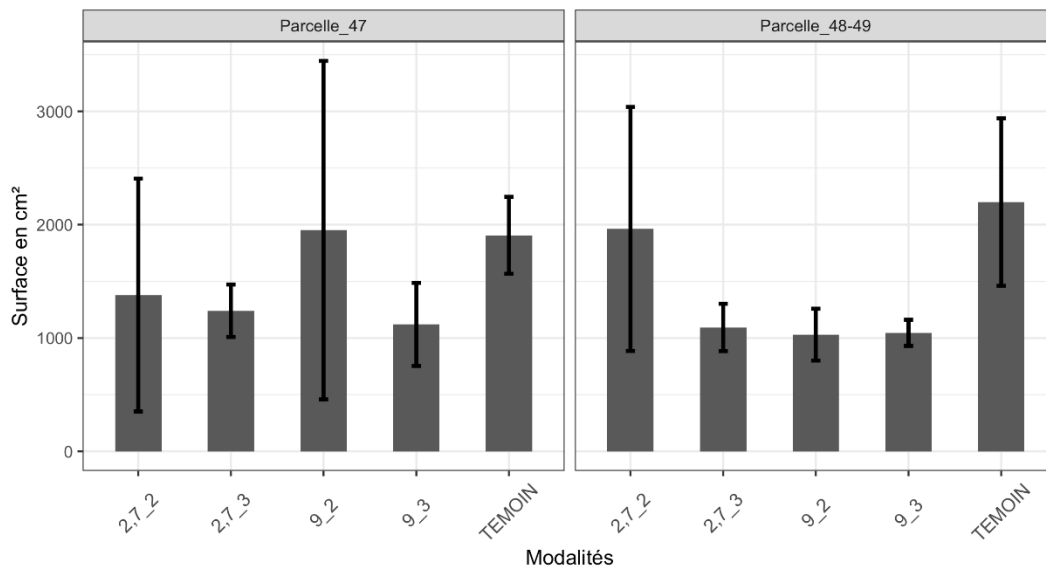


Figure 36 : Surface moyenne des qualités globalement défavorables par zones de qualité globalement défavorables et écart-type pour le rectangle complet, en fonction de la parcelle et de la modalité (n = 3 profils).

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'analyser les impacts de la préparation mécanisée des sites (PMS) sur la structure des sols. Plusieurs types de pelles hydrauliques ont été utilisés et les travaux ont été réalisés dans des conditions d'humidité du sol différentes.

Pour évaluer les impacts de la PMS nous avons utilisé la méthode du profil cultural. Cette méthode nous permet d'évaluer la qualité de la structure du sol, et donc d'en déduire les impacts potentiels sur la capacité des racines du futur plant à explorer l'environnement dans lequel elles vont devoir se développer. Le niveau d'humidité du sol lors de la PMS semble avoir un effet sur la structure du sol. En effet, la proportion des qualités de structure du sol globalement favorables à l'enracinement est plus importante lorsque le travail du sol a été réalisé en conditions sèches. Toutefois cet effet n'est pas toujours significatif, en fonction de la surface qui a été utilisée pour calculer les proportions de chaque qualité de structure du sol. Lorsque l'on calcul les proportions sur une surface restreinte du profil (100 cm de longueur et 50 cm de profondeur = rectangle central), les effets du niveau d'humidité du sol lors de la PMS sont significatifs.

A l'inverse lorsque l'on calcule les proportions sur la totalité de la surface du profil (rectangle complet), les effets du niveau d'humidité du sol ne sont plus significatifs, d'où l'importance de la surface qui est choisie pour analyser les profils. Cette différence de résultats entre les tailles de « rectangles » s'explique par le fait que le niveau d'intensité de la PMS est croissant entre le rectangle complet puis le rectangle intermédiaire et enfin le rectangle central. Pour le rectangle central, on peut considérer qu'environ 100% de la zone est travaillée, pour le rectangle intermédiaire, environ 50% de la zone est impactée et pour le rectangle complet environ 33% de la zone est impactée par la PMS. L'analyse sur les données du profil complet se rapproche d'une description d'un profil de la modalité « témoin ». Ces résultats sont intéressants car c'est dans cette zone restreinte que sera installé et où se développera le futur plant. Sa survie et sa croissance durant les années qui suivent la plantation seront donc directement impactées par l'état structural du sol de cette zone. Si l'on regarde uniquement cette zone restreinte, nous pouvons conclure quant à un effet positif de la PMS sur la structure du sol lorsque celle-ci a été réalisée en conditions sèches.

Il avait été demandé aux conducteurs des pelles de réaliser un travail du sol standardisé (décapage de la végétation sur 1,20 m de largeur et travail jusqu'à 40 cm de profondeur. Bien que nous ayons observé un effet positif de la PMS dans la zone travaillée (rectangle central et rectangle intermédiaire), nous avons constaté que la structure du sol était globalement défavorable à l'enracinement au-delà de 50 cm de profondeur dans la quasi-totalité des profils réalisés. Nous avons également observé ces résultats dans les témoins non travaillés. Cette observation peut s'expliquer par une forte charge en éléments grossiers sur la parcelle 48-49 et par un horizon plus riche en argile à partir de 50 cm dans la parcelle 47. Il est donc difficile de conclure quant à un effet négatif de la PMS sur la structure du sol en profondeur. Ces résultats posent questions quant au développement racinaire (prospection en profondeur pour l'ancrage et l'alimentation en eau) et à la stabilité des arbres après les premières années d'installation. Lors de l'analyse nous n'avons pas noté d'effet significatif du type de pelle sur la proportion de chaque qualité de structure du sol, et ce peu importe la surface choisie pour calculer les proportions. Le niveau d'humidité du sol lors de la PMS semble donc impacter davantage la structure du sol que le type de pelle utilisé. Ces résultats sont à mettre en relation avec l'étude des performances des pelles qui ont été utilisées pour la PMS et de l'évaluation ergonomique qui a été réalisée en parallèle par le FCBA.

Bien que nous n'ayons pas démontré d'effet significatif du type de pelle dans cette étude, nous savons que le poids ou encore le nombre de passages des engins peuvent impacter la structure des sols (Pischedda et al., 2009, Pischedda et al., 2021). Les profils culturaux nous apportent des informations précieuses quant à la qualité de la structure du sol cependant, seuls 3 profils ont été réalisés par modalité. Pour obtenir des résultats plus robustes, il serait nécessaire de multiplier le nombre de descriptions par modalité, toutefois cette méthode reste relativement chronophage et nécessite une formation préalable qui peut être assez longue.

Le test bêche que nous avons utilisé lors de la caractérisation des sols, nous apparaît être une piste intéressante à développer. Cette méthode nous permet de réaliser un diagnostic de la structure du sol dans ses horizons superficiels (20 cm). Elle est plus rapide, moins destructive mais moins précise que la méthode du profil cultural qui est plus coûteuse et qui nécessite la création d'une fosse suffisamment profonde pour décrire l'impact de l'outil. Cependant cette méthode reste encore peu adaptée à certains contextes pédologiques forestiers, ou il est difficile d'évaluer l'état biologique du sol à partir de l'activité biologique des vers de terre. Il serait intéressant de développer cette méthode pour trouver d'autres indicateurs de l'activité biologique des sols forestiers. Par ailleurs, la méthode du test bêche nous permet uniquement de décrire les premiers horizons du sol. On peut noter l'intérêt de la méthode comme outil de prise de décision en fonction des observations réalisées, pour réaliser ou non une PMS et par conséquent de réduire les impacts économiques et environnementaux sur les parcelles.

Le pénétromètre PANDA reste alors une façon rapide et non destructive de mesurer la compaction de sols même en profondeur. Les mesures de résistance à la pénétration que nous avons effectuées, ne nous permettent pas de conclure quant à un effet du type de pelle ou du niveau d'humidité du sol sur la compaction des sols. Cette méthode reste relativement intéressante cependant, nous avons montré qu'elle reste sensible à la structure du sol et notamment à la présence d'éléments grossiers qui peuvent perturber le signal. D'autres paramètres peuvent également affecter les mesures et notamment le niveau d'humidité du sol. Il est donc important de réaliser des

mesures d'humidité du sol en parallèle pour pouvoir standardiser les données de résistance à la pénétration obtenues. Pour finir cette étude n'a été réalisée que sur un type de sol. Il serait également intéressant de comparer les résultats obtenus sur d'autres dispositifs installés sur des parcelles avec des caractéristiques pédologiques différentes.

6. Sources

Maillant S., Party J.P., Muller N., Michel F., Pesy P., Brauer M., Bourot A., Kung A., Barneoud C., Labou L., Purson L., Vauthier Q., Vagner A., Jouart A., Sauzet O., Antoine J.M., Brouant B., 2016, Référentiel Régional Pédologique de la Lorraine (Etude n°31342), Description de l'Unité Cartographique de Sol (UCS) numéro 3206. <https://www.geoportail.gouv.fr/depot/fiches/INRA/SFaSIRUXgpqCCzKrb9S5.pdf>

Pischedda D., Helou T.E., Augoyard S., Baron P., Cacot E., Guilleray L., Pousse N., Ruch P., Ulrich E., 2021, Pratic'sols - Guide sur la praticabilité des parcelles forestières. 48 p. Disponible à l'adresse : <https://www.onf.fr/foret-exception/troncais-foret-dexception/tous-les-contenus/+/192::praticsols-guide-sur-praticabilite-des-parcelles-forestieres.html>

Pischedda D., Bartoli M., Brêthes A., Cacot E., Chagnon J.L., Gauquelin X., Nicolas M., Richter C., 2009. Prosol - Guide pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt. ISBN 978-2-84207-334-3. Disponible à l'adresse : <https://www.onf.fr/foret-exception/troncais-foret-dexception/tous-les-contenus/+/18b::prosol-guide-pour-une-exploitation-forestiere-respectueuse-des-sols-et-de-la-foret.html>

Soltner D., 2017, Les bases de la production végétale - TOME I : Le sol et son amélioration. 27ème édition. Collection Sciences et Techniques agricoles. 472 p. Disponible à l'adresse : <https://soltner.fr/agronomie/les-bases-de-la-production-vegetale-tome-i-le-sol/>

Turillon C., Créatin V., Tomis V., Duparque A., 2018, Guide méthodique du test bêche Structure et Action des vers de terre. AGRO TRANSFERT RESSOURCES et TERRITOIRES. 16 p. Disponible à l'adresse : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2018/08/Guide-methode-beche-web.pdf>

Vast F., Collet C., Köller R., Pousse N., Richter C., 2020, Le profil cultural : une méthode d'observation pour analyser les impacts de la préparation mécanisée du site sur la structure du sol. Rendez-vous Techniques de l'ONF. N° 63-64, p.57-64. Disponible à l'adresse : <https://www6.inrae.fr/renfor/content/download/3975/36804/version/2/file/Vast%20et%20al%202020%20RDVT.pdf>


7. Annexes

7.1. Description des pelles hydrauliques et outils utilisés pour la PMS sur le dispositif expérimental

Les tableaux ci-dessous sont issus de l'étude intitulée « Performances de 3 types de pelles hydrauliques & évaluations ergonomiques en préparation de sol », réalisée en 2022 par le FCBA dans le cadre du projet PIF (plantations Innovantes en Forêt). Les auteurs sont : Philippe Ruch (FCBA), Xavier Montagny (FCBA) et Clarine Lenormand (FCBA).

Compte rendu : Impacts de la PMS sur la structure du sol

Catégories	Pelle de 2,7T			Pelle de 5T			Pelle de 9T		
	1 19-23/04/21 Humide	2 7-10/03/22 Humide	3 4-12/07/22 Sec	1 19-23/04/21 Humide	2 7-10/03/22 Humide	3 4-12/07/22 Sec	1 19-23/04/21 Humide	2 7-10/03/22 Humide	3 4-12/07/22 Sec
Marque	Doosan			Yanmar	Yanmar	Caterpillar	Caterpillar	Caterpillar	Caterpillar
Modèle	DX27Z			Vi050-6A	Vi057-6A	CAT 305 CR E2	CAT 308 E2 CR	CAT 308 CR	CAT 308 CR
Année	2019			2017	2018	2018	2018	2020	06/2021
Horamètre	770 h	1202 h	1409 h	2 250 h	3552 h	3244 h	1 730 h	1078 h	892 h
Masse	2,7T			4,9T	5,5T	5,0T	8,4T	9T	9T
Puissance moteur	15,4 kW 21 ch			28,1 kW 38 ch	33,4 kW 45 ch	31,2 kW 42 ch	49,7 kW 68 ch	55,4 kW 75 ch	55,4 kW 75 ch
Force d'arrachement au balancier	16 200 N			22 700 N	24 400 N	24 700 N	40 100 N	42 300 N	42 300 N
Force d'arrachement au godet	23 720 N			36 500 N	41 900 N	44 700 N	60 200 N	62 000 N	62 000 N
Largeur	1,55 m			1,97 m	1,98 m	1,98 m	2,33 m	2,28 m	2,28 m
Garde au sol	16 cm			28 cm	32 cm	35 cm	35 cm	35 cm	35 cm
Lame	Oui			Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Catégories	Pelle de 2,7T	Pelle de 5T			Pelle de 9T		
	DX27Z	Vi050-6A	Vi057-6A	CAT 305 CR E2	CAT 308 E2 CR	CAT 308 CR	CAT 308 CR
Chenilles	Caoutchouc	Caoutchouc	Caoutchouc	Caoutchouc	Caoutchouc	Caoutchouc	Caoutchouc
Usure	Presque neuve	Demi-usure	Demi-usure	Demi-usure	Demi-usure	Demi-usure	Demi-usure
Largeur	30 cm	35 cm	40 cm	40 cm	45 cm	45 cm	45 cm
Longueur	1,95 cm	2,59 m	2,59 m	2,53 m	2,91 m	2,91 m	2,92 m
Longueur au sol	160 cm	224 cm	222 cm	222 cm	247 cm	247 cm	247 cm
Surface de contact	9 600 cm ²	15 680 cm ²	17 760 cm ²	17 760 cm ²	22 230 cm ²	22 230 cm ²	22 230 cm ²
Pression statique	0,28 kg/cm ²	0,31 kg/cm ²	0,31 kg/cm ²	0,28 kg/cm ²	0,38 kg/cm ²	0,40 kg/cm ²	0,40 kg/cm ²
Galets	3 + 1	4 + 1	4 + 1	4 + 1	5 + 1	5 + 1	5 + 1
Base chenillée Exemple en saison 1							

Catégories	Pelle de 2,7T	Pelle de 5T			Pelle de 9T		
	DX27Z	Vi050-6A	Vi057-6A	CAT 305 CR E2	CAT 308 E2 CR	CAT 308 CR	CAT 308 CR
Lame (largeur)	1,55 m	nm	1,97 m	1,98 m	nm	2,28 m	2,28 m
Capacité réservoir carburant	34 l	66 l	66 l	63 l	nc	147 l	147 l
Options liés au confort							
Correcteur d'assiette	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Climatisation	Non	Non (disponible en option)	Oui (mais non utilisé en saison 2)	Non (disponible en option)	Oui	Oui	Oui
Siège	Suspendu	Pneumatique	Pneumatique	Pneumatique (mais HS)	Pneumatique	Pneumatique	Pneumatique
Revêtement	Skai (simili cuir)	Skai (simili cuir)	Skai (simili cuir)	Tissu	Tissu	Tissu	Tissu
Ouverture vitre	Pare-brise + vitre latérale droite	Pare-brise +vitre latérale droite	Pare-brise +vitre latérale droite	Pare-brise +vitre latérale droite	Pare-brise +vitrés latérales droite & gauche	Pare-brise +vitrés latérales droite & gauche	Pare-brise +vitrés latérales droite & gauche

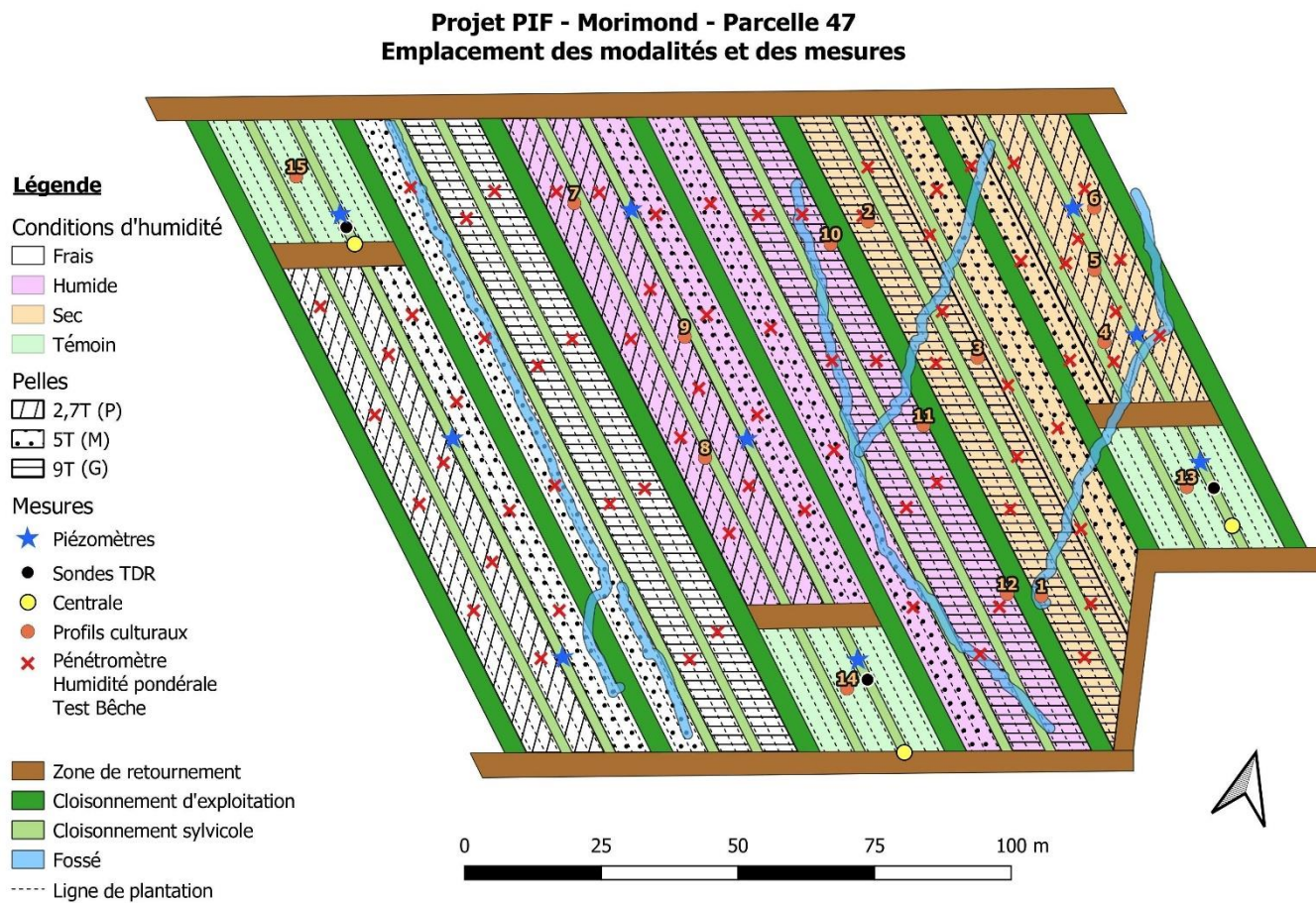
Compte rendu : Impacts de la PMS sur la structure du sol

Catégories	Pelle de 2,7T	Pelle de 5T			Pelle de 9T		
Modèle	DX27Z	Vi050-6A	Vi057-6A	CAT 305 CR E2	CAT 308 E2 CR	CAT 308 CR	CAT 308 CR
Grue	Avec déport de flèche	Avec déport de flèche	Avec déport de flèche	Avec déport de flèche	Avec déport de flèche	Avec déport de flèche	Avec déport de flèche
Flèche	2,10 m	2,70 m	2,95 m	2,57 m	nm	3,40 m	3,40 m
Balancier	1,39 m	1,45 m	1,64 m	1,13 m	nm	1,81 m	1,81 m
Longueur axe/axe	3,40 m	4,04 m	4,23 m	3,81 m	4,87 m	nm	5,00 m
Longueur axe/pointe (voir flèche sur les schémas)	4,05 m	5,15 m	5,15 m	5,06 m	6,36 m	6,40 m	6,40m
Saison 1							
Saison 3							

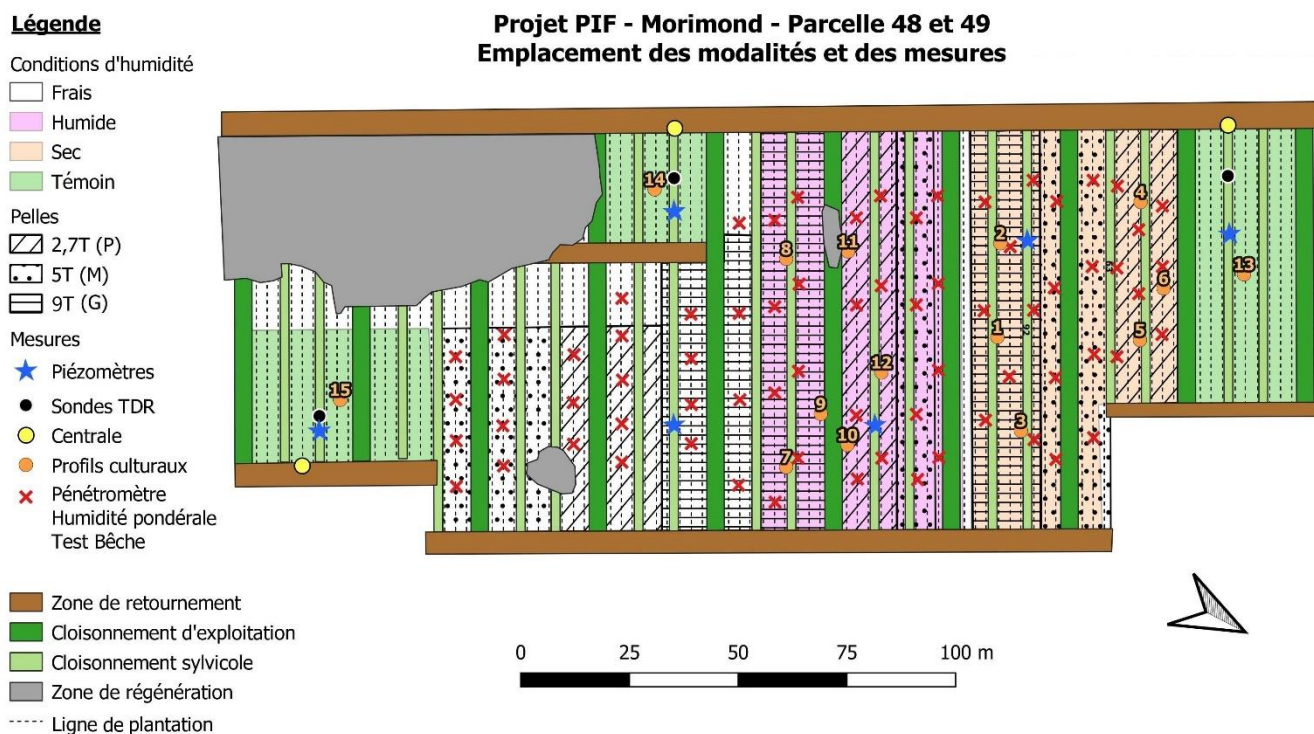
Nom de l'outil	Sous soleur Multifonctions			Sous soleur Multifonctions			Modul'D					
Saison	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
Porte outil	19-23/04/21	7-10/03/22	4-12/07/22	19-23/04/21	7-10/03/22	4-12/07/22	19-23/04/21	7-10/03/22	4-12/07/22			
Hauteur	Pelle de 2,7T 57 cm			Pelle de 5T 58 cm			Pelle de 5T 67 cm			Pelle de 9T 68 cm		
Nombre ailettes	2 en triangles			2 en triangles			2 en triangles			2 en triangles		
Ailette droite Distance par rapport au bas de l'obus	23 cm au plus haut 18 cm au plus bas			39 cm au plus haut 29 cm au plus bas			36 cm au plus haut 28 cm au plus bas			38 cm au plus haut 30 cm au plus bas		
Largeur	14 cm			19 cm			17,5 cm			17,5 cm		
Longueur	12,5 cm			19 cm			18 cm			18 cm		
Ailette gauche Distance par rapport au bas de l'obus	28 cm au plus haut 37 cm au plus bas			22 cm au plus haut 17 cm au plus bas			22 cm au plus haut 18 cm au plus bas			19 cm au plus haut 16,5 cm au plus bas		
Largeur	17,5 cm			17 cm			16 cm			17,5 cm		
Longueur	15,5 cm			17 cm			17 cm			19 cm		
Longueur obus	55 cm			68 cm			59 cm			83 cm		
Diamètre obus	6,5 cm			6,5 cm			6 cm			8 cm		
Râteau largeur	100 cm			64 cm			64 cm			105 cm		
Nombre de dents	11			5			5			11		
Râteau hauteur	21 cm dont 15 cm utilisable ce qui n'est pas suffisant en présence d'une végétation herbacée abondante			25 cm mais attache rapide trop haute => le bout de balancier frotte dans la terre			24,5 cm dont 19,5 cm utilisable			46 cm dont 36 cm utilisable		
Râteau inclinable	Non, 90° fixe mais angle très bien pour décaper			Non, > 90° fixe			Non, 90° fixe, mais angle très bien pour décaper			Oui, pour les essais positionnés à 90°		

Saison	1, 2, 3	1, 2	3	1, 2, 3
Porte outil	Pelle de 2,7T	Pelle de 5T	Pelle de 5T	Pelle de 9T
				
				
Remarques	Axes de l'attache-rapide avec du jeu induisant un léger bruit métallique désagréable, signalés en saison 3	Léger bruit métallique dû au protection de vérin	Axes de l'attache-rapide avec du jeu induisant un léger bruit métallique désagréable	Axes avec du jeu induisant un bruit métallique très désagréable

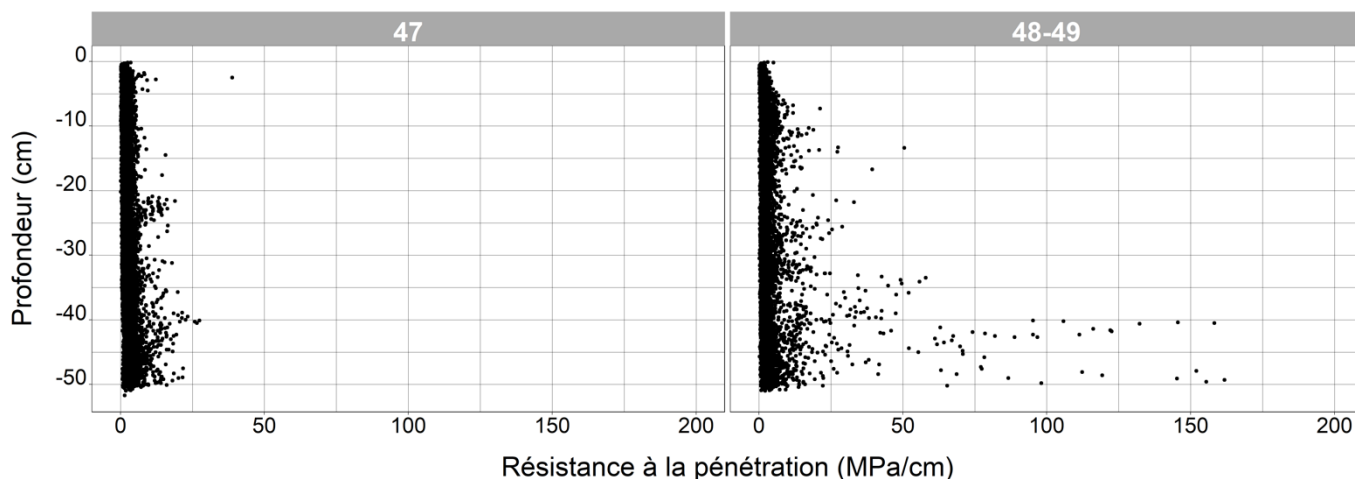
7.2. Cartographie de l'unité expérimentale installée sur la parcelle 47, emplacement des modalités et points de mesure.



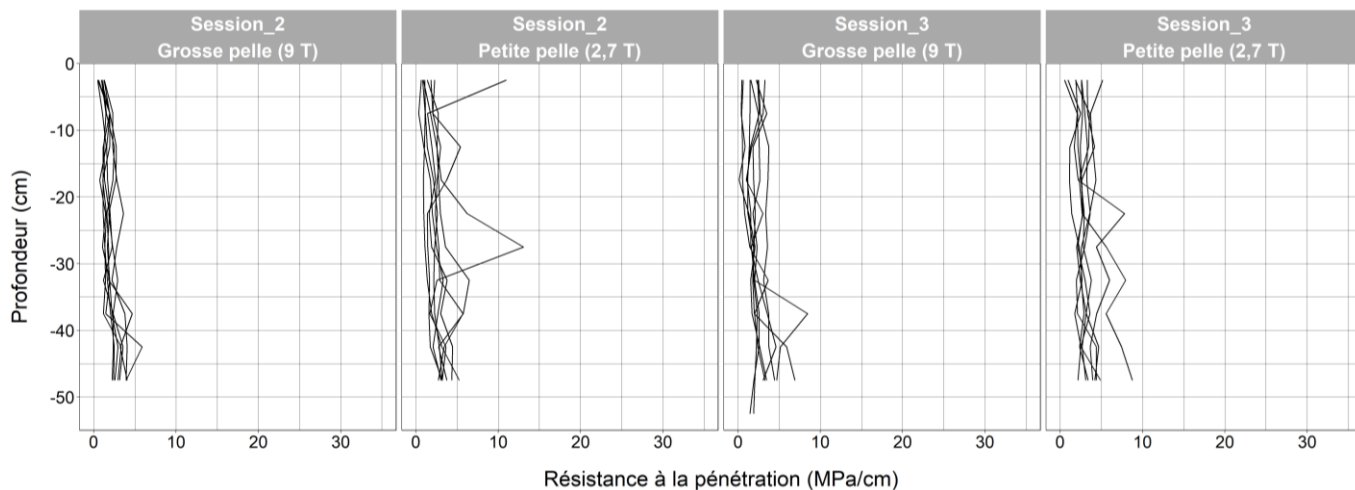
7.3. Cartographie de l'unité expérimentale installée sur la parcelle 48-49, emplacement des modalités et points de mesure.



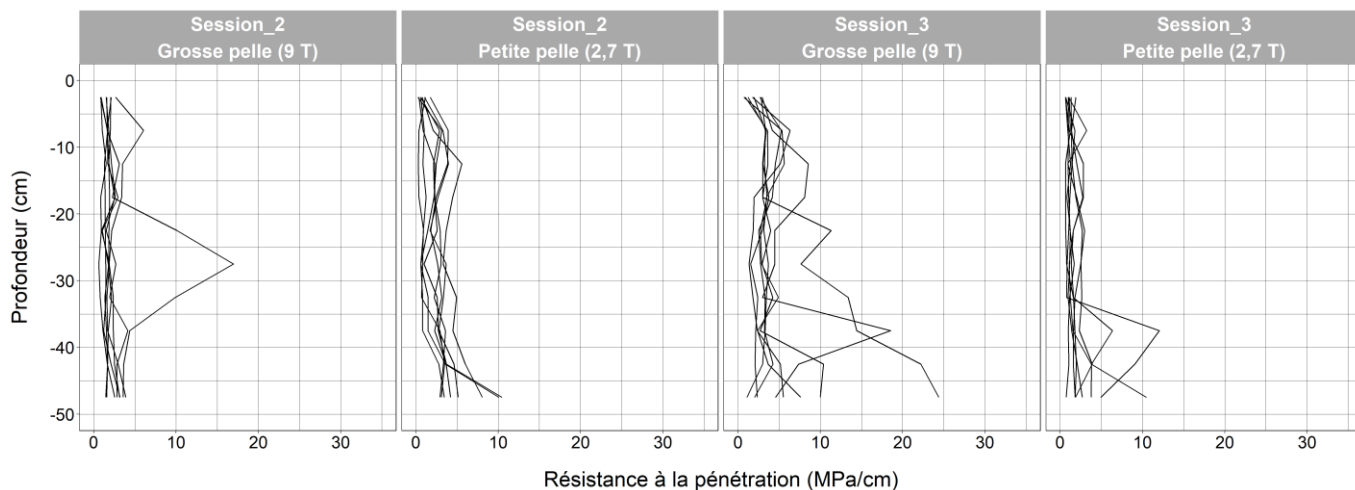
7.4. Résistance à la pénétration avant PMS par parcelle



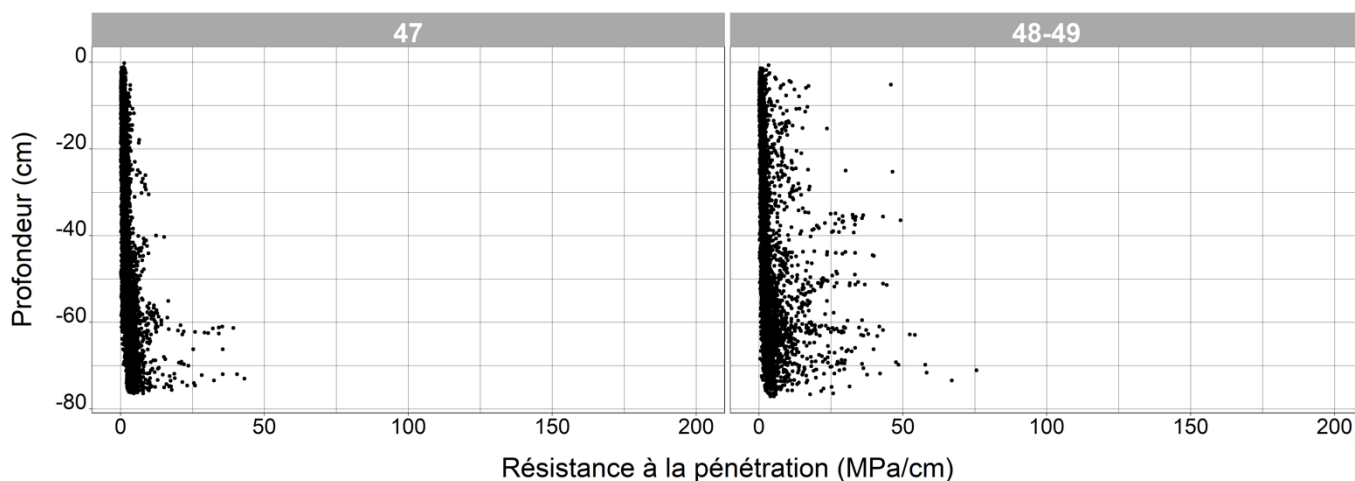
7.5. Résistance à la pénétration avant PMS sur la parcelle 47, par modalité et sondage.



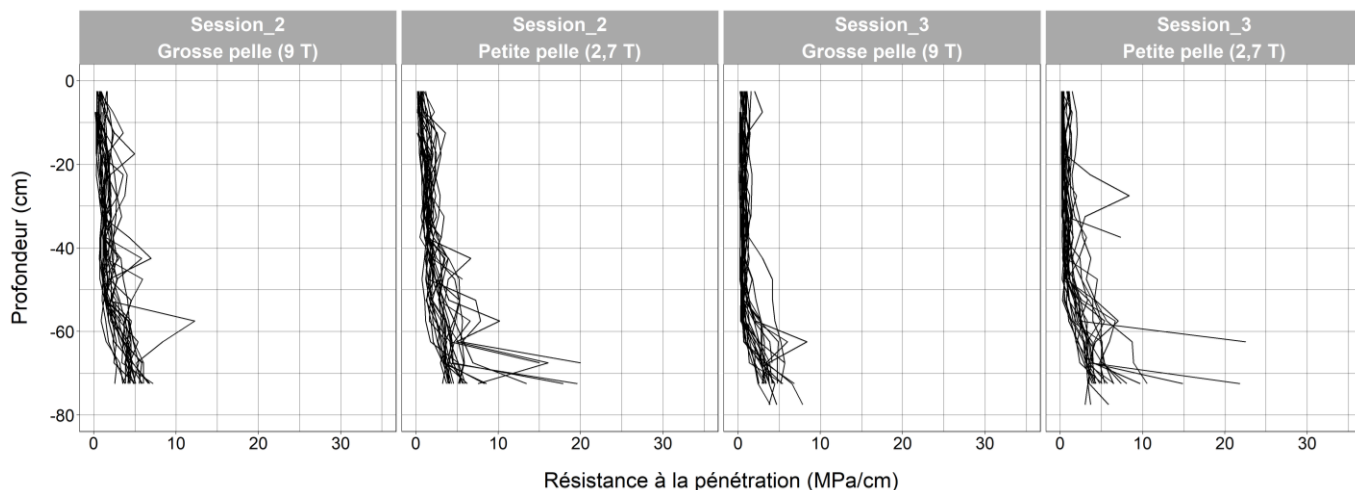
7.6. Résistance à la pénétration avant PMS sur la parcelle 48-49, par modalité et sondage.



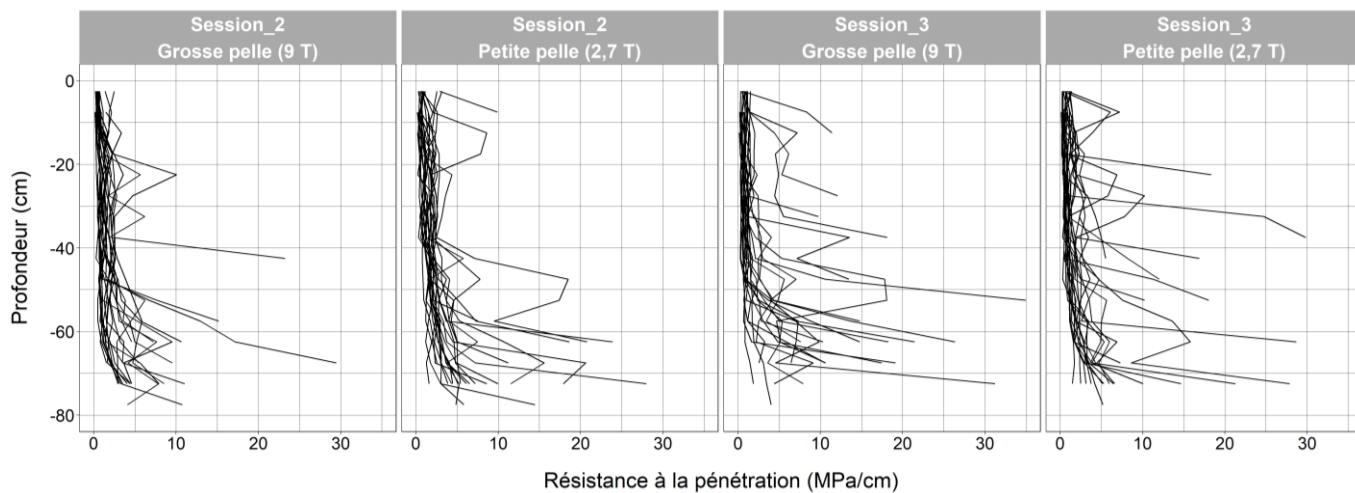
7.7. Résistance à la pénétration après PMS par parcelle



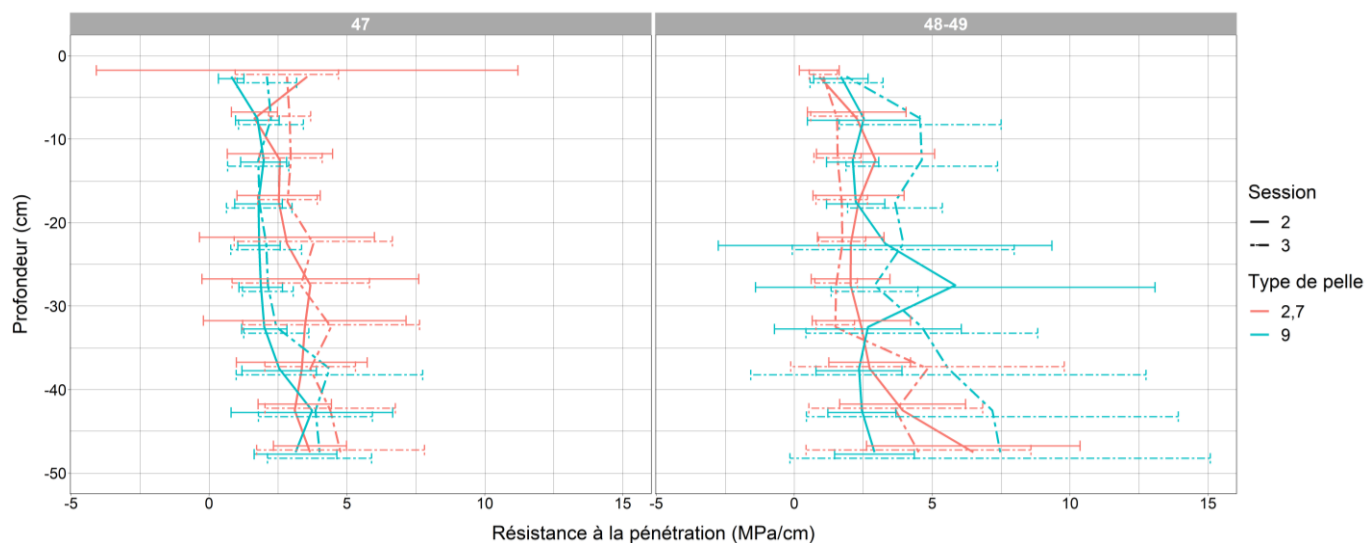
7.8. Résistance à la pénétration après PMS sur la parcelle 47, par modalité et sondage.



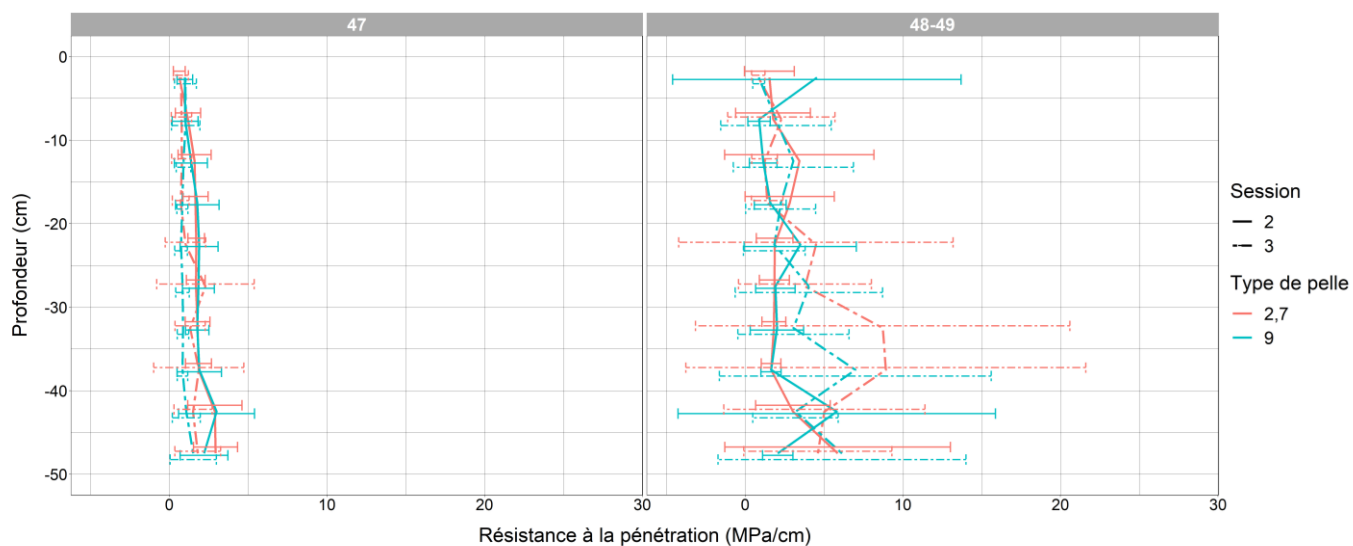
7.9. Résistance à la pénétration après PMS sur la parcelle 48-49, par modalité et sondage



7.10. Résistance à la pénétration après PMS sur la parcelle 47, moyenne et écart-type par modalité



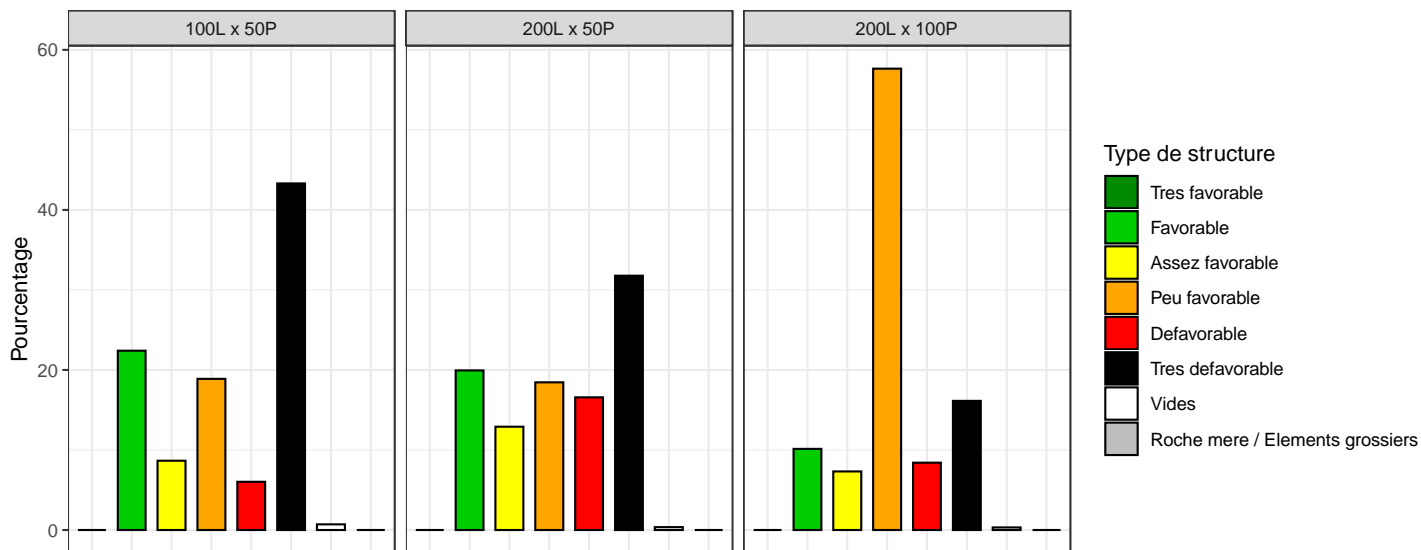
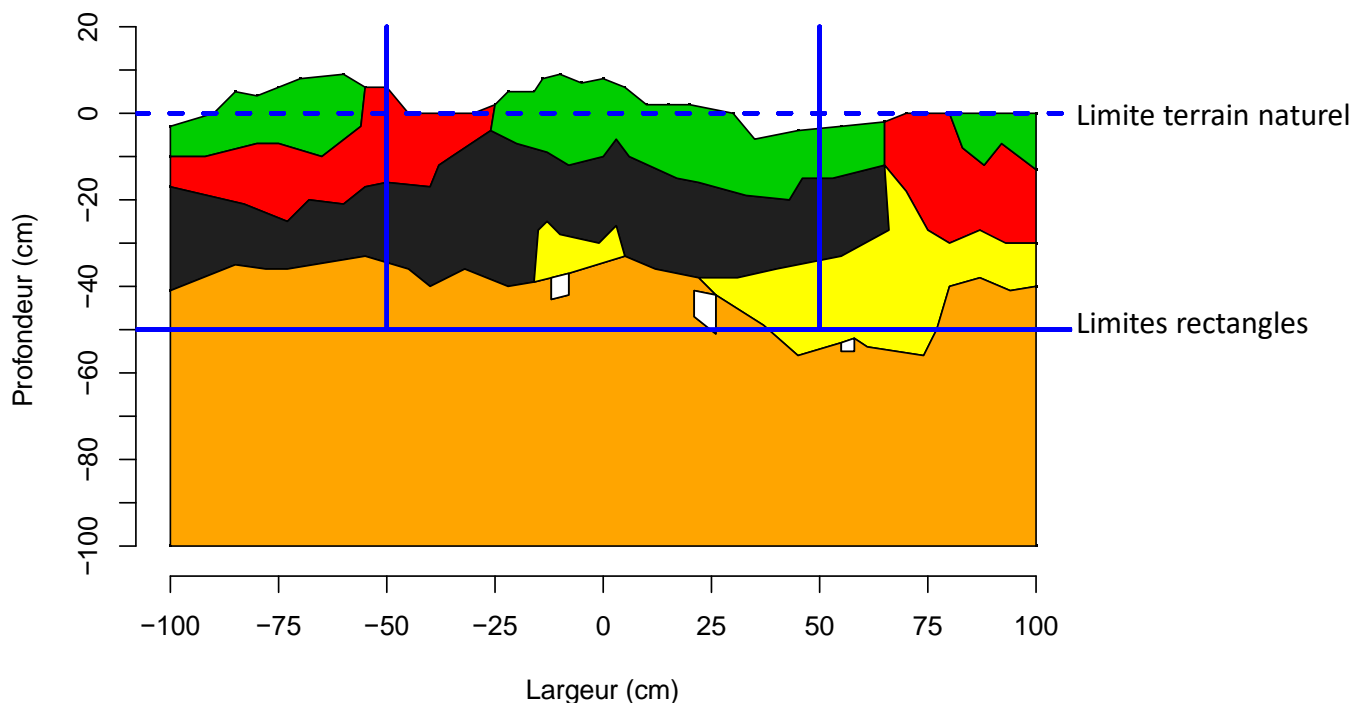
7.11. Résistance à la pénétration après PMS sur la parcelle 48-49, moyenne et écart-type par modalité



7.12. Visualisation et analyse des 30 profils culturaux réalisés

P47_Profil 1_Session 2_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



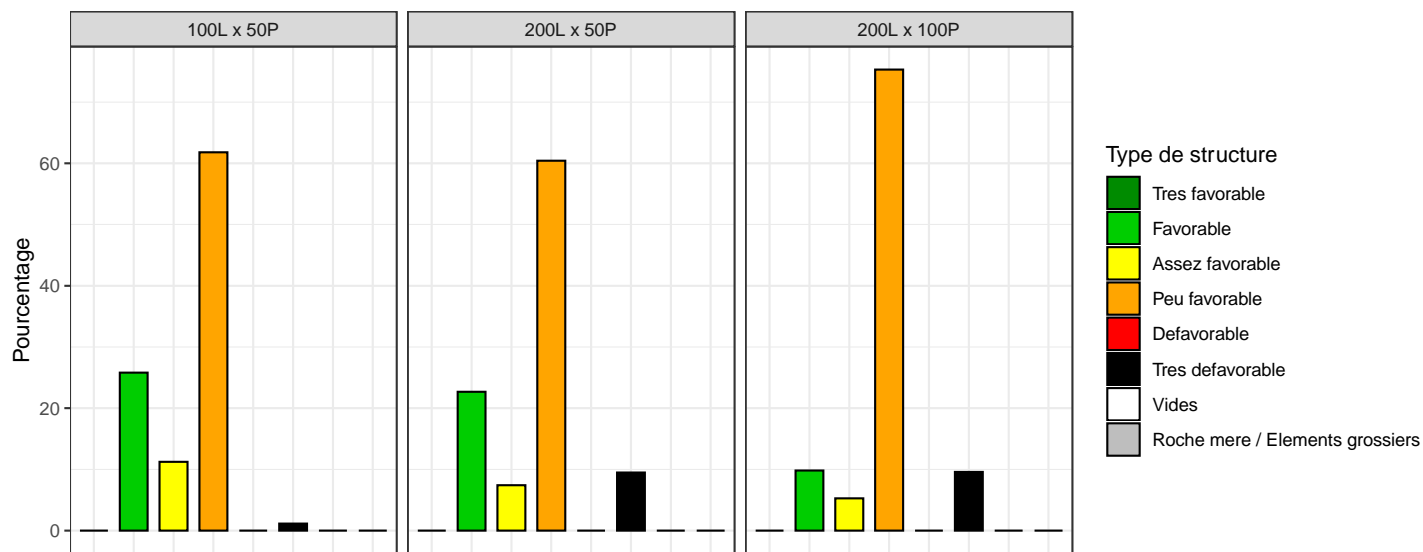
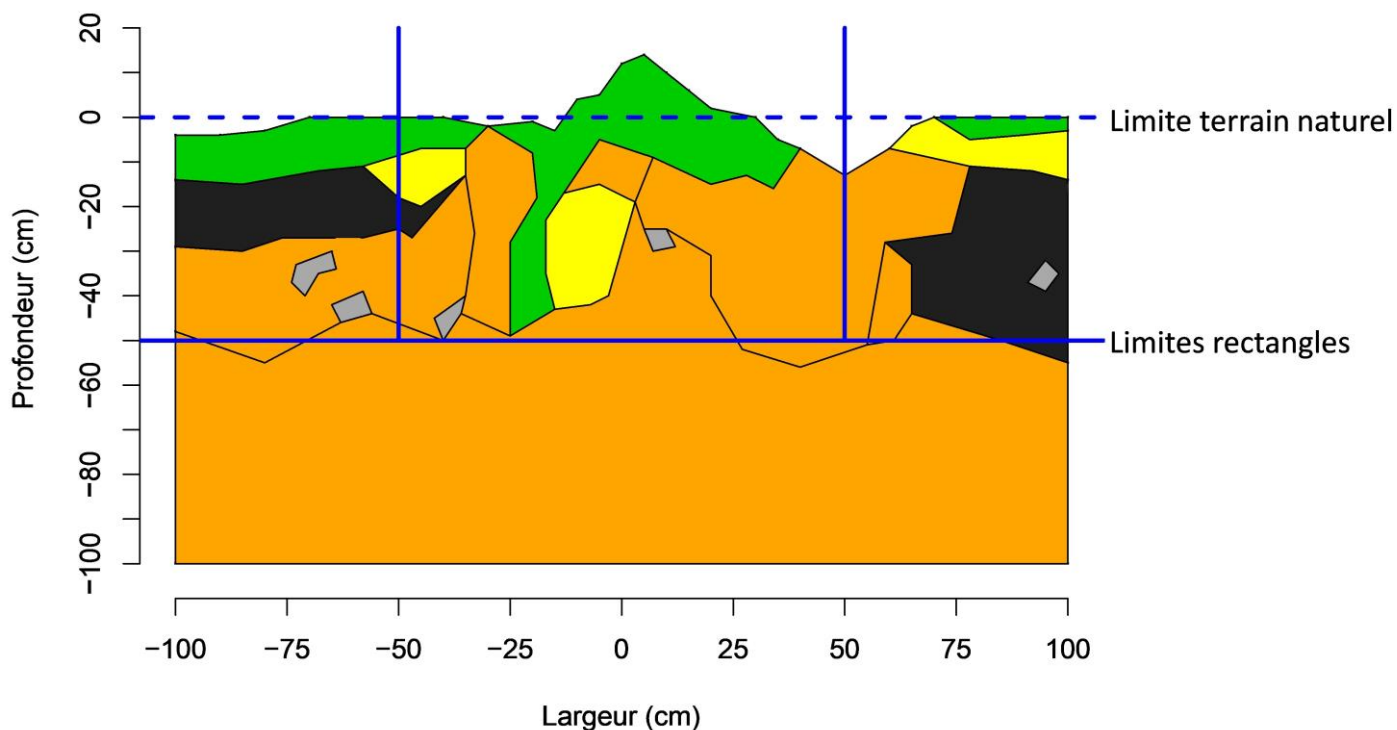
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	50
Hauteur billon en cm :	10
Nombre de traces de dents :	3

P47_Profil 2_Session 2_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

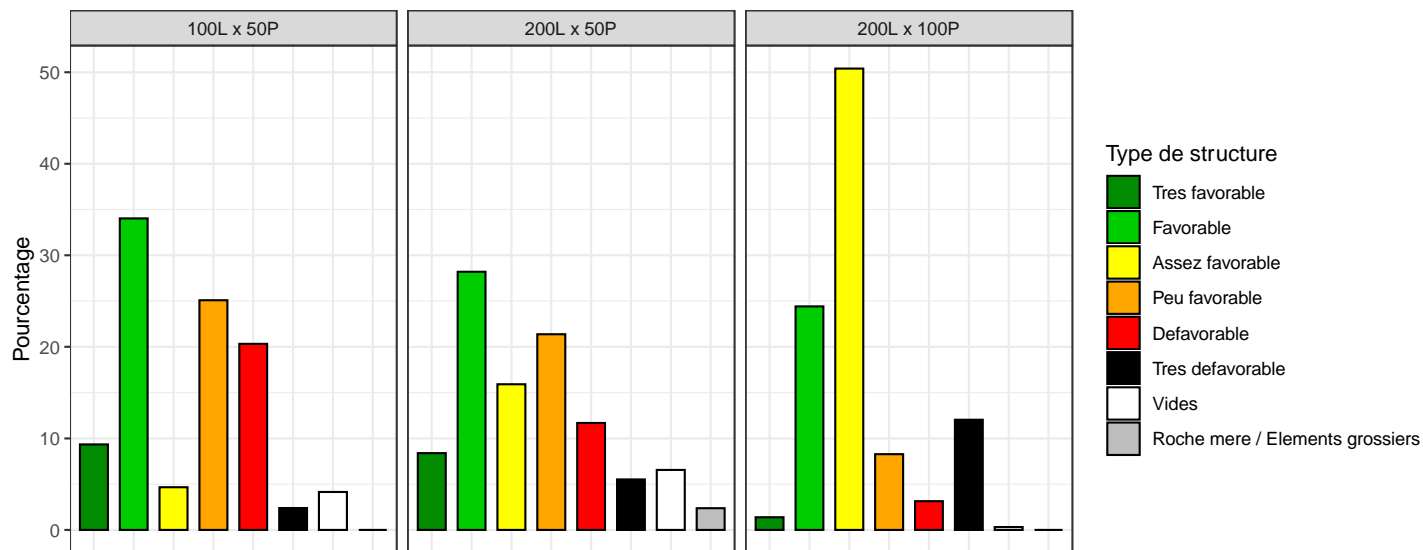
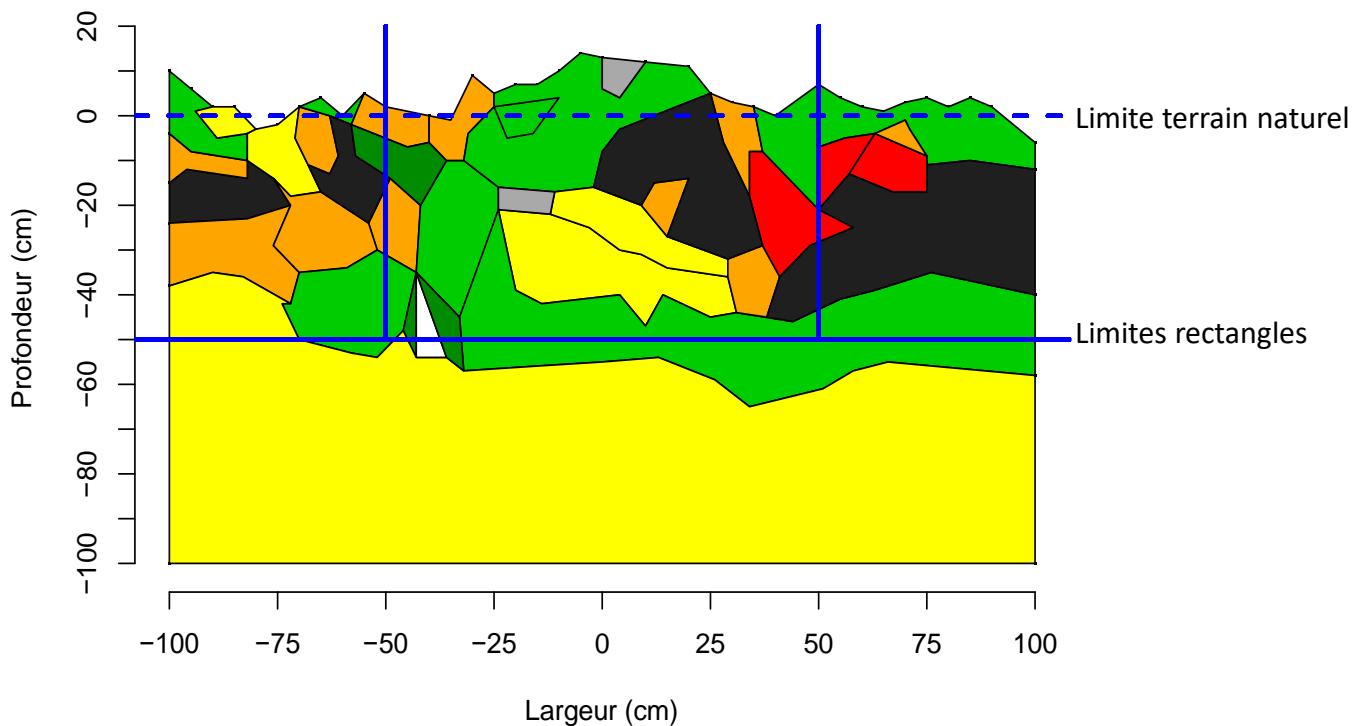
Profondeur max en cm : 50

Hauteur billon en cm : 15

Nombre de traces de dents : 0

P47_Profil 3_Session 2_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

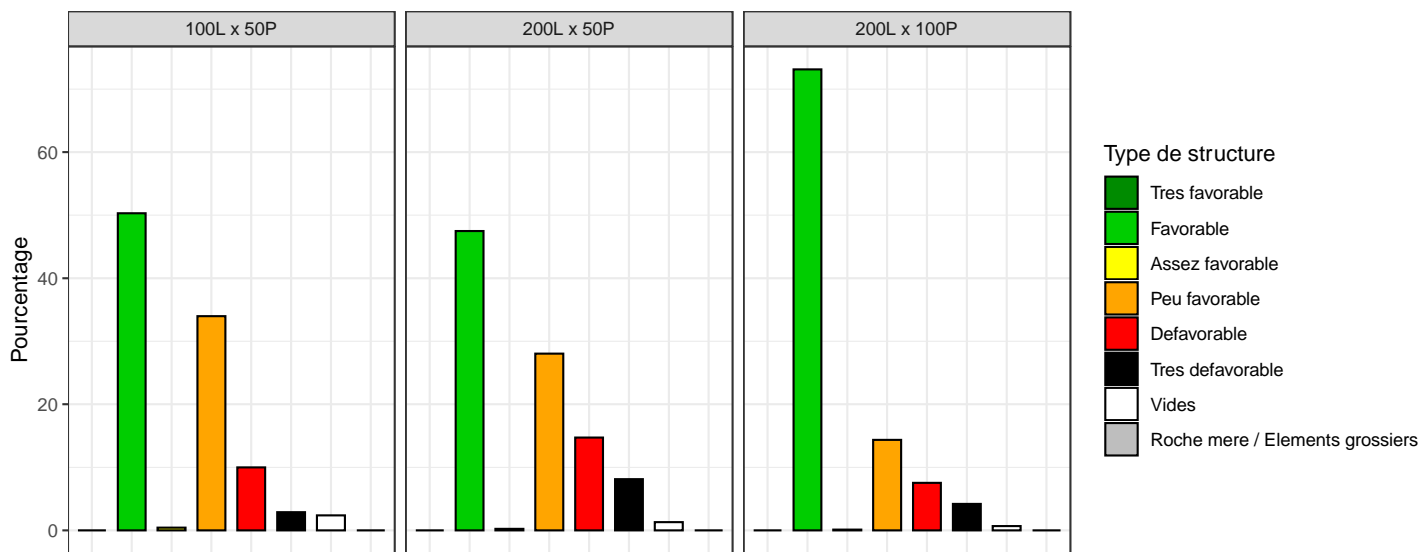
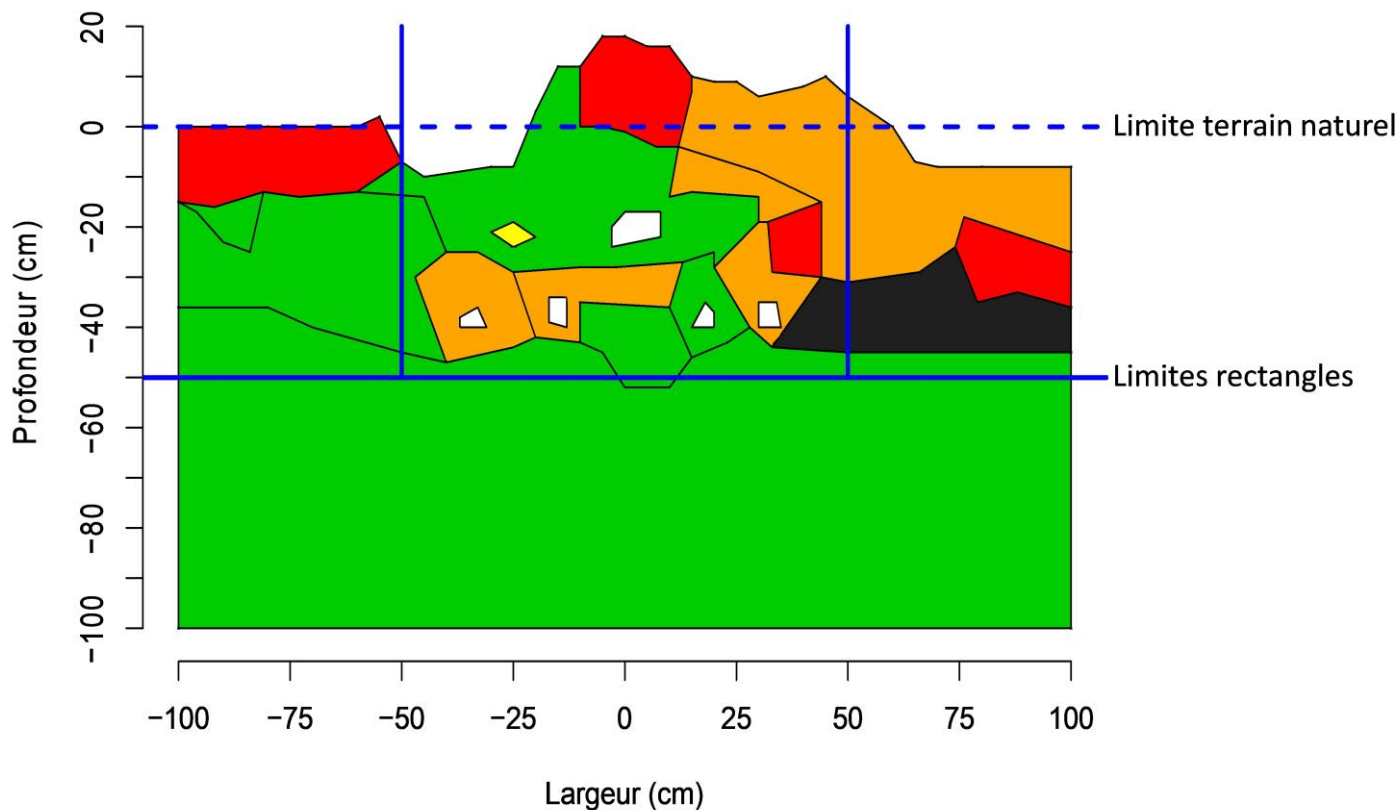
Profondeur max en cm : 50

Hauteur billon en cm : 15

Nombre de traces de dents : 1

P47_Profil 4_Session 2_Pelle 2,7 T

Pour chacun des 3 rectangles

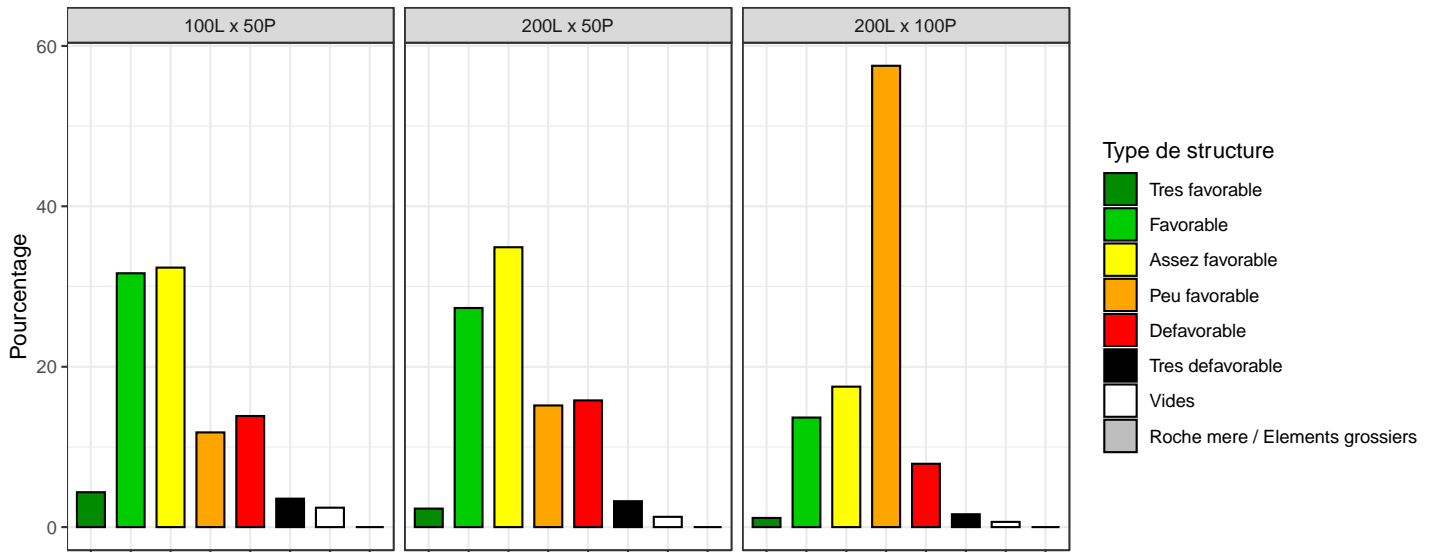
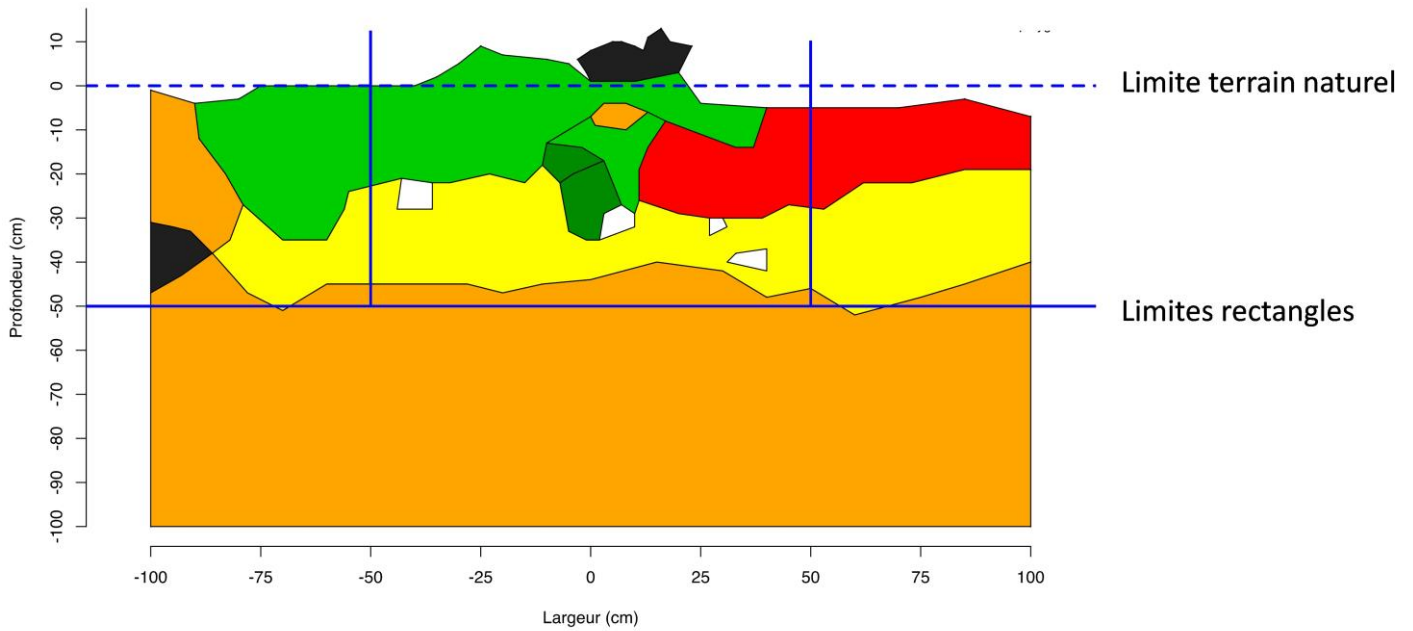


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	40
Hauteur billon en cm :	15
Nombre de traces de dents :	5

P47_Profil 5_Session 2_Pelle 2,7 T
 Pour chacun des 3 rectangles



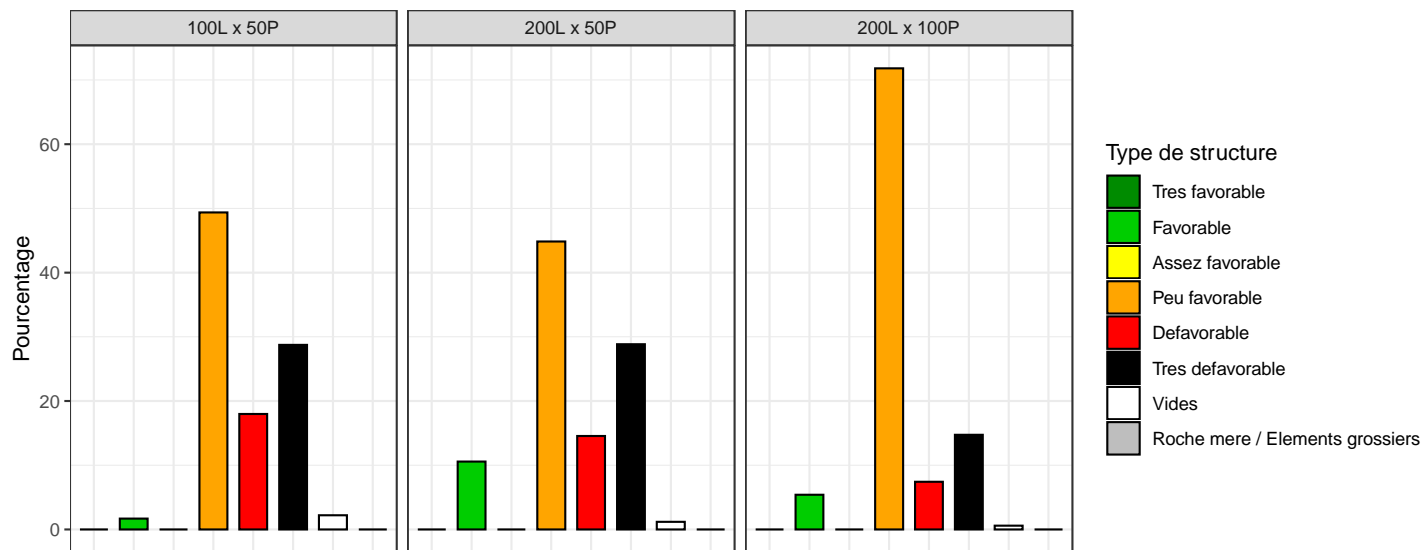
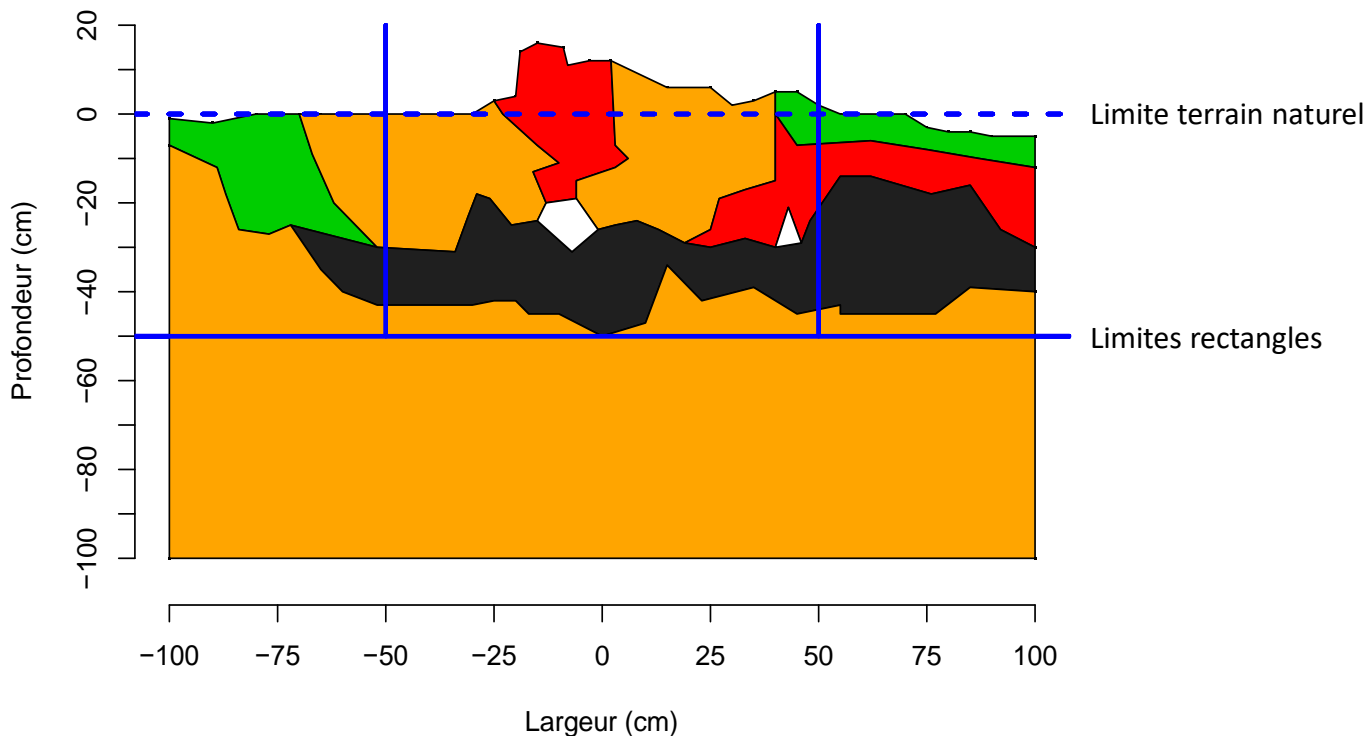
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	40
Hauteur billon en cm :	10
Nombre de traces de dents :	4

P47_Profil 6_Session 2_Pelle 2,7 T

Pour chacun des 3 rectangles



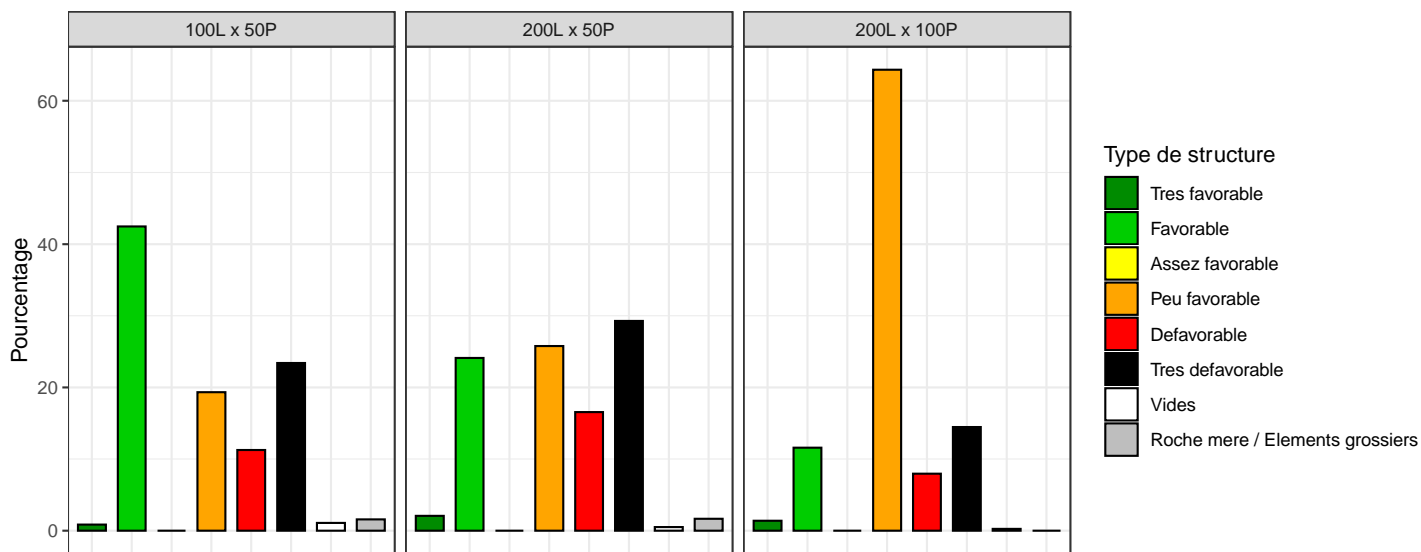
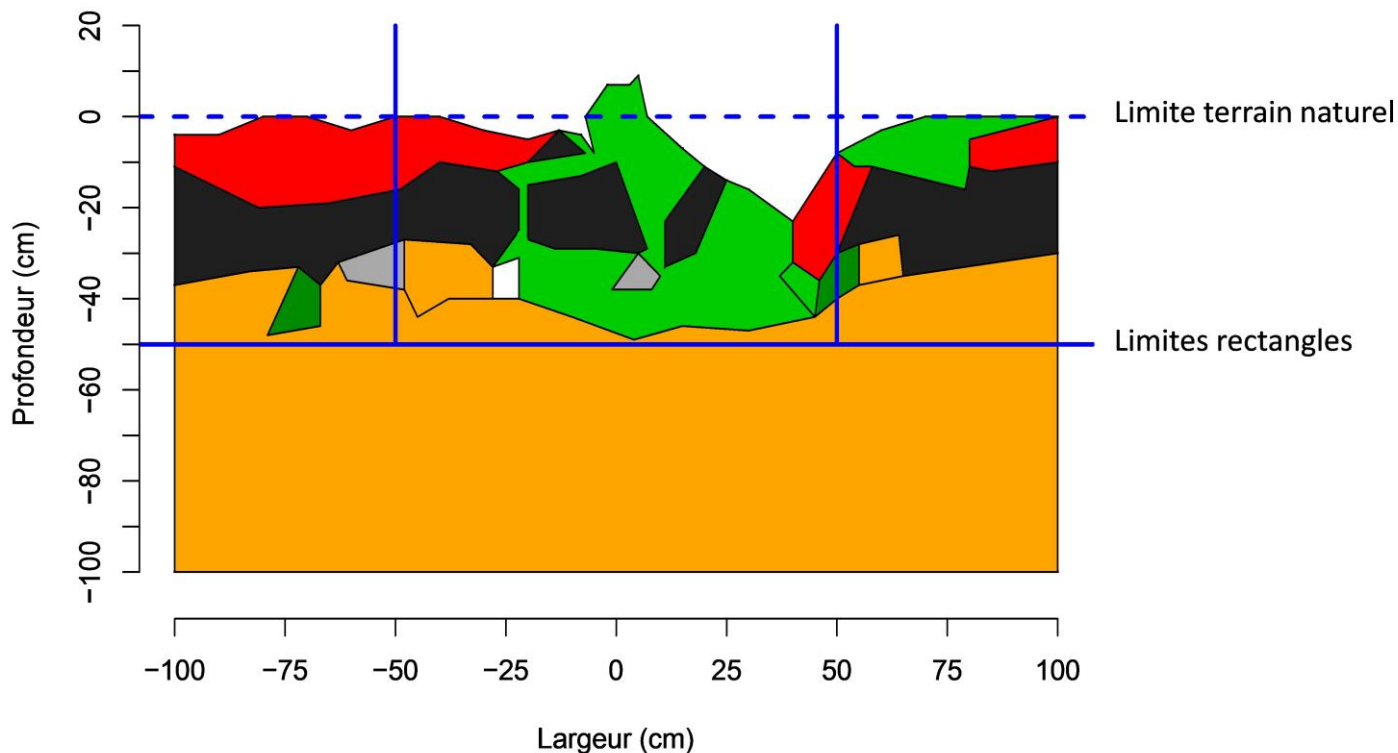
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	30
Hauteur billon en cm :	15
Nombre de traces de dents :	2

P47_Profil 7_Session 3_Pelle 2,7 T

Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

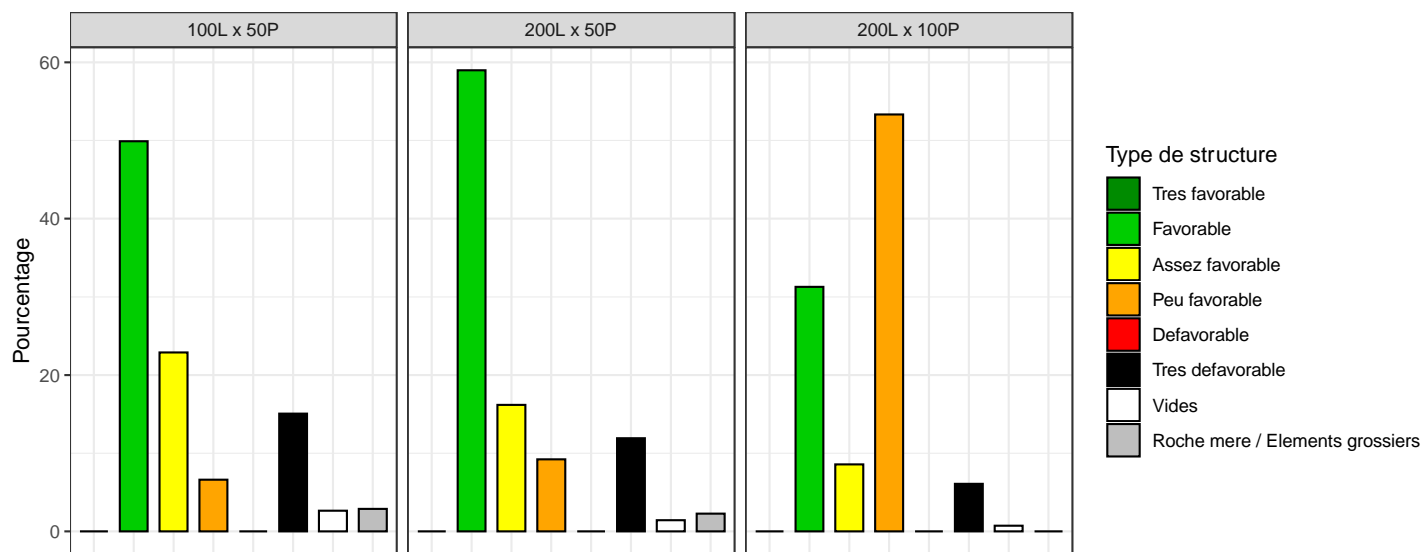
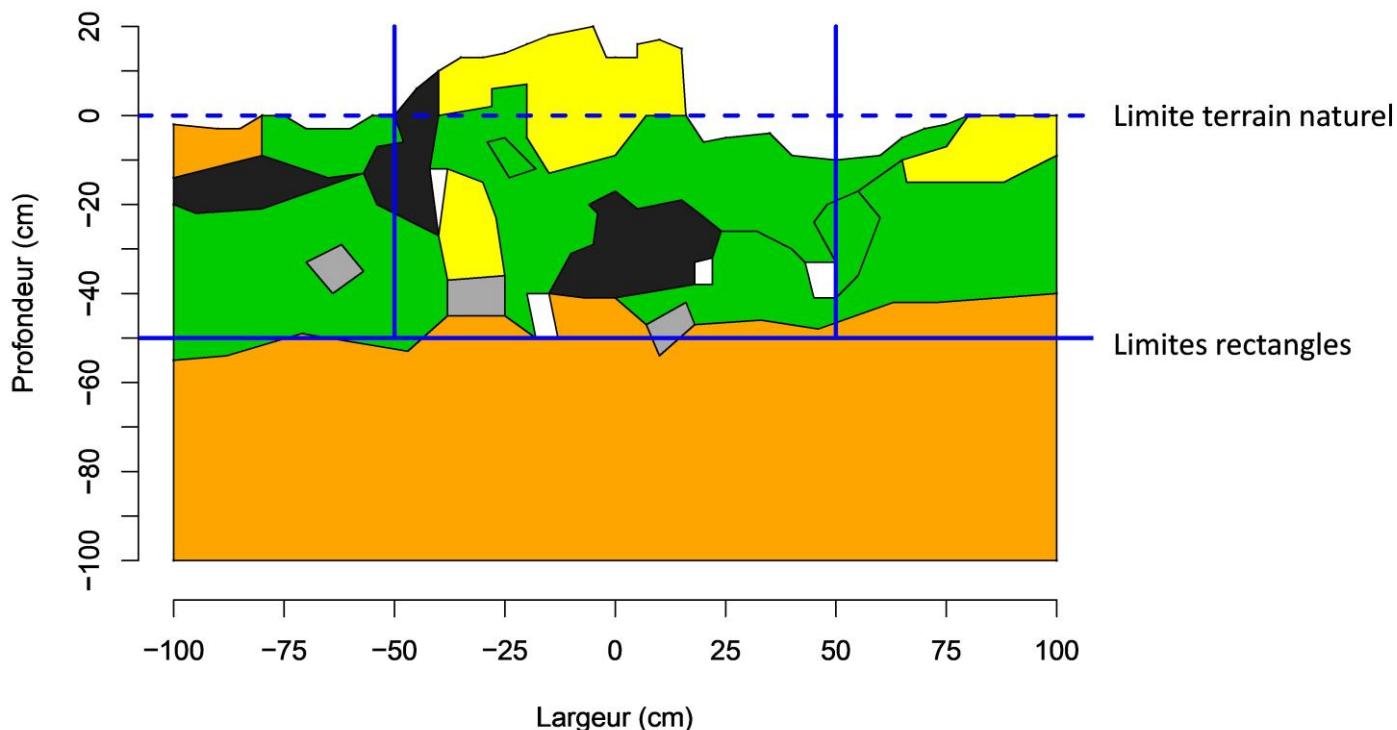
Profondeur max en cm : 45

Hauteur billon en cm : 10

Nombre de traces de dents : 1

P47_Profil 8_Session 3_Pelle 2,7 T

Pour chacun des 3 rectangles



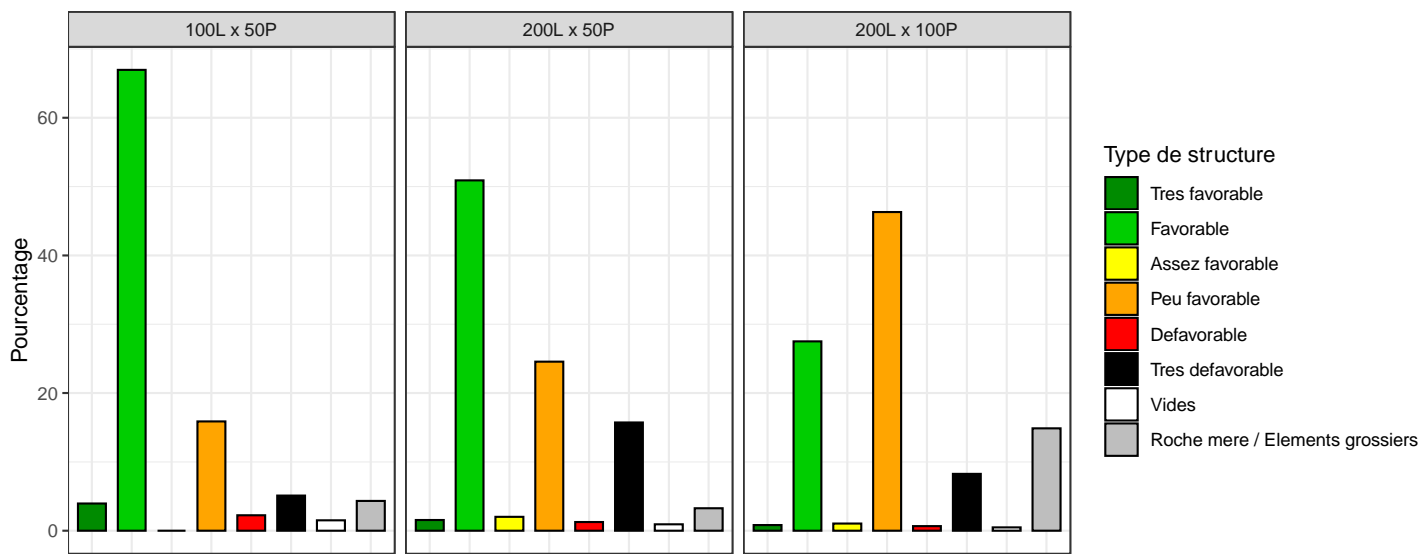
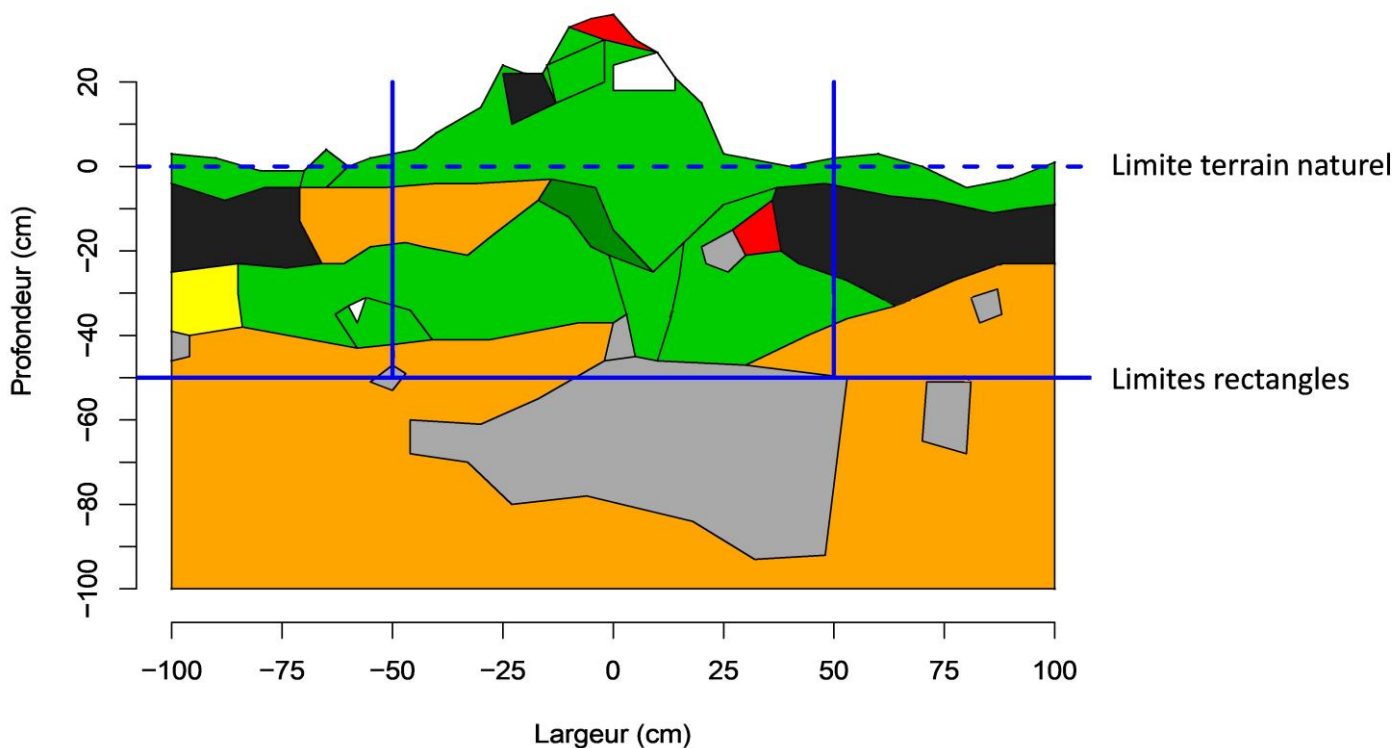
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	50
Hauteur billon en cm :	20
Nombre de traces de dents :	4

P47_Profil 9_Session 3_Pelle 2,7 T

Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil,
pour chaque classe de qualité,
pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

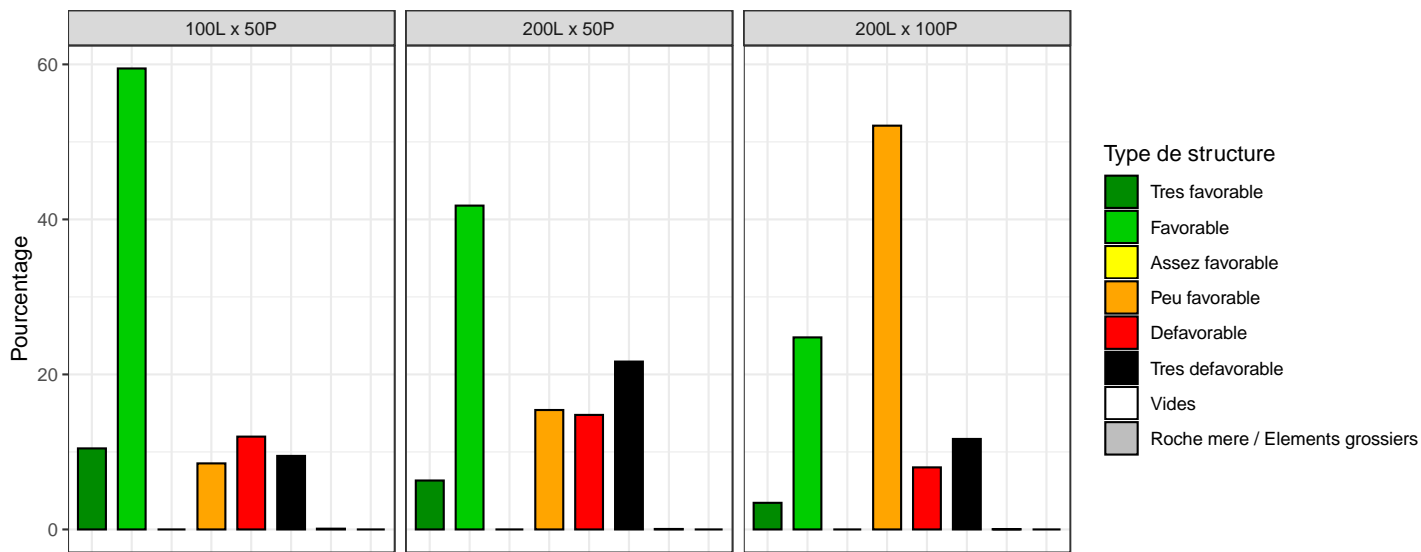
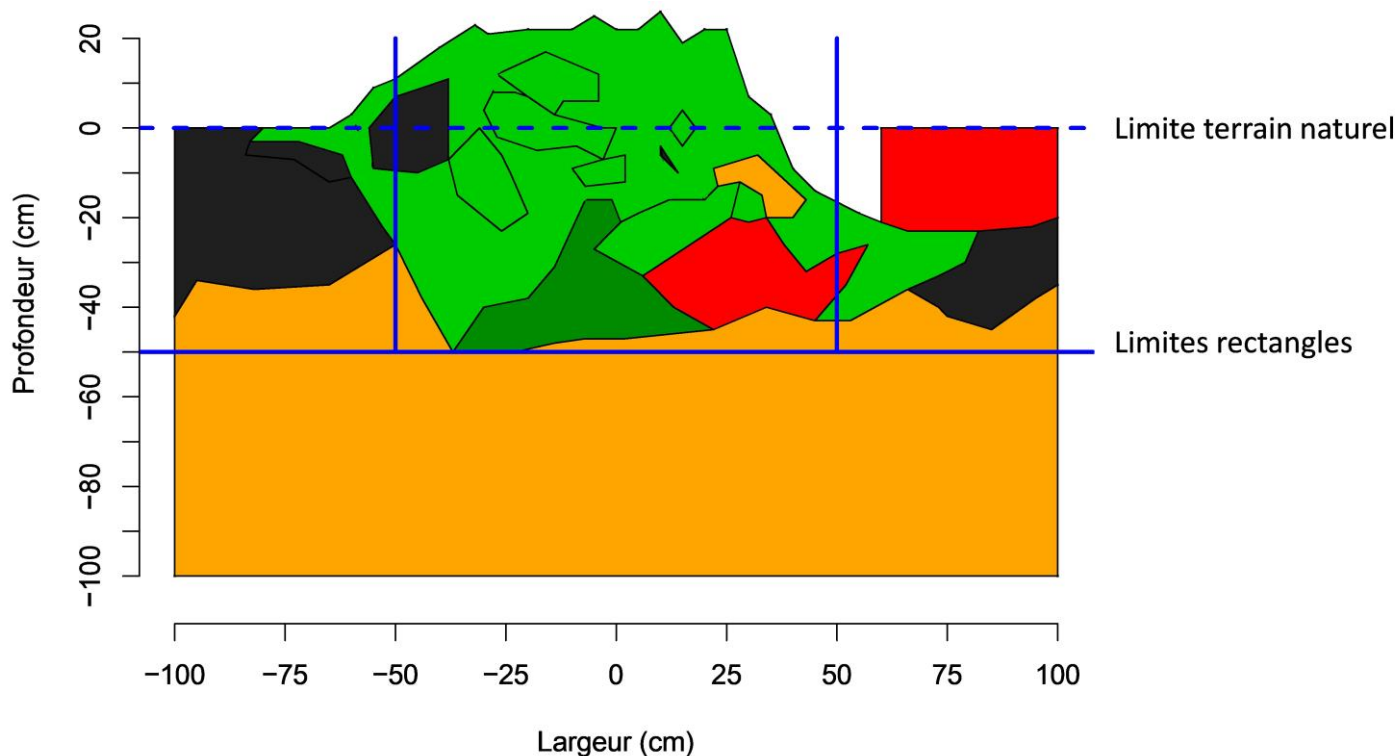
Profondeur max en cm : 50

Hauteur billon en cm : 40

Nombre de traces de dents : 1

P47_Profil 10_Session 3_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil,
pour chaque classe de qualité,
pour les 3 rectangles

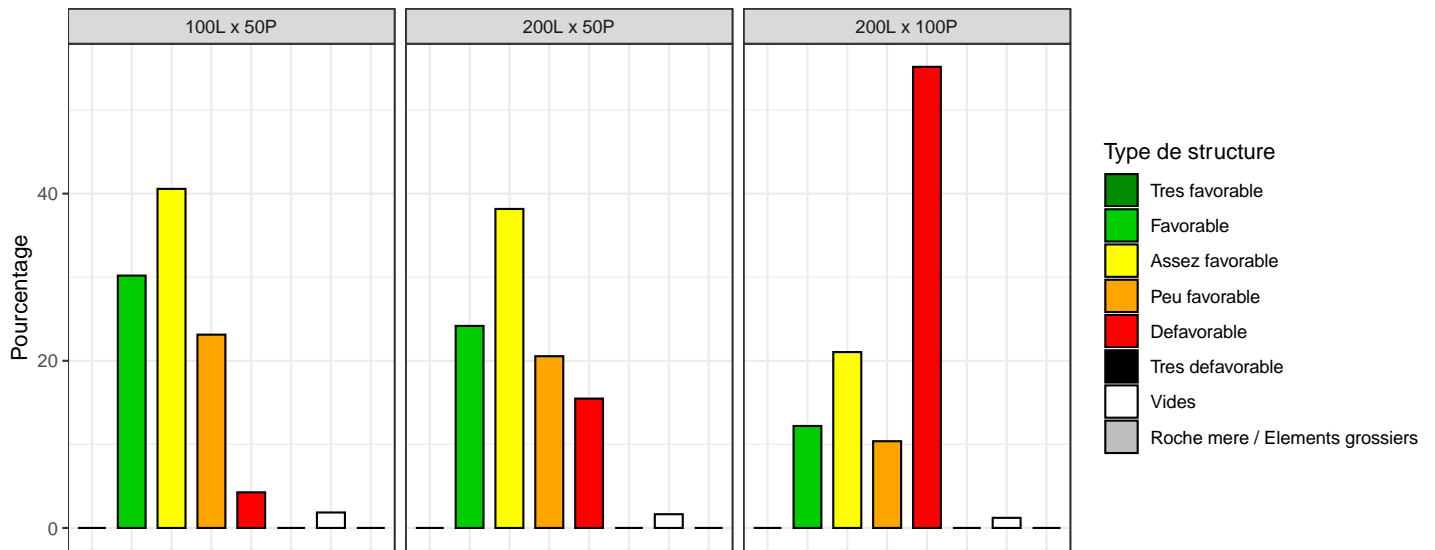
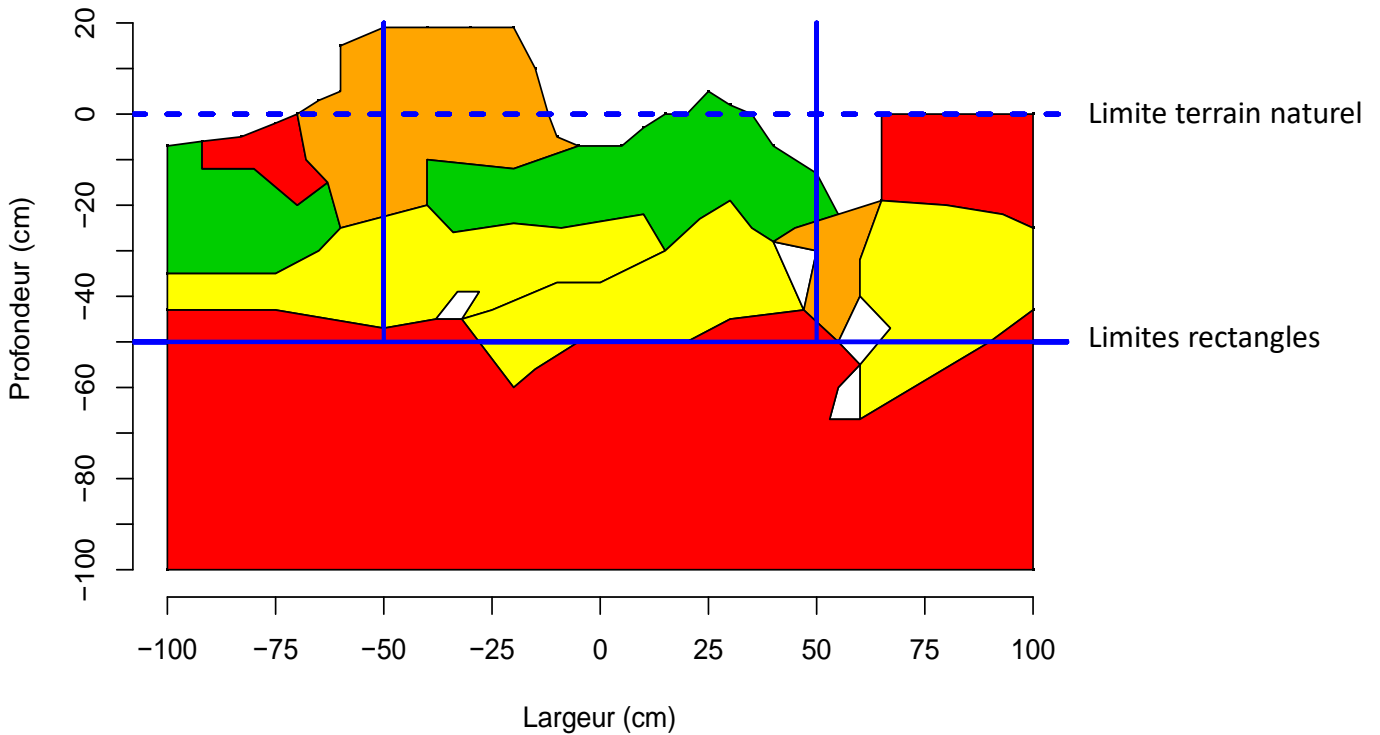
Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm : 50

Hauteur billon en cm : 25

Nombre de traces de dents : 0

P47_Profil 11_Session 3_Pelle 9 T
 Pour chacun des 3 rectangles

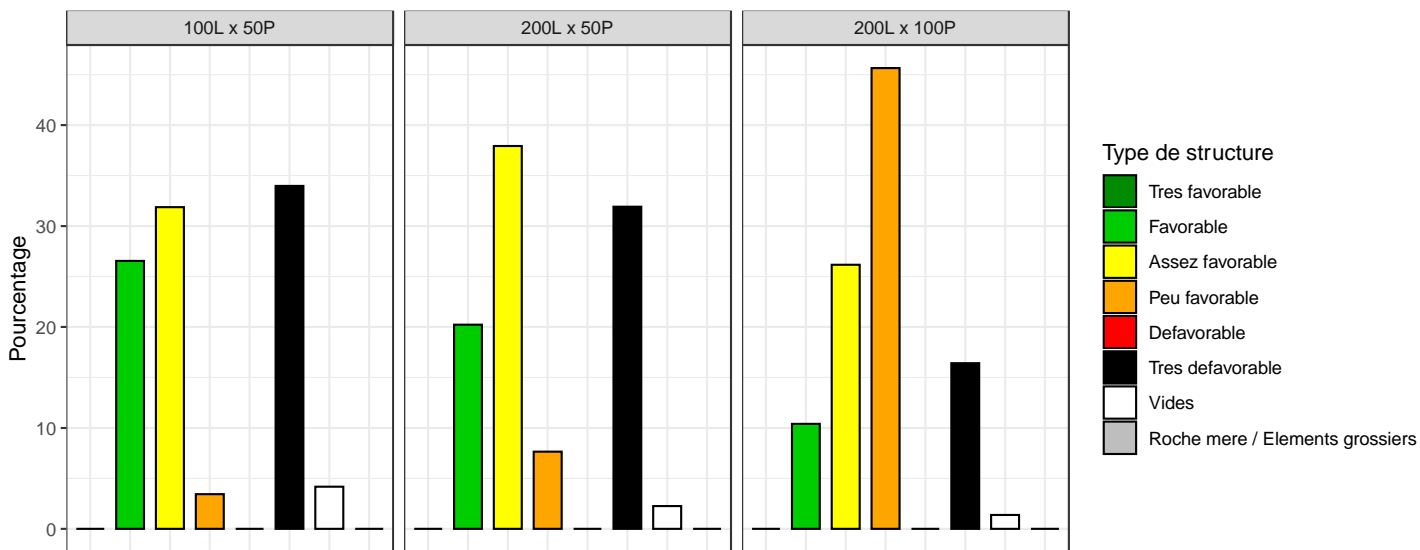
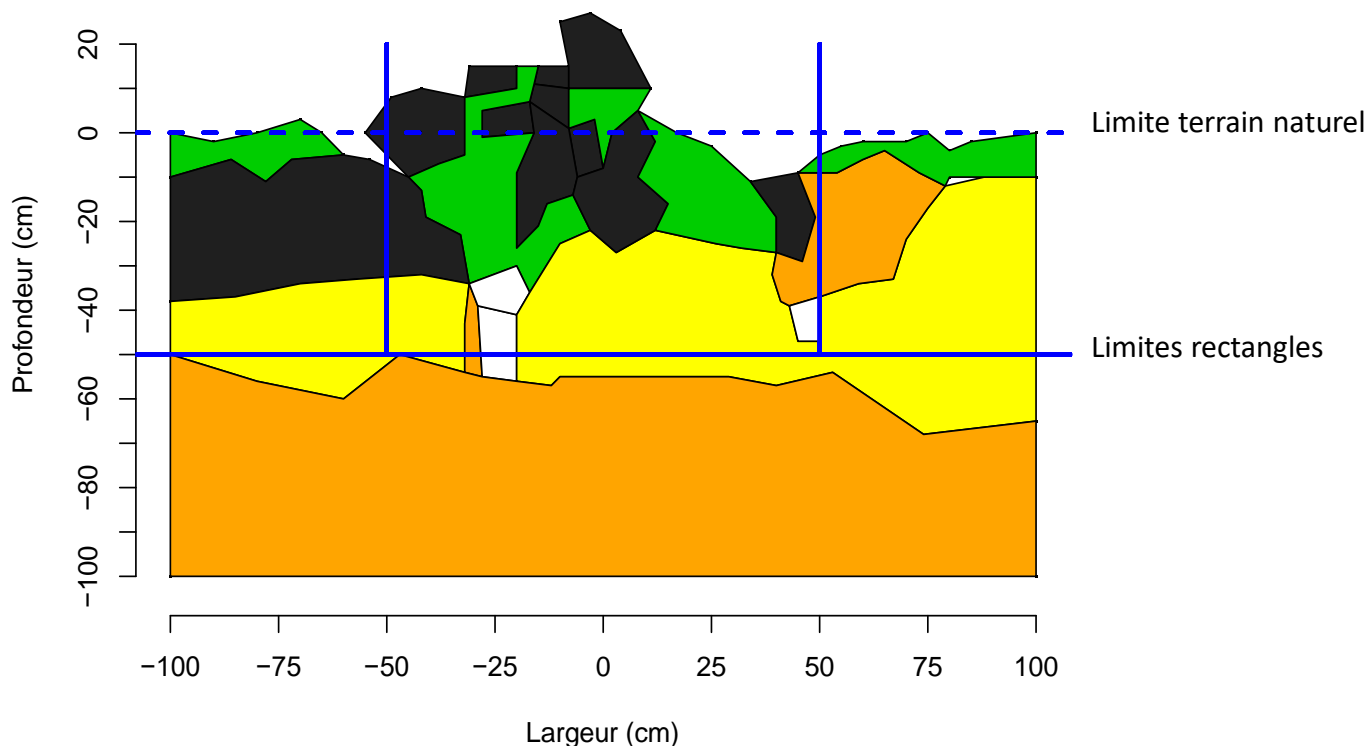


Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	50
Hauteur billon en cm :	25
Nombre de traces de dents :	0

P47_Profil 12_Session 3_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles

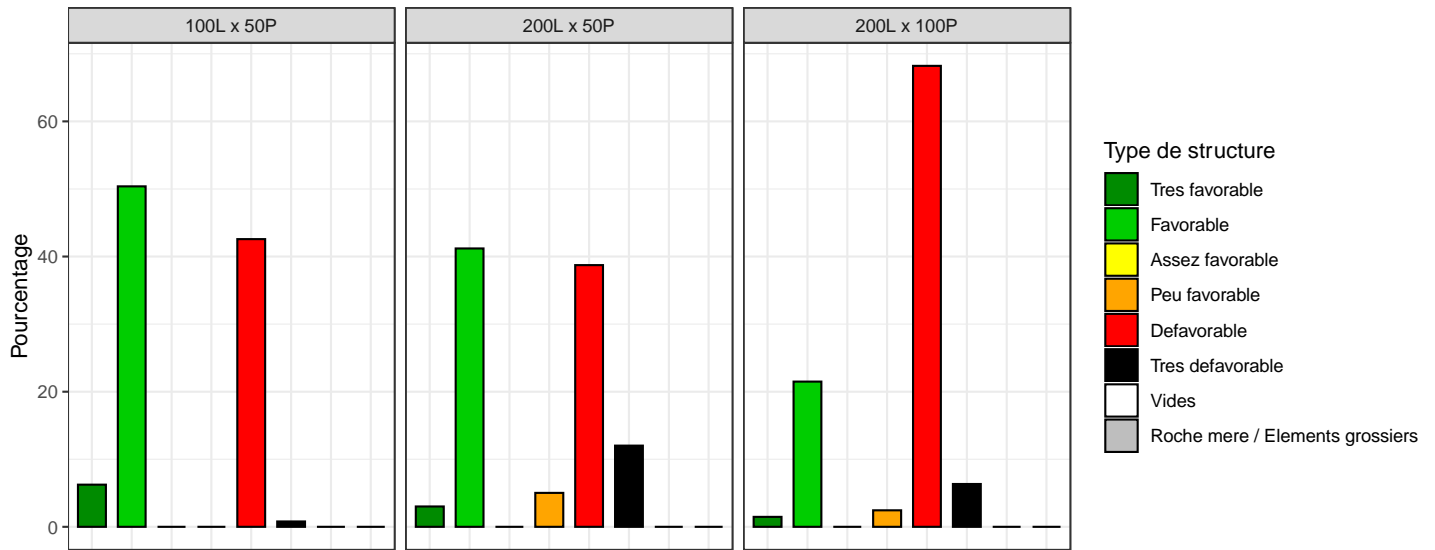
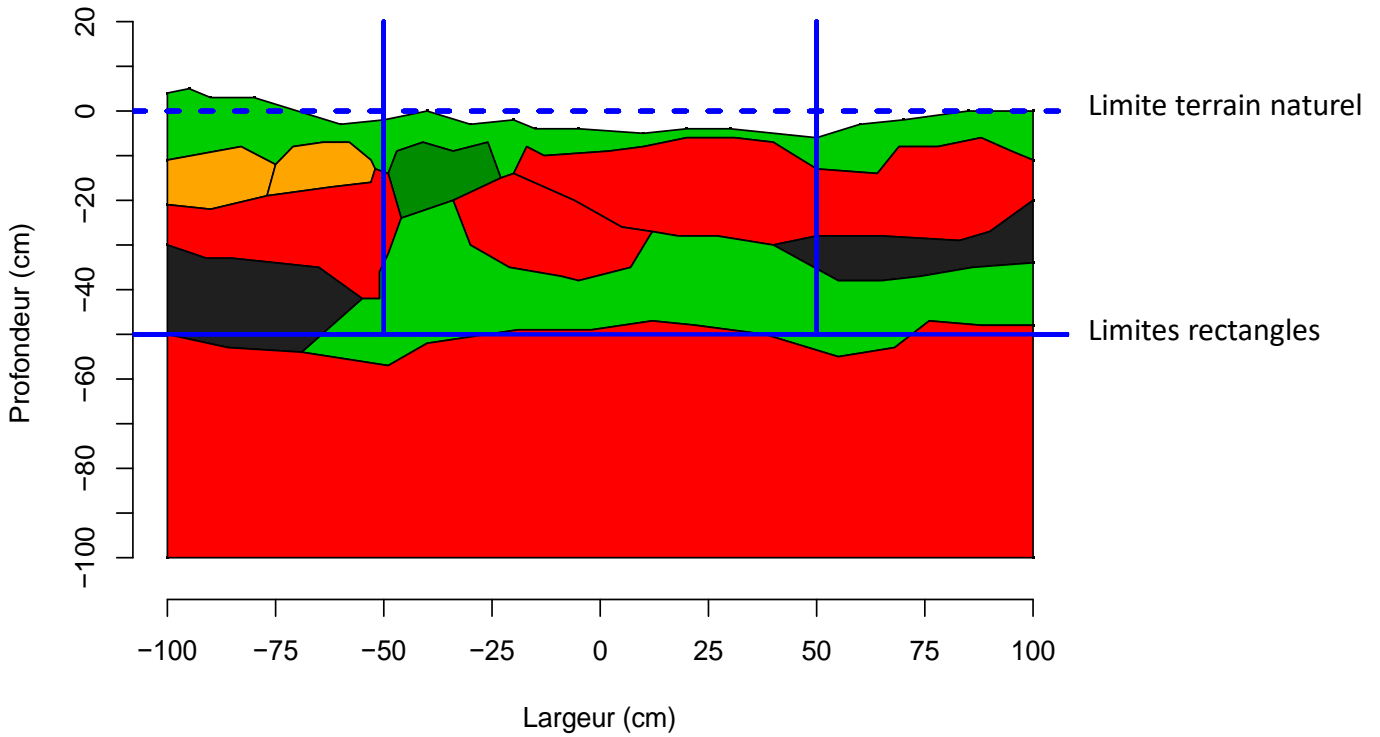


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

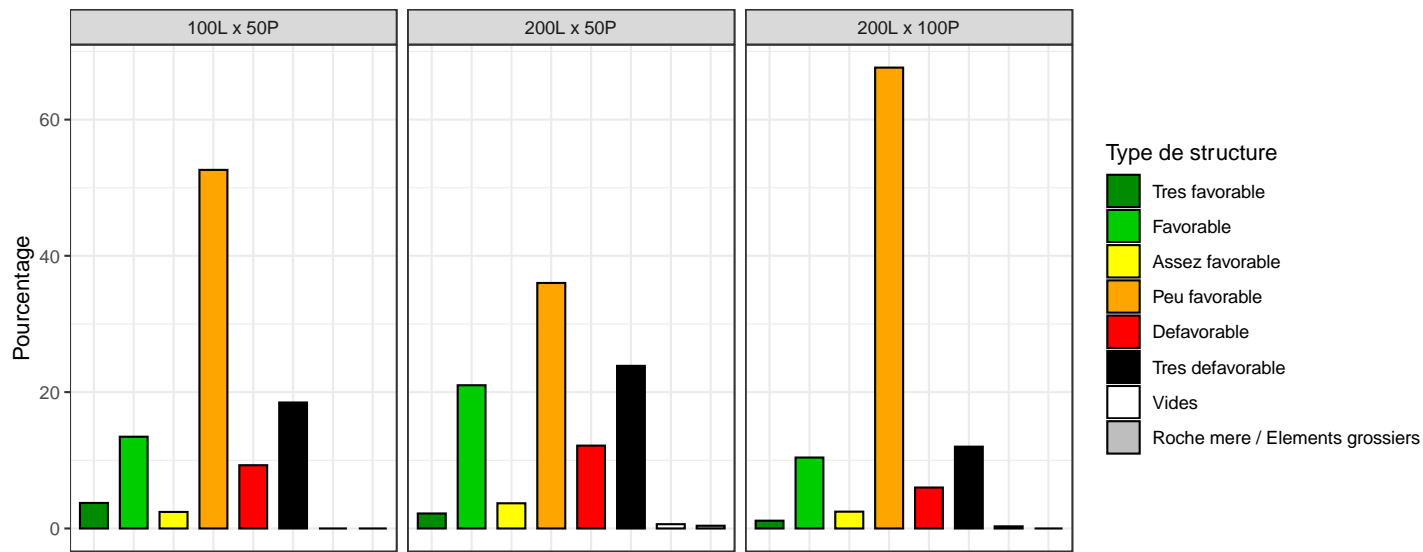
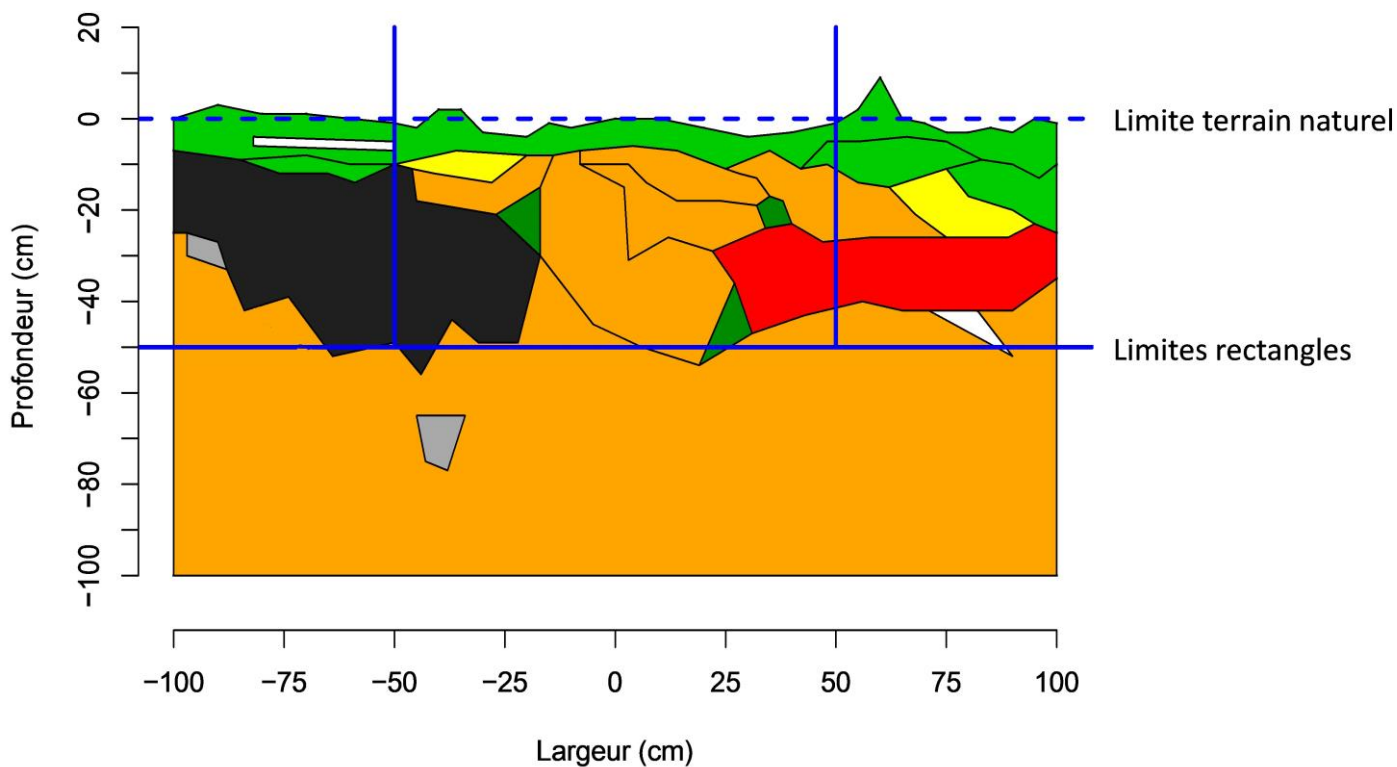
Profondeur max en cm :	65
Hauteur billon en cm :	25
Nombre de traces de dents :	2

P47_Profil 13_Témoïn
 Pour chacun des 3 rectangles



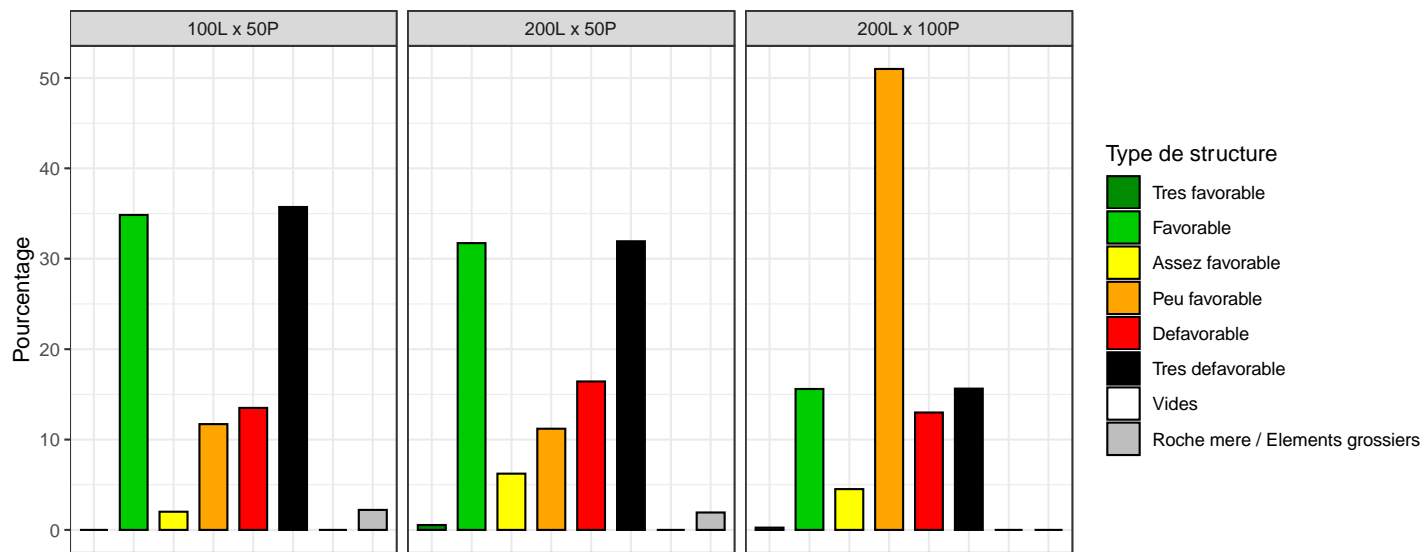
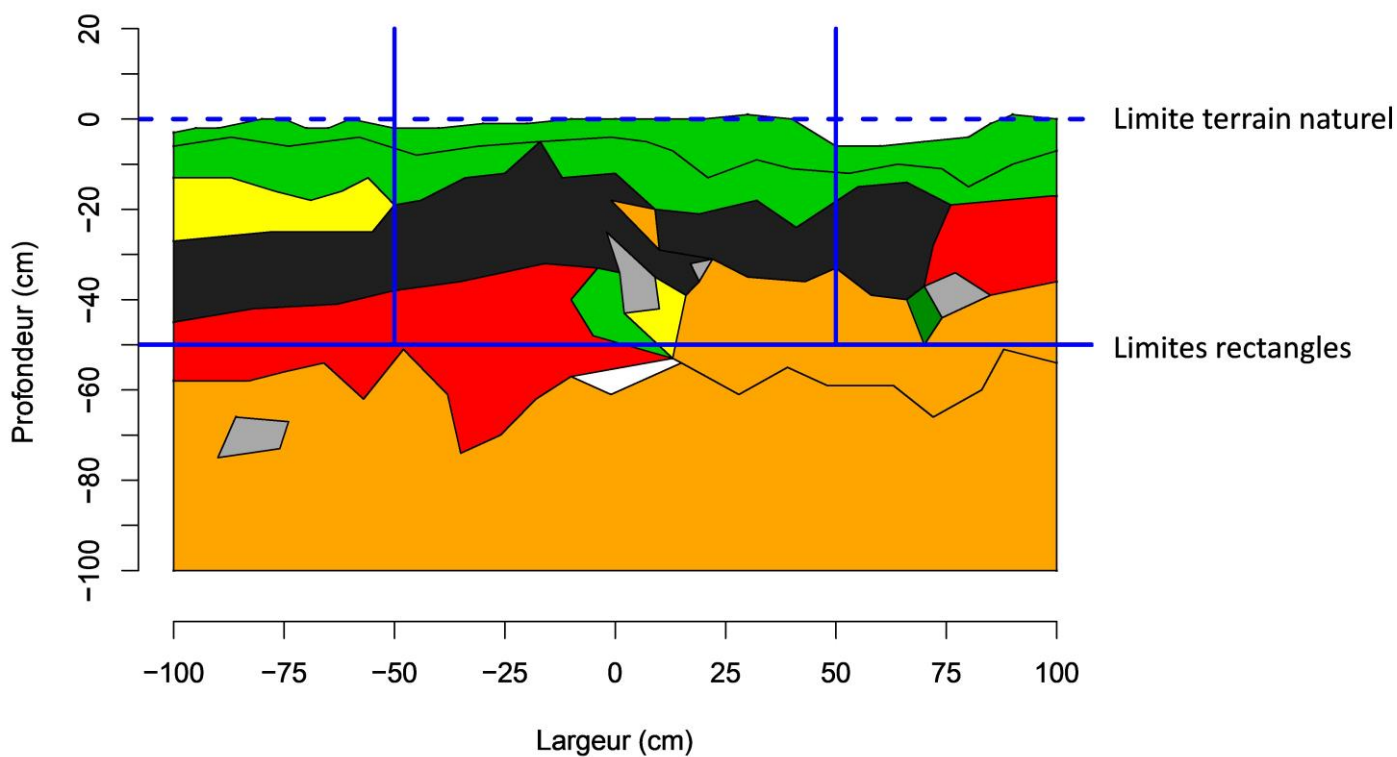
Proportion de la surface du profil,
 pour chaque classe de qualité,
 pour les 3 rectangles

P47_Profil 14_Témoin
 Pour chacun des 3 rectangles



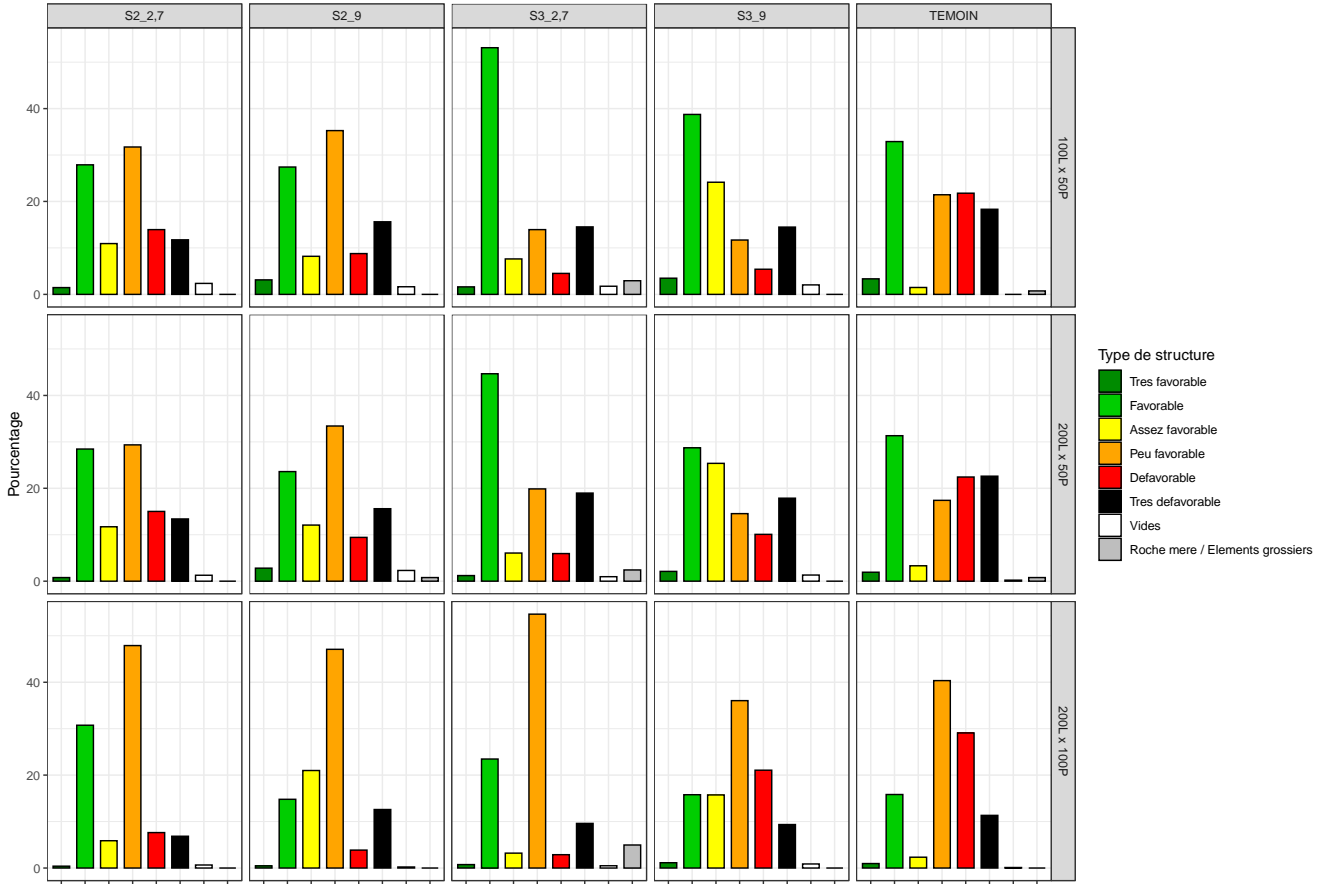
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

P47_Profil 15_Témoin
 Pour chacun des 3 rectangles

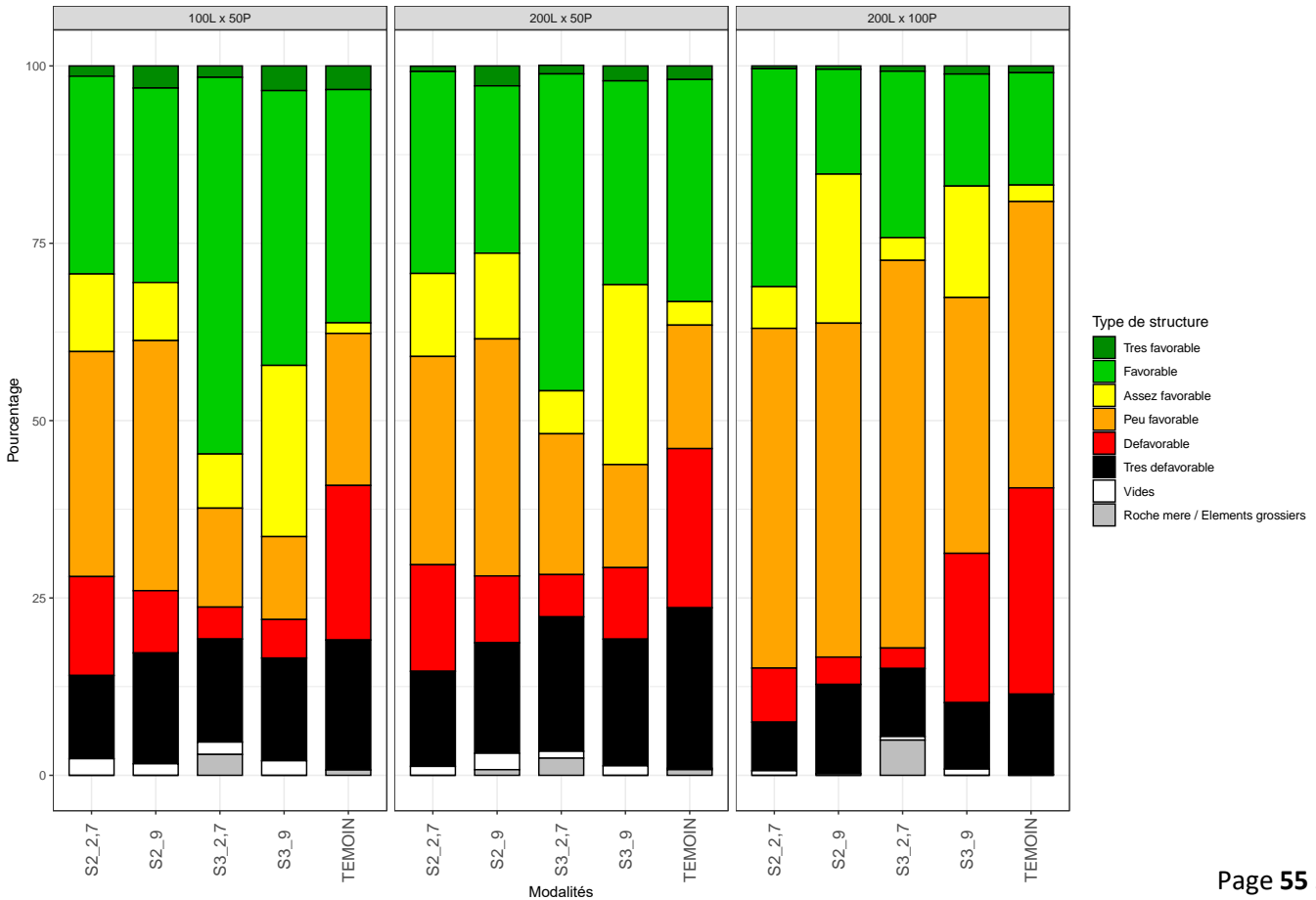


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Parcelle 47 : Comparaison entre les modalités
Pour chacun des 3 rectangles

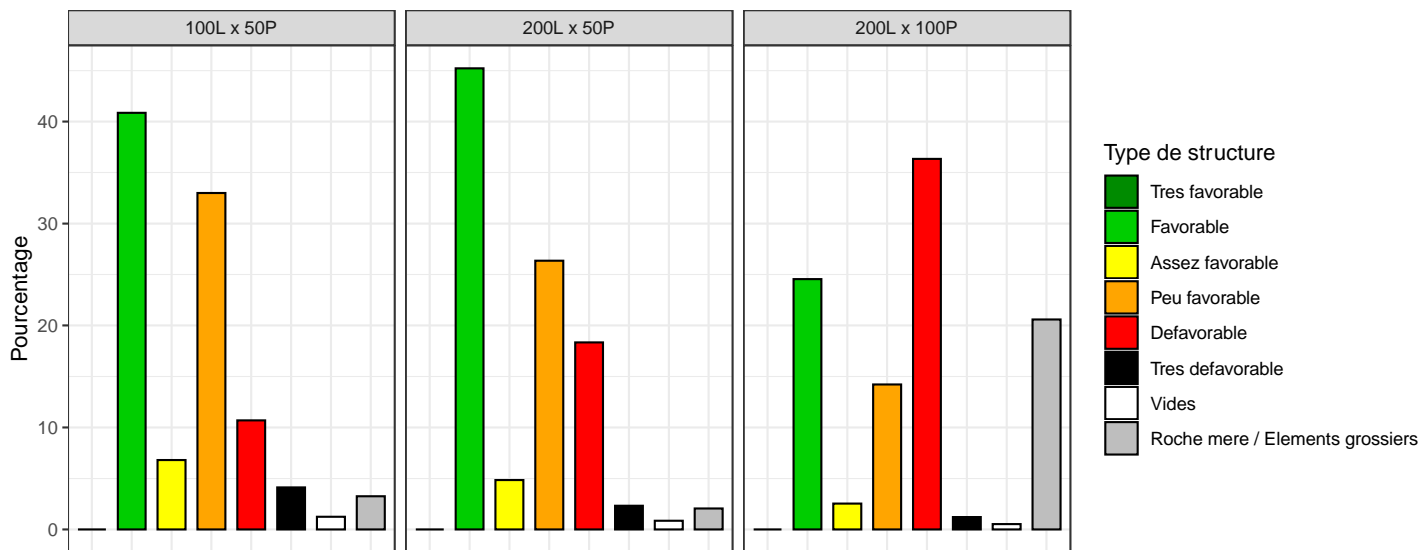
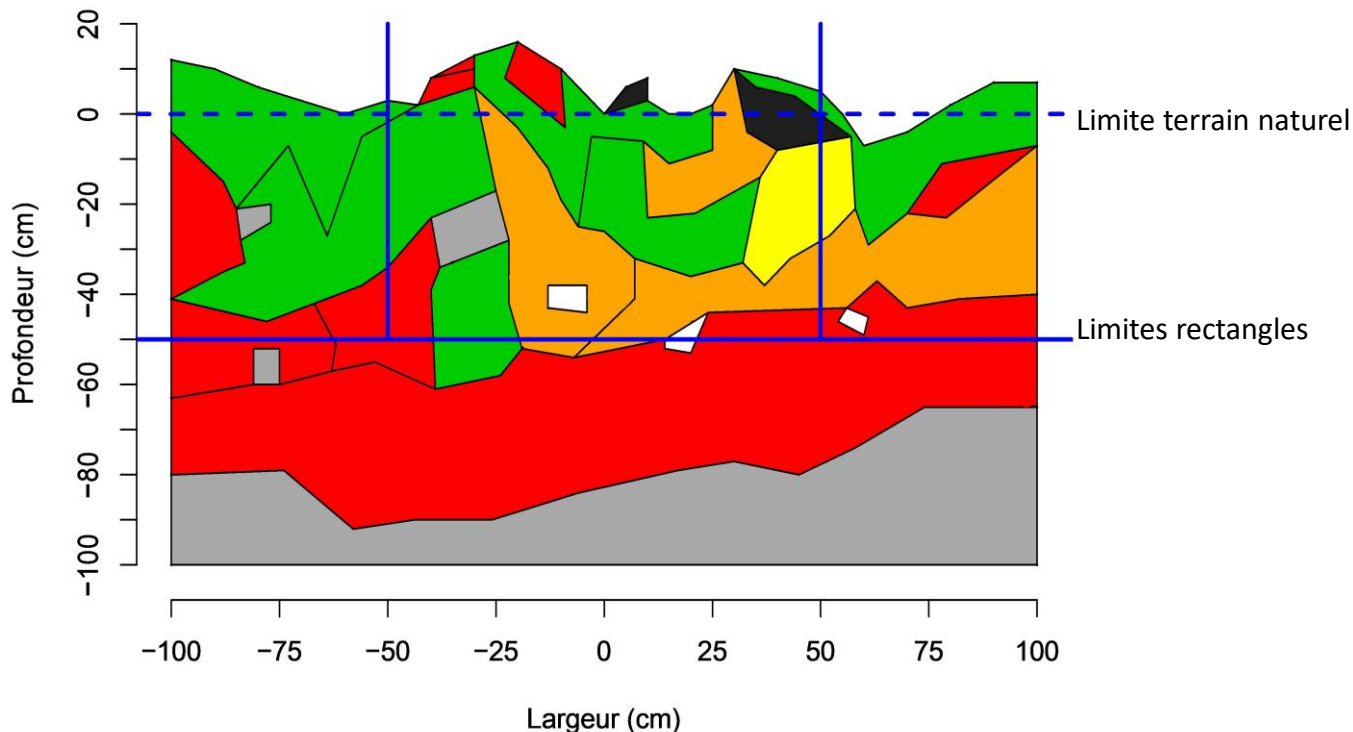


Moyenne par modalité



P48-49_Profil 1_Session 2_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



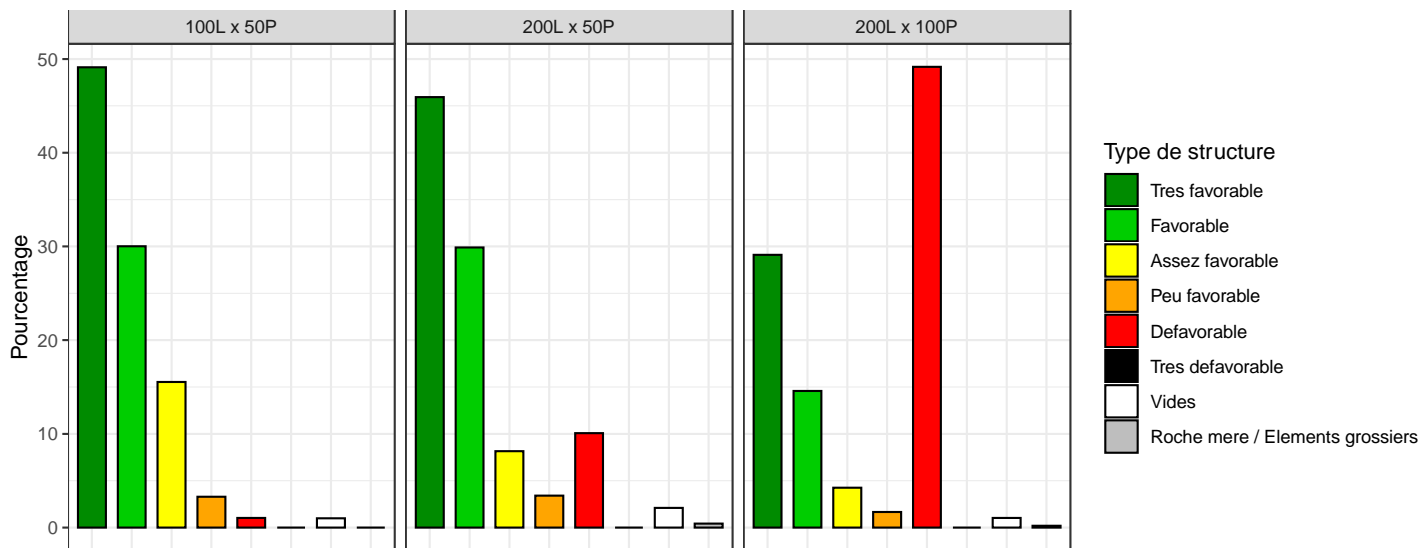
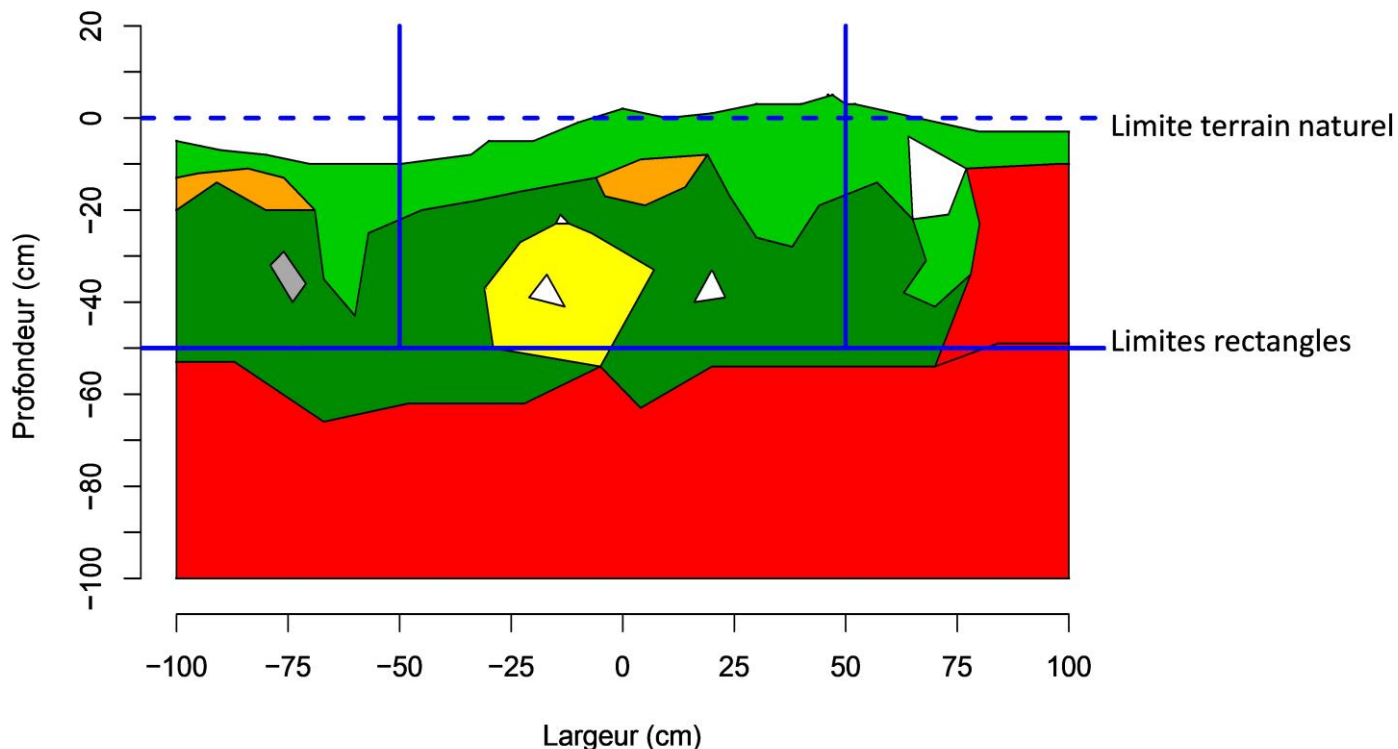
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	50
Hauteur billon en cm :	15
Nombre de traces de dents :	3

P48-49_Profil 2_Session 2_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



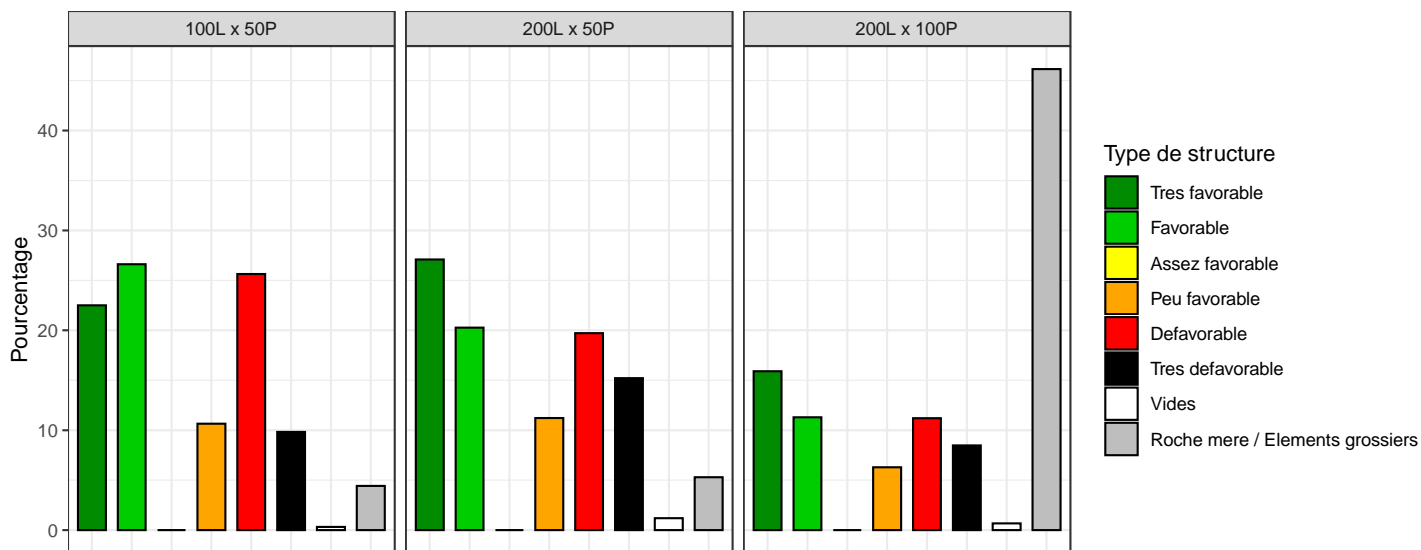
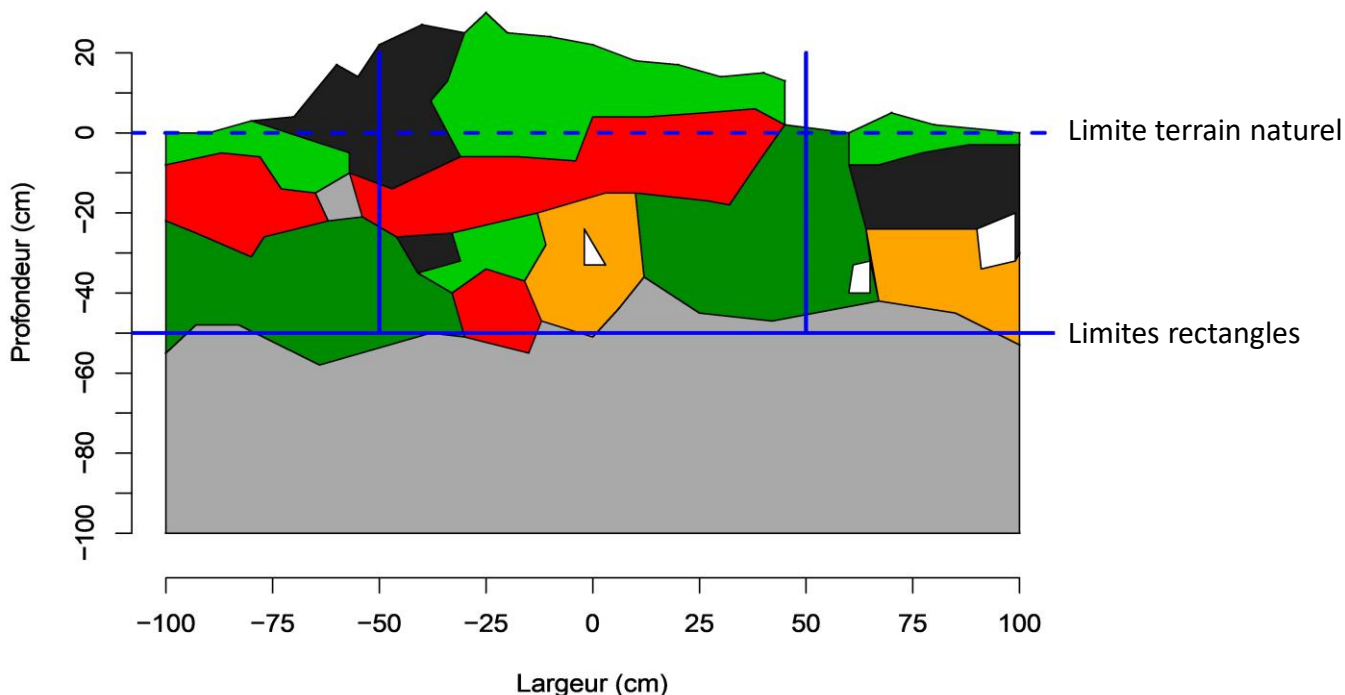
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	40
Hauteur billon en cm :	5
Nombre de traces de dents :	3

P48-49_Profil 3_Session 2_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles

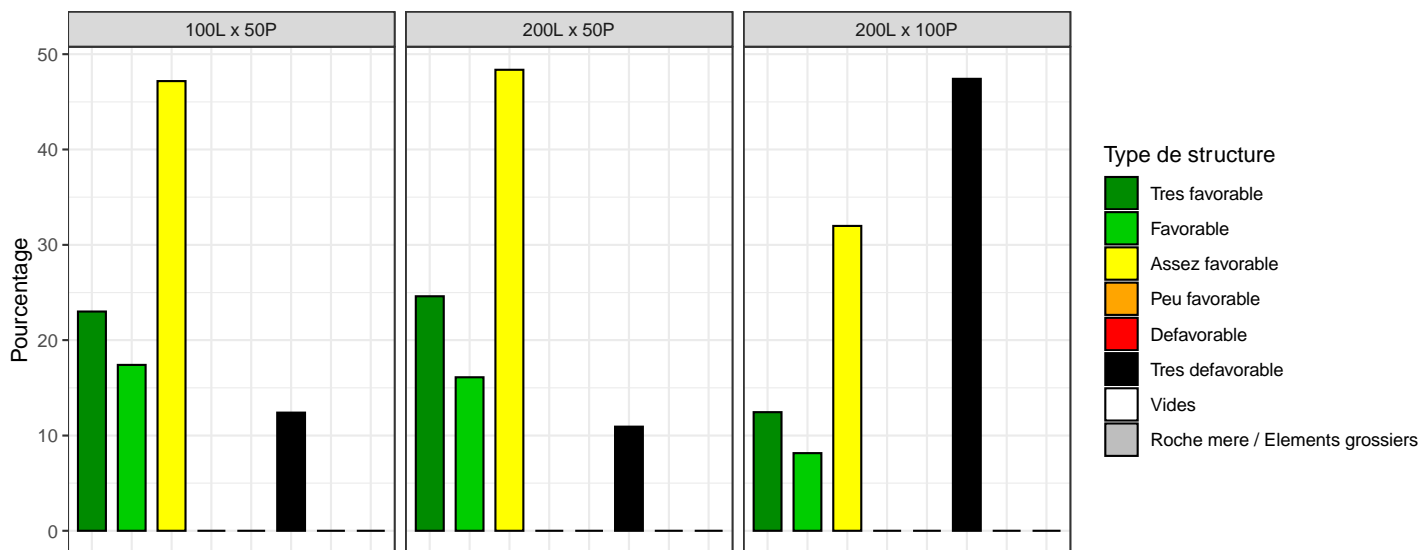
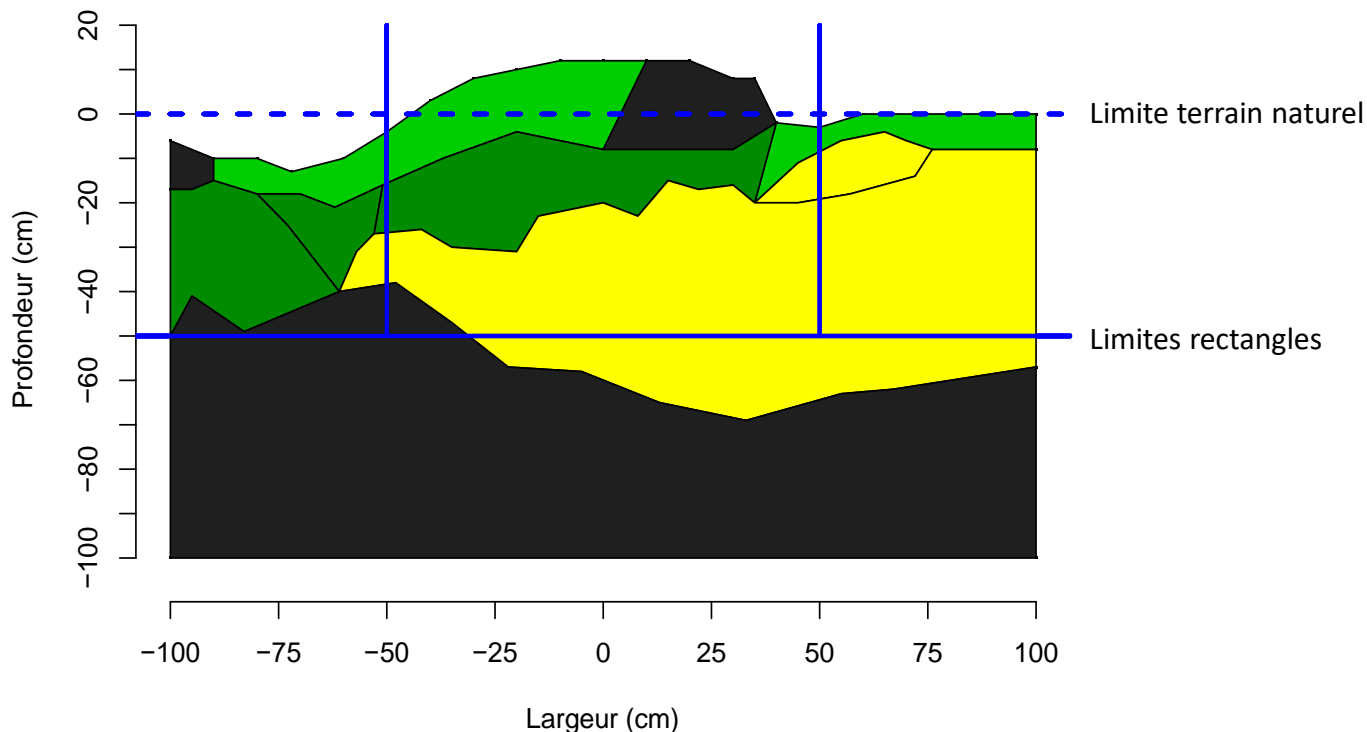


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	40
Hauteur billon en cm :	30
Nombre de traces de dents :	3

P48-49_Profil 4_Session 2_Pelle 2,7 T
 Pour chacun des 3 rectangles

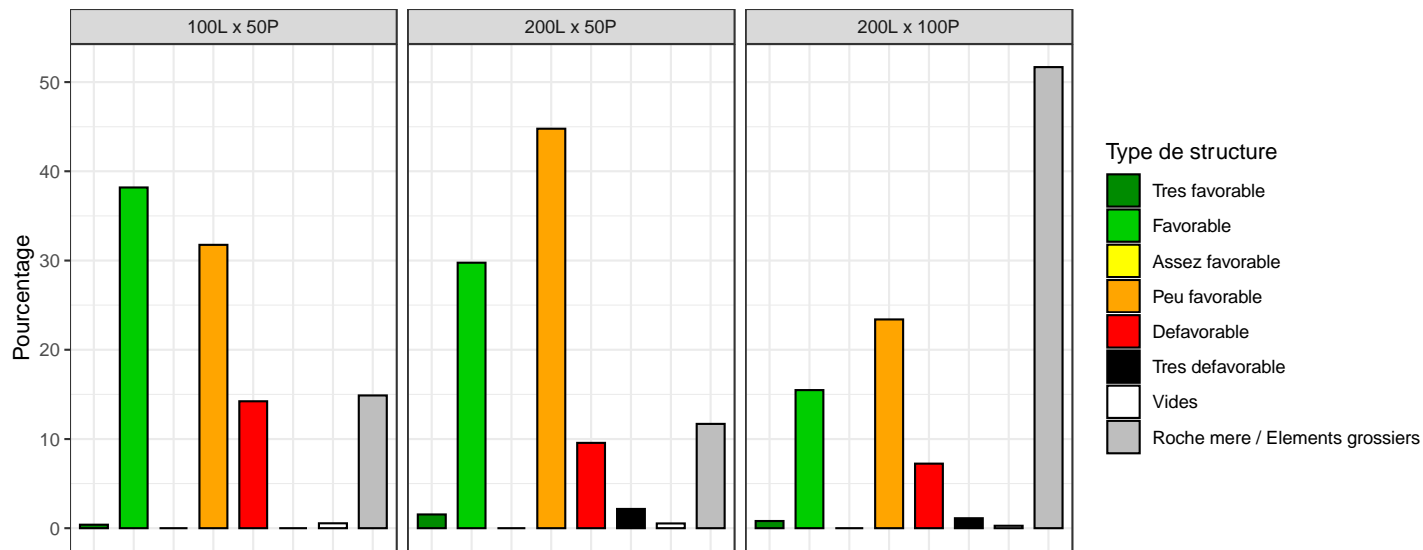
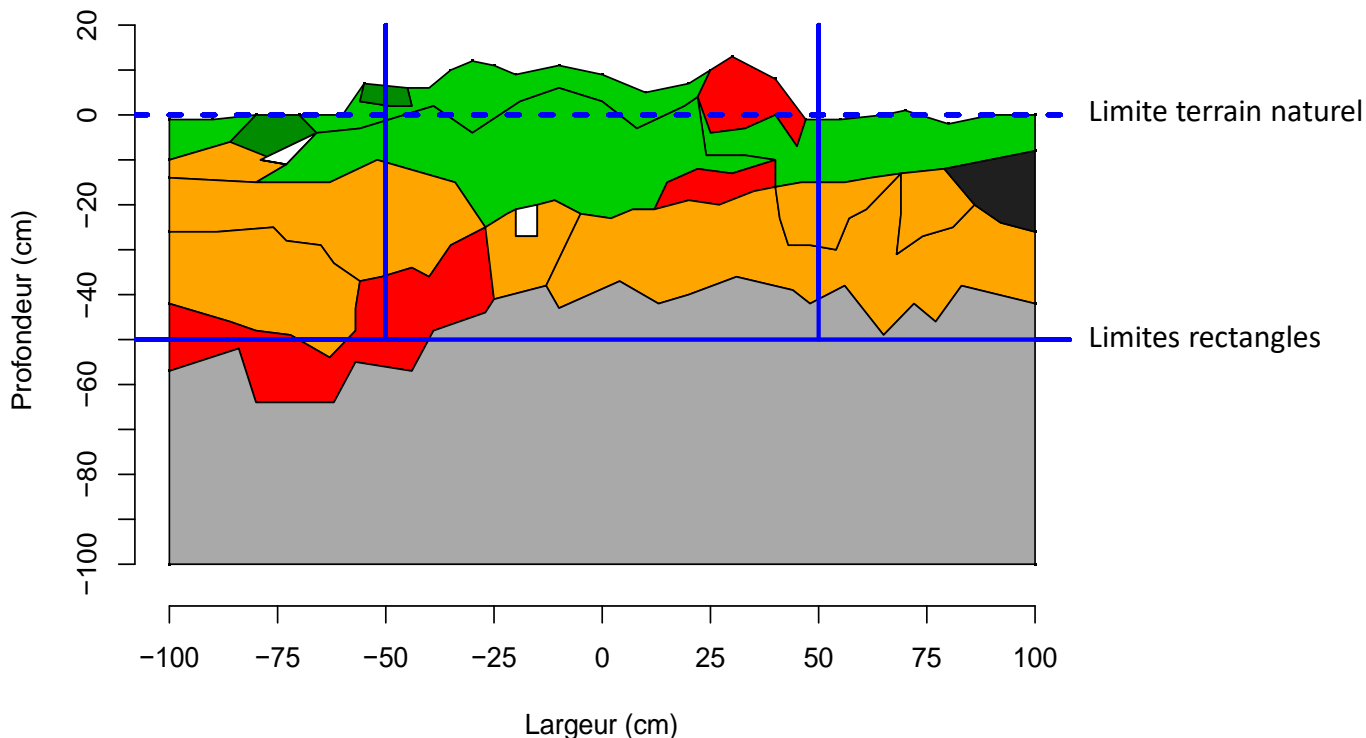


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	45
Hauteur billon en cm :	10
Nombre de traces de dents :	0

P48-49_Profil 5_Session 2_Pelle 2,7 T
 Pour chacun des 3 rectangles



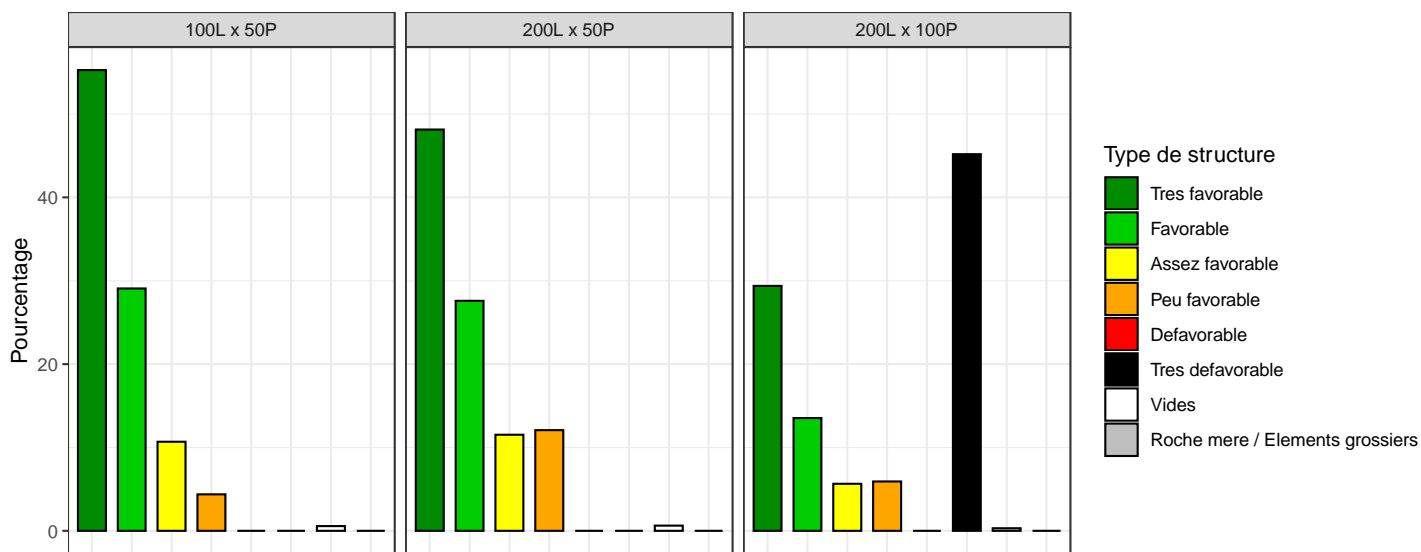
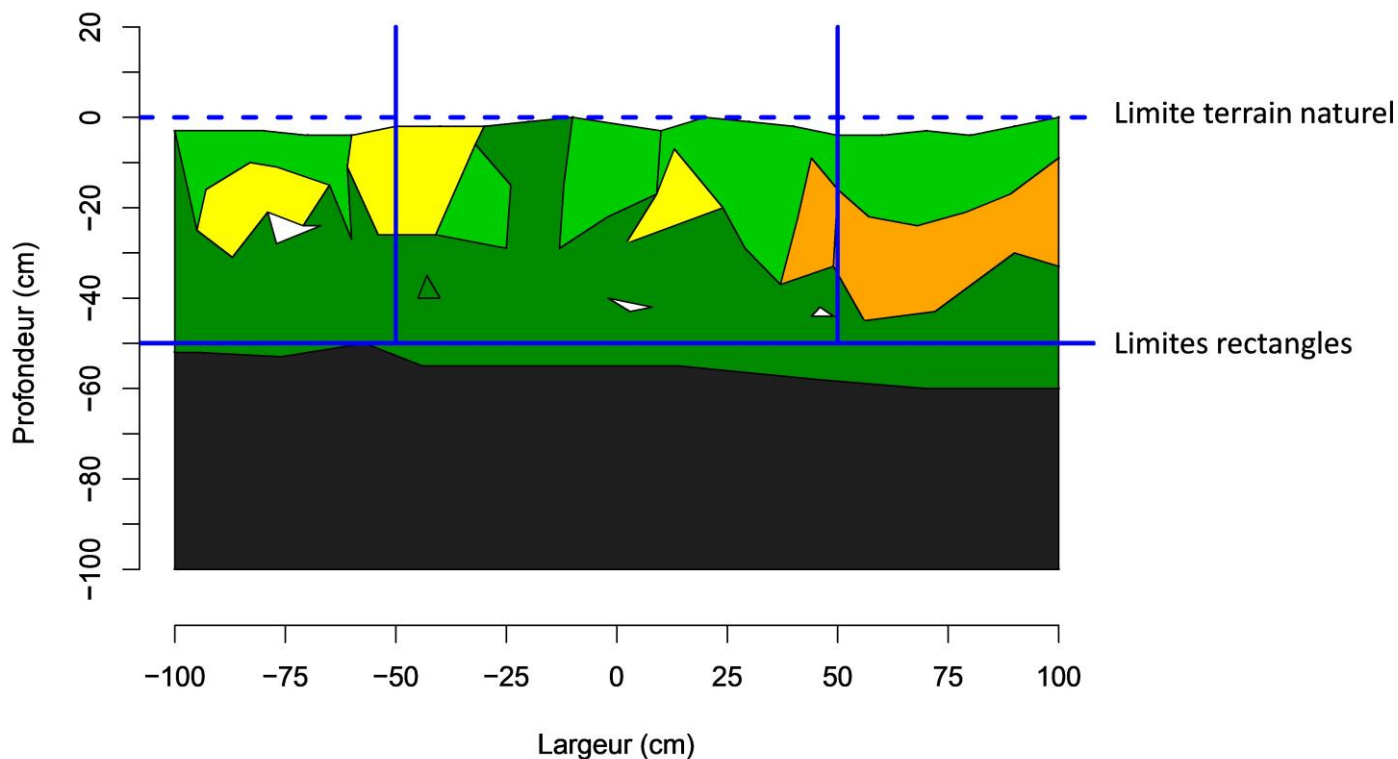
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	30
Hauteur billon en cm :	10
Nombre de traces de dents :	2

P48-49_Profil 6_Session 2_Pelle 2,7 T

Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

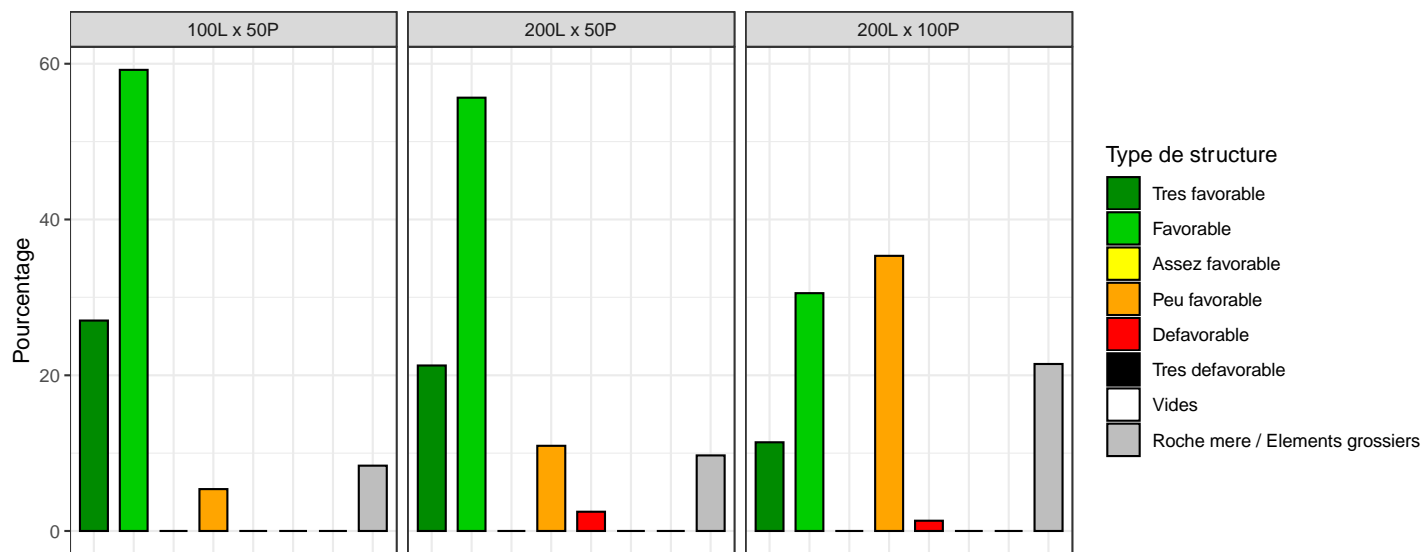
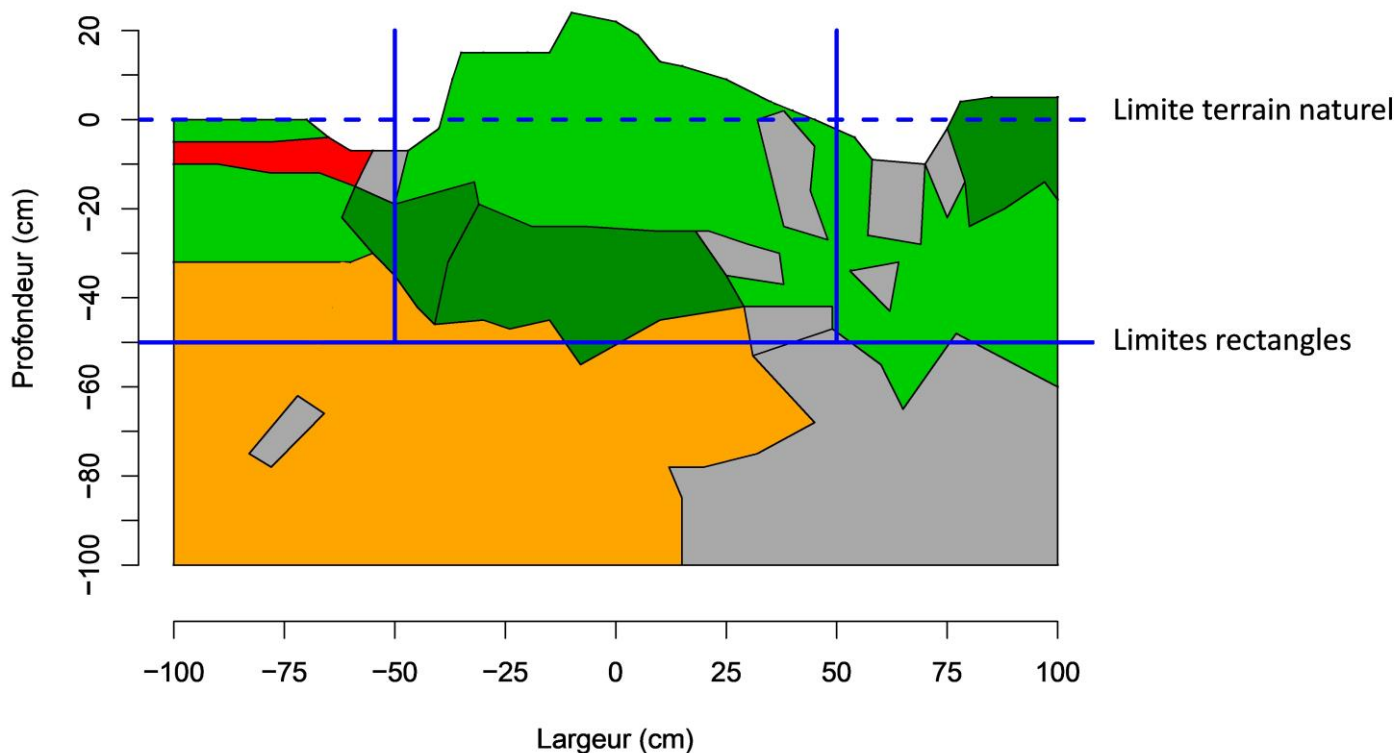
Profondeur max en cm : 40

Hauteur billon en cm : 0

Nombre de traces de dents : 3

P48-49_Profil 7_Session 3_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



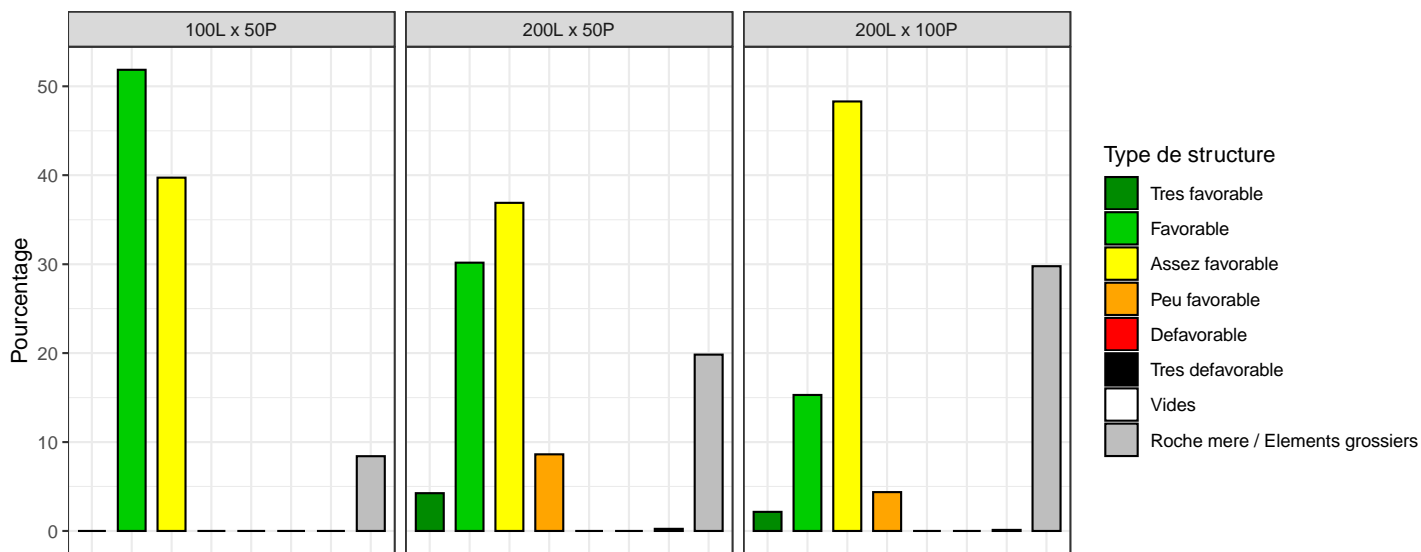
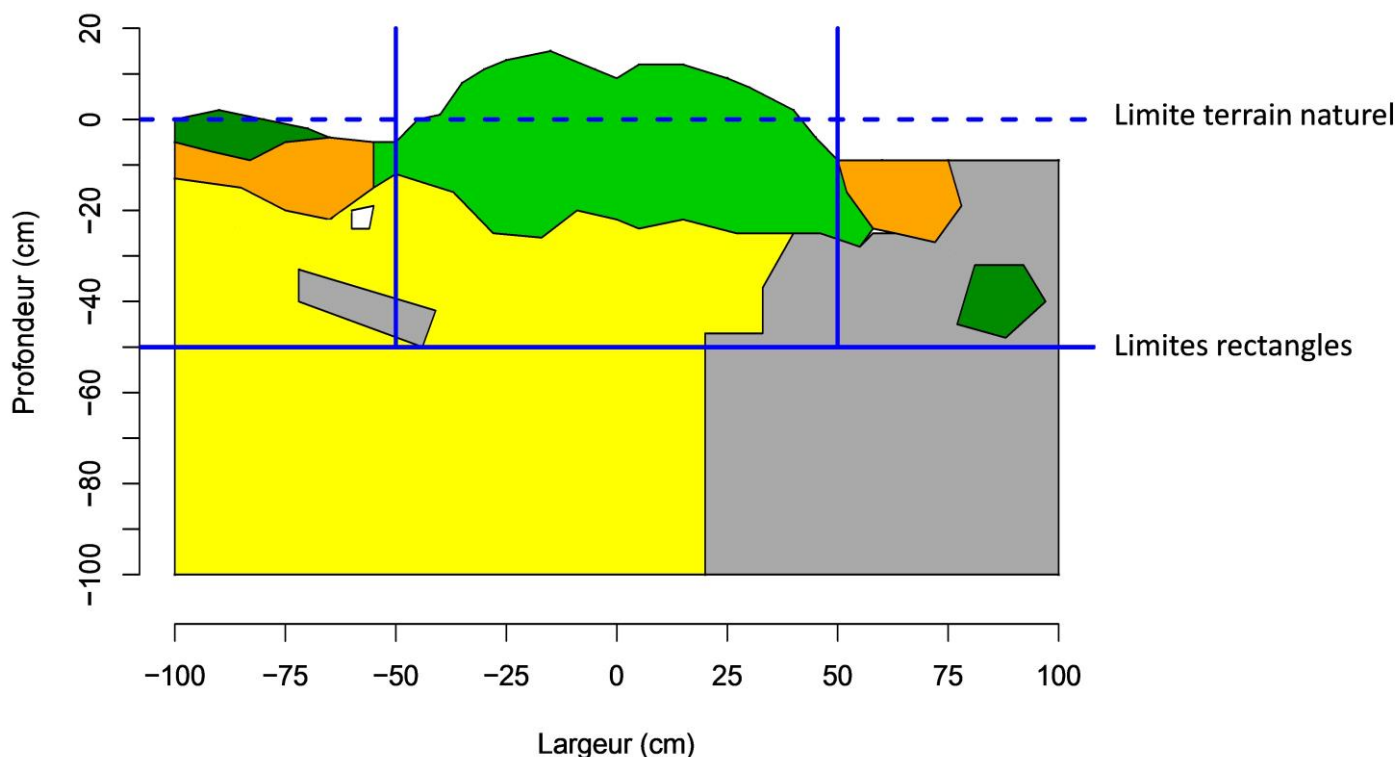
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	55
Hauteur billon en cm :	25
Nombre de traces de dents :	0

P48-49_Profil 8_Session 3_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles



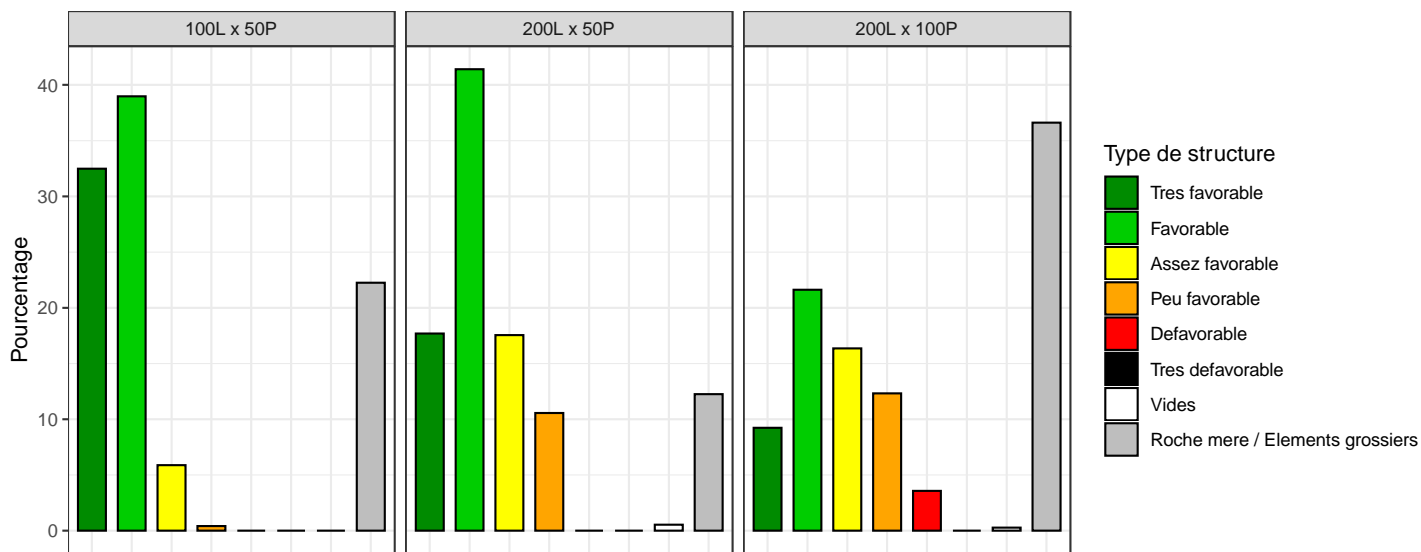
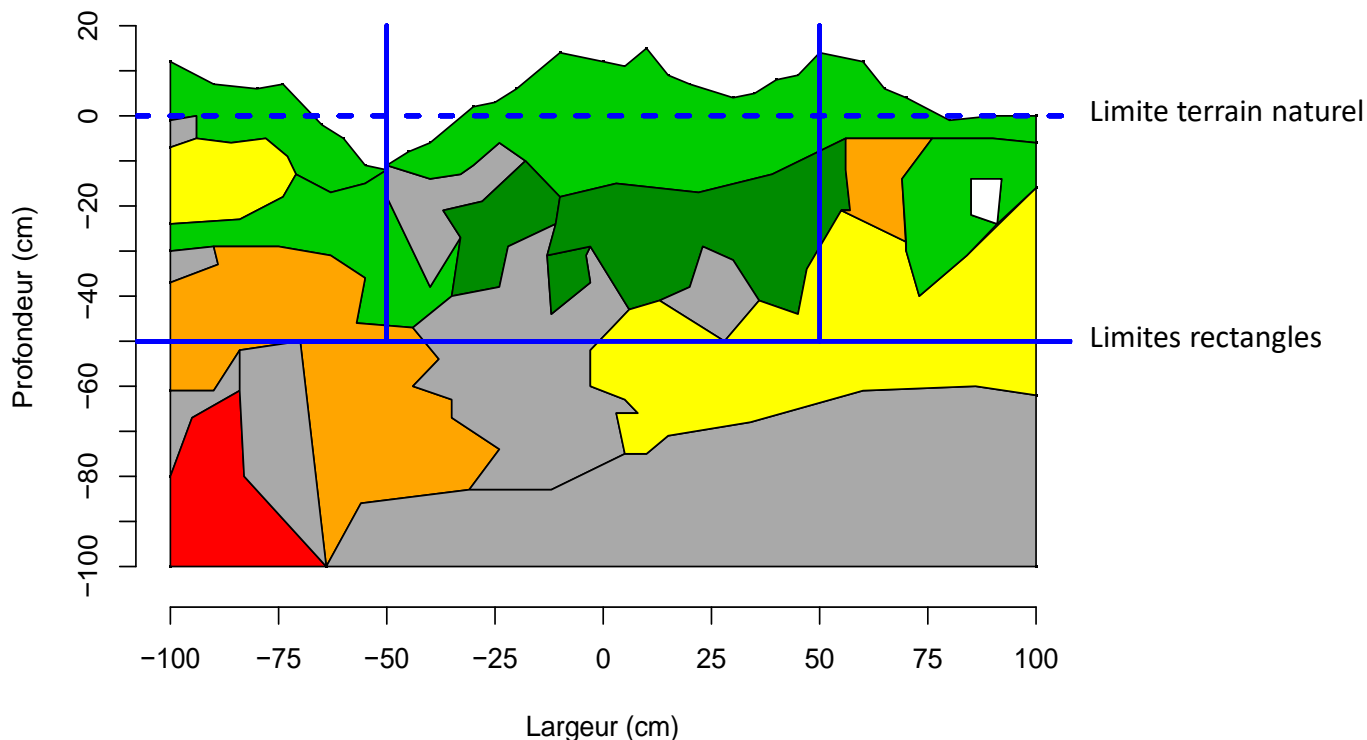
Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	25
Hauteur billon en cm :	15
Nombre de traces de dents :	1

P48-49_Profil 9_Session 3_Pelle 9 T

Pour chacun des 3 rectangles

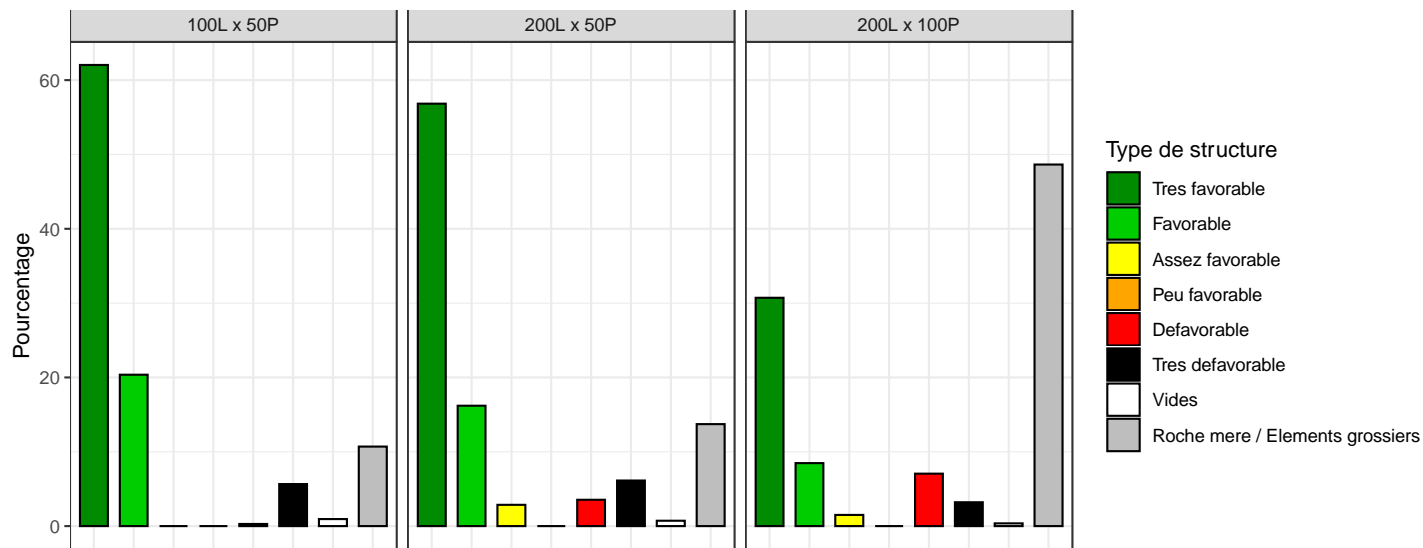
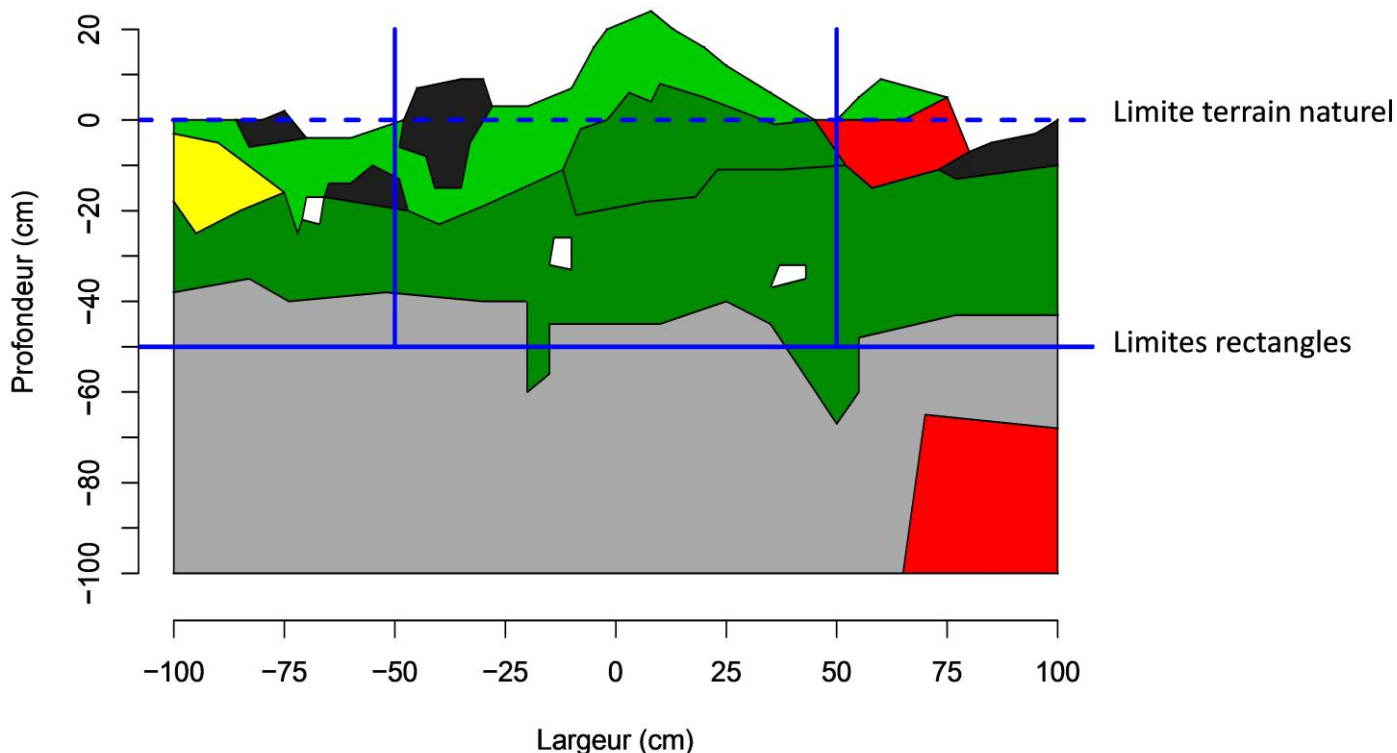


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	50
Hauteur billon en cm :	15
Nombre de traces de dents :	1

P48-49_Profil 10_Session 3_Pelle 2,7 T
 Pour chacun des 3 rectangles

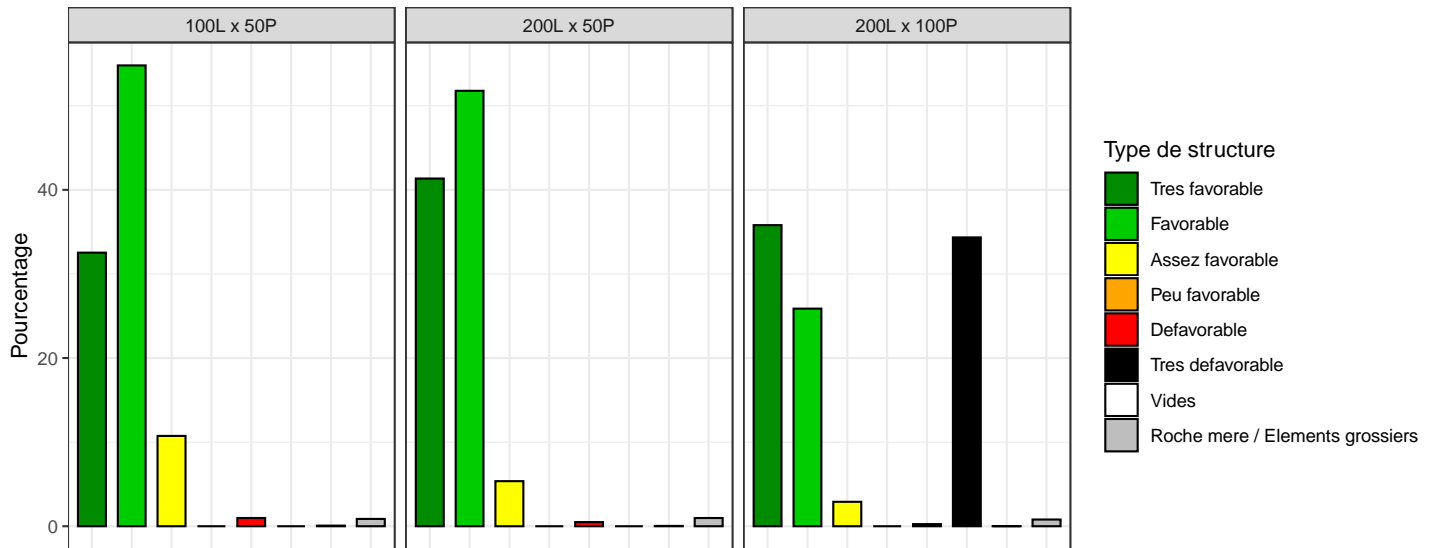
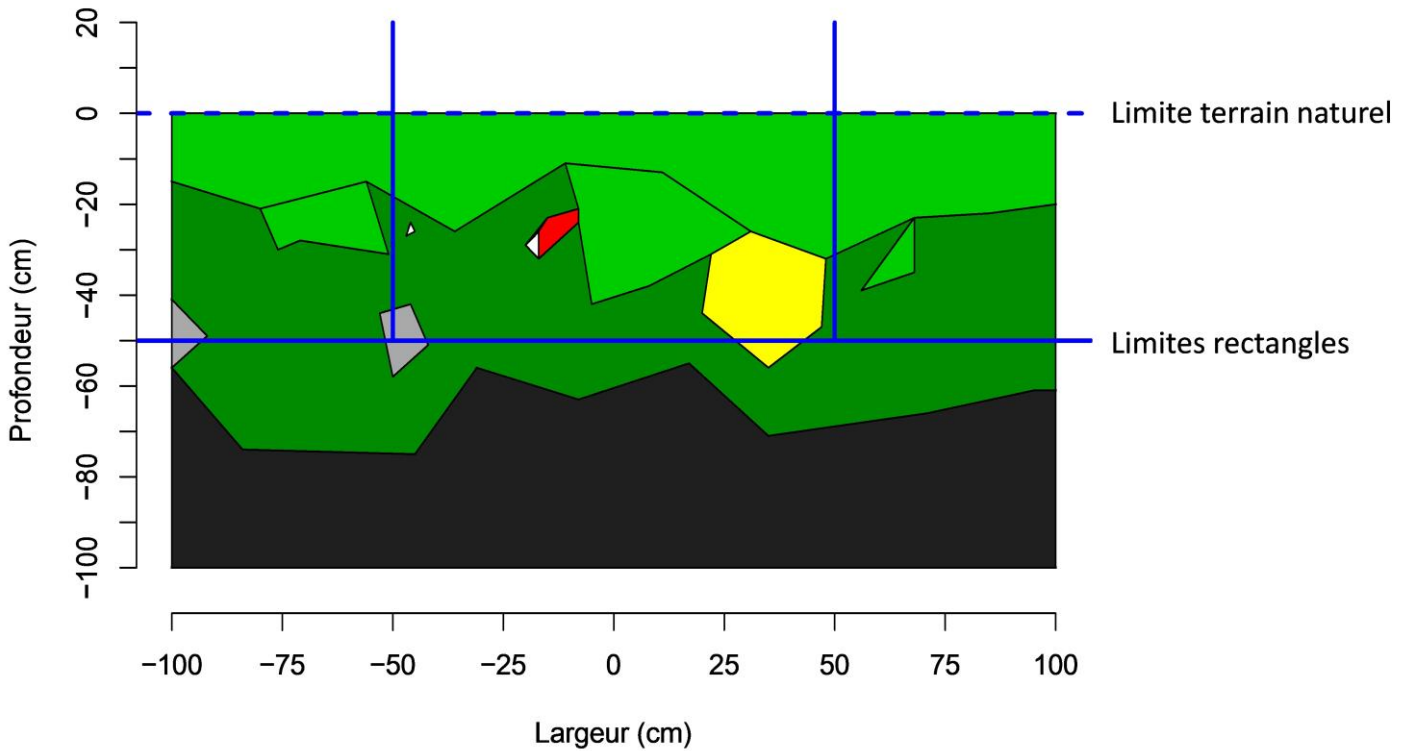


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	35
Hauteur billon en cm :	25
Nombre de traces de dents :	3

P48-49_Profil 11_Session 3_Pelle 2,7 T
 Pour chacun des 3 rectangles

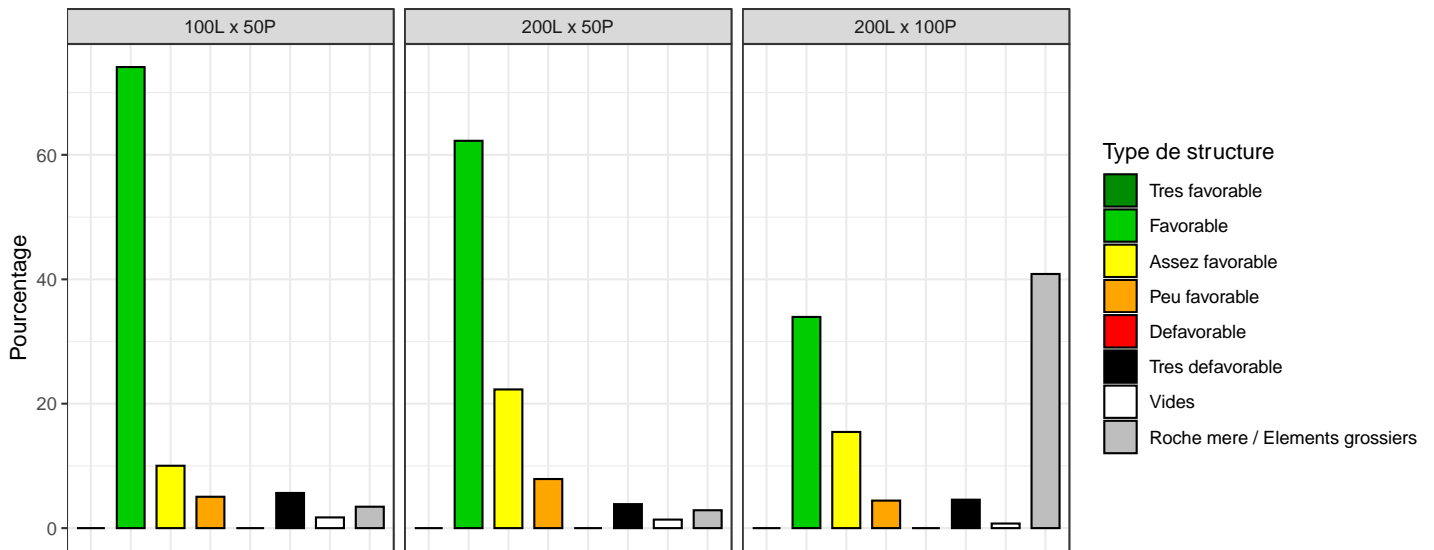
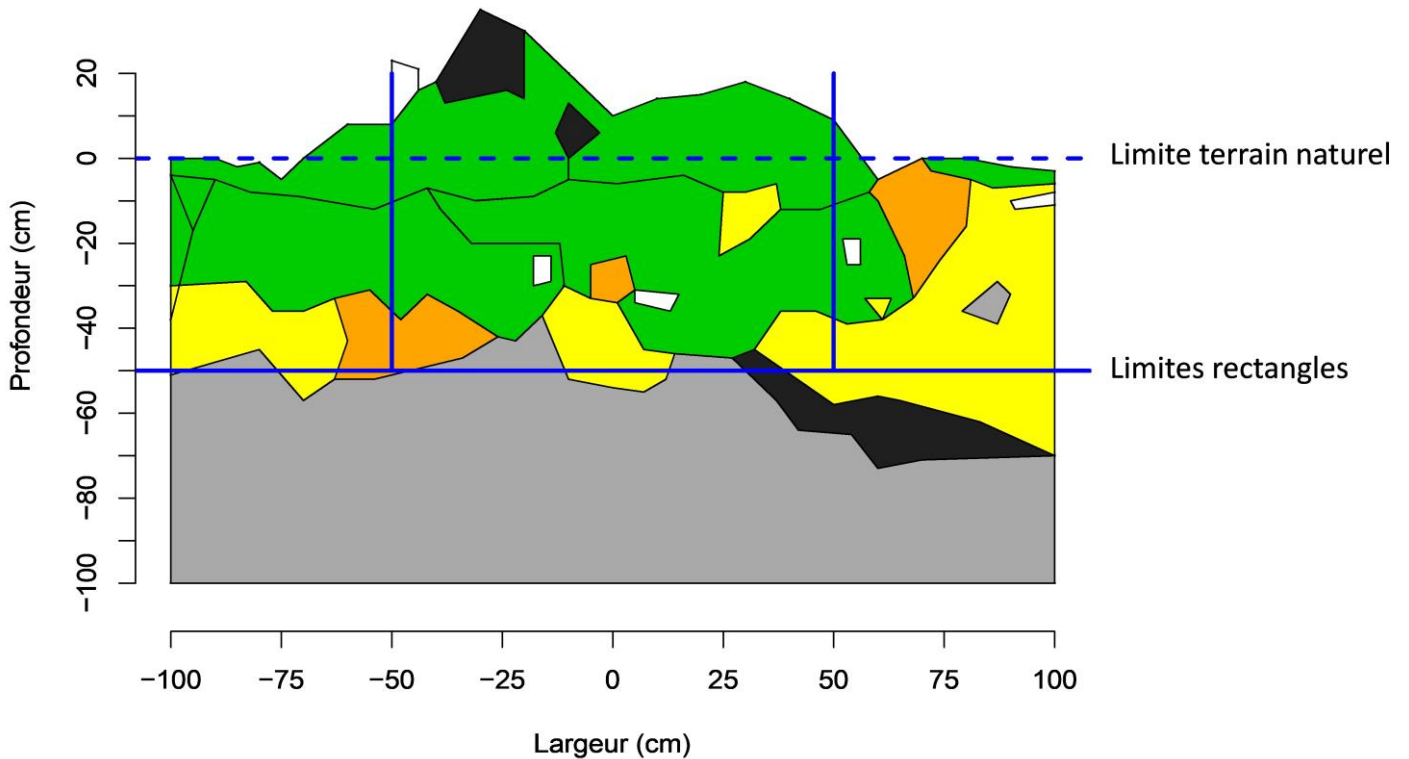


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

Profondeur max en cm :	30
Hauteur billon en cm :	0
Nombre de traces de dents :	2

P48-49_Profil 12_Session 3_Pelle 2,7 T
 Pour chacun des 3 rectangles

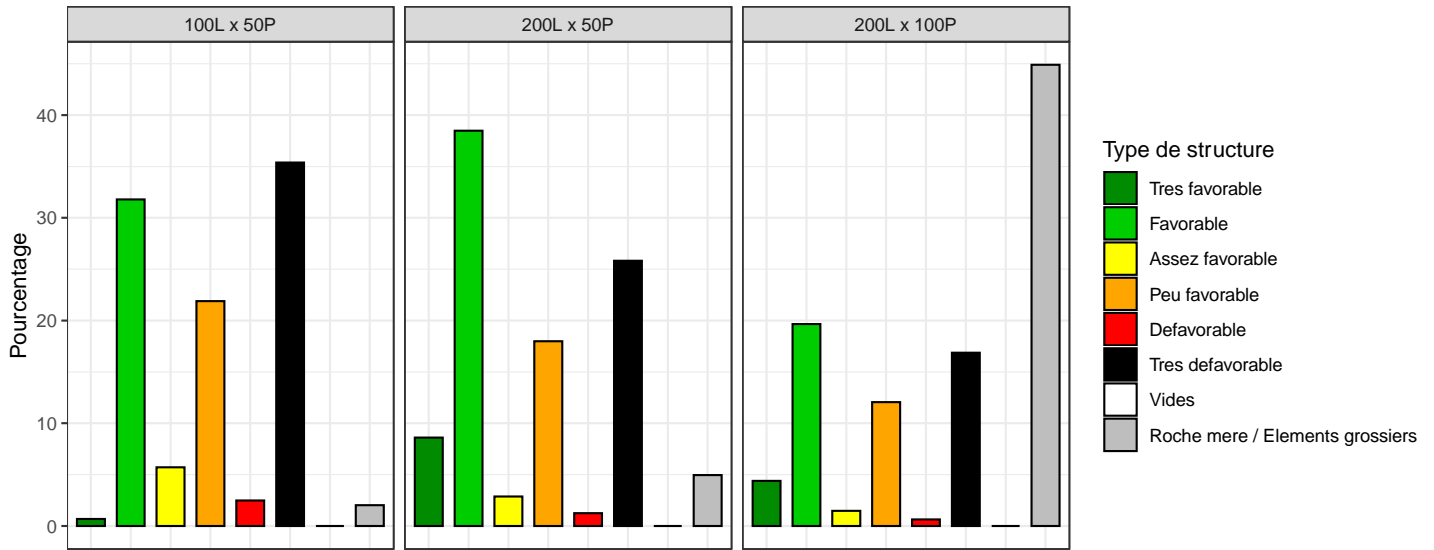
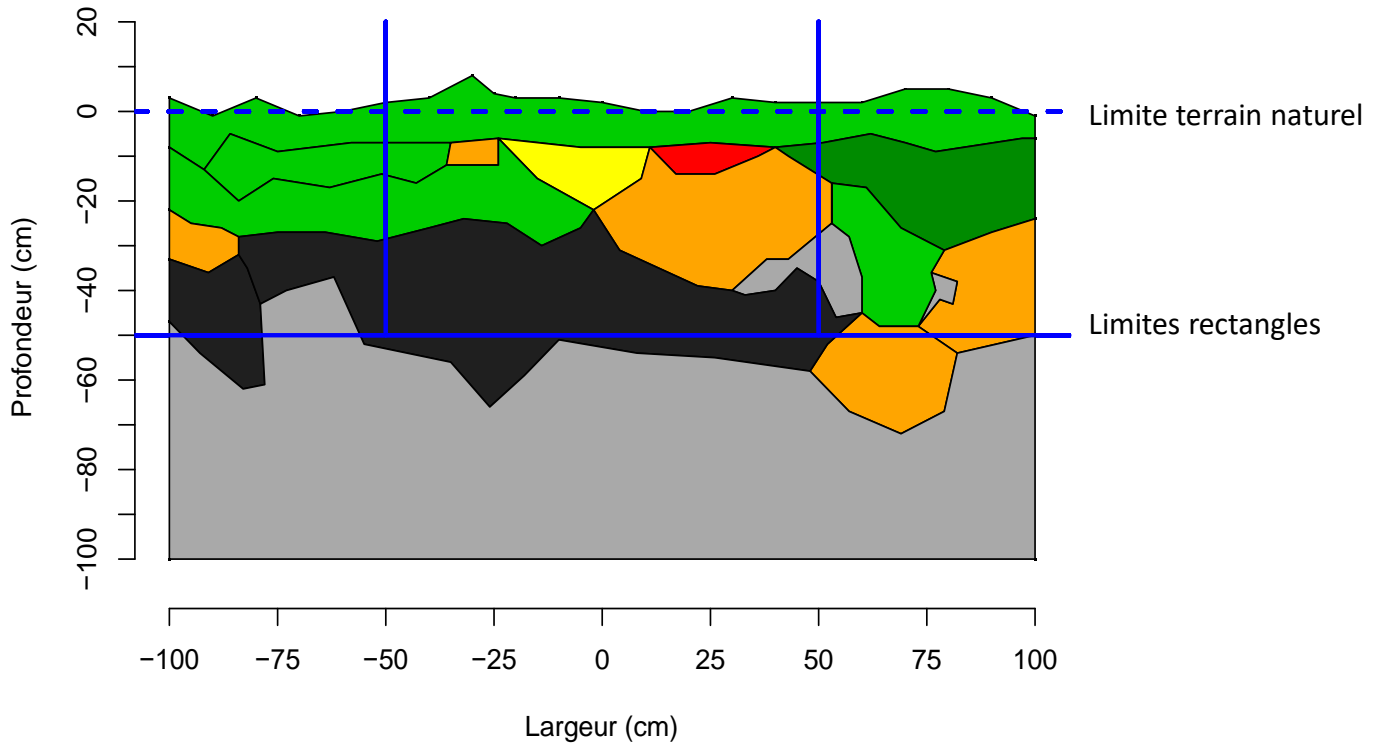


Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

Variables complémentaires sur le profil :

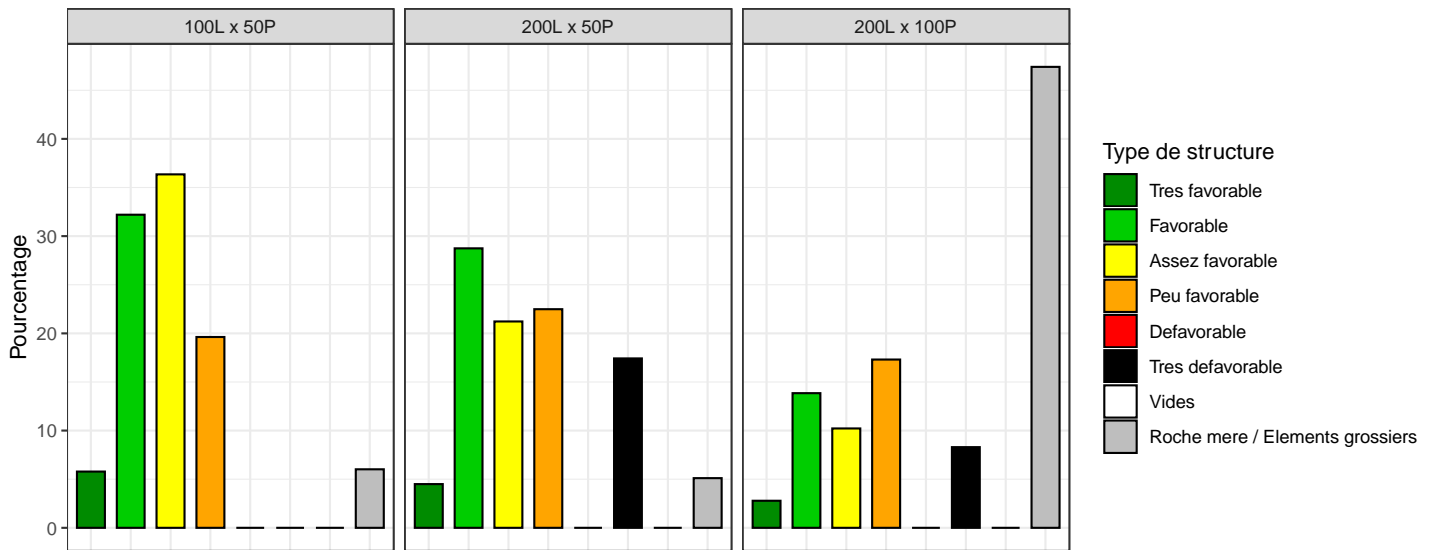
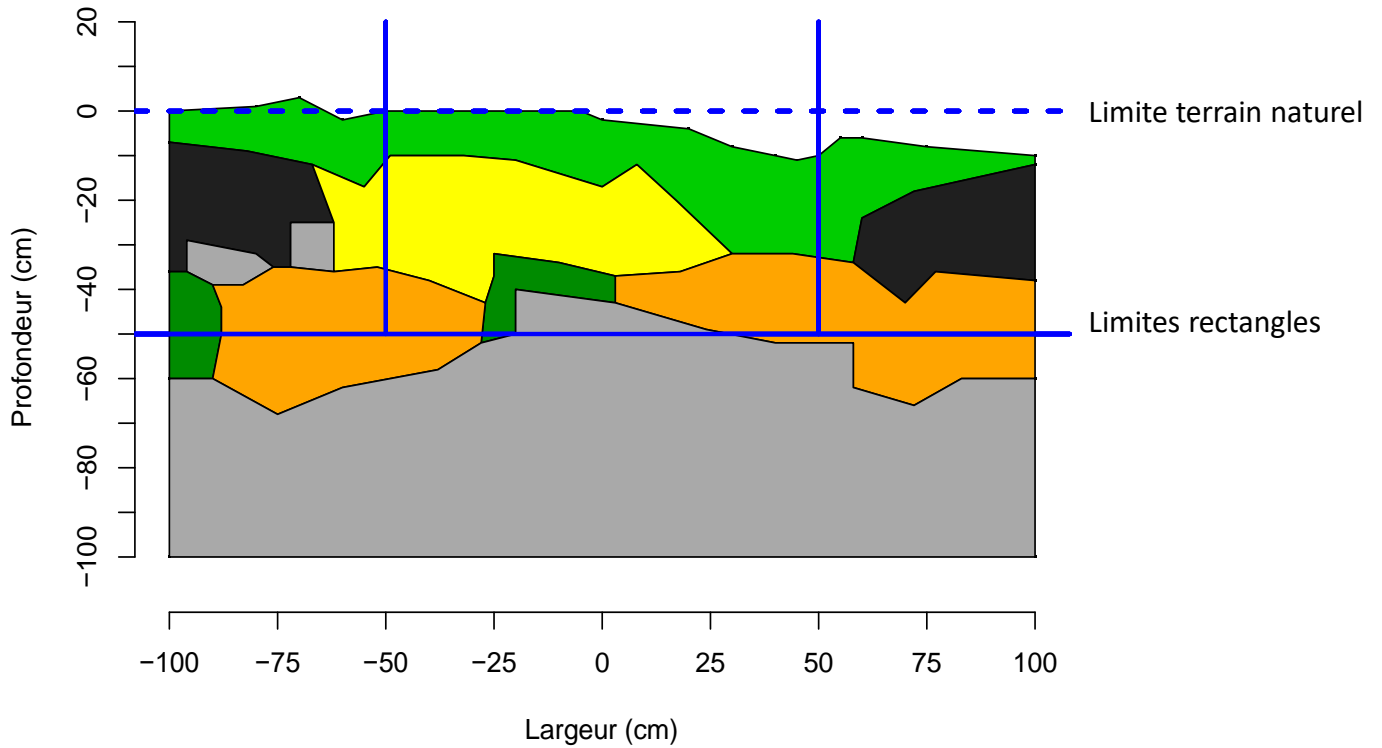
Profondeur max en cm :	35
Hauteur billon en cm :	40
Nombre de traces de dents :	4

P48-49_Profil 13_Témoïn
 Pour chacun des 3 rectangles



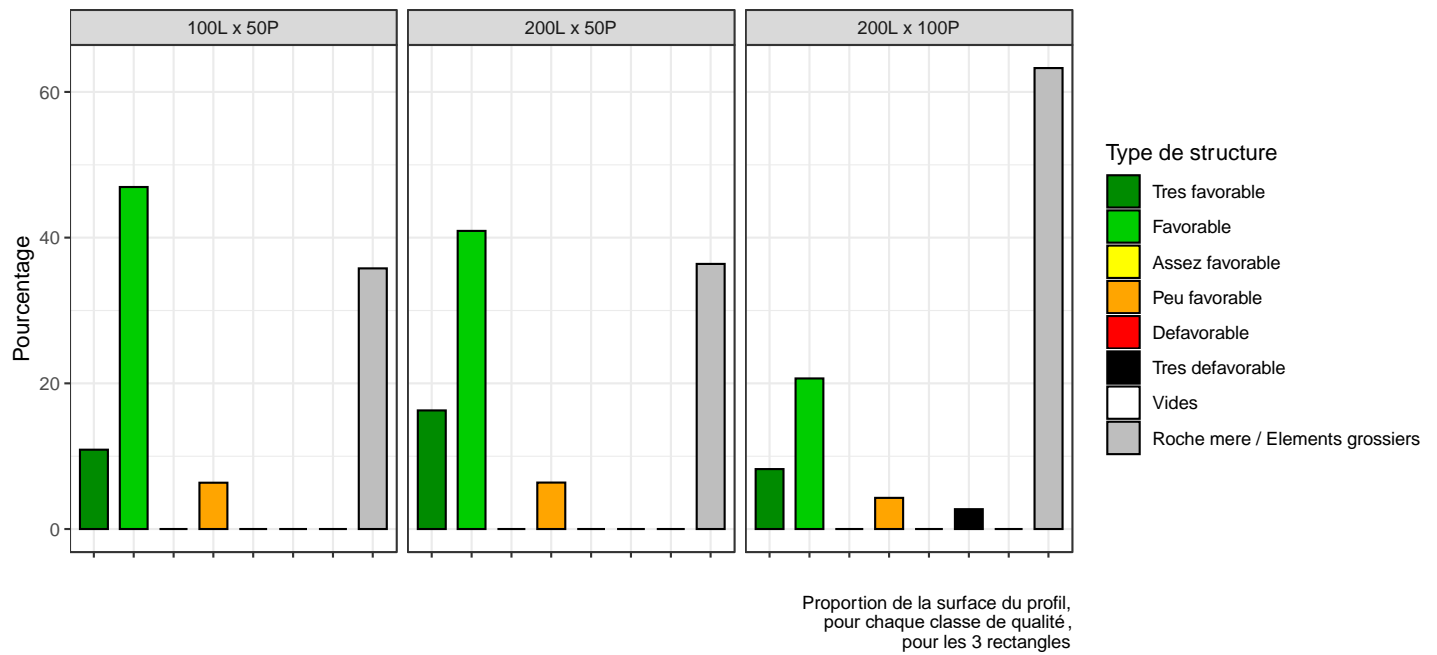
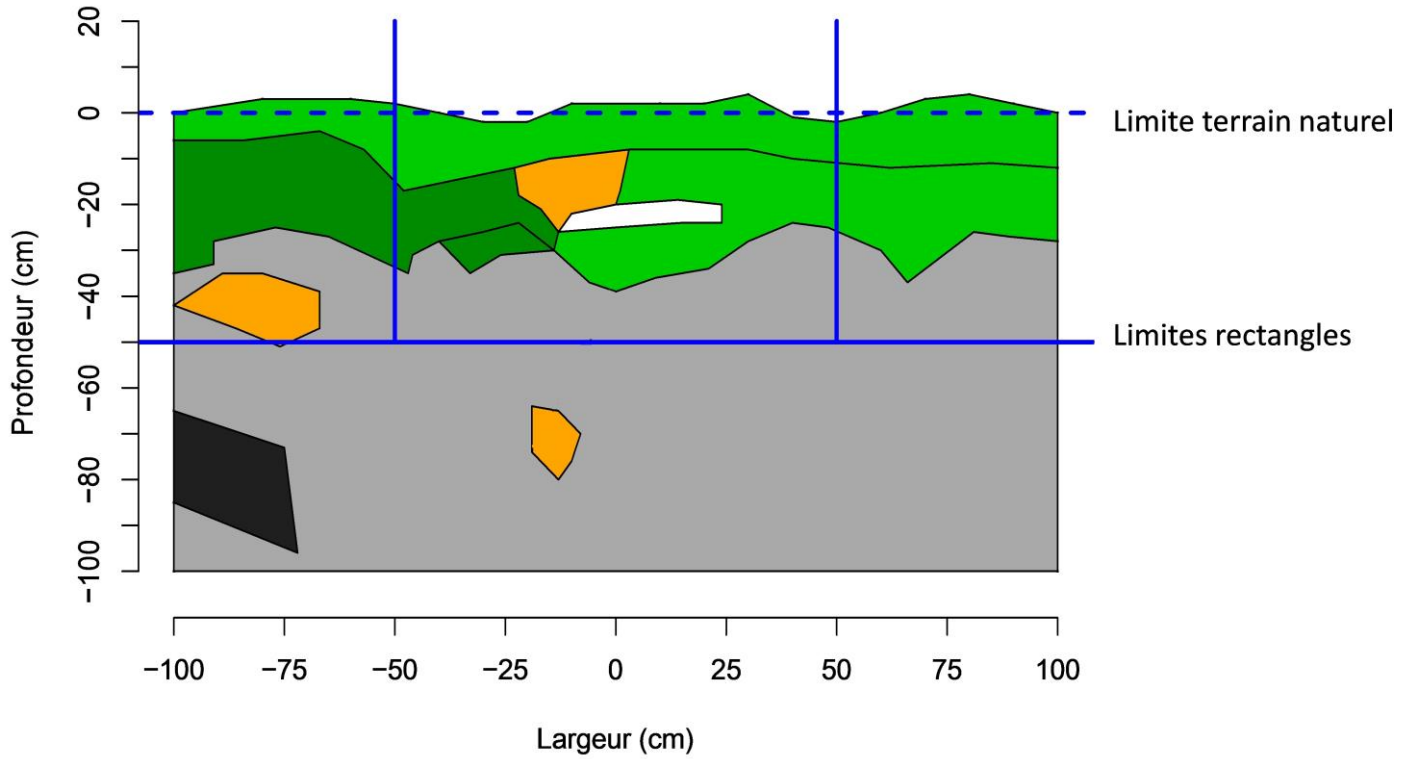
Proportion de la surface du profil,
 pour chaque classe de qualité,
 pour les 3 rectangles

P48-49_Profil 14_Témoin
 Pour chacun des 3 rectangles



Proportion de la surface du profil, pour chaque classe de qualité, pour les 3 rectangles

P48-49_Profil 15_Témoin
 Pour chacun des 3 rectangles



Parcelle 48-49 : Comparaison entre les modalités
Pour chacun des 3 rectangles

