Spécialité Agronomie
2017-2020

Stage de fin d'études

Formation Ingénieur AgroSup Dijon
Formation Initiale
Non Confidentiel

Cartographie de l'érodibilité des sols de Mayotte

(Source : https://www.brgm.eu/sites/default/files/bann_mayotte_004.jpg)

Arthur BUREAU

Enseignant référent : Stéphane FOLLAIN
Maitre de stage : Valentin LANDEMAINE, Ingénieur Risques Hydro-Gravitaires

Résumé

Mots clés : Erosion, érodibilité, Mayotte, cartographie

Le sol est une ressource fondamentale, il est notamment le substrat essentiel à la majeure partie de la production alimentaire mondiale. Afin de protéger cette ressource précieuse sur l'île de Mayotte en pleine mutation, le projet LESELAM 2 s'est constitué dans un objectif de sensibilisation et de déploiement d'action autour de cet enjeu fort. Dans le cadre du projet, le BRGM travaille à quantifier les flux érosifs, à les discerner afin de pouvoir agir efficacement. Ce rapport s'intègre donc à ce projet, par la création d'une carte de l'érodibilité des sols mahorais. Une adaptation de la méthode ISO 10930 :2012 a été déployé afin de collecter rapidement des résultats et pouvoir produire une carte issue de données locales.

Abstract

Key Words: Erosion, erodibility, Mayotte Island, mapmaking

The soil is a fundamental resource, it is in particular the essential substrate for the major part of the world food production. In order to protect this precious resource on the rapidly changing island of Mayotte, the LESELAM 2 project was set up with the objective of raising awareness and deploying actions about this major issue. As part of the project, BRGM is working to quantify erosive flows, to discern them in order to be able to act effectively. This report is a part of this project, by creating a map of the island soils' erodibility. An adaptation of the ISO 10930: 2012 method has been deployed in order to quickly collect the results and be able to produce a readable map based on local data.

Remerciements

Je voudrais remercier Valentin Landemaine, mon maitre de stage, qui malgré les conditions particulières a continué à me suivre et est resté disponible. Un grand merci à Stéphane FOLLAIN pour votre suivi malgré le contexte. Merci à Marjorie UBERTOSI et Nicolas CHEMIDLIN également, pour l'année de spécialisation passée avec vous, je garderai un très bon souvenir et des belles amitiés de cette année en R2D2C.

Pendant cette période de crise, n'ayant plus de logement, j'ai circulé en France en quête de connexion Internet pour pouvoir continuer de travailler. Grand merci à ma sœur Ariane BUREAU, à Quentin GIRARD, Robert et Elisabeth BUREAU, Mathilde METOUT et ses parents David METOUT, Catherine BURRE CASSOU et Marc FOURNAT de m'avoir accueilli à tour de rôle pendant cette drôle de période.

Enfin je tiens à remercier l'équipe de l'AgroCampus64, et plus particulièrement du Centre d'Oloron Sainte Marie où je viens de prendre mes fonctions. Je suis chanceux d'être arrivé dans un cadre si bienveillant sur une mission captivante. Mon arrivée s'est très bien passée grâce à eux, sans qui la situation aurait pu être encore plus complexe.

Table des matières

I. Introduction 8
A. Contexte du stage et présentation de la structure d'accueil 10
a. Localisation et morphologie de Mayotte 10
b. Climat mahorais 12
c. Contexte et enjeux de l'érosion des sols mahorais 13
d. Le BRGM et un projet de lutte : LESELAM 14
B. Etat de l'art 15
a. Mécanismes de l'érosion hydrique 15
b. Mécanismes de désagrégation et propriétés stabilisantes 17
c. L'érodibilité et méthode d'évaluation 18
C. Problématique et objectifs 20
II. Matériels et méthodes 21
A. Choix du protocole de mesure de l'érodibilité 21
B. Supports de travail : les couches SIG 22
C. Elaboration d'une stratégie d'échantillonnage 22
a. Constitution des catégories de sol 23
b. Répartition du nombre d'échantillons par catégorie de sol 24
c. Répartition du nombre d'échantillons par occupation de sol 25
d. Positionnement des points d'échantillonnages 26
D. Analyses statistiques et constitution des classes d'érodibilité 26
E. Création de la carte de l'érodibilité des formations superficielles mahoraises 27
F. Logiciels et packages mobilisés 27
III. Résultats 28
A. Plan d'échantillonnage et adaptations 28
a. Répartition des points 28
b. Présentation du plan d'échantillonnage 30
c. Nouveau plan d'échantillonnage 30
B. Etude des résultats des formations superficielles 32
a. Distribution des résultats 32
b. Statistique descriptive sur les résultats des deux traitements 33
c. Intérêts et relations entre les deux traitements effectués 33
C. Détermination des classes d'érodibilité 36
a. Utilisation du traitement d'humectation rapide 36
b. Influence de l'occupation du sol sur l'érodibilité 37
D. Carte de l'érodibilité des sols mahorais 38

a. Présentation de la carte d'érodibilité 38
IV. Discussion 39
A. Protocole de mesure 39
B. Prélèvement sur le terrain 40
C. Détermination des classes d'érodibilité 40
V. Conclusion 42
Bibliographie : 43
Annexe 47

Table des Figures

Figure 1: Localisation de l'île de Mayotte 10
Figure 2: Mangrove (à gauche) et padzas (à droite) 11
Figure 3: Profil d'altération (NEHLIG et al. 2013) et (BRGM 2017) 11
Figure 4: Moyenne annuelle des cumuls pluviométrique (1981-2010) (Météo France]) 13
Figure 5: Dynamique de formation de croute de battance (Le Bissonnais, 2000) 16
Figure 6: Erosion diffuse sur une parcelle photo : Bissonnais dans (Leguédois, 2003) 17
Figure 7: Rigole témoin de l'érosion concentrée en Polynésie Française (Binet, Gonnot 2005) 17
Figure 8 : Distribution des surfaces des occupations de sol pour deux isaltérites 24
Figure 9 : Schéma de distribution des prélèvements de sol entre catégorie de formations superficielles 25
Figure 10 : Diagramme des surfaces échantillonnées (croisement formations superficielles-occupation du sol) 28
Figure 11: Diagramme des répartitions d'échantillons selon les surfaces de croisements 29
Figure 12 : Nuage de points (Nombre de prélèvements prévus en fonction de la surface de l'occupation de sol) 29
Figure 13 : Plan d'échantillonnage (prévu initialement) 30
Figure 14 : Nuage de points (Répartition des prélèvements sur les croisements formations superficielles-occupation du sol) 31
Figure 15: Pourcentage de la surface de l'île représenté par des prélèvements 31
Figure 16: Courbes de densité des résultats des deux traitements 32
Figure 17 : Comparaison résultats des deux traitements 33
Figure 18 : Nuage de points (Résultats des deux traitements) 34
Figure 19 : Exemples de nuage de points (Isaltérites et Colluvions) 34
Figure 20: Boxplots des catégories de formations superficielles classées par la moyenne 35
Figure 21 : Graphique double pour élaboration des classes d'érodibilité 36
Figure 22 : Carte de l'érodibilité des sols de Mayotte 38
Figure 23 : Diagramme de Hjülstrom 39

Table des Tableaux

Tableau 1: Protocole ISO 10930 :2012 20
Tableau 2: Comparaison de protocoles 21
Tableau 3 : Catégories de la couche SIG d'occupation des sols 22
Tableau 4 : Récapitulatif des catégories de formations superficielles 23
Tableau 5: Récapitulatif des différentes occupations de sol pour deux isaltérites 24

I. Introduction

Le sol est l'interface issue des interactions entre les différents ensembles que sont la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère, la biosphère et enfin l'anthroposphère. (MATHIEU, LOZET 2011).Le sol est considéré comme une ressource fondamentale par la FAO. Il offre le substrat essentiel dont dépend la grande majorité de l'alimentation mondiale. C'est un espace vital pour l'homme car il assure de nombreux services écosystémiques comme la préservation et la régulation des ressources en eaux, la régulation du climat, la fixation de carbone, la conservation de la biodiversité et il nous rend de nombreux services culturels. (Gis Sol 2011)

On considère aujourd'hui qu'un tiers des sols terrestre a subi une dégradation modérée à forte (FAO 2015). Ces dégradations qui entraînent des diminutions de la capacité de l'écosystème à fournir ces services éco systémiques, sont principalement dues à des pressions climatiques et anthropiques. La conservation du sol est un véritable enjeu car elle est considérée comme ressource naturelle non renouvelable à l'échelle humaine. (MONTIER et al. 1998). Dans la stratégie thématique pour la protection des sols en Europe, l'érosion a été identifiée comme l'une des 8 principales menaces pesant sur les sols (Commission des communautés européennes, 2011).

L'érosion est pourtant un phénomène naturel, un processus qui est essentiel à la formation des paysages et des sols. C'est en partie grâce à ce processus que la Flandre et le Bassin Parisien sont si fertiles par exemple. Les dépôts de lœss, des limons d'origine éolienne du Quaternaire (depuis 2,4 Ma), permettent aujourd'hui à ces régions d'excellents rendements agricoles (Antoine 2002). L'érosion est définie comme l'arrachage et le transport mécanique des particules du sol par l'eau, le vent ou encore la glace (Antoni, Darboux 2009). L'érosion hydrique a une part plus importante que l'érosion éolienne dans la dégradation des sols, avec 26 millions d'hectares qui seraient touchés en Europe contre un million pour l'érosion éolienne (Gis Sol 2011). Ce phénomène est souvent aggravé par les activités humaines comme des pratiques agricoles peu protectrices (labour dans le sens de la pente, sol nu, culture peu couvrantes…), la déforestation ou l'imperméabilisation des terres (Gis Sol 2011). Plus au sud, les dégâts dûs à l'érosion hydrique sont également très importants. En Afrique Subsaharienne, la dégradation des sols est en augmentation, avec plus de 20 % des terres qui sont déjà dégradées affectant plus de 65 % de la population. L'érosion hydrique affecte 46% des 494 millions d'hectares de terres en Afrique subsaharienne touchées par la dégradation des sols (FAO 2016).

L'île de Mayotte, dans le canal du Mozambique, est en pleine mutation sur l'occupation de ses terres avec une forte augmentation démographique et une extension des surfaces agricoles. Elle est confrontée à des enjeux liés à l'érosion qui mettent en péril son agriculture, sa population et ses écosystèmes (BRGM 2016).En réponse à cette problématique, s'est constitué le projet de Lutte contre l'Erosion des Sol et l'Envasement du Lagon à Mayotte (LESELAM). De nombreux acteurs du territoire y prennent part, dont le BRGM.

Ce document est le rapport de mon stage de 21 semaines initialement prévu au sein du BRGM à l'antenne de Mamoudzou sur l'île de Mayotte. Il a été effectué dans le cadre de ma troisième année de formation d'ingénieur agronome à AgroSup Dijon, avec pour objectif principal de réaliser une mission d'ingénieur en mobilisant les connaissances acquises à l'école. Malheureusement, ce stage s'est déroulé pendant la pandémie du Covid-19, je n'ai

donc pas pu le faire sur place. Ce contexte particulier a bousculé le fonctionnement du stage m’obligeant à l’effectuer dans son intégralité en télétravail.

A. Contexte du stage et présentation de la structure d'accueil

a. Localisation et morphologie de Mayotte

L'île de Mayotte, 101ème département français, est située à l'entrée du canal du Mozambique à mi-chemin entre Madagascar et le continent Africain. Elle fait partie de l'archipel des Comores. Elle comprend deux îles principales distantes de 2 kms (Grande Terre et Petite Terre) d'une superficie totale de 370km². (1100km²) (Ministère des Outre-mer 2016 ; BRGM 2013).

Figure 1: Localisation de l'île de Mayotte

Le littoral mahorais est fortement découpé avec des baies, des presqu'iles et des pointes. Mayotte étant la plus vieille île de l'archipel des Comores, son relief est peu élevé mais la moitié de Grande Terre a des pentes fortes (plus de 15%). Le point culminant de l'île de Grande terre est le Mont Choungui (594m) situé dans le Sud. On retrouve quatre grandes familles morphologiques sur l'île :

- Des morphologies volcaniques récentes, avec des dômes de phonolites, des cônes volcaniques, des cratères d'explosion. (BRGM 2013)
- Des structures d'érosion et d'altération des formations volcaniques plus anciennes : crêtes, versants, plateaux, amphithéâtre, padzas. Les padzas étant des sols déforestés, accidentés et infertiles. Ils sont issus de la forte érosion des roches basaltiques sous le climat chaud et humide de Mayotte. (BRGM 2013)
- Des morphologies de dépôts et d'accumulation : plaine littorale, fond de vallée, glacis. (BRGM 2013)
- Des morphologies de dépôts et de construction d'origine marine : mangroves, lagon, cayes (petite île basse principalement composée de sable et de corail), plages. Le lagon corallien qui entoure l'île fait plus 1500 km2 avec une barrière de plus de 160kms coupée par une dizaine de passes. Ce lagon est le plus vaste lagon fermé de l'océan Indien (BRGM 2013)

Figure 2: Mangrove (à gauche) et padzas (à droite) *(source image : https://www.labanquedimagesdemayotte.com/)*

D'après une étude menée par le BRGM en 2017 (BRGM 2017) on peut identifier 11 terrains de nature différente : 6 terrains allochtones, dont des formations anthropiques, 5 terrains autochtones.

Les formations autochtones laviques sont classifiées par leur degré d'altération. On les classe selon le degré de fracturation, d'oxydation et de cohésion de la roche. D'une roche saine on passe par plusieurs stades d'isaltérites qui ont encore conservé la structure de la roche mère, pour finir sur une formation très altérée qui a totalement perdu sa structure initiale : l'allotérite. (NEHLIG et al. 2013 ; BRGM 2017)

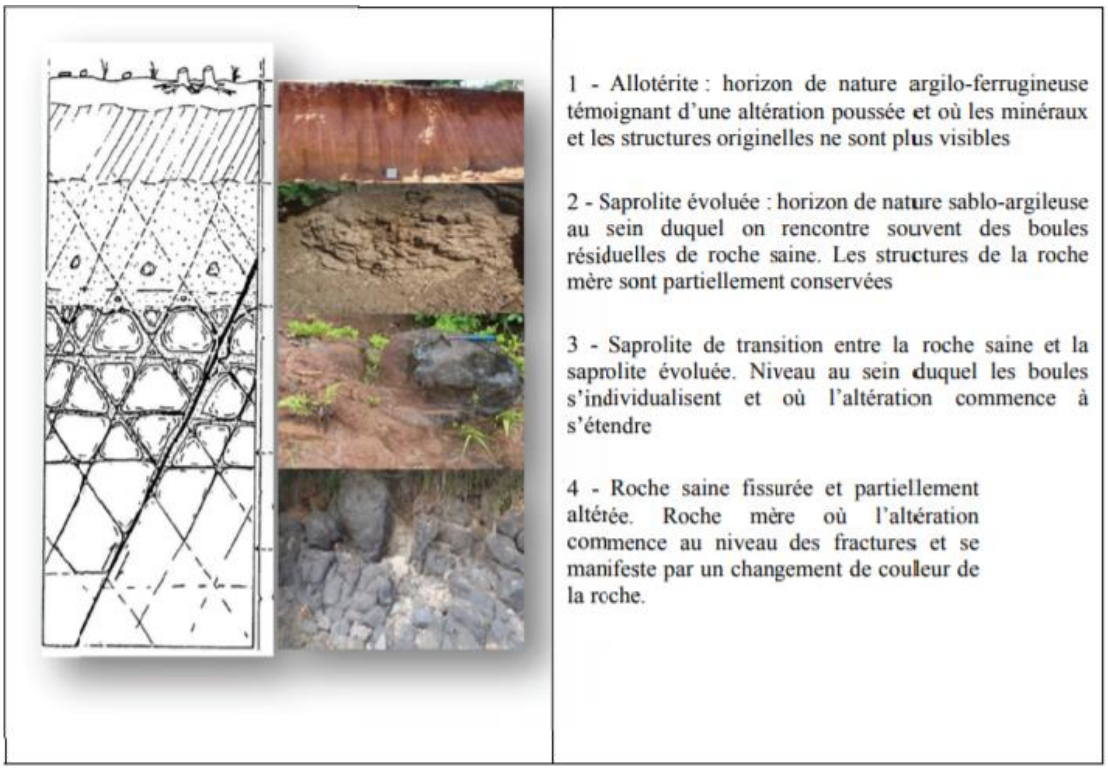


Figure 3: Profil d'altération (NEHLIG et al. 2013) et (BRGM 2017)

Parmi les formations allochtones recensées, on retrouve :

- Des dépôts anthropiques (modifiés ou induits par l'activité humaine) qui sont présents sur la plupart des aires urbaines.

- Des dépôts alluvionnaires torrentiels en zone de pente. Ils sont constitués de blocs de tailles variables qui forment des épaisseurs métriques à plurimétriques.
- Des dépôts alluvionnaires limoneux qui ont une proportion plus importante en matière organique. Leur épaisseur est généralement faible avec des maximums observés de 2 mètres.
- Des dépôts de pente fins qui sont caractérisés par des limons argileux rougeâtres avec des éléments anguleux parfois sub-anguleux de moins de 5 cm dans des proportions inférieures à 15%. Les épaisseurs sont de 20 cm minimum. Il est parfois difficile de les différencier avec les dépôts alluvionnaires limoneux mais on peut les distinguer par la présence de petits blocs inférieurs à 5 cm.
- Des dépôts de pente blocs qui sont des limons argilo-sableux brun rougeâtre avec des blocs subanguleux de tailles diverses dans une proportion entre 15% et 50%
- Des dépôts de pente à bloc jointifs qui ont une proportion de blocs supérieure à 50% avec des épaisseurs supérieures au mètre.

b. Climat mahorais

Le climat mahorais est un climat tropical humide et maritime, avec des faibles variations de températures journalières et annuelles et d'importantes précipitations (plus de 1500mm par an en moyenne sur l'île). L'île possède deux saisons principales séparées par deux intersaisons brèves.

De décembre à mars, on retrouve une saison chaude et pluvieuse d'été austral appelée « kashkasini » à Mayotte. On retrouve des épisodes pluvieux intenses type mousson pendant cette période. Les précipitations mensuelles atteignent 200 à 300mm selon les régions. Les températures maximales avoisinent régulièrement 32°C et les minimales 21°C pendant la nuit. L'humidité s'élève à 85% et dépasse 95% pendant la nuit. C'est la saison des cyclones et des dépressions tropicales, même si Mayotte est peu exposée au risque cyclonique.

De juin à septembre, on retrouve une saison sèche pendant l'hiver austral. Les alizés venant du sud-est rafraîchissent l'atmosphère (20 à 25°), le taux d'humidité est moins important, et la pluie se raréfie avec des précipitations mensuelles qui dépassent rarement les 30mm.

L'île est de petite taille mais possède tout de même une certaine hétérogénéité dans la répartition des précipitations ***(voir figure suivante).*** En effet le centre et le Nord-Ouest de Grande-Terre sont plus arrosés (environ 1700 mm par an) que la partie sud de l'île (1100 mm). Le relief mahorais va jouer le rôle d'une barrière face aux vents humides et chauds venant du Nord, ce qui va entrainer des pluies orographiques plus importantes au Nord qu'au Sud**.** (Meteo France 2010 ; Ministère des Outre-mer 2016) (Meteo France 2010) (Meteo France)

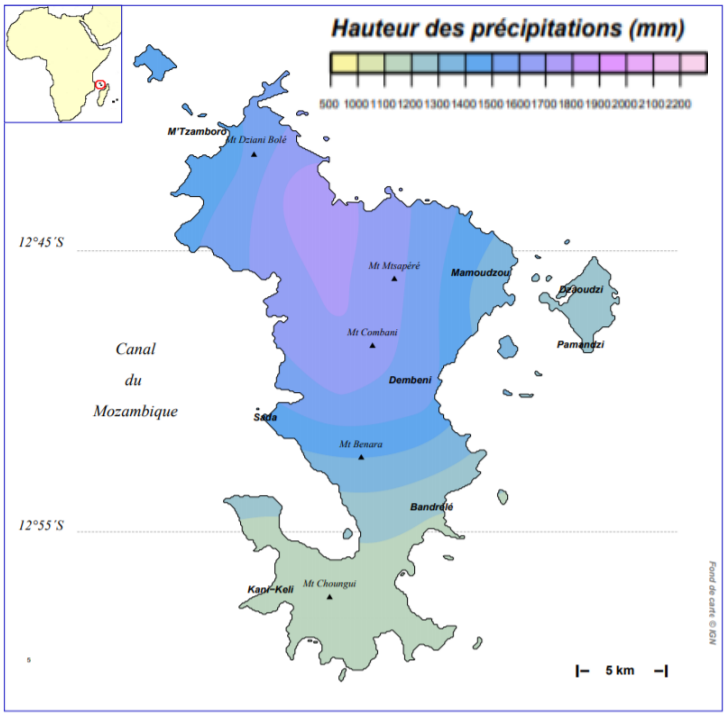


Figure 4: Moyenne annuelle des cumuls pluviométrique (1981-2010) (Météo France])

c. Contexte et enjeux de l'érosion des sols mahorais

L'érosion la plus importante à Mayotte est l'érosion hydrique, du fait des fortes pluies tropicales sur des sols souvent en pente, peu ou pas protégés.

On recense dans les zones à risques les surfaces agricoles et les zones de construction urbaine. En effet, le mode de culture traditionnel mahorais est le jardin mahorais. Cette nomination décrit plusieurs modèles agricoles agroforestiers en polyculture. Ces modes de productions permettent une bonne couverture du sol par la diversité verticale des cultures. On observe des transitions de ces modèles agroécologiques vers des modèles de monocultures (manioc, bananeraies…).(Agreste 2016 ; 2018) Ces zones agricoles quand elles sont dénuées de couverture végétale ou de paillage protègent moins le sol. Les terres mises à nus avant de nouvelles cultures, les talus non végétalisés ainsi que les zones déforestées pour l'agriculture sont autant de surfaces qui sont très fragiles. (BRGM 2016)

Mayotte subit une forte pression anthropique, avec l'augmentation démographique la plus importante en France, soit 3.8% par an en moyenne de 2012 à 2017. C'est le département français le plus densément peuplé hors Ile de France avec 690 habitants au km² en 2017.(INSEE 2017) Cela rend l'île encore plus vulnérable à l'érosion, notamment par son urbanisation peu maitrisée. Les routes, les pistes et les zones urbaines sont fortement sujettes à l'érosion avec par exemple des écoulements d'eaux sous forme de rigoles sur les talus, sur les décaissements de terrain en pente ou encore sur des déblais parfois instables. (BRGM 2013) (BRGM 2002). D'autres facteurs comme l'absence de canalisations des eaux des toitures d'habitations par exemple ou des dysfonctionnements de réseaux de gestion de l'eau de pluie vont aggraver ce phénomène.(CIRAD 2006).

L'érosion dans ce contexte mahorais met en péril :

- L'**agriculture locale** en diminuant la fertilité des sols et en diminuant les rendements,
- Les **populations locales et le bâti** avec des coulées de boue dangereuses, une augmentation du coût d'entretien des infrastructures et une détérioration des réseaux routiers, d'eau et d'assainissement.
- Le **lagon mahorais** avec une destruction des écosystèmes côtiers (massifs coralliens, herbiers, etc.) et une diminution des ressources halieutiques avec des phénomènes d'envasement par les apports de sédiments.

d. Le BRGM et un projet de lutte : LESELAM

La structure qui a accueilli ce stage est le BRGM. C'est l'établissement de référence sur les géosciences pour la gestion de risques et des ressources liés au sol et au sous-sol. Il a été fondé en 1951 et est actuellement sous tutelle de trois ministères : ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, ministère de la Transition écologique et solidaire, ministère de l'Économie et des Finances. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Ses actions sont orientées vers la recherche scientifique, l'aide et appui aux politiques publiques et la coopération internationale.

Le BRGM est implanté dans toutes les régions françaises et a donc ancré une antenne mahoraise à Mamoudzou. Ils sont investis dans des missions et projets divers. Ils travaillent notamment autour d'enjeux tels que de la gestion des eaux souterraines, la protection des environnements côtiers, la cartographie géologique ou encore la gestion des risques naturels comme par exemple les risques liés à l'érosion.

Dès les années 70-80 des pédologues IRAT (Brouwsers M. ;Subreville G. et Latrille Ed.) ont recommandés des mesures anti-érosives sur l'archipel des Comores (CIRAD 2006). En 1992, des études ont été menées par Michel Raunet (Raunet 1992) pour recenser les facteurs d'érosions à Mayotte. Il y faisait déjà figure de la gravité de la situation et d'une accélération significative de l'érosion sur les bassins versants mahorais sur la période 1991-2000. Dans le même temps, le programme Cordet (1992-1996) a d'ailleurs clairement montré l'instabilité des sols mahorais face à l'érosion, en quantifiant sur des parcelles l'érosion agricole par un dispositif Wischmeier. Des programmes se sont encore succédés par la suite pour mieux comprendre et organiser des actions concrètes pour limiter l'érosion.

En réponse à cette problématique d'érosion toujours urgente, c'est alors constitué le projet LESELAM (2015-2017). Le BRGM en est à l'initiative avec le CIRAD, l'IRSTEA, les Naturalistes de Mayotte, et la CAPAM. Ce projet a pour objectif de cerner les phénomènes qui caractérisent l'érosion des sols mahorais pour pouvoir sensibiliser les acteurs concernés à adopter des pratiques qui limitent le risque érosif. On retrouve dans les missions qui ont été effectuées : la quantification des phénomènes érosifs sur deux, puis trois bassins versants pilotes, la mise en place de parcelles « démonstratrices » de pratiques de remédiation ainsi que la formation et la sensibilisation des acteurs. (LESELAM)

Dans la continuité de ce projet a été lancé le projet LESELAM 2(2018-2020). Toujours porté par le BRGM et les Naturalistes de Mayotte, il est dirigé avec l'appui de sous-traitants (Université de Tours, Kermap, Capam, Agrikagna, ADINM). Il a pour objectif de poursuivre l'observatoire physique de l'érosion, de compléter les données, d'utiliser les parcelles expérimentales mises en place dans LESELAM à l'échelle des bassins pilotes, de

continuer les actions de sensibilisation avec notamment la création de supports pédagogiques et d'ateliers au champ, la mise en place d'actions pour faciliter l'adoption des pratiques qui permettent de réduire l'érosion. (BRGM, 2016 ; LESELAM)

C'est donc dans ce projet LESELAM2 que s'inscrit mon stage proposé par le BRGM : *Cartographie de l'érodibilité des sols de l'île de Mayotte.* L'objectif du stage étant de réaliser une cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique à une échelle 1/30 000ème. Ce projet s'inscrit dans la démarche d'une meilleure compréhension des phénomènes érosifs sur l'île.

B. Etat de l'art

a. Mécanismes de l'érosion hydrique

L'une des plus importantes causes de la dégradation des sols est l'érosion hydrique.(Gis Sol 2011). L'érosion hydrique est définie comme l'arrachage et le transport mécanique des particules du sol par l'eau. (Antoni, Darboux 2009). Le terme d'érosion hydrique englobe plusieurs processus d'érosion : l'érosion diffuse ou en nappe et l'érosion linéaire en rigoles et ravines ou dites concentrée (Roose 2010 ; PEIGNE 2013).

L'érosion en nappe, aréolaire ou dite diffuse est le processus d'érosion par l'énergie de battance des gouttes de pluie et le transport par un ruissellement en nappe. (Roose 2010) On considère cette érosion comme le premier stade de dégradation par l'érosion hydrique des sols (Roose 1994). Il est moins dégradant donc moins visible, mais on peut néanmoins en déceler des traces lorsqu'on observe des accumulations d'éléments grossiers en surface laissés sur place par l'érosion des particules plus fines et légères. Par son action décapante sur la couche superficielle, elle exporte notamment les nutriments et les produits phytosanitaires à la surface des parcelles cultivées ce qui participe à la pollution des eaux (Leguédois 2003). Cette force de battance dépend de l'érosivité des pluies qui varie selon l'intensité de l'épisode pluvieux, l'état d'humidité initiale du sol mais aussi selon les caractéristiques des gouttes de pluie (angle d'impact, taille, vitesse, forme…).(Le Bissonnais 1988). L'énergie cinétique des gouttes peut être diminuée par la présence d'un couvert, ce qui réduira l'impact au sol. Le sol peut aussi être protégé par une lame d'eau suffisamment haute. Mais si la lame est d'une épaisseur trop faible, il semblerait que cela aggrave le détachement par les gouttes. (Proffitt et al. 1991). Quand elle atteint le sol, l'énergie de la goutte se dissipe selon plusieurs processus (Roose 2010):

- Une humectation brutale du sol et un éclatement des agrégats
- Un tassement de la surface du sol sous l'impact des gouttes
- L'arrachement tangentiel qui sépare les particules agrégées des mottes
- L'effet splash, soit la projection de ces particules selon une couronne sur sol plat et transport dans toutes les directions, mais plus efficacement vers l'aval sur les pentes
- Le bruit du choc des gouttes sur les matériaux résistants, et redistribution des particules vers les sommets des mottes (pellicules de battance) et vers les points bas (croûtes de sédimentation).

Cette érosion a donc pour principaux effets un tassement par l'impact des gouttes, une perte sélective de la matière organique et des argiles et donc une mise à nu de couches inférieures de sol plus compactes, moins drainantes, plus pierreuses. Ce phénomène de mise à nu est appelé squelettisation du sol (FAO 2015). On observe également un nivellement du sol par la

formation dans les creux de pellicule de battance, des croûtes de sédimentation et le rabotage des mottes.

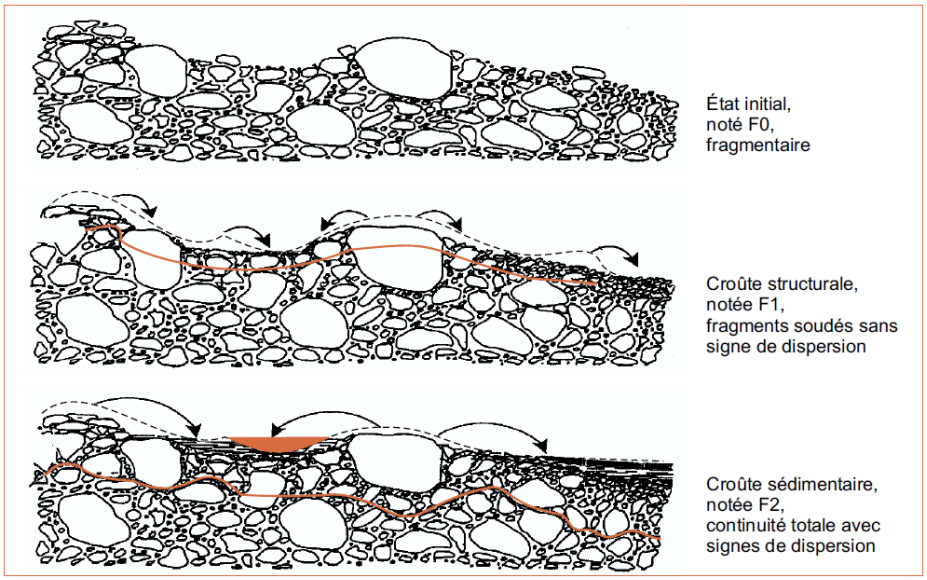


Figure 5: Dynamique de formation de croute de battance (Le Bissonnais, 2000)

Le second processus d'érosion concentrée est plus dégradant. En contexte de pente forte ou longue, on observe une hiérarchisation du ruissellement qui augmente son énergie. L'eau va être capable de creuser la surface en griffes ou ravines (*voir figure 6*). Cette concentration du ruissellement permet à l'écoulement d'acquérir une capacité érosive suffisante pour entraîner des fragments de sol (Leguédois 2003). L'eau chargée en sables et graviers gagnent en force de cisaillement. On explique globalement par deux principaux mécanismes le ruissellement superficiel (Roose et al. 2010):

- Le mécanisme de Dunne : une saturation de la porosité du sol. Le sol ne peut plus transmettre latéralement l'eau et n'est plus capable de la stocker.
- Le mécanisme de Horton : une impossibilité d'infiltration car l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol.

Ce mécanisme d'érosion est moins sélectif. La multiplicité d'épisodes pluvieux peut entraîner la formation de ravines là où dans un premier temps il n'y avait que des rigoles moins profondes, ce qui peut entraîner par exemple une diminution de la surface exploitable dans un contexte agricole en plus de l'appauvrissement du sol. Les passages de roue d'engins agricoles ou des lignes de travail de sol peuvent être alimentés par l'eau et déclencher ce processus d'érosion concentrée. (Antoni, Darboux 2009)

Figure 7: Erosion diffuse sur une parcelle, photo : Bissonnais dans (Leguédois, 2003)

Figure 6: Rigole témoin de l'érosion concentrée en Polynésie Française (Binet, Gonnot 2005)

b. Mécanismes de désagrégation et propriétés stabilisantes

La désagrégation par l'action de l'eau d'un sol, donc la destruction de sa cohésion, met en jeu plusieurs mécanismes différents par leurs échelles d'actions et processus :

- Un phénomène d'éclatement qui résulte de l'immersion rapide d'agrégats secs dans l'eau. Le mécanisme mis en jeu est celui d'une compression de l'air piégé lors de l'humectation. Un sol argileux sera moins sensible à ce mécanisme par sa plus faible porosité et du fait qu'ils retiennent plus d'humidité pour une contrainte hydrique donnée.(Bissonnais Le 2000)
- Une désagrégation sous l'impact des gouttes de pluie. Comme évoqué plus haut, ce mécanisme gagne en efficacité sur un sol saturé en eau qui perd en résistance mécanique. Les gouttes arrachent des agrégats et il y a rejaillissement (ou splash). (Al-Durrah, Bradford 1982)
- Une désagrégation par gonflement différentiel des argiles, qui fragilisent par des microfissures les agrégats. (Bissonnais 1996)
- Une dispersion physico-chimique par la réduction des forces entre particules colloïdales lors de l'humectation. C'est un mécanisme qui concerne les particules élémentaires et qui décuple les effets des autres mécanismes. En général c'est la présence de sodium échangeable qui favorise cette dispersion. (Shainberg 1992)

Les sols sont donc tous plus ou moins sensibles à ces dégradations selon leurs caractéristiques intrinsèques et les conditions d'érosion. Les principales caractéristiques sont la teneur en matière organique, la texture, la minéralogie des argiles, les cations, les oxydes de Fe et AL et le CaCO3. Bien entendu ces caractéristiques interagissent, ce qui rend encore plus compliqué la quantification de leur importance.

La matière organique est déterminante pour la stabilité structurale. Elle a un effet bénéfique sur la porosité des sols avec ses propriétés agrégantes et cohésives sur les particules minérales. Elle peut avoir un effet protecteur en ralentissant la vitesse d'humectation ce qui limite la dégradation par éclatement. (Bissonnais 1995) La matière organique peut offrir une certaine résistance au compactage et à la formation des croûtes de battance. On ne peut pas se

limiter à quantifier la matière organique pour savoir son rôle sur la stabilité d'un sol, car ses effets dépendent aussi de quelle matière organique il s'agit. Un sol avec une bonne activité biologique pourra être stabiliser par les racines et champignons mais aussi par les sécrétions des microorganismes sur des agrégats de plus petites tailles, de la litière pourra jouer un rôle de protection physique tout en stimulant cette activité biologique.

La **texture** qui est la proportion relative de particules argileuses, limoneuses et sableuses de la terre fine d'un sol joue aussi sur sa stabilité structurale. Elle a un rôle notamment sur sa porosité, l'infiltration de l'eau. Un sol très sableux sera bien perméable et filtrant à l'inverse d'un sol trop argileux. Les sols très limoneux seront très sensibles à la formation de croute battance.

On retrouve aussi dans les caractéristiques importantes sur la stabilité structurale la minéralogie des argiles, les cations, les oxydes de Fe et Al et le $CaCO_3$. On ne s'étale pas sur ces sujets car on étudiera moins ces propriétés dans le stage même si ces paramètres ont des importances réelles sur la stabilité structurale d'un sol.

c. L'érodibilité et méthode d'évaluation

On considère deux propriétés importantes et complémentaires des sols qui facilitent leur altération par l'érosion : l'érodibilité et la battance. La battance d'un sol, évoquée à plusieurs reprises plus tôt dans le texte, est sa sensibilité à la formation d'une croûte en surface qui va favoriser les phénomènes de ruissellement et réduire l'infiltration (Bissonnais Le 2000). Cette croûte est d'ailleurs appelée croûte de battance. L'érodibilité est quant à elle, la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent, sous l'action de la pluie ou du ruissellement. (Antoni, Darboux 2009).

Souvent pour modéliser l'érosion mathématiquement on utilise le modèle empirique USLE (Universal Soil Loss Equation) créé par WISCHMEIER et SMITH, 1960, 1978 ou sa version améliorée et révisée : le RUSLE. Le modèle initial traduit l'érosion en nappe par cette équation :

$$\text{Érosion moyenne} = R \times C \times SL \times K \times P$$

<u>Avec :</u>

R : indice d'érosivité des précipitations
K : indice d'érodibilité du sol, fonction de la texture du sol, du taux d'humus, de la structure de la couche superficielle de sol ainsi que de sa perméabilité
SL : indice topographique, fonction de l'intensité de la pente (S) et de sa longueur (L)
C : indice de couverture végétale et de pratiques culturales
P : indice d'aménagement antiérosif

Ce modèle estime donc l'érosion comme une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies par la résistance du milieu. Il permet de faire des estimations en utilisant les valeurs estimées de chaque composante pour un contexte donné. Il peut donc être très utile pour faire des approximations à moyen et long terme des pertes de sol.

L'indice d'érodibilité peut être estimé empiriquement par une perte moyenne en tonnes/hectare pour un sol particulier, dans des conditions précises d'occupation de sol et de pente. Le protocole de WISCHMEIER prévoyait initialement des mesures sur des parcelles

nues de référence de 22,2 m de long sur des pentes de 9 % et sur un sol nu, travaillé dans le sens de la pente et qui n'aurait pas reçu de matières organiques depuis trois ans. Ce modèle a bien entendu des limites car il néglige un certain nombre de paramètres réels. Tout d'abord il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et néglige l'érosion concentrée car il a été testé sur des pente de 1% à 20%. Il néglige certaines interactions entre facteurs et il nécessite des valeurs locales pour les différents types de pluies. Un dispositif proche de ces parcelles a été déployé dans le projet LESELAM avec douze parcelles d'érosion appelé « ruissellomètres », pour quantifier les transports liquides et solides à l'échelle de 100 m² en milieu forestier, agricole, (péri)urbain et sur padza, pour différentes pentes. Il a été mis en place pour une étude multi-échelle de quantification des flux sédimentaires sur trois bassins versants mahorais.(Thietry 2017)

On ne peut pas appliquer cette méthode pour tester toutes les combinaisons sol-occupation par faute de temps, de données ou de moyens. On peut alors faire l'approximation de l'érodibilité en mesurant d'autres paramètres et en déployant d'autres tests. De nombreuses méthodes en laboratoire ont été mises au point. Elles sont multiples car les mécanismes en jeu, les caractéristiques des échantillons de sols le sont également. Des travaux de comparaisons de cette multitude de méthodes ont été effectués, notamment par Pauwells (J.m et al. 1976). Par un travail de recensement, de croisement entres les méthodes de mesure de la stabilité structurale, Yves Le Bissonnais (Bissonnais 1996) a proposé un cadre méthodologique commun. Désormais cette méthodologie normalisée de mesure de la stabilité structurale existe et elle est sous la nomination norme **ISO 10930 :2012.** La méthode s'appuie grandement sur les travaux d'Henin (Henin et al. 1958).

La Norme Internationale préconise 3 traitements qui permettent d'informer sur le comportement d'un sol à une humectation rapide, à une humectation lente par capillarité ainsi que sur la cohésion des matériaux humides indépendamment de l'éclatement étudié lors du premier traitement. L'objectif de ces trois traitements est de distinguer l'effet des différents mécanismes de l'érosion hydrique. Les sols réagissent plus ou moins à chaque mécanisme de désagrégation, il est donc essentiel de combiner plusieurs résultats pour pouvoir comparer des sols différents dans des conditions diversifiées.

Tableau 1: Protocole ISO 10930 :2012

ISO 10930:2012		
Prélevement des échantillons		
-conditions d'humidité modérées lors du prélevement -prélevements multiples sur une surface homogène pour un échantillon composite		
Préparation des échantillons		
-Séchage à l'air libre de l'échantillon -Fractionnement à la main sans lissage des agrégats -Passage au tamis pour récupération de la portion 3-5mm -Calcul du rendement en agrégats 3-5mm (masse agrégats par rapport à l'échantillon) -Passage à l'étuve à 40°C pendant 24h avant les traitements		
Traitements		
Humectation rapide	**Humectation Lente**	**Désagrégation mécanique**
-Peser 5g d'aggrégats de 3-5mm -Verser 50mL eau + aggrégats dans un bécher -10 min repos -Pipetage de l'excès d'eau -Passage au tamis (50 µm) dans l'étanol	-Peser 5g d'aggrégats de 3-5mm -Humectation par capillarité sur papier filtre type kleenex -Passage au tamis (50 µm) dans l'étanol	-Peser 5g d'aggrégats de 3-5mm -Immersion agrégats dans éthanol pendant 30 min -Evacuation excès éthanol -Verser 50mL d'eau -Transfert dans un erlenmeyer et ajustement d'eau à 250mL -Agitation (manuel ou avec agitateur) -Repos 30mn -Pipetage excès d'eau -Passage au tamis (50 µm) dans l'étanol
Séparation des différentes fractions de particules par les tamis: 2000µm, 1000µm, 500 µm, 200µm , 100µm, 50µm		
Mesure de la distibution des particules -Calcul du diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD) -Histogramme de distribution de taille des particules		

On notera l'utilisation de l'éthanol, liquide non polaire et miscible avec l'eau qui permet d'éviter que les particules se réagrègent pendant le séchage et d'avoir un meilleur contrôle de la désagrégation qu'avec de l'eau (Henin et al. 1958).

A partir des figures de distribution de taille des particules et des diamètres moyens pondéraux, on peut comparer les sols. On considère que plus le diamètre pondéral moyen sera grand plus le sol sera stable.

C. Problématique et objectifs

Le rendu du stage est une carte de l'érodibilité des sols de Mayotte. Deux couches SIG m'ont été donné comme supports de travail pour la réaliser. L'une renseigne les formations superficielles, l'autre les occupations de sol. Elles seront présentées plus dans le détail sur leur contenu par la suite. A partir des informations qu'elles renseignent et de données de terrain, le défi est de renseigner une valeur d'érodibilité du sol en tout point de Mayotte. L'objectif est donc d'évaluer l'érodibilité des différentes formations superficielles mahoraises et de déterminer l'influence des différentes occupations de sol. Les hypothèses suivantes ont donc été posées :

Hypothèse 1 : Les différentes formations superficielles mahoraises ont des érodibilités différentes.

Hypothèse 2 : L'occupation du sol a une influence significative sur l'érodibilité.

II. Matériels et méthodes

A. Choix du protocole de mesure de l'érodibilité

Comme évoqué plus tôt, il existe un protocole normalisé **ISO 10930 :2012** pour la mesure de la stabilité structurale des sols. Le protocole se réalise avec du matériel spécifique (tamis de différentes tailles, éthanol en quantité suffisante). A Mayotte, il n'aurait pas été possible de les obtenir. Pour effectuer des mesures pertinentes, il a donc fallu proposer une adaptation de ce protocole.

Un protocole avait déjà été testé sur place par Valentin Landemaine, ingénieur Risques Hydro-Gravitaires du BRGM Orléans et maitre de ce stage. En effet, en janvier 2020, il a effectué 51 mesures avec ce protocole adapté à Mayotte. La période de stage étant prévu initialement à 6 mois, les 51 mesures représentaient une quantité importante de données de terrain qui pourraient compléter celles effectuées sur la durée du stage. Le protocole ayant aussi déjà été testé avec le matériel sur place, il a été choisi de le conserver.

Tableau 2: Comparaison de protocoles

Préparation des échantillons		
Echantillons laissés à l'air libre pendant une semaine Les échantillons sont séchés à 40°C pendant 24h à l'estuve		
Caractéristiques des échantillons traités		
Agrégats de 3mm à 5mm	Agrégats de 2mm à 1cm	Seulement deux tamis (1cm et 2mm) disponibles
5g traités	40g d'agrégats traités	On mesure des masses en fin de traitement donc il faut plus de matière
Pour les deux traitements		
Transfert après traitement sur un tamis de 50µm immergé dans l'éthanol	Transfert après traitement sur un tamis de 2mm	Pas d'éthanol disponible en quantité suffisante
Séchage à 105°C pendant 48h	Séchage à 105°C pendant 12h	Gain de temps à l'étuve, compensé par la semaine de séchage à l'air libre
Mesure du diamètre moyen pondéral (MWD) après désagrégation	Mesure de la masse d'agrégats inférieur à 2mm après désagrégation	Absence des tamis nécessaires, d'appareil de hénin ou de Yoder.
Traitement 2 : Cohésion des matériaux humides		
Immersion des agrégats dans l'éthanol pour éviter l'éclatement	Immersion des agrégats dans l'eau	Pas d'éthanol disponible en quantité suffisante
Agitation manuelle (10 retournements avec erlenmeyer) ou avec un agitateur adapté	Utilisation d'un agitateur magnétique à 500 tours/min pendant 10 min	Choix de technique pour uniformiser les traitements
Laisser au repos pendant 30 min après agitation		Gain de temps et permet de faire les deux traitements en même temps (10 minutes)

Le protocole s'inspire de la norme **ISO 10930 :2012,** avec deux traitements sur trois conservés. Des variantes du traitement par humectation rapide et du traitement avec désagrégation mécanique ont été faites. En effet comme évoqué dans l'introduction officielle de la norme ISO (ANON.), le traitement par humectation rapide est le plus facile à mettre en place et peut à lui seul être suffisant pour une comparaison d'échantillons. Le traitement avec désagrégation mécanique a aussi été conservé. Dans le contexte climatique tropical humide mahorais avec des épisodes pluvieux intenses, il semblait très important de conserver ce type de traitement qui met en jeu une énergie autre que l'éclatement et qu'on pourrait comparer à

celle de l'impact des gouttes sur un sol. Le traitement par capillarité aurait été aussi intéressant à mettre en place, car il permet de discriminer des sols très peu stables et mime l'effet que pourrait avoir des pluies plus modérées sur des sols peu humides. Il a été écarté car il est plus long à mettre en œuvre et que faire trois traitements sur chaque échantillon représentait une surcharge de travail non assumable sur la courte durée du stage.

B. Supports de travail : les couches SIG

Comme principaux supports de travail pour ce stage, deux couches SIG étaient à ma disposition. La première est une couche qui recense les différentes formations superficielles sur l'ensemble de Mayotte. Il y a deux niveaux de classification des formations superficielles dans la couche, un niveau avec les nominations précises de 42 formations superficielles et un second niveau avec 17 regroupements de ces formations superficielles. (voir annexe).

La seconde couche résulte d'un travail à partir d'imagerie satellite et donne en tous points de l'île une occupation du sol. Elle contient 14 occupations différentes qui sont regroupées en 10 regroupements, et un dernier niveau de 4 grandes catégories très englobantes. Les trois niveaux d'informations s'articulent de la manière suivante :

Tableau 3 : Catégories de la couche SIG d'occupation des sols

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Espaces artificialisés	Tissu urbain	Bâti Non bâti asphalté
	Réseau routier	Route Piste
	Sol nu	Sol nu perméable
	Espaces verts urbains	Jardin et espaces vert urbains
Espaces agricoles	Cultures	Jardin mahorais Bananeraie monoculture Manioc monoculture haute densité Manioc monoculture très haute densité Manioc monoculture basse densité Autres cultures
	Formation herbacée indifférenciée	Formation herbacée indifférenciée
Espaces naturels	Végétation ligneuse	Forêt Végétation arbustive Mangrove
	Végétation basse	Padza enherbé et fougeraie
	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétatio	Padza nu Affleurement rocheux Plage
Surfaces en eaux	Surfaces en eaux	Surfaces en eaux

C. Elaboration d'une stratégie d'échantillonnage

A l'origine il était prévu que j'effectue moi-même une campagne d'échantillonnage sur place. Un planning avait été créé pour récolter le maximum de données possibles pour l'analyse dans le temps imparti sur place. Au fur et à mesure que le temps potentiel à Mayotte se réduisait avec l'impossibilité dûe à la crise sanitaire de se rendre sur place, ce planning était réactualisé et les

objectifs vus à la baisse. L'objectif était simple, dans un premier temps il fallait récolter le plus de données de terrain possible dans le temps imparti. A partir du temps de traitement des échantillons de sol prévu par le protocole, un nombre maximum d'échantillons de 90, sur 4 semaines quasiment exclusivement prévues à cette tâche. A ces 90 échantillons, il aurait été ajouté des prélèvements complémentaires en parallèle du traitement de données, selon ce qu'il serait ressorti des résultats. Cette organisation laissait de la souplesse de travail sur place. Étant dans l'impossibilité d'aller sur place, les prélèvements ont finalement été faits par un organisme tiers. Dans la partie suivante, il sera présenté l'évolution de la stratégie d'échantillonnage.

a. Constitution des catégories de sol

Pour pouvoir attribuer un nombre de points de prélèvements aux différentes formations superficielles, il me fallait une stratégie. En effet, 42 formations superficielles sont présentes sur la couche, l'objectif était d'échantillonner des sols représentatifs de l'île et dont les données pourraient être utilisées pour prévoir de manière cohérente les comportements de sols moins représentés sur Mayotte.

Tout d'abord des formations superficielles pas intéressantes à étudier dans le cadre du stage ont évidemment été écartées. Parmi ces formations, on retrouve toutes les surfaces en eaux, mais aussi les dépôts anthropiques et les plages. Les rivières, lacs et autres points d'eau ont bien évidemment été écartés car ils n'ont pas leur place dans une étude sur l'érodibilité d'échantillons de sol. Les dépôts anthropiques, malgré le grand risque érosif auquel sont exposés les talus par exemple, ont été écartés car la dénomination est très vague. Elle englobe des formations superficielles beaucoup trop diverses. Les plages n'ont pas été étudiées dans ce stage par choix, l'étude ne se concentrant pas sur le littoral.

A partir de la couche SIG et du logiciel de programmation R j'ai extrait les surfaces que représentent les différentes formations de l'île. A partir des surfaces de chaque formation et en me basant sur les catégories déjà effectuées sur la couche SIG, j'ai rassemblé en groupements de sols cohérents les formations en évitant toutefois d'avoir des surfaces trop petites par catégorie. Les sols étant déjà regroupés dans la couche SIG, je me suis largement appuyé sur cette proposition. L'objectif était d'avoir des catégories de sol qui représentent des surfaces assez conséquentes et qui rassemblent des formations de nature proche donc susceptibles de réagir à l'érosion de manière analogue.

Tableau 4 : Récapitulatif des catégories de formations superficielles

Catégories	Descriptions	Nombre de formations incluses dans la catégorie	Surface de l'île (en %)
1	Allotérite	3	7,25%
2	Alluvions	3	18,67%
3	Formations de pente - Colluvions	1	10,90%
4	Formations de pente - Colluvions	2	23,71%
5	Formations de pente - Colluvions à blocs jointifs	2	4,42%
6	Isaltérites - Horizon fissuré inférieur	2	1,62%
7	Isaltérites - Horizon fissuré supérieur	6	21,65%
8	Isaltérites_Horizon fissuré meuble	1	1,53%
9	Isaltérites-Horizon meuble	4	6,60%
10	Substrat - Lavique indifférencié	10	2,58%
11	Substrat phonolite	3	1,07%

b. Répartition du nombre d'échantillons par catégorie de sol

Pour répartir les 90 prélèvements qui devaient initialement être faits à Mayotte, il a fallu trouver une méthode de répartition cohérente. J'ai choisi de prendre en compte plusieurs critères pour attribuer un nombre de prélèvements à une catégorie de formation superficielles :

- La surface que représente la catégorie. L'enjeu de caractériser fidèlement l'érodibilité de ces formations est plus important car elles sont plus représentatives.
- Le nombre de formations incluses dans la catégorie.
- La répartition des surfaces de la catégorie entre les différentes occupations de sol. En effet il s'agit ici d'éviter d'attribuer trop de prélèvements à une catégorie qui est majoritairement associée à une seule occupation de sol. A l'inverse si les formations superficielles sont occupées de manière homogène par une multitude d'occupations du sol différentes, il faudra plus de prélèvements pour avoir une description fidèle.

Pour ce dernier point sur la répartition des surfaces, j'ai utilisé l'**écart type** des pourcentages des occupations de sol par catégorie. En effet si l'écart type est grand, cela signifie que la répartition est très hétérogène, seulement quelques occupations de sols sont présentes en grande majorité sur ces formations superficielles. A l'inverse si la répartition est plus homogène, il faudra plus de prélèvements car il y aura plus d'occupations de sols non négligeables.

Tableau 5: Récapitulatif des différentes occupations de sol pour deux isaltérites

Pourcentage surface par occupation	Bananeraie monoculture	Manioc monoculture très haute densité	Jardin mahorais	Manioc monoculture haute densité	Manioc monoculture basse densité	Formation herbacée indiférenciée	Autres cultures	...
Isaltérites Horizon meuble	7,65	10,94	21,92	13,79	0,96	5,12	1,37	...
Isaltérites Phonolite	1,15	0,76	3,04	5,24	0,23	0,55	0,18	...

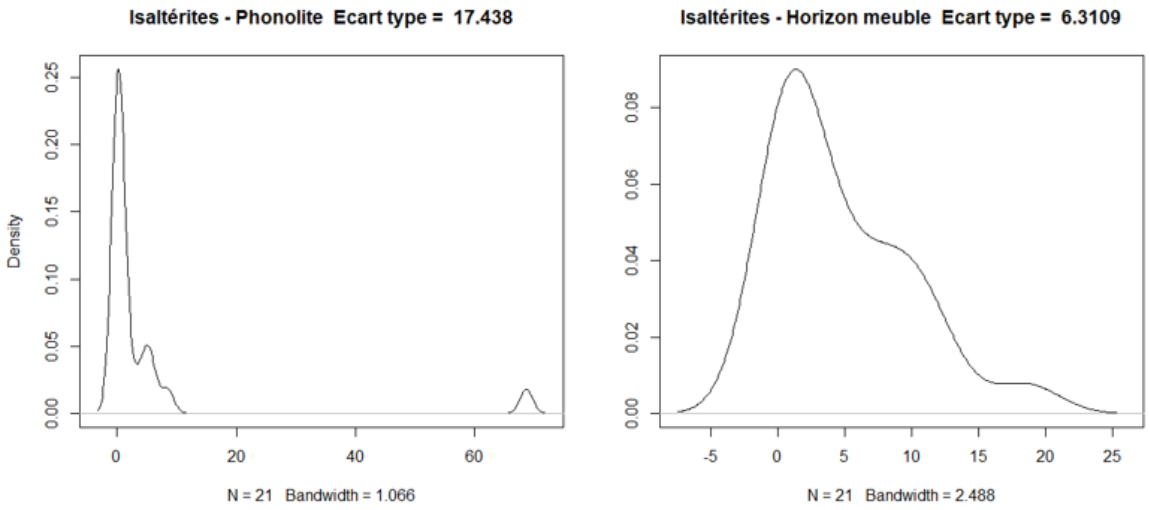


Figure 8 : Distribution des surfaces des occupations de sol pour deux isaltérites

Pour comptabiliser ces différents critères j'ai décidé d'assigner une note par catégorie. Les points qui constituent cette note sont distribués par rapport à la surface, au nombre de formations inclues dans la catégorie et à l'écart type de la suite des pourcentages des surfaces d'occupation de la catégorie de sol.

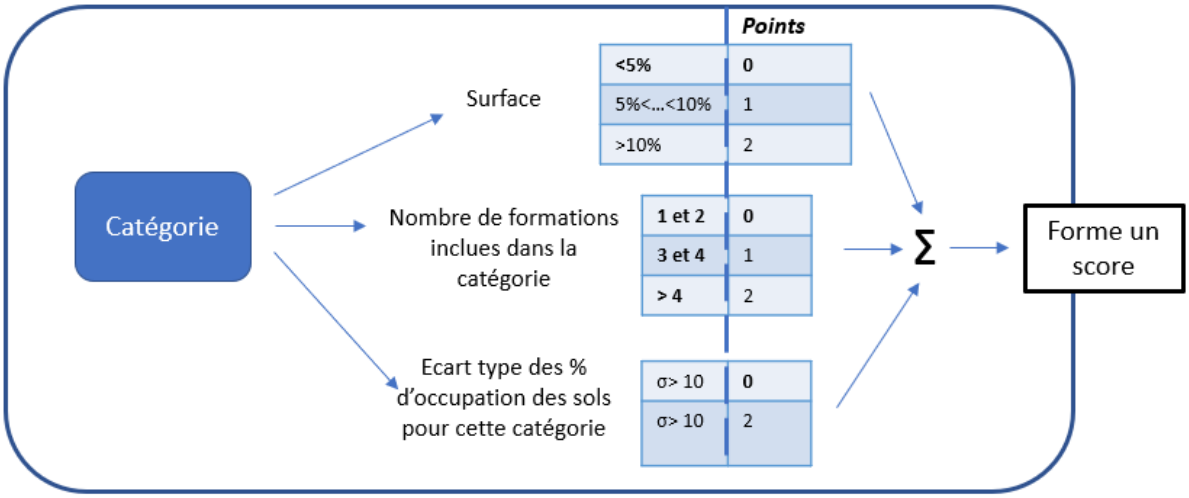


Figure 9 : Schéma de distribution des prélèvements de sol entre catégorie de formations superficielles

Les valeurs assignées pour chaque catégorie ont été choisies pour discriminer les différentes catégories entre elles. J'ai estimé qu'il fallait au minimum 4 échantillons par catégorie au départ. Après avoir distribué les 4 prélèvements minimums par catégorie, j'ai réparti les prélèvements restants proportionnellement au score de chaque catégorie. Dans un premier temps il était prévu de faire 90 échantillons sur place. Au final 200 prélèvements ont été commandés Les points ont donc été différenciés en deux catégories avec les 90 points initiaux en prioritaire et les 110 autres moins urgents.

c. Répartition du nombre d'échantillons par occupation de sol

Pour la répartition des prélèvements au sein d'une catégorie, il a été choisi de ne pas faire plus de 3 prélèvements pour un croisement, afin de balayer plus largement les différents sols et occupations. Pour choisir entre les différentes formations superficielles et les différentes occupations de sols plusieurs critères ont été retenus :

- Se focaliser en priorité sur les formations superficielles représentant les plus grandes surfaces. En effet, les croisements représentant les très petites surfaces ont été écartés, l'objectif était d'avoir des données références sur la plus grande surface possible de Mayotte.
- Avoir une diversité de type d'occupation du sol pour les formations superficielles. L'objectif étant d'avoir par exemple des données sur les différents systèmes agricoles, les milieux naturels et anthropisés. L'idée étant d'essayer de dégager ensuite des grandes tendances et des données variées sur les occupations qui aideraient à l'extrapolation d'érodibilité pour d'autres occupations et formations superficielles de même catégorie.

d. Positionnement des points d'échantillonnages

Les points ont été positionnés un par un sur le logiciel QGis, en essayant le plus possible d'éviter les zones difficiles d'accès. Ils ont été placés dans un souci de représentativité du territoire, en évitant de surcharger une partie de l'île et en essayant d'atteindre une répartition homogène sur l'ile principale.

D. Analyses statistiques et constitution des classes d'érodibilité

Les données ont été analysées statiquement dans l'objectif de dégager des éventuelles différences de résultats significatives aux traitements effectués sur les prélèvements. L'objectif était d'avoir des clés de compréhension sur les différences d'érodibilité entre formations superficielles et de traduire l'influence de l'occupation du sol.

Tout d'abord, Les résultats aux différents tests ont été analysés avec des statistiques descriptives. Il s'agit de décrire globalement les résultats afin de mieux cerner les principales caractéristiques des résultats aux deux traitements effectués.

Dans un second, il a été choisi d'étudier la répartition des valeurs récoltées afin de déterminer s'il est possible d'admettre pour les tests une distribution normale. Les résultats des deux traitements effectués sur chaque échantillon, humectation rapide et agitation, ont été analysés. L'objectif est de voir si une corrélation existe entre les tests. Ainsi on pourra déterminer si l'un des tests était désuet ou s'ils traduisent bien des comportements à différents types d'érosion. Cette recherche de corrélation a été effectuée séparément sur les prélèvements de même formations superficielles, de même occupation de sol, mais aussi simultanément sur les données issues de prélèvements identiques sur ces deux facteurs. Tous les niveaux possibles des catégories de ces deux facteurs ont été testés. Des tableaux récapitulatifs des résultats au différents tests effectués sont formés pour faciliter l'analyse.

Afin de faciliter l'analyse et de mettre en évidence rapidement des possibles tendances, des box plots des deux traitements ont été tracés également pour comparer les différents prélèvements de même formation superficielle avec différentes occupations, et inversement. En parallèle à ces toutes les possibilités de croisement entre niveaux des deux facteurs ont encore été tracées. Les résultats aux différents tests statistiques effectués pour discriminer les différents sols ont été aussi conservés dans des tableaux récapitulatifs toujours pour accélérer l'analyse.

A partir de ces box plots, des valeurs suspectes ont été déterminées. Ces valeurs extrêmes ont été écartées automatiquement. Un intervalle maximum d'acceptation très large à été utilisé. C'est le calcul de l'intervalle de confiance de Student à 90% qui a été choisi de manière arbitraire. Toujours de manière arbitraire il a été considéré qu'à partir de 4 échantillons effectués pour un croisement formations superficielles-Occupation du sol, on pouvait se permettre d'enlever des valeurs extérieures à cet intervalle.

Les résultats tirés de cette analyse seront alors mobilisés pour définir les classes d'érodibilité auxquelles seront rattachées les différentes formations mahoraises pour la création de la carte. En plus de devoir coller aux résultats de l'analyse, les classes d'érodibilité

seront réfléchies dans l'optique de faire de la carte un outil visuel intéressant et lisible. C'est pourquoi les surfaces que représentent chaque catégorie d'érodibilité auront leur importance, afin d'avoir un outil final nuancé.

E. Création de la carte de l'érodibilité des formations superficielles mahoraises

A partir des couches SIG fournies par le BRGM, un nouveau champ « Erodibilité » a été ajouté. Sur ce champ a été renseigné une valeur entre 0 et 3 compris. 3 est la plus haute valeur d'érodibilité, 1 la plus petite, 0 étant les formations superficielles non pertinentes (ex : points d'eau).

La carte d'érodibilité de la surface de Mayotte doit répondre à plusieurs critères. Elle doit s'appuyer sur les résultats de l'analyse statistique mais c'est aussi un outil visuel qui doit être facilement compréhensible. Le choix des couleurs est donc très important pour représenter les différentes classes d'érodibilité de manière claire. Aussi les catégories d'érodibilité doivent être assez équilibrées dans les surfaces qu'elles représentent chacune pour éviter une carte trop peu nuancée.

F. Logiciels et packages mobilisés

La création du plan d'échantillonnage a mobilisé l'utilisation du logiciel R (Version 3.5.1, © 2018 The R Foundation of Statistical Computing) ainsi que du logiciel de Système d'Information Géographique, QGIS. Les graphiques présentés ont été réalisé à l'aide des fonctions intégrées de base à R ainsi que le package ggplot2 pour la plupart. Certains ont été retouchés avec l'éditeur d'image GIMP pour proposer d'autres mises en forme, c'est le cas du graphique (**piechart**) qui est composé d'un graphique créé sur R auquel j'ai intégré la forme de Mayotte sur GIMP. Le figure 12 a été réalisé sur tableur Excel.

Le traitement des données issues de la campagne de prélèvement a également été effectué avec le logiciel R. Le package rstatix a été utilisé dans l'étude statistique en complément des fonctions intégrées dans R.

La carte a été créée sur le logiciel SIG QGIS.

Des packages ont été mobilisés ponctuellement, notamment pour la manipulation, le nettoyage des données ainsi que l'ouverture des différents de documents. Parmi ces packages, on retrouve entre autres les packages devtools, reshape2, stringr, readxl.

III. Résultats

A. Plan d'échantillonnage et adaptations

a. Répartition des points

Les points ont été répartis entre les catégories de formations superficielles et les occupations afin de récolter le plus possible de références variés sur les sols mahorais.

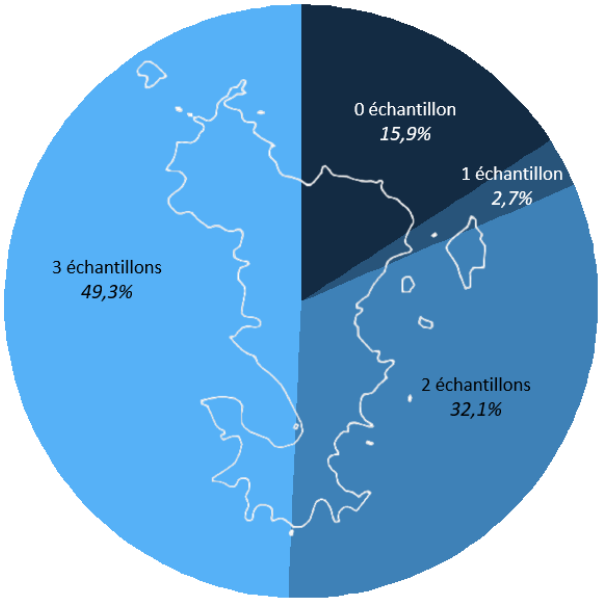


Figure 10 : Diagramme des surfaces échantillonnées (croisement formations superficielles-occupation du sol)

Le plan d'échantillonnage est assez complet avec plus de 80% de la surface de l'île qui a au moins un échantillon représentatif de son croisement formation superficielle-occupation de sol. Presque 50% de la surface de l'ile a 3 prélèvements représentatifs.

Toujours dans l'optique de récolter des données pour les formations superficielles les plus représentatives, ce graphique représente la proportion des sols à avoir au moins une valeur de référence pour leur croisement formations superficielles-occupation de sol. Ainsi les croisements représentant entre 4 et 7% de la surface de Mayotte ont eu pour plus de 75% d'entre eux trois prélèvements de mêmes caractéristiques. La surface restante a eu 2 prélèvements.

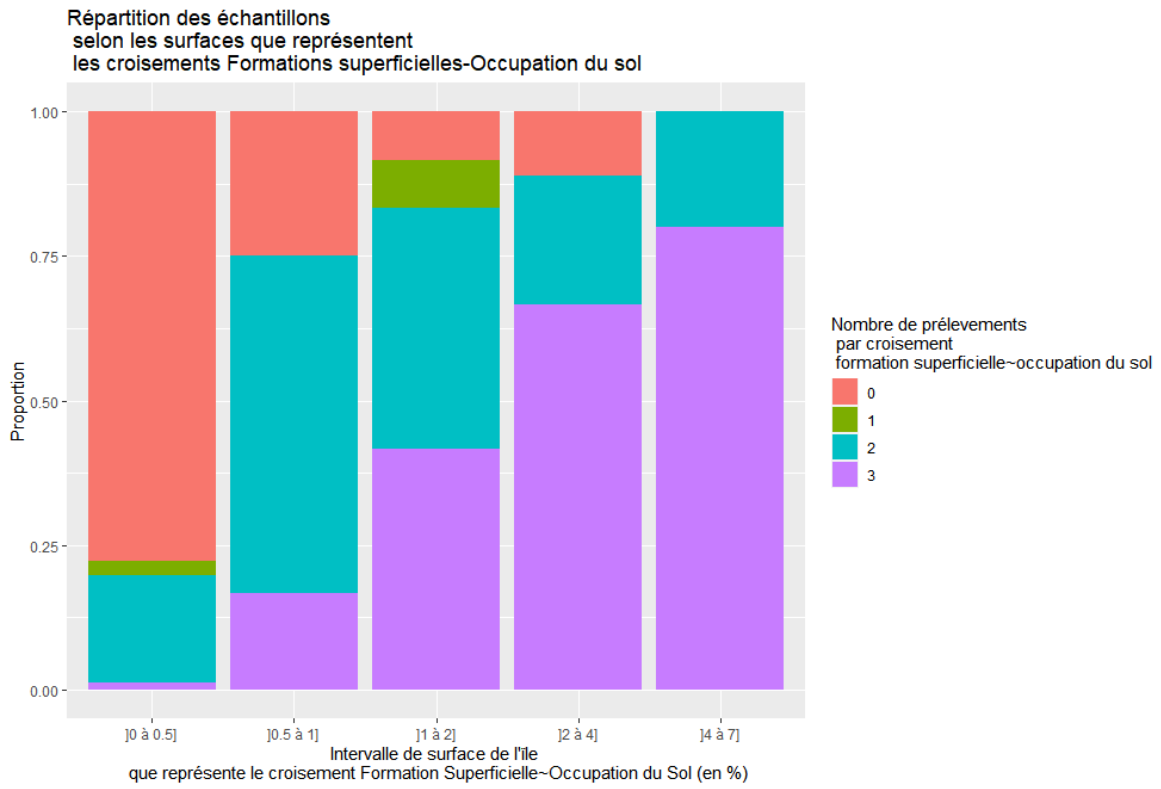


Figure 11: Diagramme des répartitions d'échantillons selon les surfaces de croisements

Le travail du plan d'échantillonnage a été principalement de dispatcher les prélèvements potentiels pour les différentes formations superficielles selon plusieurs critères évoqués plus tôt. Cependant un effort a aussi été fait pour représenter le plus possible la diversité des occupations de sols de manière cohérente. Les critères retenus sont bien tout d'abord la surface que représente cette occupation sur Mayotte, mais aussi si les résultats sont susceptibles d'être mobilisables pour déduire la valeur d'une autre occupation moins échantillonnée.

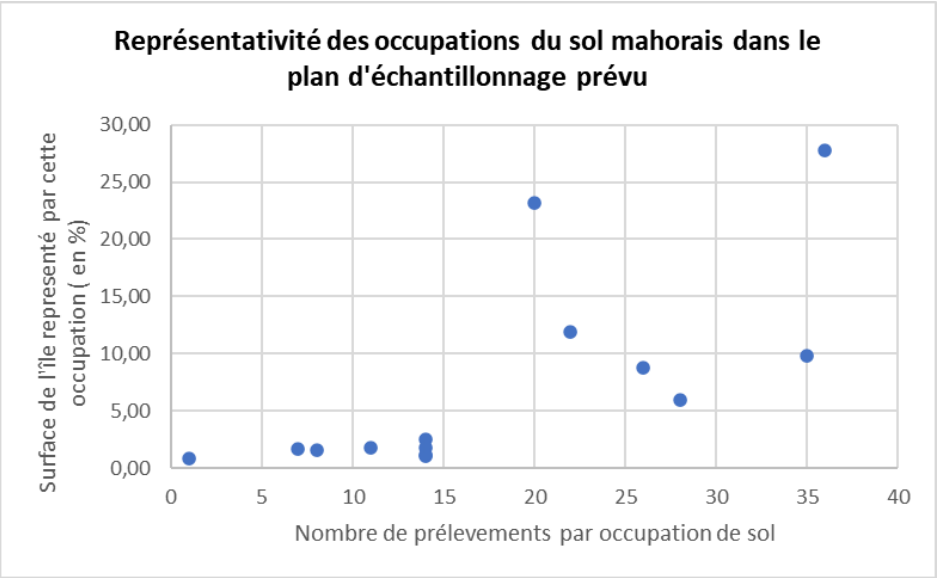


Figure 12 : Nuage de points (Nombre de prélèvements prévus en fonction de la surface de l'occupation de sol)

b. Présentation du plan d'échantillonnage

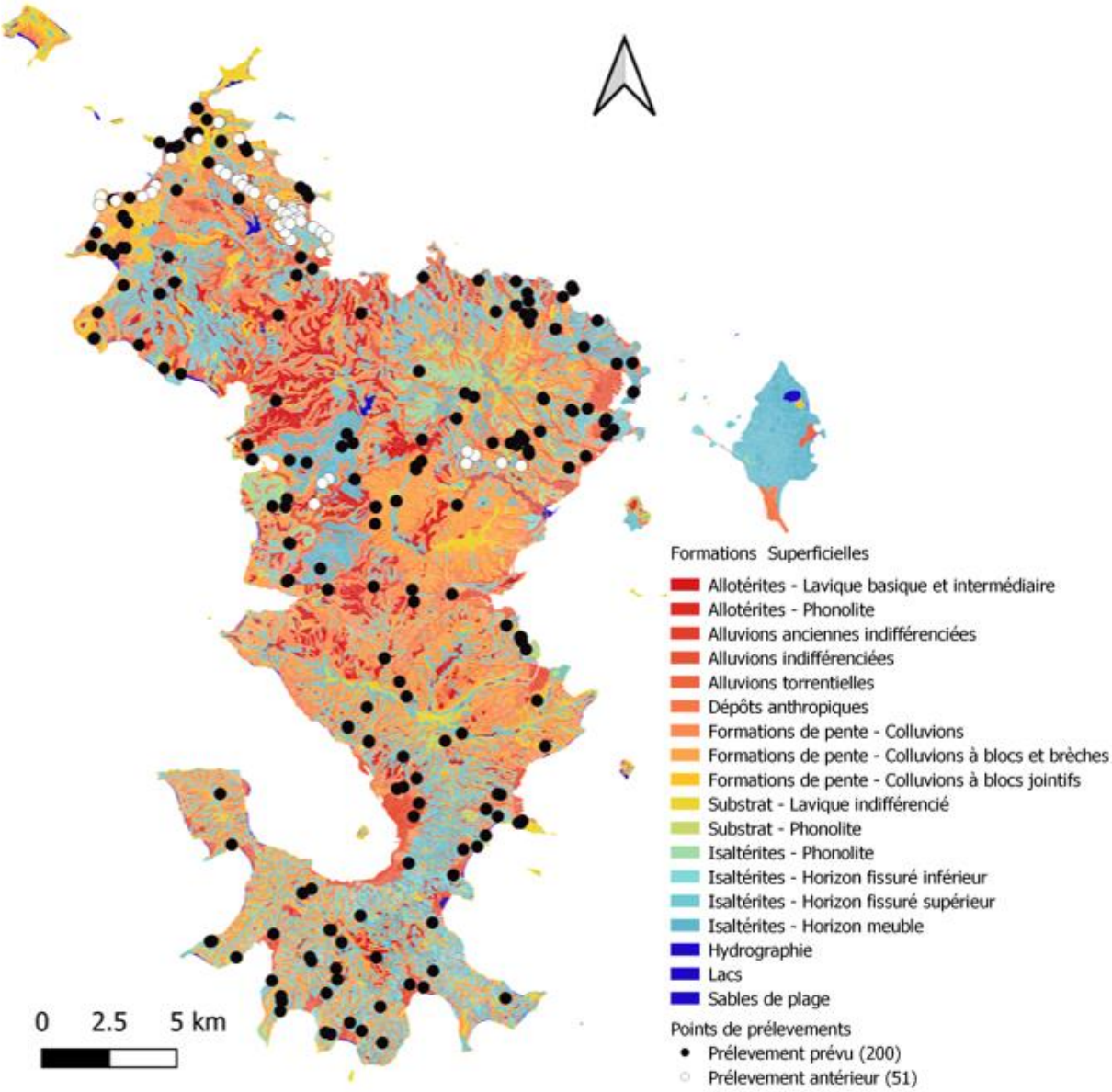


Figure 13 : Plan d'échantillonnage (prévu initialement)

Pour ce plan d'échantillonnage, on obtient une distribution assez homogène des points prévus sur l'île. Malheureusement les terres intérieures de l'île sont moins représentées, car plus difficile d'accès. On observe une grande densité de points dans le Nord-Ouest de l'île. Ces points ont été prélevés par Valentin LANDEMAINE, ils sont antérieurs au stage. Ce sont d'ailleurs sur ces points que le protocole d'étude de l'érodibilité mobilisé pour ce stage a été testé. Petite Terre, l'île à l'Est de la plus grande partie de Mayotte, n'a pas été prévu pour des échantillons, à cause de l'accessibilité moins évidente.

c. Nouveau plan d'échantillonnage

Finalement, le plan d'échantillonnage n'a pas pu être réalisé complétement. Il y a eu 168 prélèvements au lieu des 200 prévus. Certaines zones n'étaient pas accessibles, le temps a manqué donc il y a dû avoir adaptation sur place.

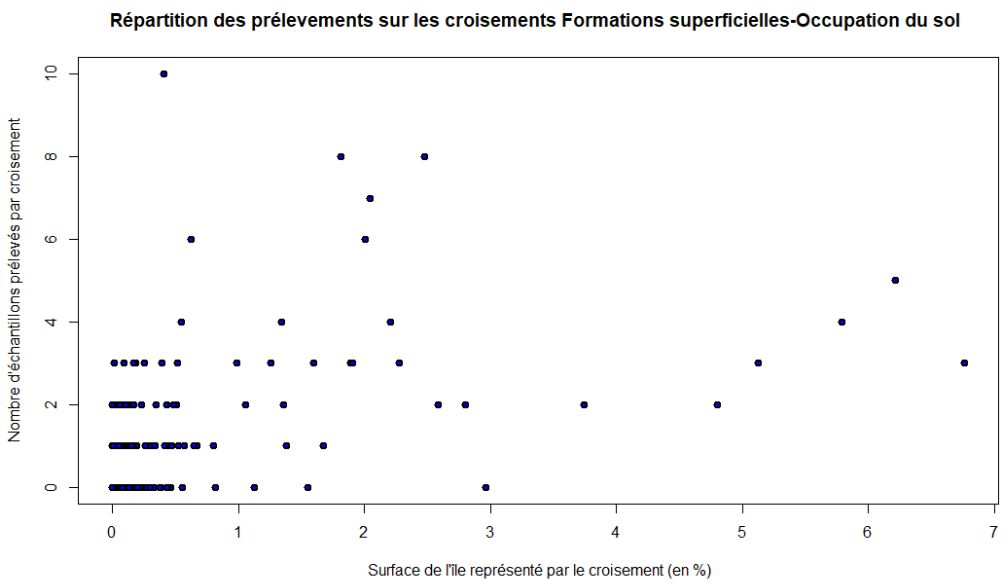


Figure 14 : Nuage de points (Répartition des prélèvements sur les croisements formations superficielles-occupation du sol)

Une des principales différences du plan d'échantillonnage réalisé par rapport à celui prévu initialement, est la distribution des points par croisement Formations Superficielles-Occupation du sol. Des croisements sont beaucoup échantillonnés, d'autres beaucoup moins, la répartition est moins homogène. De nombreuses formations de petites tailles ont été aussi échantillonnées en grand nombre, c'est le cas pour un croisement prélevé 10 fois pour une surface inférieure à 1% de l'île de Mayotte.

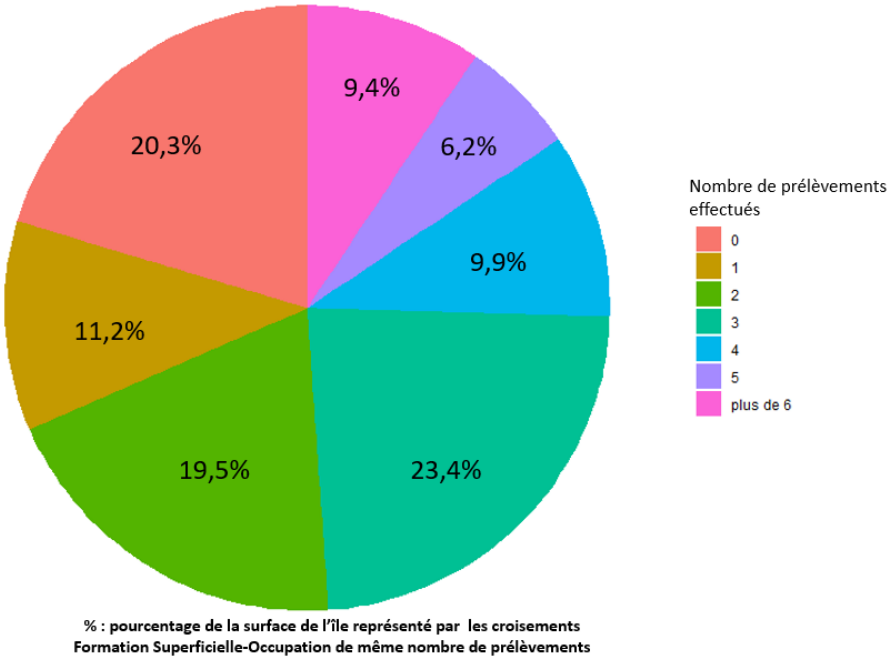


Figure 15: Pourcentage de la surface de l'île représenté par des prélèvements

On a un plus grand nombre de croisement qui sont non-échantillonnés, avec 20% de la surface de l'île sans valeur représentative. La distribution des prélèvements est très différente.

B. Etude des résultats des formations superficielles

a. Distribution des résultats

Pour débuter une analyse statistique et déployer des tests statistiques valables, une analyse de la distribution des données a dû être faite. Pour cela, les courbes de densités ont été tracées et un test de Shapiro a été effectué sur les proportions de terre fine récoltée à l'issue des deux traitements effectués sur les prélèvements de sol.

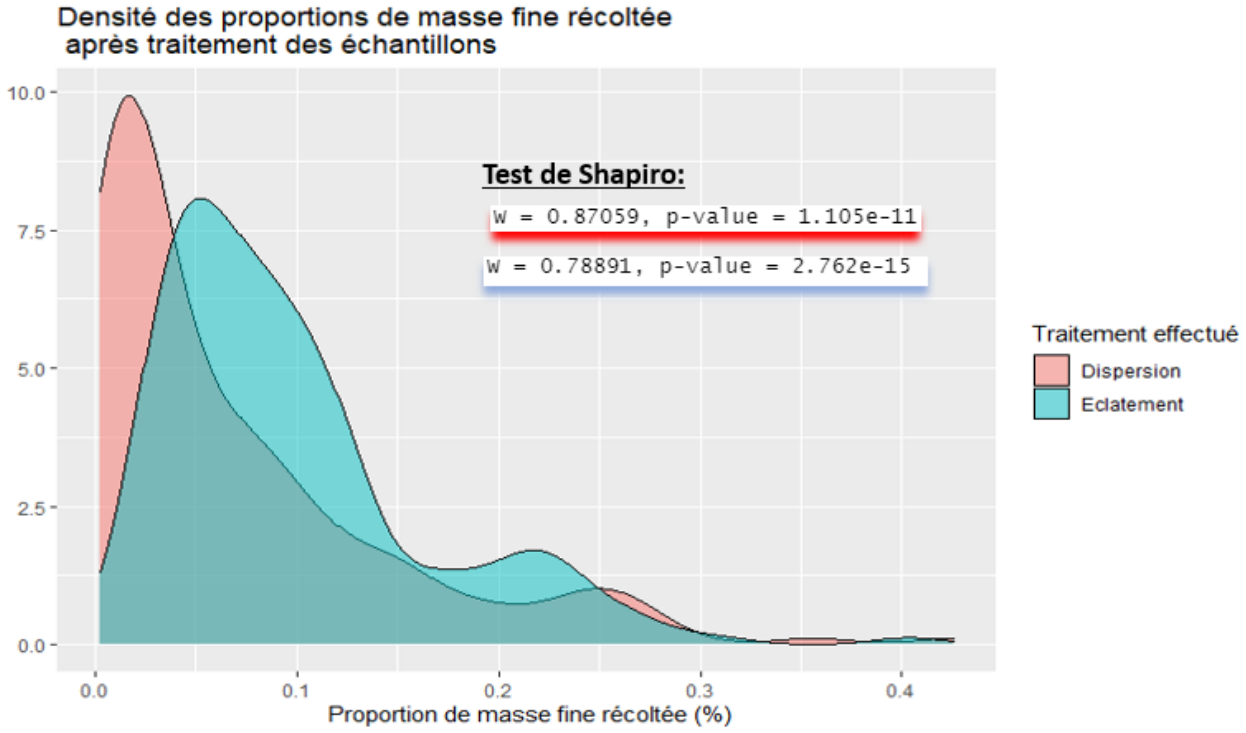


Figure 16: Courbes de densité des résultats des deux traitements

On ne retrouve pas chez les deux courbes de densité l'allure gaussienne caractéristique d'une distribution normale. Cela est confirmé par les tests de Shapiro dont ressortent des valeurs de p-value largement inférieure à 0.05. L'hypothèse Ho du test, qui est celle d'une distribution normale des données, est rejetée.

b. Statistique descriptive sur les résultats des deux traitements

On se penche alors sur les résultats globaux aux deux traitements :

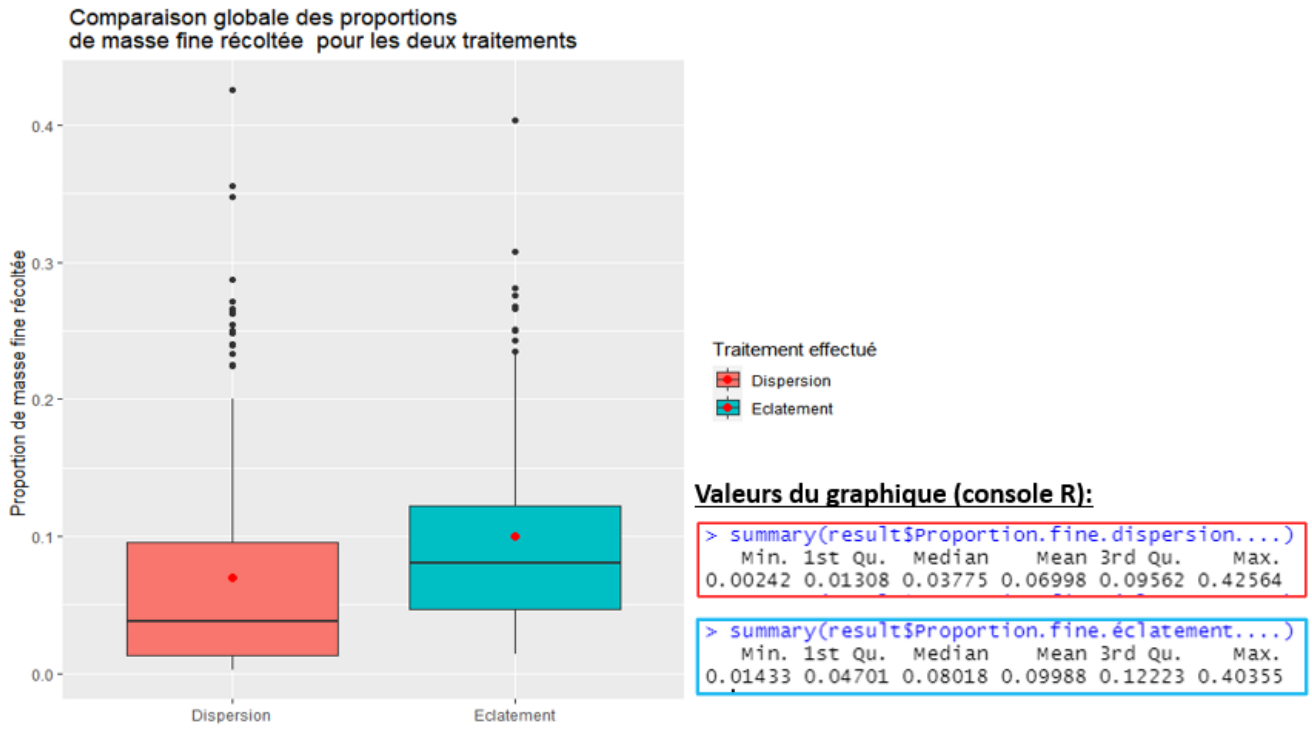


Figure 17 : Comparaison résultats des deux traitements

Comme attendu, le traitement avec agitation (éclatement) est globalement plus destructif sur les échantillons. Malgré le fait qu'on est enlevé 25 prélèvements jugé suspects à cause de leurs valeurs extrêmes de masse fine récoltée, les amplitudes de valeurs sont très importantes. On a malgré tout des écarts interquartiles identiques. On retrouve pour les deux traitements, 75% des résultats dans un intervalle inférieur à 9% de masse fine après traitement. Si on se repenche sur les densités (figure 16), il semblerait à première vue que le traitement par humectation rapide soit plus discriminant pour les échantillons sensibles à l'érosion. On observe un grand pic d'échantillons plus résistants avec des valeurs faibles de masse fine récoltée puis une pente plus douce et régulière de la courbe de densité pour les valeurs plus importantes. Les résultats du traitement dispersion sont plus regroupés pour les fortes proportions de masse récoltées. Cette supposition sera à vérifier après l'étude plus poussée des résultats par catégories de formations superficielles.

c. Intérêts et relations entre les deux traitements effectués

Afin de mieux cerner les comportements des échantillons de sols aux deux traitements, le lien entre les résultats aux deux traitements a été étudié. L'intérêt est aussi de chercher comment il sera possible d'intégrer de manière cohérente les résultats des deux traitements dans la conception de catégories d'érodibilité.

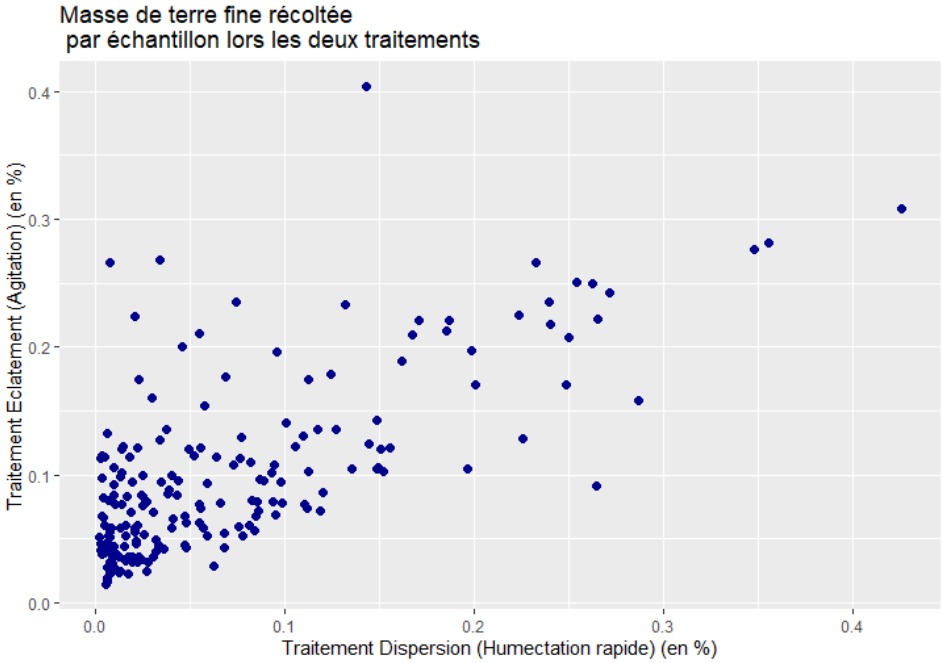
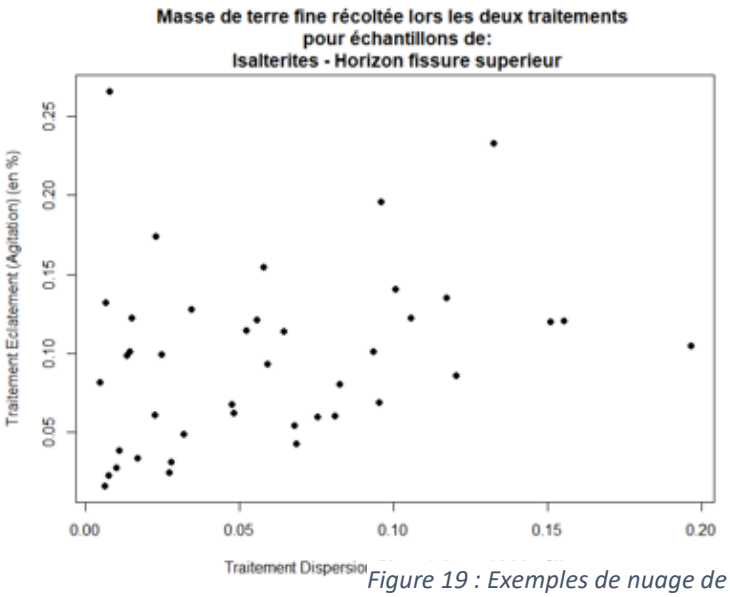


Figure 18 : Nuage de points (Résultats des deux traitements)

Sur ce graphique, tous les prélèvements analysés sont représentés. La forme globale du nuage de points pourrait laisser présager une corrélation plutôt linéaire entre les résultats des deux tests. On effectue deux tests de corrélation, le test de Kendall et le test de Spearman **(voir Annexe)**. Les p-value sont inférieures au seuil de 0.05, le coefficient de corrélation est donc significativement différent de zéro.

Visuellement il semblerait qu'un modèle linéaire puisse convenir. Des tests sur des modèles linéaires ont donc été effectués, mais ils ne peuvent être validés les résidus ne suivant pas une Loi Normale. Il n'y a donc pas de tendance claire qui se dessinent même s'il semble bien exister une corrélation. On peut alors tenter de travailler plus en détail sur les différentes formations superficielles, pour voir si des comportements communs aux traitements peuvent être dégagés.



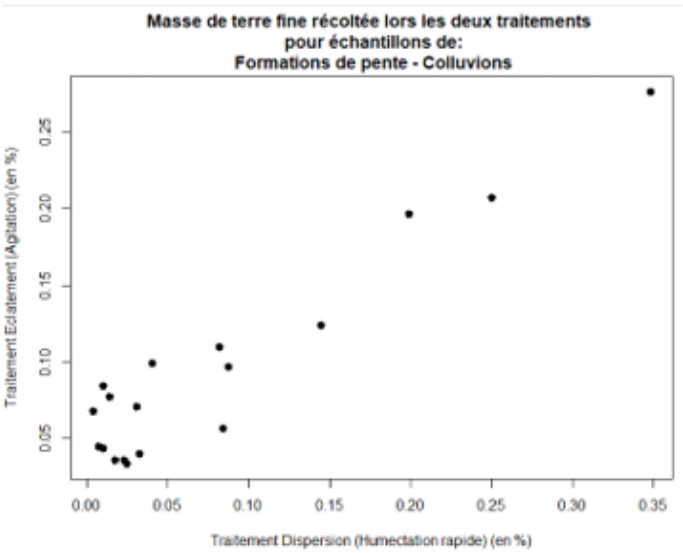


Figure 19 : Exemples de nuage de points (Isaltérites et Colluvions)

On retrouve une grande diversité de formes de nuages de points. Pour la plupart des grandes catégories de formations superficielles, les corrélations sont significatives mais il est impossible d'adapter un modèle simple qui correspond aux comportements observés. De plus, le nombre de prélèvements par catégorie étant très variable, certaines catégories qui présentent des corrélations significatives aux tests ne sont finalement pas assez échantillonnés pour donner du crédit à ces résultats. On effectue seulement les tests lorsqu'on a plus de 4 échantillons pour cette formation superficielle mais cela reste insuffisant. La très grande diversité de comportements aux seins de catégorie regroupant des formations censées être très proches confortent encore l'impossibilité de conclusion réelle. On tente une approche plus générale, en comparant pour les deux traitements par classement de moyenne de proportion fine récoltée les différentes catégories.

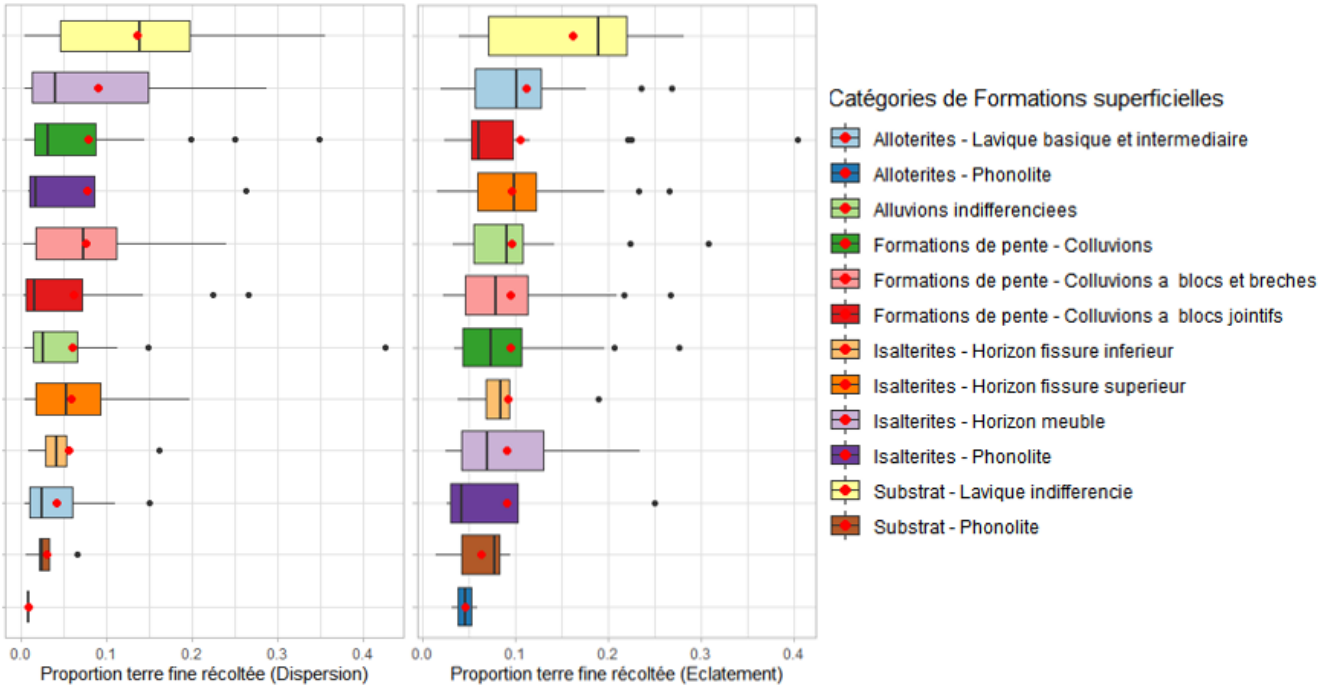


Figure 20: Boxplots des catégories de formations superficielles classées par la moyenne

Le classement n'est pas identique. On observe que les deux catégories les moins sensibles (Substrat-Phonolite et Allotérite Phonolite) restent les mêmes pour les deux traitements ainsi que la catégorie la plus sensible (Substrat lavique indifférencié). Les autres catégories bougent dans le classement.

Aux vues des comportements divers des différentes catégories de formations superficielles aux deux traitements, on a la confirmation de l'importance de la diversité des traitements sur les échantillons pour avoir une vision complète de la sensibilité des sols aux différents phénomènes érosifs.

C. Détermination des classes d'érodibilité

a. Utilisation du traitement d'humectation rapide

Pour déterminer des classes d'érodibilité, on compare sous formes de boxplots les différentes formations superficielles. Pour estimer la significativité des différences de valeurs entre formations superficielles, ont été effectué les tests Kruskal-Wallis et de Dunn. Aucune significativité ne ressort des tests (**Voir en Annexe**) et cela quel que soit le traitement. Nous sommes donc dans l'impossibilité de prouver une différence significative de sensibilité aux traitements des prélèvements de formations superficielles.

Pour définir des classes d'érodibilité, ce sont les donc les moyennes qui permettront de définir les classes d'érodibilité. Pour avoir une carte lisible et nuancée, les classes d'érodibilité devront représenter des surfaces équilibrées. Le temps de travail restant étant très limité pour poursuivre l'analyse statistique, le choix de se baser uniquement sur les résultats du traitement par humectation rapide (Dispersion) pour définir les classes d'érodibilité a été retenu. Ce traitement a été choisi car il est le plus simple à mettre en œuvre, on considère qu'il est donc plus facilement reproductible de manière rigoureuse. Aussi c'est le traitement préconisé par la norme ISO s'il faut n'en conserver qu'un. (ANON. [sans date]).

On part des catégories de formations superficielles pour créer les classes d'érodibilité. On garde ce niveau de catégorisation pour définir les classes d'érodibilité. Les catégories ont été analysées de manière plus détaillée (voir boxplot annexe). Cependant les formations qui présentent des différences de valeur moyenne pour la proportion de matière fine récoltée sont sous-échantillonnée (moins de quatre prélèvements), le choix a été fait de ne pas les dissocier.

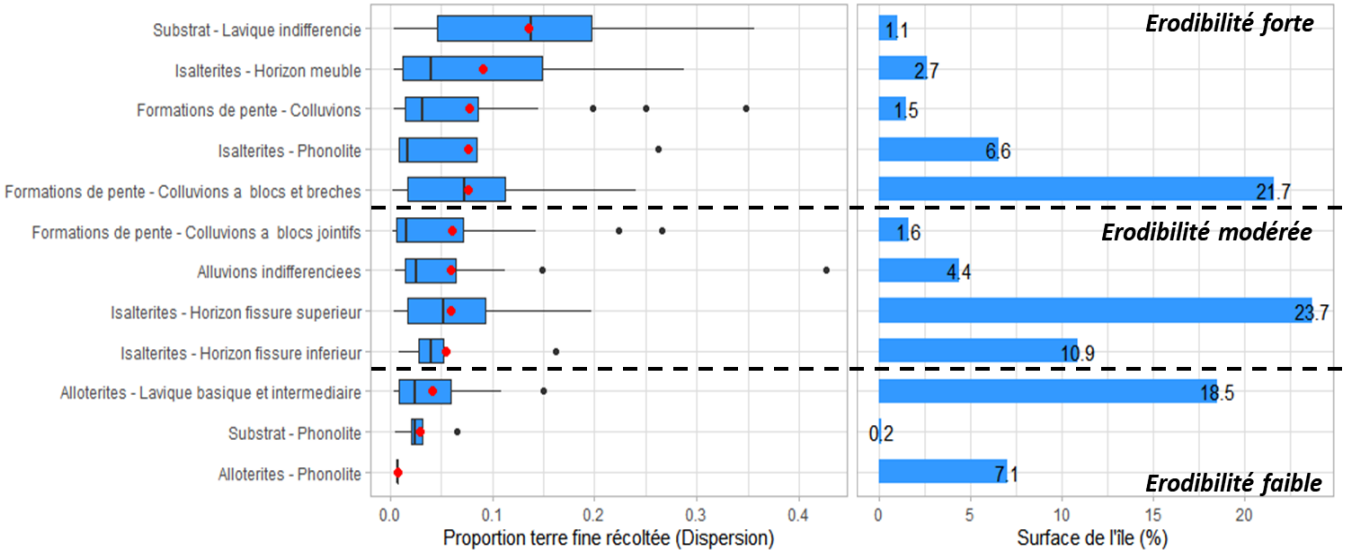


Figure 21 : Graphique double pour élaboration des classes d'érodibilité

Cela nous fait donc 33.6% des sols mahorais qui nous intéressent avec une forte érodibilité, 40.6% avec une érodibilité modérée et 25.8% avec une érodibilité faible.

b. Influence de l'occupation du sol sur l'érodibilité

Sur la même démarche que pour l'étude des formations superficielles, pour chaque formation superficielle a été tracé des boxplots de toutes les occupations du sol (exemple en annexe). Les tests de Kruskal Wallis et de Dunn ont été fait pour tester la significativité des différences entre occupation. Malheureusement, aucun niveau de significativité n'en ressort. Le temps manquant pour approfondir les recherches, la décision a alors été prise d'écarter ce facteur pour les classes d'érodibilité. Il aurait été vraiment intéressant de creuser plus dans les résultats, mais un facteur aurait de toute façon limité la pertinence de l'intégration de l'occupation dans la carte de l'érodibilité : la pertinence de la couche SIG d'occupation des sols qui a été faite par imagerie satellite.

D. Carte de l'érodibilité des sols mahorais

a. Présentation de la carte d'érodibilité

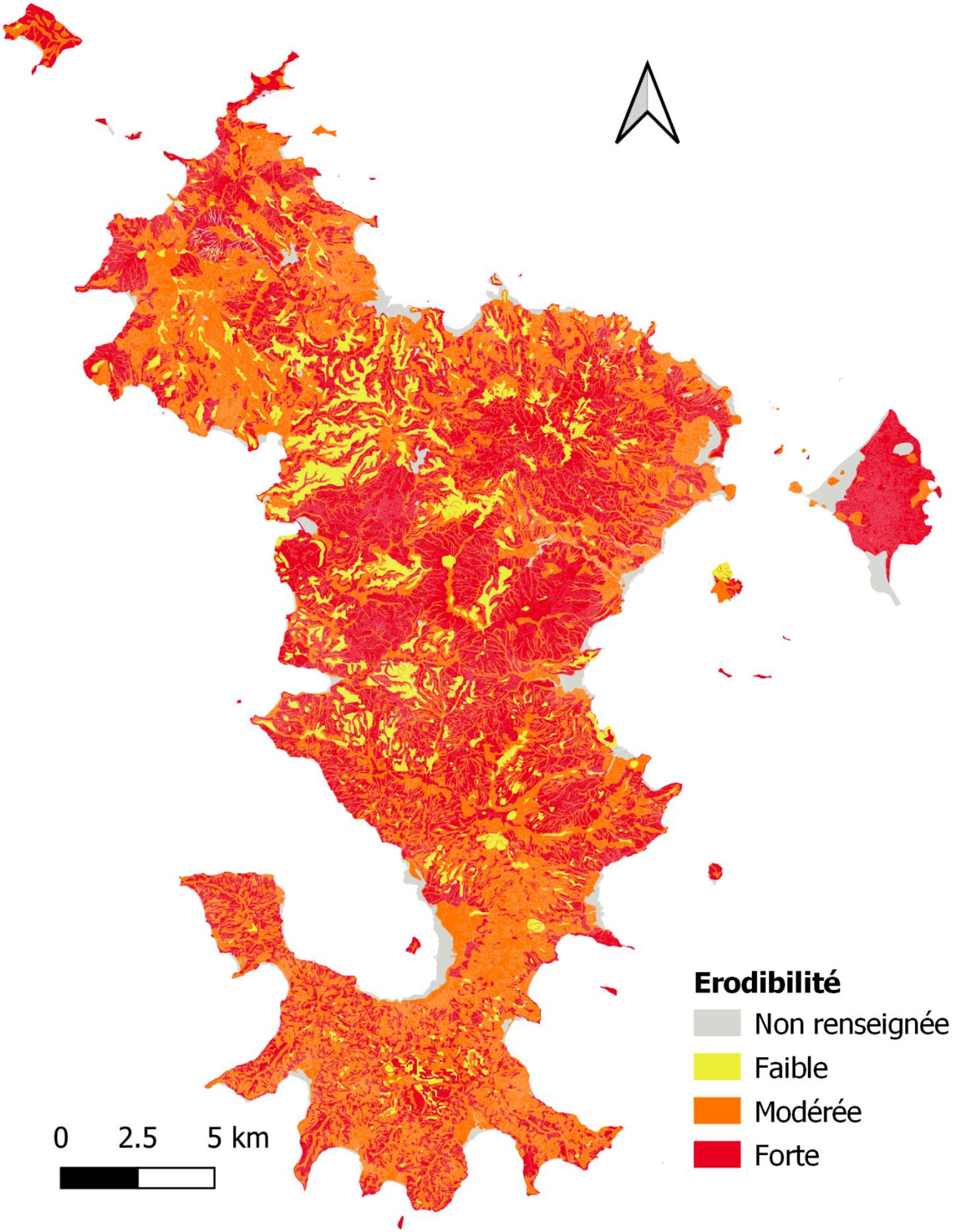


Figure 22 : Carte de l'érodibilité des sols de Mayotte

Dans la légende, les formations à l'érodibilité « Non renseignée » sont les formations superficielles non pertinentes pour l'étude. On y retrouvera les plages, les points d'eaux et rivières. Les dépôts anthropiques n'ont pas été renseigné également car cette dénomination englobe beaucoup de type de dépôts très différents et que les données manquent. On aurait pu néanmoins considérer que ce sont des zones à grands risques érosifs, et donc supposer une érodibilité globale assez forte.

IV. Discussion

A. Protocole de mesure

N'ayant pas manipuler par moi-même, il est assez délicat pour moi de discuter de ce point sur le plan logistique. Malgré cela de nombreuses faiblesses sont ressorties. Le manque de matériel sur place pénalise évidemment le protocole. L'utilisation de l'eau au lieu de l'éthanol dans les traitements n'a pas pu empêcher la reformation des agrégats lors du séchage par exemple. Toujours sur le matériel, les tamis très peu nombreux et avec des maillages très grands n'ont pas permis une étude plus rigoureuse de la désagrégation. En effet le tamis disponible le plus petit était de 2mm contre 50µm dans la norme ISO.

C'est ce dernier détail qui a malheureusement contraint de mesurer la masse de terre fine et non le diamètre moyen pondéral des agrégats après désagrégation. La mesure de la masse ne peut suffire avec un tamis avec des mailles de 2mm pour une étude plus poussée de l'érodibilité. En effet, les particules peuvent être de tailles tellement variables en dessous de ce diamètre avec des différences vraiment significatives de comportement pour une vitesse de courant donnée. C'est ce qui est d'ailleurs illustré par le diagramme classique de Hjülstrom suivant.

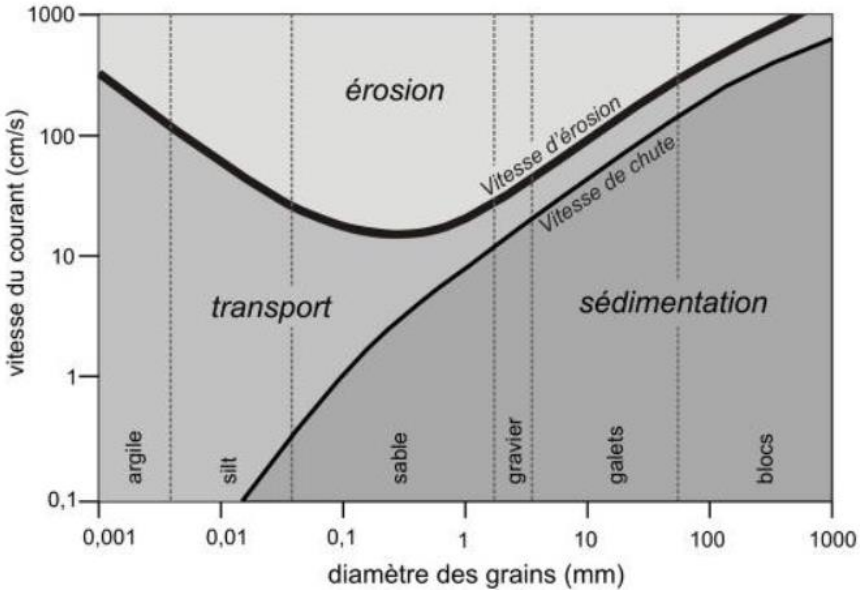


Figure 23 : Diagramme de Hjülstrom

Cependant le protocole a bien permis de produire rapidement de la donnée, ce qui était important au vu des délais raccourcis qui nous étaient impartis. En effet, 168 échantillons ont été traités dans un laps de temps très court.

B. Prélèvement sur le terrain

En utilisant les couches SIG pour déterminer les formations superficielles et les occupations de sol d'un prélèvement, il y a le danger que les couches ne soient pas exactes. En effet, même si l'occupation du sol a été bien renseignée sur la couche à un moment, elle peut rapidement changer et passer par exemple d'une forêt arbustive à une zone de production agricole. Il aurait été bénéfique de renseigner pour quelques échantillons un bref récapitulatif de l'occupation du sol environnante. En effet cela aurait permis en plus de vérifier la nature des échantillons, de faire une vérification de la pertinence des couches SIG.

Une des difficultés fut aussi parfois de replacer les échantillons correctement sur la carte. En effet certaines zones étant difficiles d'accès, des prélèvements ont été faits à proximité des routes. Parfois les données GPS se décalent et des prélèvements de sol peuvent être signalés en plein milieu d'une route asphaltée. Des résultats de traitement ont sans doute été rattachés à de mauvaises formations superficielles.

C. Détermination des classes d'érodibilité

Les classes d'érodibilité ont été finalement construites que sur la nature des sols. Or comme évoqué plus tôt dans l'état de l'art, une multitude de caractéristiques jouent un rôle important sur la résistance à l'érosion. Connecter la nature des formations superficielles et leur environnement par l'occupations du sol semblait être une bonne idée pour une description plus spécifique. En effet on peut considérer que l'occupation du sol donne aussi des informations sur l'historique du sol, qui peut fournir des éléments de réponse pour décrire la sensibilité à l'érosion. Un exemple probant est celui des terres agricoles, qui selon la cultures induit des techniques culturales qui impactent sur le long terme la texture des sols. Par exemple, la culture du manioc se fait parfois sans paillage, pour éviter l'accès aux plantes des rongeurs. Le sol nu est alors fragilisé car on lui apporte moins de matière organique et qu'il est moins protégé des éléments climatiques. Mais on peut aussi retrouver de la culture du manioc en association avec des plantes de couverture du sol comme la courge, la patate douce, le niébé. (Chariot 2019)

Cela soulève un autre problème, la nomination des occupations de sol. Quelques cultures sont effectivement recensées dans la couche SIG selon l'intensivité du système et la densité de la culture. Mais cela ne peut pas prendre en compte les techniques culturales de l'agriculteur, qui donnent beaucoup plus d'informations intéressantes sur l'état de son sol. La grande diversité des pratiques se rajoute encore comme un élément difficile à appréhender dans ce type de projet à grande échelle, mais qui a une grande importance localement.

Un seul traitement a été utilisé pour la constitution des classes d'érodibilité. Cela n'est sans doute pas suffisant pour décrire la sensibilité d'un sol aux mécanismes divers qui composent l'érosion hydrique. Comme on a pu le voir, les comportements des échantillons sur les deux traitements sont très variés. Les sols peuvent être plus sensible à un processus plutôt qu'à un autre, il aurait donc été intéressant de lier le second traitement dans la constitution des classes d'érodibilité.

A l'origine, il était prévu par le plan d'échantillonnage de limiter à 3 le nombre d'échantillons traités par croisement. Cependant les échantillons réalisés présentaient parfois des résultats

après traitement beaucoup plus inégaux, et globalement la répartition était moins homogène. Cependant, au vu de la difficulté pour trouver des différences significatives, il aurait peut-être été plus judicieux de directement se focaliser sur quelques croisements représentatifs par formations superficielles puis de déduire le reste à partir des résultats.

V. Conclusion

L'évaluation de l'érodibilité d'un sol nécessite une étude poussée et approfondie si on désire pouvoir tirer des conclusions sur son comportement face aux différents mécanismes érosifs. Les facteurs qui rentrent en compte dans la capacité d'un sol à résister à l'érosion sont nombreux et couplés entre eux. Pour pouvoir extrapoler les résultats et décrire l'érodibilité des sols à l'échelle d'un territoire, peut être vaut-il mieux faire un peu abstraction de ces trop nombreux facteurs pour pouvoir avancer. S'affranchir des résultats d'un traitement et de l'influence de l'occupation des sols réduit la pertinence du modèle proposé. En effet cette étude ne permet pas de tirer de grandes conclusions sur l'érodibilité des formations superficielles, mais elle propose un modèle basé sur des données locales. Le protocole qui a été déployé n'est pas obsolète, même s'il est sans aucun doute perfectible. Dans un contexte d'urgence, il a permis dans des délais très courts de récolter beaucoup de données et d'assurer la production d'une carte d'érodibilité.

Mayotte est actuellement en pleine expansion démographique, ce qui se répercute sur les ressources de l'île. L'érosion intense des sols dans ce climat tropical humide met en péril la durabilité des systèmes agricoles mahorais, la sécurité des habitants et menace une richesse commune : le lagon. Les systèmes agricoles mahorais tendent à s'intensifier de plus en plus, se tournant souvent vers des techniques culturales moins protectrices que les techniques traditionnelles. Trouver des solutions pour augmenter l'autonomie alimentaire de cette l'île tout en évitant d'accélérer la perte de fertilité des sols est un véritable défi et une urgence.

Les outils, comme les cartes, qui aident à la compréhension et à la spatialisation des processus érosifs sont nécessaires pour réfléchir aux moyens de lutte adaptés, pour pouvoir les déployer et sont de formidables outils de communication. Un projet comme LESELAM 2, qui regroupe une diversité d'acteurs permet de sensibiliser les populations à plusieurs niveaux et de faire prendre conscience de leurs influences sur ces enjeux.

Bibliographie :

AGRESTE, 2016. « Le jardin mahorais »: modèle d'agroécologie, mais quel avenir ? septembre 2016. n° 68.

AGRESTE, 2018. L'agroforesterie à Mayotte. In : . avril 2018. n° 87.

AL-DURRAH, M. M. et BRADFORD, J. M., 1982. The Mechanism of Raindrop Splash on Soil Surfaces. In : *Soil Science Society of America Journal*. septembre 1982. Vol. 46, n° 5, pp. 1086-1090.

ANON., ISO 10930:2012(fr), Qualité du sol — Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau. In : [en ligne]. [Consulté le 23 mars 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10930:ed-1:v1:fr.

ANTOINE, P., 2002. Les lœss en France et dans le Nord-Ouest européen. In : *Revue Française de Géotechnique*. 2002. n° 99, pp. 3-21.

ANTONI, Véronique et DARBOUX, Frédéric, 2009. L'érosion des sols. In : *De la terre à la table* [en ligne]. [Consulté le 15 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01189811.

BINET, Thomas et GONNOT, Catherine, 2005. *Etude de l'érosion sur des plantations d'ananas à Moorea (Polynésie française)* [en ligne]. S.l. AgroParisTech. [Consulté le 03 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/305680784_Etude_de_l'erosion_sur_des_plantations_d'ananas_a_Moorea_Polynesie_francaise.

BISSONNAIS LE, 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. In : *Étude et Gestion des Sols*. 1995. pp. 13.

BISSONNAIS LE, Yves, 2000. *Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion : la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés* [en ligne]. 2000.. [Consulté le 26 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/41936361_Analyse_experimentale_des_mecanismes_d'erosion_la_degradation_structurale_superficielle_et_le_detachement_des_particules_des_sols_cultives.

BISSONNAIS, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. In : *European Journal of Soil Science*. décembre 1996. Vol. 47, n° 4, pp. 425-437.

BRGM, 2002. *Projet « Risques naturels et érosion à Mayotte : résultats d'année 1 »*. juillet 2002.

BRGM, 2013. *Notice de la carte géologique de Mayotte*. Juin 2013.

BRGM, 2016. *Projet LESELAM(Lutte contre l'érosion des Sols et l'Envasement du Lagon à Mayotte) Rapport Avancement n°2*. Décembre 2016.

BRGM, 2017. *EROMAY Erosion Mayotte : Caractérisation, cartographie et dynamique des sols*. Novembre 2017.

CHARIOT, Agathe, 2019. *Place et rôle de l'activité agricole dans la vallée de Doujani : Réflexions sur son intégration dans l'aménagement d'une zone d'aménagement concertée (ZAC)*. S.l. : Montpellier SupAgro.

CIRAD, 2006. *Fiche technique : La lutte anti érosive en zone de culture à Mayotte*. Décembre 2006. S.l. : s.n.

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 2011. *Stratégie thématique en faveur de la protection des sols* [en ligne]. Bruxelles. [Consulté le 25 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3Al28181.

FAO, 2015. Les sols : une ressource non renouvelable. In : [en ligne]. 2015. [Consulté le 13 juin 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/fr/c/278960/.

FAO, 2016. *Etat des Ressources en Sols dans le Monde (Résumé technique)* [en ligne]. Janvier 2016. [Consulté le 25 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/324056184_Etat_des_Ressources_en_Sols_dans_le_Monde_Resume_technique.

GIS SOL, 2011. *L'état des sols de France* [en ligne] [Consulté le 25 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/331682443_L'etat_des_sols_de_France_Gis_Sol_2011_L'etat_des_sols_de_France_Groupement_d'interet_scientifique_sur_les_sols_188_p.

HENIN, S., MONNIER, G. et COMBEAU, A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. In : *Annales Agronomiques* [en ligne]. 1958. n° 1. [Consulté le 26 mars 2020]. Disponible à l'adresse : https://prodinra.inra.fr/?locale=es#!ConsultNotice:109666.

INSEE, 2017. *Insee Analyses : Mayotte* [en ligne]. Décembre 2017. Disponible à l'adresse : insee.fr/fr/statistiques/3284395?sommaire=4199393#consulter-sommaire.

J.M, Pauwels, D, Gabriels et G, Eeckhout, 1976. Evaluation of different criteria to assess the stability of the soil surface. In : *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit Gent* [en ligne]. 1976. [Consulté le 14 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BE19770159730.

LE BISSONNAIS, Yves, 1988. Comportement d'agrégats terreux soumis à l'action de l'eau : analyse des mécanismes de désagrégation. In : *Agronomie*. 1988. Vol. 8, n° 10, pp. 915-924.

LEGUÉDOIS, Sophie, 2003. *Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés* [en ligne]. phd thesis. : Université d'Orléans. [Consulté le 26 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00516390.

LESELAM . In : [en ligne]. [Consulté le 10 mars 2020 a]. Disponible à l'adresse : https://www.leselam.com/.

LESELAM, Présentation LESELAM 2 (2018-2020). In : *leselam.com* [en ligne].[Consulté le 5 février 2020 b]. Disponible à l'adresse : https://www.leselam.com/objectifs.

MATHIEU, Clément et LOZET, Jean, 2011. *Dictionnaire encyclopédique de science du sol* [en ligne]. Editions Tech&Doc. Paris : [Consulté le 25 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.lavoisier.fr/livre/agriculture/dictionnaire-encyclopedique-de-science-du-sol/mathieu/descriptif-9782743013196.

METEO FRANCE, 2010. Pluviométrie - Pluies extrêmes à Mayotte. In : [en ligne]. 2010. [Consulté le 9 février 2020]. Disponible à l'adresse : http://pluiesextremes.meteo.fr/mayotte/Pluviometrie.html.

METEO FRANCE. CLIMAT MAYOTTE - Description du climat de Mayotte par Météo-France. In : [en ligne]. [Consulté le 9 février 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.meteofrance.yt/climat/description-du-climat.

MINISTÈRE DES OUTRE-MER, 2016. Mayotte - Géographie & climat |. In : [en ligne]. 2016. [Consulté le 9 février 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.outre-mer.gouv.fr/mayotte-geographie-climat.

MONTIER, Cécile, DAROUSSIN, Joël et LE BISSONNAIS, Yves, 1998. *Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France*. Orléans : Institut français de l'environnement (IFEN).

NEHLIG, P., LACQUEMENT, F., BERNARD, J., AUDRU, J-C, CAROFF, M., DEPARIS, J., JAOUEN, T., PELLETER, A-A., PERRIN, J., PROGNON, C. et VITTECOQ, B., 2013. *NOTICE EXPLICATIVE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE MAYOTTE À 1/30 000* [en ligne]. Orléans : BRGM. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/profile/Pierre_Nehlig/publication/292607286_NOTICE_EXPLICATIVE_DE_LA_CARTE_GEOLOGIQUE_MAYOTTE_A_130_000/links/5ed8b0d4299bf1c67d3bd1f8/NOTICE-EXPLICATIVE-DE-LA-CARTE-GEOLOGIQUE-MAYOTTE-A-1-30-000.pdf.

PEIGNE, Joséphine, 2013. *Module UVED : Processus écologiques - Érosion hydrique* [en ligne]. 2013. [Consulté le 26 août 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.supagro.fr/ress-pepites/Opale/ProcessusEcologiques/co/Erosion.html.

PROFFITT, A. P. B., ROSE, C. W. et HAIRSINE, P. B., 1991. Rainfall Detachment and Deposition: Experiments with Low Slopes and Significant Water Depths. In: *Soil Science Society of America Journal*. 1991. Vol. 55, n° 2, pp. 325-332. DOI 10.2136/sssaj1991.03615995005500020004x.

RAUNET, Michel, 1992. *Ile de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien) : les facteurs de l'érosion des terres et de l'envasement du lagon*. Montpellier. CIRAD-CA.

ROOSE, Eric, 1994. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* [en ligne]. Rome : FAO. [Consulté le 26 août 2020]. Bulletin Pédologique de la FAO, 70. ISBN 978-92-5-203451-3. Disponible à l'adresse : http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:41504. Centre IRD de Bondy

ROOSE, Eric, 2010. La lutte antiérosive conventionnelle en fonction des processus et des facteurs de l'érosion hydrique. In : *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc*. IRD Editions. Marseille

ROOSE, Eric, SABIR, Mohamed et LAOUINA, Abdellah, 2010. *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes* [en ligne]. S.l. : IRD Éditions. [Consulté le 25 août 2020]. ISBN 978-2-7099-1683-7. Disponible à l'adresse : http://books.openedition.org/irdeditions/294.

SHAINBERG, I., 1992. Chemical and mineralogical components of crusting. In : *Advance in Soil Science. Soil crusting: physical and chemical processes*.

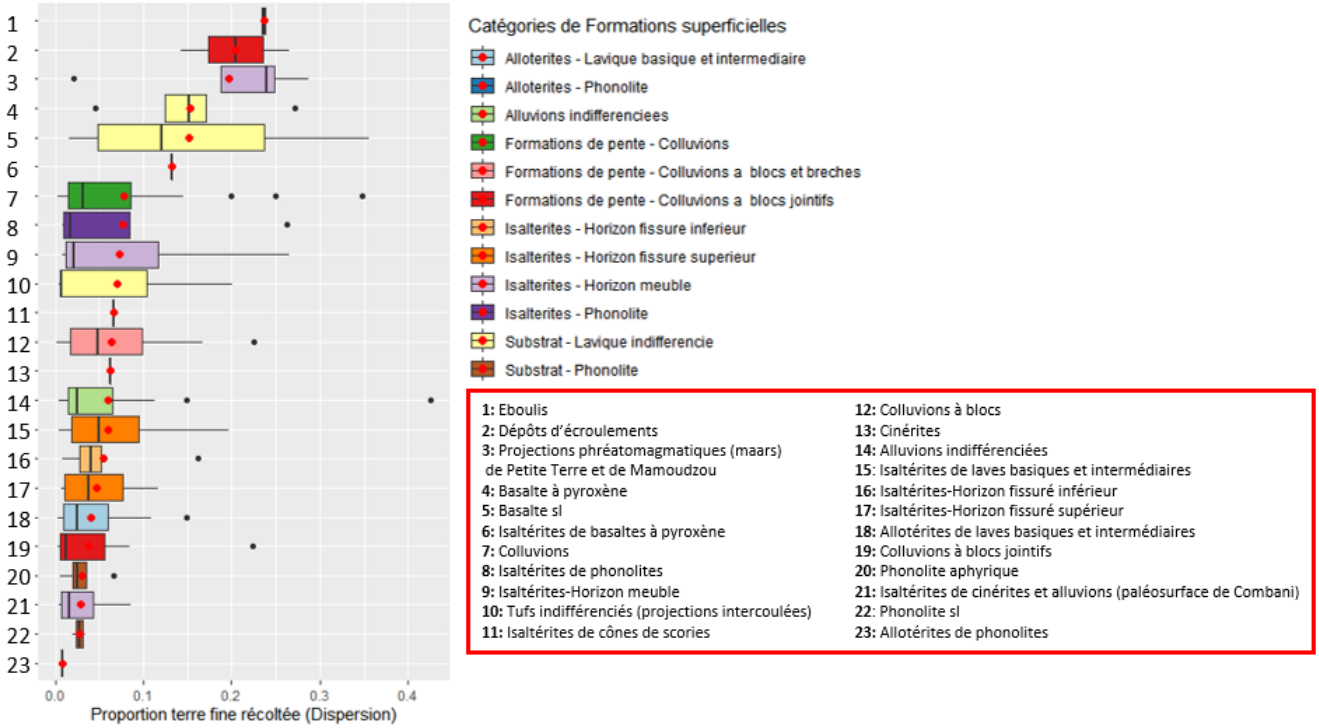
THIETRY, Claire, 2017. *Quantification des flux sédimentaires sur les bassins versants de Mayotte*.

Annexe

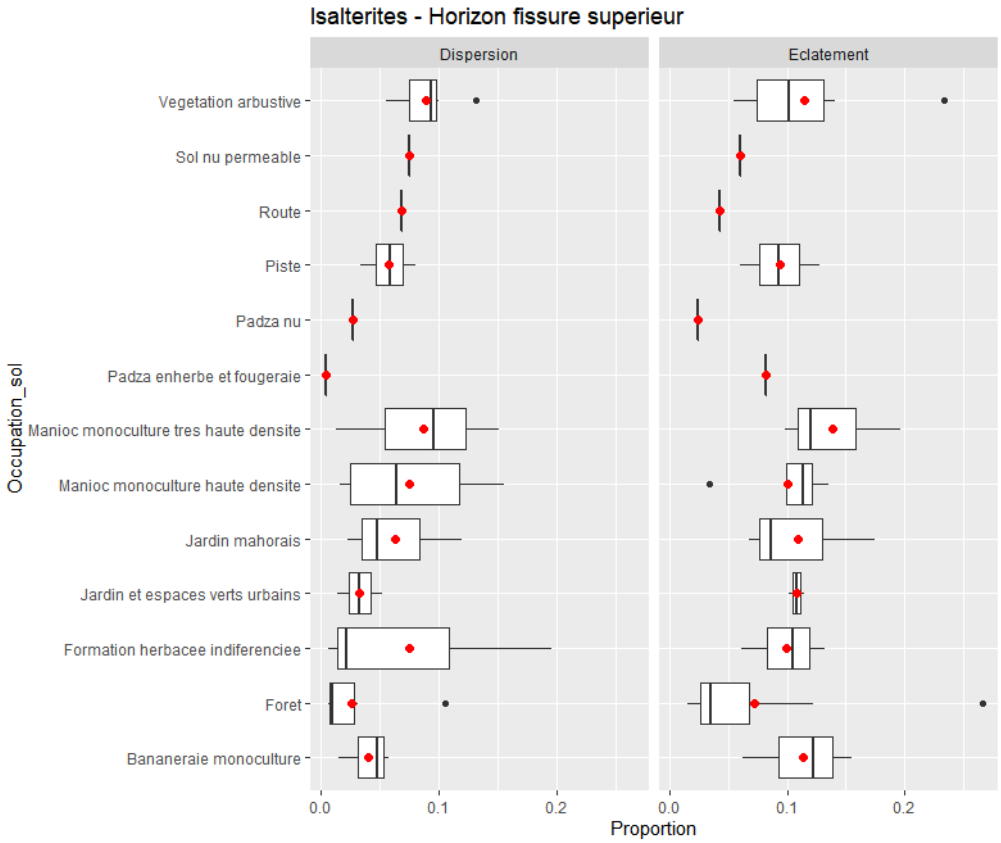
Test de corrélation Code R

```
> cor.test(result$Proportion.fine.dispersion....,result$Proportion.fine.éclatement....,method="kendall")

        Kendall's rank correlation tau

data:  result$Proportion.fine.dispersion.... and result$Proportion.fine.éclatement....
z = 9.2161, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true tau is not equal to 0
sample estimates:
      tau
0.4498468

> cor.test(result$Proportion.fine.dispersion....,result$Proportion.fine.éclatement....,method="spearman")

        Spearman's rank correlation rho

data:  result$Proportion.fine.dispersion.... and result$Proportion.fine.éclatement....
S = 429928, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
      rho
0.6239044


[1] "Isalterites - Horizon fissure superieur"

        Kendall's rank correlation tau

data:  result$Proportion.fine.dispersion....[nbr] and result$Proportion.fine.éclatement....[nbr]
T = 515, p-value = 0.01822
alternative hypothesis: true tau is not equal to 0
sample estimates:
      tau
0.2560976


        Spearman's rank correlation rho

data:  result$Proportion.fine.dispersion....[nbr] and result$Proportion.fine.éclatement....[nbr]
S = 7584, p-value = 0.03049
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
      rho
0.3393728


[1] "Formations de pente - Colluvions"

        Kendall's rank correlation tau

data:  result$Proportion.fine.dispersion....[nbr] and result$Proportion.fine.éclatement....[nbr]
T = 115, p-value = 0.002986
alternative hypothesis: true tau is not equal to 0
sample estimates:
     tau
0.503268


        Spearman's rank correlation rho

data:  result$Proportion.fine.dispersion....[nbr] and result$Proportion.fine.éclatement....[nbr]
S = 320, p-value = 0.003062
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
      rho
0.6697626
```

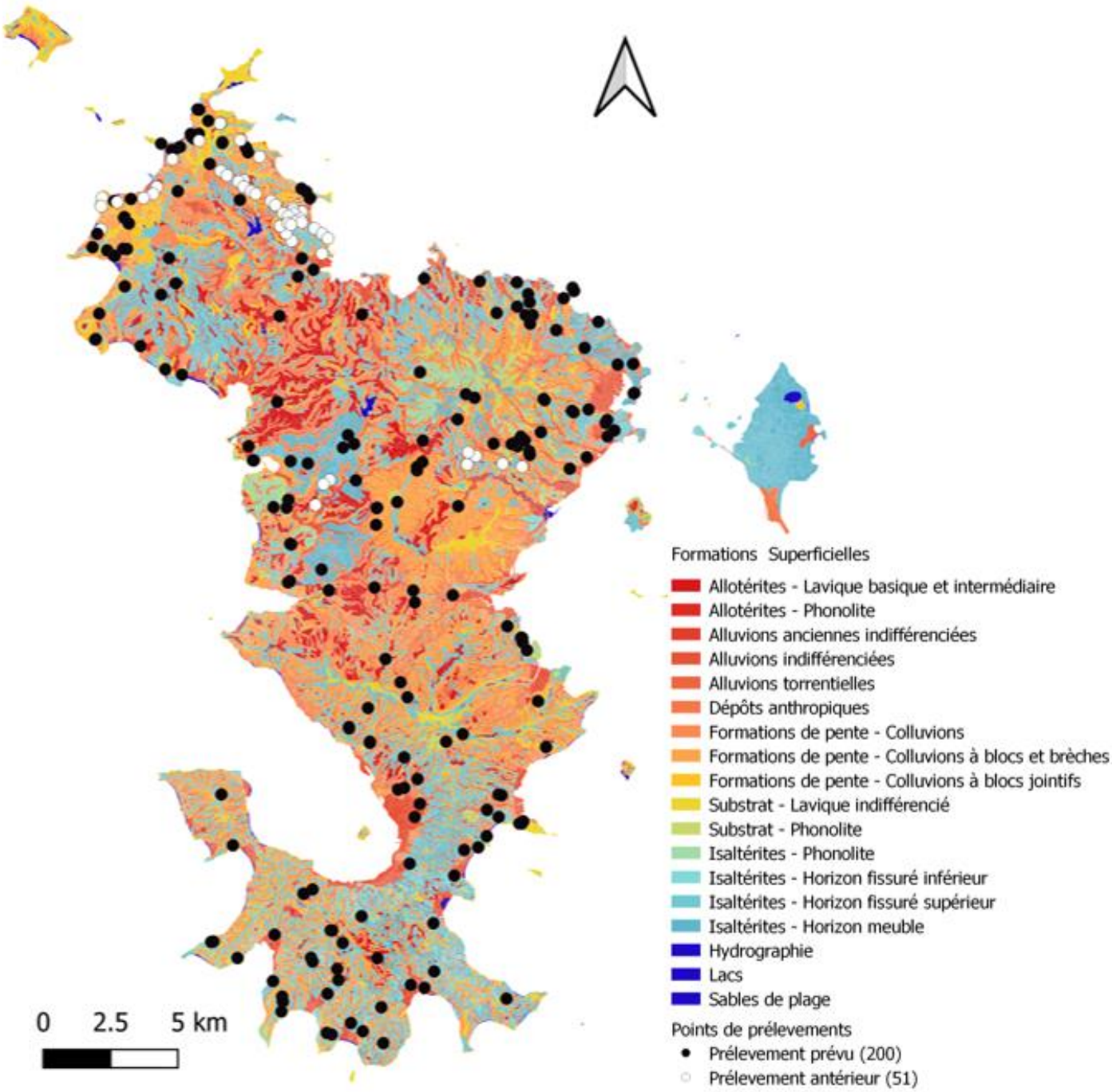
Boxplots comparatifs de toutes les formations superficielles échantillonnées



Exemple boxplot de comparaison pour les occupations de sol



Plan d'échantillonnage prévu



Descriptif complet des catégories de la couche SIG Occupation du sol

Groupement de Formations	Formations superficielles
Dépôts anthropiques	Remblais anthropiques
Alluvions anciennes indifférenciées	Alluvions anciennes indifférenciées
Alluvions indifférenciées	Alluvions indifférenciées
Alluvions torrentielles	Alluvions torrentielles
Formations de pente - Colluvions à blocs et brèches	Eboulis
	Colluvions à blocs
Formations de pente - Colluvions	Colluvions
Formations de pente - Colluvions à blocs jointifs	Colluvions à blocs jointifs
	Dépôts d'écroulements
Sables de plage	Sables
Isaltérites - Horizon fissuré inférieur	Horizon fissuré inférieur
	Isaltérites de brèches et panneaux glissés
	Horizon fissuré supérieur
	Isaltérites de basaltes à pyroxène
	Isaltérites de cônes de scories
	Isaltérites de laves basiques et intermédiaires, horizon granulaire à blocs
	Projections scoriacées (cônes stromboliens)
	Projections scoriacées (cônes stromboliens) de Petite Terre et de Mamoudzou
Isaltérites - Horizon meuble	Isaltérites - Horizon meuble
	Isaltérites de cinérites et alluvions (paléosurface de Combani)
	Cinérites
	Projections phréatomagmatiques (maars) de Petite Terre et de Mamoudzou
Isaltérites - Phonolite	Isaltérites - Isaltérites de phonolites
Allotérites - Lavique basique et intermédiaire	Allotérites de laves basiques et intermédiaires
	Allotérites de laves basiques et intermédiaires à grenailles ferrugineuses
Allotérites - Phonolite	Allotérites de phonolites
Substrat - Lavique indifférencié	Brèches et panneaux glissés
	Basalte à olivine
	Basalte à olivine et clinopyroxène
	Basalte à pyroxène
	Basalte porphyrique faciès ankaramite
	Basalte sl
	Mélilitite
	Néphélinite
	Téphrite sl
	Brèches riches en cumulats de Bandrélé, à Ilot Bambo et de Bambo Ouest
	Tufs indifférenciés (projections intercoulées)
Substrat - Phonolite	Protrusion de phonolite
	Phonolite aphyrique
	Phonolite sl
Lacs	Lacs
Hydrographie	Hydrographie

Test de Kruskall-Wallis

```
        Kruskal-Wallis rank sum test

data:  Proportion by Formations_Superficielles
Kruskal-Wallis chi-squared = 9.1538, df = 5, p-value = 0.1031
```

```
# A tibble: 15 x 9
   .y.      group1                            group2                              n1    n2 statistic      p p.adj p.adj.signif
 * <chr>    <chr>                             <chr>                            <int> <int>     <dbl>  <dbl> <dbl> <chr>
 1 Proport~ Alluvions indifferenciees         Formations de pente - Colluvions     2     2      2.22  0.0265 0.398 ns
 2 Proport~ Alluvions indifferenciees         Formations de pente - Colluvions~    2     2      1.66  0.0961 1     ns
 3 Proport~ Alluvions indifferenciees         Isalterites - Horizon fissure su~    2     2      0.971 0.332  1     ns
 4 Proport~ Alluvions indifferenciees         Isalterites - Horizon meuble         2     2      0.277 0.782  1     ns
 5 Proport~ Alluvions indifferenciees         Substrat - Lavique indifferencie     2     2     -0.139 0.890  1     ns
 6 Proport~ Formations de pente - Colluvions  Formations de pente - Colluvions~    2     2     -0.555 0.579  1     ns
 7 Proport~ Formations de pente - Colluvions  Isalterites - Horizon fissure su~    2     2     -1.25  0.212  1     ns
 8 Proport~ Formations de pente - Colluvions  Isalterites - Horizon meuble         2     2     -1.94  0.0522 0.783 ns
 9 Proport~ Formations de pente - Colluvions  Substrat - Lavique indifferencie     2     2     -2.36  0.0184 0.276 ns
10 Proport~ Formations de pente - Colluvions ~ Isalterites - Horizon fissure su~    2     2     -0.693 0.488  1     ns
11 Proport~ Formations de pente - Colluvions ~ Isalterites - Horizon meuble         2     2     -1.39  0.166  1     ns
12 Proport~ Formations de pente - Colluvions ~ Substrat - Lavique indifferencie     2     2     -1.80  0.0714 1     ns
13 Proport~ Isalterites - Horizon fissure sup~ Isalterites - Horizon meuble         2     2     -0.693 0.488  1     ns
14 Proport~ Isalterites - Horizon fissure sup~ Substrat - Lavique indifferencie     2     2     -1.11  0.267  1     ns
15 Proport~ Isalterites - Horizon meuble       Substrat - Lavique indifferencie     2     2     -0.416 0.677  1     ns
```