

## Hydrologie de surface et processus d'érosion hydrique en milieu agricole tempéré



*Figure 1 - Photographie de la petite retenue d'eau étudiée (Source : B. MARION)*

Domaine d'approfondissement

Gestion des Milieux Naturels

Présenté par : Baptiste MARION

Stage effectué du 05/03/2018 au 05/09/2018

À : UMR 7324 CITERES

MSH Val de Loire, 33 – 35 allée Ferdinand de Lesseps

37200 Tours

Maître de stage : Séraphine GRELLIER

Enseignant référent : Christian PIEDALLU

Soutenu le : 11/10/2018

Année 2017/2018

Baptiste MARION

## Engagement de non plagiat

### ① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

### ② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

### ④ Engagement :

Je soussigné Baptiste MARION

Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Clermont-Ferrand le 21 septembre 2018

Baptiste MARION  


Signature :

## Table des matières

<b>1. Introduction générale et contexte de l'étude</b> .....	12
1.1. L'érosion des sols.....	12
1.2. L'étude de l'érosion hydrique.....	13
1.2.1. Le couvert végétal et l'usage du sol.....	14
1.2.2. Le gradient de pente.....	15
1.2.3. La stabilité structurale.....	15
1.2.4. La hauteur, l'intensité et la fréquence des pluies.....	16
1.3. Contexte général de la perte de sol.....	17
1.4. Présentation générale du projet de recherche DynEtang.....	18
1.5. Description du PNR de la Brenne.....	19
1.5.1. Principales activités économiques du PNR de la Brenne.....	19
1.5.2. Histoire géologique du PNR de la Brenne.....	20
1.5.3. Différents sites labellisés inclus dans le PNR de la Brenne.....	20
1.6. Objectifs du stage.....	22
<b>2. Matériel et méthode</b> .....	23
2.1. Présentation de la zone d'étude.....	23
2.1.1. Un site d'étude au sein du PNR de la Brenne.....	23
2.1.2. Une zone agricole dans un climat tempéré.....	25
2.2. Quantification de l'érosion hydrique à l'aide de la perte de sol et des eaux de ruissellement 31	
2.3. L'intensité pluviale.....	33
2.4. Les caractéristiques du sol jouant sur les processus influençant le ruissellement et le détachement de sol.....	34
2.4.1. La stabilité structurale du sol.....	35
2.4.2. L'infiltration de l'eau dans le sol.....	38
<b>3. Résultats et discussion</b> .....	41
3.1. Un détachement de sol pauvre et un ruissellement léger.....	41
3.2. Une intensité pluviale assez faible.....	42
3.3. Les caractéristiques du sol favorisent l'infiltration et la stabilité structurale.....	44
3.3.1. Un sol stable structurellement.....	45
3.3.2. Une infiltration efficace de l'eau dans le sol.....	56
3.3.3. Relation entre les caractéristiques du sol.....	60
<b>4. Conclusion générale</b> .....	62

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 - Photographie de la petite retenue d'eau étudiée (Source : B. MARION) .....	1
Figure 2 - Graphique de la vitesse de chute des gouttes de pluie en fonction de leurs diamètres (Source : J. POULENARD).....	16
Figure 3 - Localisation à l'échelle nationale du PNR de la Brenne (source : parc-naturels-regionaux.fr) .....	19
Figure 4 - Cartographie des zones classées au titre de leur intérêt environnemental (Source : PNR de la Brenne).....	21
Figure 5 - Cartographie des zones inscrites aux inventaires ZNIEFF et ZICO (Source : PNR de la Brenne).....	22
Figure 6 - Schéma représentant les liens entre les différents paramètres influençant l'érosion hydrique .....	23
Figure 7 - Photographie satellitaire du site d'étude et de l'étang Pifaudière (Source : géoportail.gouv.fr) .....	24
Figure 8 - Modèle numérique de terrain, obtenu avec le logiciel Surfer du pâturage, représentant les courbes de niveau, les micro bassins versants ainsi que les trajectoires d'écoulement de l'eau et les emplacements des micro parcelles selon leur position topographique : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP).....	25
Figure 9 - Photographie des micro parcelles placées le long de la pente dans le pâturage d'étude : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP).....	26
Figure 10 - Photographie du troupeau bovin dans le pâturage d'étude.....	28
Figure 11 - Photographie de la flore lors de l'identification .....	29
Figure 12 - Photographie de la retenue d'eau étudiée à proximité de l'étang de la Pifaudière (15/03/2018) .....	30
Figure 13 - Photographie du « débordement » de la retenue d'eau dans l'étang Pifaudière (12/04/2018) .....	30
Figure 14 - Représentation schématique de la structure d'une micro parcelle (Source : Janeau et al., 2003) .....	31
Figure 15 - Photographie d'une des micro parcelles mises en place sur le site d'étude .....	31
Figure 16 - Photographie du dispositif pour le filtrage des particules fines.....	33
Figure 17 - Schéma synthétique présentant les liens entre certaines caractéristiques du sol et des processus impliqués dans l'érosion hydrique.....	34
Figure 18 - Photographie de la disposition des prélèvements d'échantillons de terre pour les densités apparentes (DA) par rapport aux micro parcelles.....	35
Figure 19 - Photographie des étapes de séchage et de pesage des échantillons de terre pour le calcul de la densité apparente .....	36
Figure 20 - Photographie représentant la disposition des prélèvements des TSBF autour de la micro parcelle de bas de pente.....	37
Figure 21 - Photographie du matériel utilisé lors des tests d'infiltration dans le pâturage .....	39
Figure 22 - Photographie de la répartition des répétitions pour les tests d'infiltration .....	39
Figure 23 – Graphes du ruissellement total et des sédiments collectés dans les cuves de stockage des eaux de ruissellement pour les 3 microparcelles : celle de haut de pente (HP), celle de milieu de pente (MP) et celle de bas de pente (BP) .....	42
Figure 24 - Représentation des quantités de pluies cumulées mensuelles de Février 2018 à Août 2018 .....	43
Figure 25 – Tableau synthétique du ruissellement mesuré [mL] à chaque mission de terrain en fonction de l'intensité pluviale moyenne [mm/h], de l'intensité maximale [mm/h] et du ratio du nombre d'heures de pluie sur le nombre d'heures total mesurés entre deux missions de terrain.....	43
Figure 26 - Equivalences entre intensité pluviale et qualification des pluies proposées par Météo France .....	44

Figure 27 – Boîtes à moustache des valeurs de densités apparentes mesurées dans la Brenne au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP) .....	45
Figure 28 - Tableau récapitulatif des coefficients de variation (CV) exprimés en % calculés pour les données de densité apparente au niveau de chaque micro parcelle et pour toutes les micro parcelles .	45
Figure 29 - Gammes de valeurs de densité apparente selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca) .....	46
Figure 30 - Analyse granulométrique des échantillons (0 - 10 cm de profondeur) des 3 micro parcelles de la Brenne (DynÉtang).....	47
Figure 31 - Tableau récapitulatif des coefficients de variation exprimés en % calculés pour les données de granulométrie au niveau de chaque micro parcelle et pour toutes les micro parcelles.....	47
Figure 32 – Boîtes à moustache des taux en matières organiques (g/kg) obtenus grâce à la méthode normalisée internationale NF ISO 14235 au niveau des 3 micro parcelles : haut de pente (HP), milieu de pente (MP) et bas de pente (BP).....	48
Figure 33 - Gammes de valeur de la teneur en matières organiques .....	48
Figure 34 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de matières organiques au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles .....	49
Figure 35 – Boîtes à moustache des indices de battance calculés grâce à la texture du sol et à la matière organique au niveau des micro parcelles de haut de pente (HP), milieu de pente (MP) et bas de pente (BP) .....	49
Figure 36 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données d'indice de battance au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles .....	50
Figure 37 – Boîtes à moustache du nombre de fourmis trouvées lors du tri manuelle au niveau des trois micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP).....	50
Figure 38 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de population de fourmis au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles .....	51
Figure 39 - Nombre d'individus de fourmis trouvées dans des pièges à appâts pour une lande hygrophile pâturée (Hp) et une lande mésophile pâturée (Mp) dans le département de la Manche (Source : D. FORGEROT).....	51
Figure 40 - Boîtes à moustache des populations lombriciennes relevées suite au tri manuel au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP).....	52
Figure 41 - Boîtes à moustache des biomasses des lombrics au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP).....	52
Figure 42 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de population et de biomasse des lombrics au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles .....	53
Figure 43 - Valeurs d'abondance (A) et de biomasse (B) mesurées par tri manuel et avec utilisation de formol au niveau de Quimper et de Rennes et pour plusieurs types d'usage de sol (Source : G. PERES, 2003).....	53
Figure 44 – Valeurs du nombre de turricules observés dans la surface d'1 m <sup>2</sup> des micro parcelles selon les missions de terrains.....	55
Figure 45 - Distribution des valeurs de porosité totale calculées pour les échantillons de la Brenne (DynÉtang) selon les 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP) .....	56
Figure 46 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de porosité totale au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles .....	56
Figure 47 - Gammes de valeurs de porosité totale et de densité apparente selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca) .....	57
Figure 48 - Série des conductivités hydrauliques à saturation K <sub>s</sub> mesurées regroupées par micro parcelle selon leur position topographique : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et bas de Pente (BP) .	58
Figure 49 - Valeurs de taux d'infiltration selon le type de sol (Source : mddelcc.gouv.qc.ca) .....	58
Figure 50 - Tableau reprenant les possibilités d'infiltration d'un sol selon la texture et sa conductivité hydraulique (Source : d'après Musy et Soutter (1991), cité dans Barraud (2006)).....	59

Figure 51 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation mesurés par un perméamètre à charge constante sur les sites de Quimper et Rennes.CV signifie coefficient de variabilité. (Source : G.PERES)	59
Figure 52 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de conductivité hydraulique au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles	60
Figure 53 – Graphique mettant en évidence les corrélations (corrélogramme) des différents paramètres du sol étudié. MO = Matières Organiques ; Ks = Conductivité hydraulique à saturation ; DA = Densité Apparente.	61
Figure 54 - Niveaux de significativité des corrélations entre les caractéristiques du sol	61
Figure 55 - Schéma représentant les liens entre les résultats obtenus d'érosion hydrique, de précipitation et de caractéristiques du sol	63
Figure 56 - Localisation géographique de la région de Na Noi (Source : Google Map)	72
Figure 57 - Photographie du site d'étude (Source : B. MARION)	72
Figure 58 - Série des densités apparentes mesurées pour les microparcelles de la section "Top" regroupées par micro parcelle	75
Figure 59 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de densité apparente au niveau de chaque micro parcelle les plus en amont de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles les plus en amont de la pente sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed	75
Figure 60 - Gammes de valeurs de densité apparente selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca)	75
Figure 61 - Série des densités apparentes mesurées pour les microparcelles de la section "Top" regroupées par micro parcelle	76
Figure 62 - Gammes de valeurs de densité apparente et de porosité totale selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca)	76
Figure 63 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de porosité totale au niveau de chaque micro parcelle les plus en amont de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles les plus en amont de la pente sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed	77
Figure 64 - Série des conductivités hydrauliques à saturation mesurées pour les microparcelles de la section "Top" regroupées par micro parcelle	77
Figure 65 - Tableau reprenant les possibilités d'infiltration d'un sol selon la texture et sa conductivité hydraulique (Source : d'après Musy et Soutter (1991), cité dans Barraud (2006))	78
Figure 66 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de conductivité hydraulique à saturation au niveau de chaque micro parcelle « Top » les plus en amont de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles les plus en amont de la pente sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed.	78
Figure 67 - Série des conductivités hydrauliques à saturation (Ks) mesurées pour les microparcelles le long de la pente regroupées par micro parcelle	79
Figure 68 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de conductivité hydraulique à saturation au niveau de chaque micro parcelle le long de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed	79
Figure 69 - Boîtes à moustache des valeurs de conductivité hydraulique à saturation Ks [mm/s] au niveau des micro parcelles les plus en amont "Top". Top 07 = répétition de Juillet 2018 ; Top 1 à 6 = répétitions de Mai 2018.	80
Figure 70 - Schéma représentant les liens entre les résultats obtenus d'érosion hydrique, de précipitation et de caractéristiques du sol pour le site d'étude en Thaïlande	81
Tableau 1 - Profils verticaux des sols au niveau des 3 micro parcelles le long de la pente (Source : B.MARION)	27
Tableau 2 - Valeurs de pente [%] autour des micro parcelles	28
Tableau 3 - Photographies des filtrages des éléments grossiers via filtres à café	32
Tableau 4 - Gammes de valeur des catégories de sol selon sa sensibilité à la battance (Source : J-Y MASSENET)	49

Tableau 5 - Seuils employés pour la description de l'activité lombricienne (Source : Delaunois, 2008)	55
Tableau 6 - Qualification de la vitesse d'infiltration d'un sol en fonction des classes de conductivité à saturation $K_s$ [mm/s] (in Chamayou et Legros, 1989)	60
Tableau 7 - Qualification de la vitesse d'infiltration d'un sol en fonction des classes de conductivité à saturation $K_s$ [mm/s] (in Chamayou et Legros, 1989)	78
Tableau 8 - Qualification de la vitesse d'infiltration d'un sol en fonction des classes de conductivité à saturation $K_s$ [mm/s] (in Chamayou et Legros, 1989)	79
Annexe 1 - Tableau des espèces identifiées suite aux prélèvements TSBF	83
Annexe 2 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $i/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour la micro parcelle HP et pour les 4 répétitions réalisées	84
Annexe 3 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $i/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour la micro parcelle MP et pour les 4 répétitions réalisées	85
Annexe 4 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour la micro parcelle BP et pour les 4 répétitions réalisées	86
Annexe 5 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour l'emplacement TOP et pour les 3 répétitions réalisées	87
Annexe 6 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour l'emplacement UP et pour les 2 répétitions réalisées	88
Annexe 7 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour l'emplacement MIDDLE et pour les 2 répétitions réalisées	89
Annexe 8 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$ pour l'emplacement DOWN et pour les 2 répétitions réalisées	90
Annexe 9 - Valeurs des densités apparentes mesurées au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). DA = Densité apparente. CV = Coefficient de Variation.	91
Annexe 10 - Valeurs des porosités totales mesurées au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.	91
Annexe 11 - Valeurs des teneurs en matières organiques mesurées par un laboratoire d'analyse au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.	92
Annexe 12 - Valeurs des abondances de fourmis mesurées par la méthode des TSBF au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.	92
Annexe 13 - Valeurs des abondances lombriciennes mesurées par la méthode des TSBF au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.	92
Annexe 14 - Valeurs des indices de battance calculés au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.	93
Annexe 15 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation $K_s$ (mm/s) mesurées par la méthode de Beerkan au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.	93
Annexe 16 - Valeurs des densités apparentes (g/cm <sup>3</sup> ) au niveau des micro parcelles « Top » les plus en amont de la pente pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; BD = Bulk Density = Densité Apparente.	94
Annexe 17 - Valeurs des porosités totales [%] au niveau des micro parcelles « Top » les plus en amont de la pente pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; PT = Porosité Totale.	94

Annexe 18 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation [mm/s] obtenues lors de la mission de terrain de Mai 2018 au niveau des micro parcelles « Top » les plus en amont de la pente pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; KS = Conductivité hydraulique à saturation..... 95

Annexe 19 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation [mm/s] obtenues lors de la mission de terrain de Juillet 2018 au niveau des micro parcelles selon leur position dans la pente : Top, Up, Middle et Down pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; KS = Conductivité hydraulique à saturation. .... 95

**Remarque** : S'il n'est pas fait mention de l'origine ou de la source d'une photographie, elle provient alors de ma bibliothèque d'images personnelle.

## PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : LE LABORATOIRE CITERES

L'acronyme CITERES signifie littéralement CITés, TERritoires, Environnement et Sociétés. Il s'agit d'une UMR (Unité Mixte de Recherche) située à Tours. Cette UMR a été créée en janvier 2004 par le CNRS et l'université de Tours et résulte du rapprochement de deux UMR, le Centre d'Etudes et de Recherches sur l'URBANisation du Monde arabe et le Laboratoire Archéologie et Territoires et d'une Equipe d'Accueil, le Centre de recherche Ville/Société/Territoire.

L'objectif scientifique principal de CITERES est d'analyser les dynamiques spatiales et territoriales des sociétés. Cet objectif mobilise une forte diversité de disciplines, par exemple l'aménagement et l'urbanisme, l'écologie, l'hydrologie et la géographie pour ne citer qu'eux.

Les travaux de CITERES s'articulent autour de 5 principaux domaines de recherche interdisciplinaire : la recherche urbaine, la recherche environnementale, la recherche sur le patrimoine, la recherche sur les rapports au(x) territoire(s), et la recherche sur les effets des recompositions sociales contemporaines.

L'UMR 7324 CITERES est ainsi composée de 4 grandes équipes, qui possèdent chacune leur spécialité mais restent proches entre elles afin de répondre aux thématiques étudiées :

- L'équipe Construction Sociale et politique des espaces, des normes et des Trajectoires (CoST). Cette équipe contribue à une meilleure connaissance du rapport entre espace, politique et normes sociales.
- L'Equipe Monde arabe et Méditerranée (EMAM). L'EMAM s'intéresse au Monde arabe ainsi qu'aux relations qu'il entretient avec d'autres territoires, comme l'Europe méditerranéenne. Elle possède une spécialisation majeure dans les études urbaines.
- L'équipe Dynamique et Action Territoriales et Environnementales (DATE). Elle étudie la pertinence des transformations, « spontanées » ou volontaires, des milieux naturels et des espaces aménagés et construits. Pour ce faire, elle réalise des travaux de recherche allant des inventaires et diagnostics de terrain aux projets prospectifs en passant par l'analyse des dynamiques territoriales.
- L'équipe Archéologie et Territoires (LAT). Elle participe au développement des sciences historiques de l'espace en analysant les relations des sociétés pré-industrielles avec leur environnement et les territoires dans lesquels elles inscrivaient leurs activités.

## REMERCIEMENTS

Avant de présenter le travail effectué durant ces semaines de stage dans la suite de ce rapport, j'aimerais adresser des remerciements sincères aux personnes suivantes, qui m'ont aidé de près ou de loin et ont permis le bon déroulement de ce stage :

Tout d'abord, ma maître de stage, Séraphine GRELLIER. Séraphine a toujours été disponible pour moi, mais plus généralement pour tous ses stagiaires. De plus, elle a toujours une bonne humeur et le sourire, ce qui est réellement motivant pour travailler.

J'aimerais remercier deux membres importants du LDD situé à Bangkok, deux chercheurs français : Mr. Jean Louis JANEAU pour sa bonne humeur, son aide et son expertise et Mr. Claude HAMMECKER pour sa gentillesse et son expertise également.

Il s'agit d'un remerciement plus personnel que professionnel mais j'aimerais remercier Noi qui s'est proposée gentiment comme guide pour cette mégapole impressionnante qu'est Bangkok et m'a permis de vivre un très bon séjour.

Merci aux autres stagiaires qui ont travaillé dans le même bureau que moi, Myriam, Soline, Quentin, *etc.* et qui ont contribué à une ambiance de travail plus qu'agréable.

J'aimerais remercier le personnel du Parc de la Brenne et plus particulièrement Vincent qui était un interlocuteur très sympathique et efficace, et qui nous a beaucoup aidés durant ce projet.

Je remercie également Joël Moulin pour ses connaissances en pédologie impressionnantes et pertinentes de la Brenne.

Et enfin, je remercie les membres du DAE pour leur accessibilité et leur bonne humeur, en particulier les membres du « Bullot », dont le bureau était juxtaposé au nôtre et dont l'humour et la bonne humeur étaient très appréciables.

## RESUME

L'érosion hydrique est un phénomène naturel composé de deux étapes : le détachement et le déplacement de particules du sol par l'action de l'eau. Le détachement se fait par l'énergie d'impact de la goutte de pluie sur le sol et le déplacement s'effectue par le ruissellement. Cette érosion hydrique a été qualifiée d'érosion « accélérée » du fait de certaines pratiques humaines qui favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration comme le labourage, la déforestation, ... La Commission européenne a identifié l'érosion comme la principale menace pour les sols et affecterait 40 millions d'hectares du territoire européen.

Les projets DynEtang et SeaWeed, dans lesquels s'inscrit ce stage, proposent une étude du ruissellement et de l'érosion hydrique respectivement pour un sol de pâturage du PNR de la Brenne et un sol de culture thaïlandais. Pour cela, des micro parcelles d'érosion ont été mises en place : 3 dans la Brenne et 24 au total en Thaïlande. Ces micro parcelles permettent de recueillir l'eau de ruissellement et les particules détachées sur une surface d'1 m<sup>2</sup>. Parallèlement à ce suivi, le fonctionnement hydrologique d'une retenue d'eau, exutoire d'un micro bassin versant, à proximité de l'étang Pifaudière en Brenne a été étudié. Une sonde de mesure de hauteur d'eau et une autre de turbidité seront installées au centre de la retenue d'eau et reliées à une station enregistreuse qui enverra les données sur un serveur FTP durant une année hydrologique entière. Ces sondes n'ont pas pu encore être installées à cause d'un problème technique.

Cette étude a permis d'en apprendre davantage sur les propriétés de ces sols et de présenter les premiers résultats du processus de l'érosion hydrique en pâturage en Brenne, qui montrent une érosion hydrique faible et une infiltration efficace.

**Mots clefs** : Détachement, propriétés du sol, ruissellement, micro parcelles, érosion hydrique, Brenne, Thaïlande

## ABSTRACT

Water erosion is a natural process is made up of two steps : the detachment and movement of the soil particules by the action of water. The detachment is done by the energy of raindrops impact and the movement is created by runoff. This water erosion was described as accelerated erosion because of certain human practices which increase the chance of runoff rather than infiltration like tilling, deforestation, ... The European Commision has identified erosion as the major threat for the soil and would affect 40 millions hectares of the European territory.

This internship takes part into two projects : DynEtang and SeaWeed. They offer a study of the runoff and water erosion for two distinct environments : a pasture in the Regional National Park of Brenne for the first project and a thai crop for the second project. To this end, some micro plots have been set up, 3 in Brenne and 24 in total in Thailand. These micro plot collect runoff water and loose particules from an area of 1 m<sup>2</sup>. In parallel of this monitoring, the hydrological functioning of a little pond, outflow of a micro watershed, located near the Pifaudière pond was studied. A measurement probe of water height and one of turbidity will be settled in the center of the micro pond and linked to a data logger, which will send datas to a FTP server for a hydrological year. This probes are not settled yet because of a technical problem.

This study showed the proprieties of each soil and the results of water erosion in a pasture in Brenne : water erosion i slow and infiltration is efficient.

**Key words** : Water erosion, runoff, micro plot, Brenne, Thailand, soil proprieties

---

## 1. Introduction générale et contexte de l'étude

---

### 1.1. L'érosion des sols

L'érosion correspond à l'enlèvement de morceaux superficiels du sol. Etymologiquement, le mot « érosion » vient du verbe latin « erodere », qui signifie ronger. Cette érosion provoque à la fois un abaissement de la surface du sol et une production de matière solide et dissoute, cette matière alimentant les sédiments détritiques en aval (M. Campy et J.-J. Macaire, 2003). L'érosion est composée de 3 étapes : le détachement, le transport et le dépôt des sédiments d'amont en aval.

Plusieurs phénomènes naturels et climatiques sont à l'origine de l'érosion. Ces principaux phénomènes sont le vent, la glace mais surtout la pluie. Il existe différents types d'érosion selon l'origine de celle – ci : érosion hydrique, érosion éolienne, érosion « anthropique », ... On parle d'érosion hydrique lorsque le détachement et le déplacement de sol s'effectuent sous l'action de l'eau. Cette érosion hydrique est considérée comme majoritaire au niveau européen mais également comme le principal vecteur de transport de sédiments à la surface du sol.

Lorsque le sol n'est pas en mesure d'infiltrer les eaux de pluie, une fine pellicule d'eau se forme et s'écoule le long des pentes : il s'agit du phénomène de ruissellement. Ce phénomène se produit lorsque :

- Les capacités d'infiltration du sol sont inférieures à l'intensité des pluies, lors d'un fort épisode orageux sur un sol sec par exemple (ruissellement Hortonien),
- Le sol est déjà saturé d'eau par une nappe et ne peut donc pas infiltrer les eaux de pluie (ruissellement par saturation).

Le ruissellement induit donc un détachement des particules du sol et leur transport. Ce ruissellement permet de distinguer deux types d'érosion :

- L'érosion diffuse : les eaux de ruissellement s'écoulent à une vitesse plutôt faible, sous forme d'une fine couche continue. L'énergie de ruissellement peut néanmoins être suffisante pour entraîner les éléments fins d'amont en aval et peut affecter des pentes même faibles ;
- L'érosion concentrée : la vitesse de ruissellement est forte, la lame d'eau de ruissellement acquiert donc une énergie plus forte qui peut aboutir à des incisions dans le sol telles que des ravines ou des rigoles. Ces dernières peuvent se différencier entre elles selon leur taille, une rigole nécessite moins de travail du sol pour être effacée par rapport à une ravine. Une ravine quant à elle, ne peut être effacée par des travaux du sol courants.

L'érosion agit donc sur la couche fine du sol en surface. Cela engendre des conséquences environnementales importantes, que ce soit sur le site ou en dehors du site.

#### *Conséquences sur site :*

Comme il a été mentionné au-dessus, l'érosion provoque une diminution de la surface du sol. Or le sol est le support et le produit de la biosphère. Par conséquent, cela signifie également une perte d'éléments nutritifs et de matière organique. L'érosion hydrique entraîne ainsi une perte de la couche fertile, qui s'accompagne d'une perte de rendement agricole.

#### *Conséquences hors site :*

L'érosion peut avoir un impact négatif sur la qualité de l'eau en aval. L'érosion hydrique fournit en effet la quasi-totalité des matières en suspension, qui se retrouveront dans les océans suite aux crues des fleuves. Cependant, si trop de sédiments sont déplacés dans un cours d'eau et/ou une retenue d'eau, cela augmentera sensiblement sa turbidité et si cette eau est destinée à être consommée, un traitement de l'eau supplémentaire sera nécessaire.

Si trop de sédiments se retrouvent dans un plan d'eau, cela peut entraîner un déséquilibre dans l'écosystème aquatique avec une eutrophisation des eaux de surface. Cette eutrophisation correspond à un apport excessif de substances nutritives, en particulier d'azote et de phosphore. Des eaux de surfaces eutrophisées peuvent amener à la prolifération d'algues, à la disparition de poissons ...

Un surplus de sédiments peut se retrouver au niveau d'infrastructures et affecter leur fonctionnement voire diminuer leur vie utile (barrages, ...). Dans des cas plus extrêmes, cela peut provoquer des événements destructeurs comme des coulées boueuses. Borges présente dans sa thèse en 1993 le coût annuel approximatif des dégâts causés par la sédimentation aux Etats-Unis, estimé par Brown en 1948. La facture totale s'élevait à 175 millions de dollars américains.

Si certains sédiments ont été impactés par des polluants, comme des métaux lourds ou des pesticides, le détachement et le transport de ces sédiments en aval risquent de propager cette pollution à d'autres sédiments ou de contaminer l'eau dans laquelle les sédiments se dilueront.

### 1.2. L'étude de l'érosion hydrique

L'érosion est donc un phénomène naturel mais qui dépend de certains facteurs. Ces principaux facteurs sont les suivants, selon Lacombe et *al.*, (2017) :

- La hauteur et l'intensité des pluies,
- La structure de la couverture végétale,
- Les propriétés du sol,
- Les pratiques agricoles,
- La pente.

Ces facteurs sont étroitement liés à deux phénomènes :

- L'érosivité des pluies, qui correspond à l'intensité potentielle de l'érosion, en d'autres termes la capacité de la pluie à provoquer l'érosion. Les précipitations atmosphériques étant l'agent atmosphérique responsable de l'érosion hydrique.
- L'érodibilité du sol, qui représente la résistance du sol à l'érosion, c'est-à-dire les propriétés du sol, la couverture végétale et la pente. Ces derniers conditionnent l'érosion hydrique.

Une équation universelle de perte de sol a d'ailleurs été proposée par Wischmeier et Smith en 1978. Cette équation se base sur une très grande base de données d'observations de 10 000 parcelles avec les mêmes caractéristiques sur plusieurs années.

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Avec :

A : Perte de sol par unité surfacique [T/ha/an]	L : Facteur de longueur des pentes
R : Facteur d'érosivité des pluies	S : Facteur d'inclinaison de la pente
K : facteur d'érodibilité du sol	C : Facteur de couverture végétale et pratiques culturales
	P : Facteur des pratiques anti-érosif

Ainsi, pour comprendre le phénomène et pouvoir ensuite l'anticiper, il est pertinent d'étudier ces paramètres selon une surface de référence et une échelle de temps choisie.

La surface de référence comporte plusieurs échelles. Elle peut aller du grand bassin versant jusqu'à l'échelle centimétrique voire micro-métrique. Le bassin versant est considéré comme une unité fonctionnelle idéale pour évaluer l'érosion (Horton, 1945). La quantification des flux de matière dans chaque bassin versant permet ensuite de les comparer entre eux.

Le bassin versant est la surface ruisselée et drainée par un réseau hydrologique en amont d'un point (exutoire) par où transitent les produits issus de l'érosion. C'est un système ouvert recevant de l'énergie (thermique du soleil, cinétique des précipitations ...) et de la matière (eau, poussières, ...) et les redistribuant à son exutoire après transformation.

Un bassin versant est délimité par des lignes de partage des eaux. Généralement, ces dernières correspondent aux frontières naturelles dessinées par le relief. Le bassin versant est alors considéré comme un bassin versant topographique (BVT). Le bassin versant comprend un réseau de vallons et vallées à drainage intermittent ou permanent, marqués par des talwegs, lignes de convergence des versants.

Dans le cadre du stage, l'échelle fine du mètre carré et l'échelle du micro bassin versant ont été choisies pour l'étude de l'érosion hydrique. L'échelle de temps choisie est de l'ordre de l'année. Le fait d'utiliser l'échelle de la micro placette d'1 m<sup>2</sup> permet une caractérisation fine des processus hydrologiques, avec une estimation des pertes en terre. Cela offre également la possibilité de couvrir la variabilité géographique et spatiale des milieux à l'échelle fine. Enfin, l'échelle fine du m<sup>2</sup> peut être utile à la compréhension du processus de l'érosion hydrique à l'échelle des versants et du bassin versant.

Les transferts de matière au sein d'un bassin versant équivalent à la quantité d'eau de pluie tombant à l'intérieur du bassin versant, à la quantité d'eau s'infiltrant dans le sol, à la quantité d'eau de ruissellement, si ce phénomène se produit, et enfin à la quantité de sédiments détachés du sol.

Il existe une relation mathématique liant les différentes quantités d'eau :

$$\begin{aligned} \text{Quantité}_{\text{eau de pluie}} &= \text{Quantité}_{\text{eau infiltrée}} + \text{Quantité}_{\text{eau de ruissellement}} \\ &\Rightarrow \text{Quantité}_{\text{eau infiltrée}} \\ &= \text{Quantité}_{\text{eau de pluie}} - \text{Quantité}_{\text{eau de ruissellement}} \end{aligned}$$

La seule inconnue dans l'équation ci-dessus est la quantité d'eau infiltrée. En effet, l'eau infiltrée est difficilement quantifiable sur le terrain. A contrario, la quantité d'eau de pluie tombant en amont du bassin est mesurable grâce à un pluviomètre et la quantité d'eau de ruissellement peut être obtenue grâce à des micro parcelles d'érosion.

Ces micro parcelles correspondent à un corps homogène de la surface du territoire à un temps donné (C. Valentin *et al.*, 1992), employé pour étudier le ruissellement et la perte de sol et de fait permettre de comparer les résultats en fonction de paramètres environnementaux et des propriétés du sol.

Les micro parcelles ont donc été régulièrement utilisées afin de s'intéresser à des problématiques en lien avec la perte de sol. Les paramètres d'étude, variant selon les études, sont ceux qui influent sur l'intensité de la surface de ruissellement et de l'érosion du sol, qui ont été indiqués en début de partie.

### **1.2.1. Le couvert végétal et l'usage du sol**

Le couvert végétal est un paramètre fréquemment pris en compte par les disciplines scientifiques car il correspond à l'interface sol – atmosphère. La végétation joue un rôle important vis-à-vis de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Il a été montré que :

- Les parties aériennes de la végétation (canopée, tronc) interceptent une partie de la pluie (Quinn and Laflen, 1983 ; Levia et Frost, 2003), diminuant ainsi l'énergie cinétique des gouttes.
- Les parties souterraines (racines) permettent de stabiliser la structure du sol en surface et les gouttes d'eau de pluie peuvent s'infiltrer le long des racines.

Ainsi, la présence d'un couvert végétal garantit la protection du sol contre les phénomènes d'érosion (Collinet, 1988; Lal, 1998; Eswaran *et al.*, 2001; Rey *et al.*, 2004; Gyssels *et al.*, 2005; Valentin *et al.*, 2005; Neave and Rayburg, 2007). Cependant, la protection peut être plus ou moins efficace selon la

formation végétale en présence. Par ordre décroissant d'efficacité, on trouve : les forêts-taïga, les prairies, les savanes-forêts sèches, les steppes et la toundra (Matteys, 1983).

Certains travaux montrent l'importance du couvert végétal vis-à-vis de l'érosion hydrique : en Afrique de l'Ouest, suite au passage d'une forêt intacte à un sol nu, les pertes de terre sont multipliées par 100 à 1000 et le ruissellement par 20 à 50 d'après les travaux.

L'usage du sol est difficilement dissociable au couvert végétal. Il conditionne la longueur et les connexions entre les parcelles, la nature des couvertures végétales et les « états de surface » des sols.

### **1.2.2. Le gradient de pente**

L'effet de la pente sur l'infiltration a fait l'objet de nombreuses études qui ne s'accordent pas toutes sur le même résultat.

Des études en Europe (De Ploey *et al.*, 1976 en Belgique ; Djorovic, 1980 en Serbie) ou en Inde (Sharma *et al.*, 1983) sont arrivés au résultat suivant : l'infiltration est d'autant plus faible que le gradient de pente est fort.

D'autres n'ont trouvé aucun effet significatif de la pente sur l'infiltration, avec des valeurs de gradient assez faibles, comprises entre 2 et 10 % (Gumbs *et al.* en 1986, à Trinidad et Mah *et al.* en 1992 en Australie).

Chaplot et Le Bissonnais en 2000 en milieu tempéré ont observé une diminution de l'infiltration vers les faibles pentes du fait de la formation de croûtes de surface. Ces « croûtes » correspondent à des croûtes de battance formées suite à de fortes pluies. Elles sont dures et lisses, ce qui imperméabilise légèrement le sol. La conséquence de cette légère imperméabilisation est une diminution de l'infiltration de l'eau dans le sol, ce qui favorise l'apparition du phénomène de ruissellement.

C'est également ce qu'ont observé Janeau *et al.* en 2003 dans le Nord de la Thaïlande sur sol nu : la formation de croûtes est importante en cas de pentes faibles (<15%), ce qui induit un écoulement assez important. Ils ont également observé que l'infiltration augmentait et la détachabilité diminuait lorsque la pente augmentait.

### **1.2.3. La stabilité structurale**

La stabilité structurale peut être définie comme étant l'aptitude des agrégats du sol à résister à l'action dégradante des pluies. Le paramètre le plus influent sur la stabilité structurale au niveau des sols de grande culture des régions tempérées d'Europe de l'Ouest est le plus souvent la matière organique (Monnier, 1965 ; Tisdal et Oades, 1982 ; Churchman et Tate, 1987 ; Gollany *et al.*, 1991 ; Haynes, 1993).

La matière organique est un des agents de cohésion et de stabilité structurale les plus importants (Chenu, 1989). La matière organique peut agir sous différentes formes sur la stabilité structurale :

- Des macro agrégats peuvent se former, composés de micro agrégats, des débris de végétaux et de champignons, autour de particules organo-minérales, à proximité des racines (Tisdall et Oades, 1982).
- La présence d'une litière offrirait une protection physique et améliorerait l'activité microbiologique.
- La stabilité des agrégats peut être amélioré par les actions physico-chimiques des microorganismes (Chenu et Guérif, 1991 ; Roberson *et al.*, 1991).

La texture joue également un rôle important dans la stabilité structurale, en particulier la teneur en argile (Stern *et al.*, 1991). La stabilité structurale étant d'autant plus forte que la teneur en argile est importante.

## 1.2.4. La hauteur, l'intensité et la fréquence des pluies

L'action des pluies provoque l'érosion hydrique. Son action dépend cependant de certains caractères, à savoir la hauteur des pluies, son intensité et sa fréquence.

### 1.2.4.1. La hauteur des pluies

Fournier écrit dans le Bulletin Technique d'Information – Météorologie et Agriculture en 1969 que le lien entre hauteur des pluies et l'érosion a été étudié mais qu'aucune étude traitant de ce sujet n'a pu démontrer l'existence de ce lien.

Hudson a étudié les valeurs moyennes annuelles de hauteur de pluie, d'érosion et de ruissellement de 6 parcelles en Rhodésie de 1953 à 1958. Ces valeurs montrent qu'il n'y a pas de relation entre la hauteur de pluie, d'érosion et de ruissellement.

### 1.2.4.1. L'intensité des pluies

L'intensité des pluies joue directement sur le détachement mécanique des particules fines. Il a été montré que c'est bel et bien l'impact des gouttes de pluies contre le sol qui est à l'origine du détachement des particules fines avec une expérience en Rhodésie du Sud, réalisée par Hudson.

Deux parcelles étaient maintenues nues manuellement mais une gaze a été placée au-dessus de l'une d'elle afin d'absorber l'énergie cinétique mais laissant passer l'eau. Après 3 années de mesure, l'érosion hydrique moyenne de la parcelle avec gaze est très faible, largement inférieure à celle de la parcelle à terre nue, et même légèrement inférieure à l'érosion hydrique d'une parcelle placée en prairie dense de *Digitaria swazilandensis*.

Le ruissellement a été également fortement réduit grâce à la présence de la gaze. Cela montre que le battage du sol par la pluie peut obstruer la porosité de surface et favoriser les eaux de ruissellement.

Ce détachement est d'autant plus important que l'énergie de ces gouttes est forte. Cette énergie est fonction de la vitesse de chute des gouttes qui elle-même dépend de la taille des gouttes (Figure 2).

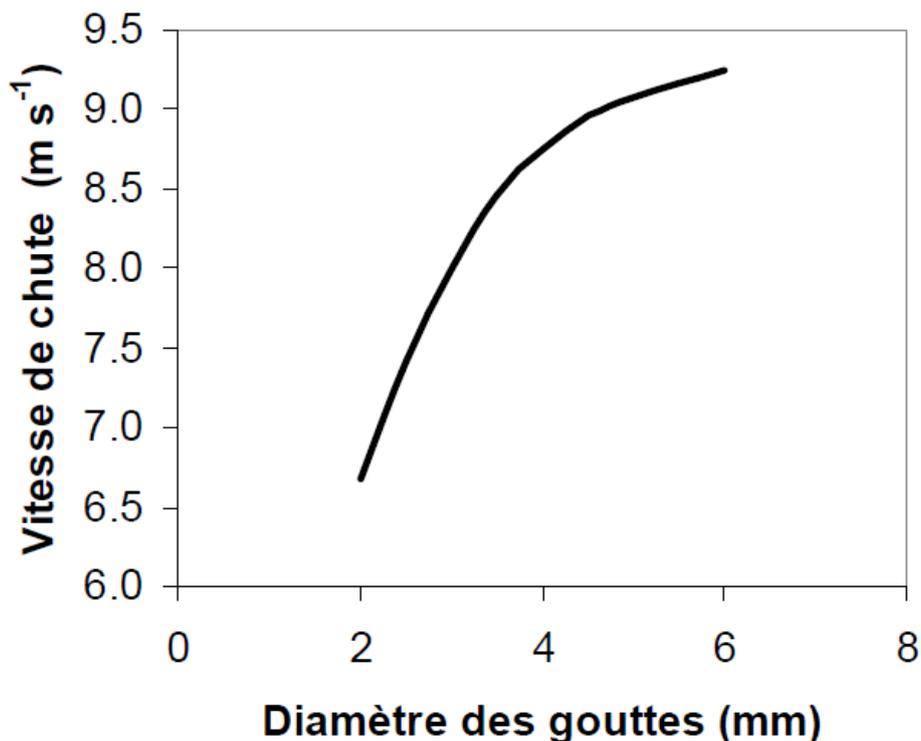


Figure 2 - Graphique de la vitesse de chute des gouttes de pluie en fonction de leurs diamètres (Source : J. POULENARD)

Une goutte d'eau de masse  $m$  et de vitesse  $v$  possède lors de sa chute une énergie cinétique équivalente à  $\frac{1}{2} * m * v^2$ . Ainsi, plus les pluies sont intenses, plus la taille et la vitesse des gouttes est importante et ainsi plus fort sera le battage du sol. L'énergie cinétique des gouttes de pluie est le fondement de l'érosivité des pluies.

Une équation de l'énergie cinétique a été établie par Smith et Wischmeier (1978), mettant en avant l'importance primordiale de l'intensité des pluies sur ce phénomène :

$$EC = 916 + 331 * \log I$$

Avec : EC : Energie Cinétique en pieds/tonnes par acre et par pouce de pluie ;

I : intensité pluviale en pouces par heure.

#### *1.2.4.1. La fréquence des pluies*

La fréquence des pluies influencera la saturation en eau du sol. Des pluies fréquentes empêcheront la désaturation en eau, ce qui jouera en la faveur du ruissellement plutôt que de l'infiltration.

Des mesures des effets de pluies successives ont été réalisées à Madagascar et il en résulte que la deuxième pluie, qui s'est produite le lendemain de la première, a davantage érodé et ruisselé que la première alors qu'elle était moins intense.

Pour certains climats, comme le climat méditerranéen ou tropical, les précipitations sont caractérisées par leur répétition à court terme, à l'échelle de la journée par exemple, durant la saison des pluies. Ces climats seront donc en théorie plus sensibles à la fréquence des précipitations que d'autres.

### *1.3. Contexte général de la perte de sol*

Dans le contexte global actuel, l'érosion naturelle a été perturbée par l'Homme. Selon Sundborg en 1986, les actions humaines sont associées à l'apparition de conditions naturelles exceptionnelles favorables à l'accélération de l'érosion des sols. Ces actions humaines sont liées à la surpopulation et la surconsommation : augmentation de la dimension des parcelles et spécialisation des cultures, techniques culturales intensives qui fragilisent le sol (approfondissement des labours, travail intensif du sol et apports phytosanitaires), urbanisation, disparition des éléments structurant le paysage, ...

Les actions anthropiques ont également un effet avéré sur le changement climatique global, notamment l'augmentation de la température et une accentuation des contrastes saisonniers de pluviométrie. L'augmentation des phénomènes pluviométriques extrêmes ou des pluies hivernales plus abondantes peuvent induire une accélération de l'érosion des sols et/ou augmenter les conditions d'engorgement des sols. Cette érosion perturbée et amplifiée par l'Homme a été nommée « érosion accélérée » par Langhor en 1990.

La vitesse d'érosion se mesure en tonne par hectare par année. A titre d'exemple, pour avoir une idée de ce que cette unité représente, une érosion de 10 t/ha/an est équivalente à une perte de sol d'1 mm/an. Selon les données du BRGM datant de 2010, l'érosion des sols au niveau européen est estimée à environ 17 tonnes/ha/an et concernerait une surface de 4 milliards de km<sup>2</sup> soit 40 millions d'hectares.

Cerdan *et al.* en 2010 ont effectué des extrapolations régionales à partir de banques de données européennes. A partir de ces extrapolations, ils ont pu estimer les taux d'érosion moyens par pays. D'après ces données, la France est le pays européen possédant la surface concernée par les pertes en terre dues à l'érosion hydrique la plus forte avec une surface de 547 400 km<sup>2</sup> et l'érosion totale par année la plus forte avec 80.5 millions de tonnes, ce qui représente 14.5 % de l'érosion européenne totale.

L'érosion hydrique sur le territoire français provoquerait une perte de sol moyenne d'environ 1.5 t/ha/an, avec une déviation standard de 5. Or, une érosion supérieure à 1 t/ha/an sur 50 à 100 ans est considérée comme irréversible car le renouvellement du sol par pédogénèse ne compense pas la perte de sol à partir

de ce seuil-là. On admet que la quantité moyenne de formation de sol est d'environ 1 t/ha/an. Du fait de ce caractère irréversible de l'érosion, le sol est considéré comme une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle du temps historique.

Par rapport aux autres régions françaises, la région Centre est une des régions les plus affectées par la perte en terre due à l'érosion hydrique avec une surface concernée de 39 600 km<sup>2</sup>. La majorité de cette surface est comprise entre 0 et 0,5 t/ha/an de perte de terre. Cependant, une perte en terre supérieure à 2 t/ha/an concerne plus de 26 % de ces 39 600 km<sup>2</sup>.

Il existe donc un véritable enjeu vis-à-vis de la compréhension de ce phénomène de perte de sol afin de l'anticiper et de mieux l'appréhender, car il peut être une menace pour la pérennité de certains agro-écosystèmes.

#### *1.4. Présentation générale du projet de recherche DynEtang*

Le projet DynEtang (Dynamique des Etangs) a pour objectif de mieux comprendre la dynamique hydrosédimentaire, géochimique et biologique des étangs. Ces derniers correspondent à de petites étendues d'eau qui ne sont pas suffisamment prises en compte dans les études scientifiques, elles sont en effet considérées comme des masses d'eau orphelines. Il existe donc un réel besoin en connaissances scientifiques sur ces étendues d'eau.

Ce projet de recherche d'intérêt régional a été mis en place par l'unité de recherche CEDETE. Il s'agit d'un projet impliquant la collaboration de plusieurs structures : CEDETE, ISTO, CETRAHE, CITERES, 3ZAINTEC et le PNR de la Brenne.

La durée de ce projet est de 36 mois. Ces derniers sont divisés en 4 phases, chacune possédant des tâches à accomplir :

- Phase 1 : Choix des sites de prélèvement et définition des protocoles de mesures et d'analyses (durée : 1 semestre) ;
- Phase 2 : Caractérisation des étangs et de leurs bassins versants (durée : 2 semestres) ;
- Phase 3 : Modélisation de l'hydrologie des écoulements et des flux de matière (durée : 2 semestres) ;
- Phase 4 : Prédiction et préconisations pour la gestion durable et la restauration (durée : 2 semestres).

Le travail réalisé durant ce stage correspond donc au début de la phase 2 du projet DynEtang. Cette phase 2 a pour objectif de comprendre l'interaction bassin versant – étangs grâce à la mise en place de techniques qui permettent de suivre les flux d'eau et de sédiments d'un bassin versant.

Certains étangs sont menacés par des pollutions diverses (macronutriments, métaux). Ces pollutions peuvent provoquer une éventuelle désoxygénation des strates profondes dans les retenues d'eau. Ces désoxygénations sont devenues récurrentes ces dernières décennies et présentent une réelle menace au bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques.

Ainsi, bien appréhender le fonctionnement hydrosédimentaire, entre autres, des étangs permettra ensuite de proposer des solutions écologiques de remédiation et de préservation à une éventuelle désoxygénation qui pourra servir à la gestion du patrimoine hydrique du Val de Loire.

Notre projet d'étude de la perte de sol par les eaux de ruissellement dans un pâturage du PNR de la Brenne permettra donc d'avoir des informations à propos de ce phénomène dans un climat continental européen et avec un usage de sol particulier. De plus, si d'autres projets à propos de la perte de sol sont mis en place ultérieurement afin d'approfondir le sujet, la méthodologie suivie au niveau des étangs de Berre servira de modèle pour l'élaboration d'une méthodologie pouvant être reprise sur d'autres sites.

### 1.5. Description du PNR de la Brenne

Un Parc Naturel Régional correspond à un territoire rural possédant des paysages, des milieux naturels et un patrimoine culturel de qualité mais dont l'équilibre est fragile, selon la définition donnée par le site internet des Parcs Naturels Régionaux.

La Brenne possède en effet ces caractéristiques car elle propose une mosaïque d'étangs, de landes et de buttes unique en France. Ces buttes sont des buttes de grès qui ont résisté à l'érosion au cours de l'histoire géologique. Le PNR de la Brenne a été créé en 1989 dans le département de l'Indre, en région Centre – Val de Loire (Figure 3) et recouvre une superficie de 183 000 hectares. Il comprend en son sein 51 communes et environ 33 000 habitants. Ce Parc œuvre à la sauvegarde nécessaire d'une zone humide d'importance internationale, classée Ramsar en 1991.

La Brenne est surnommée « Le pays des 1000 étangs » et possède 5321 plans d'eau en son sein, dont 3254 étangs et 1609 mares, ce qui en fait l'une des plus grandes zones continentales de zone humide en France et une zone humide d'importance internationale. Ces étangs sont artificiels et ont été créés grâce à la nature argilo-gréseuse du sol, ce qui en fait un substrat imperméable, et selon la topographie du site. Ils sont généralement peu profonds, environ 1.5 m de profondeur. L'usage de ces étangs est surtout piscicole.

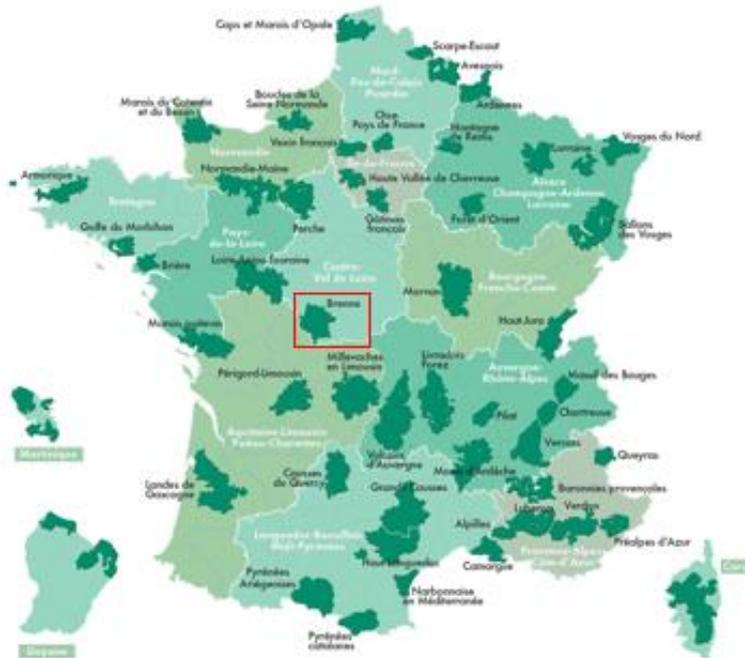


Figure 3 - Localisation à l'échelle nationale du PNR de la Brenne (source : parc-naturels-regionaux.fr)

#### 1.5.1. Principales activités économiques du PNR de la Brenne

Une activité économique ressort principalement dans le PNR de la Brenne, il s'agit de l'agriculture. En effet, plus de 1000 exploitations sont recensées dans le Parc. La majorité des parcelles agricoles sont dédiées à l'élevage. Les sols ne sont pas propices à la culture car ils sont trop humides en hiver et desséchés en été. Environ deux tiers du territoire de la Brenne sont dédiés à l'agriculture.

La pisciculture est une des activités économiques principales en Brenne. La pisciculture est restée traditionnelle jusqu'aux années 1960. A partir des années 1970, elle est devenue plus productive afin d'augmenter le rendement. Actuellement, la pisciculture est pratiquée de façon extensive.

La production de poissons d'étang de la Brenne est d'environ 1200 tonnes par an et est donc une source de richesse importante pour la Brenne, employant une centaine de professionnels.

### **1.5.2. Histoire géologique du PNR de la Brenne**

L'histoire géologique de la Brenne est relativement riche et ancienne. Elle débute il y a 300 millions d'années, à la fin de l'ère primaire, avec l'édification de la chaîne hercynienne.

Au début de l'ère secondaire, pendant la période du Jurassique, la mer s'installe sur une grande partie de l'Europe du Nord puis se retire, laissant derrière elle un paysage propice à l'altération et à la formation de cuirasses de fer sur le relief.

Durant la seconde moitié de l'ère secondaire, c'est-à-dire le Crétacé, le climat est chaud et humide, voire tropical. Ce climat est propice à l'altération des vieilles roches primaires, permettant la formation d'une épaisse couche argileuse.

L'individualisation de la Brenne commence il y a environ 40 millions d'années, avec un effondrement du substratum calcaire qui crée une cuvette. Cette cuvette sera comblée par une accumulation d'argiles et de sables argileux en provenance du Massif Central. Ces argiles et sables argileux sont à l'origine des « terres grasses » de Brenne.

L'histoire géologique de la Brenne s'achève à la fin de l'ère tertiaire, il y a deux millions d'années, avec le comblement de la cuvette de la Brenne. Les fleuves se répandent librement sur le plateau, laissant derrière eux des épandages sablo-argileux et creusant de profondes vallées. Une érosion différentielle affecte les plateaux : une partie des sédiments meubles sont érodés mais épargne les buttes de grès résistants, ce qui est à l'origine des chaînes de buttes de la Brenne.

### **1.5.3. Différents sites labellisés inclus dans le PNR de la Brenne**

Du fait de sa grande richesse écologique, plusieurs sites labellisés ont été mis en place dans le PNR de la Brenne :

- Réserve Naturelle Régionale (RNR) : Terres et étangs de Brenne, Massé, Foucault :

Une Réserve Naturelle Régionale a été créée en Octobre 2014 au sein du PNR de la Brenne. Il s'agit d'une RNR comprenant 314 hectares de prairies et de zones humides. 25 habitats naturels caractéristiques de la Brenne se retrouvent dans cette Réserve.

La retenue d'eau étudiée ainsi que le pâturage accueillant la retenue d'eau se situe dans cette RNR.

- Zone Ramsar :

Il s'agit de la seconde plus grande surface de zone Ramsar de France. La Convention de Ramsar a pour objectif d'éviter la disparition des zones humides et de favoriser leur conservation.

La Brenne a été désignée comme zone Ramsar le 8 avril 1991. Cette zone recouvre environ 140 000 hectares dont 9000 hectares d'eau.

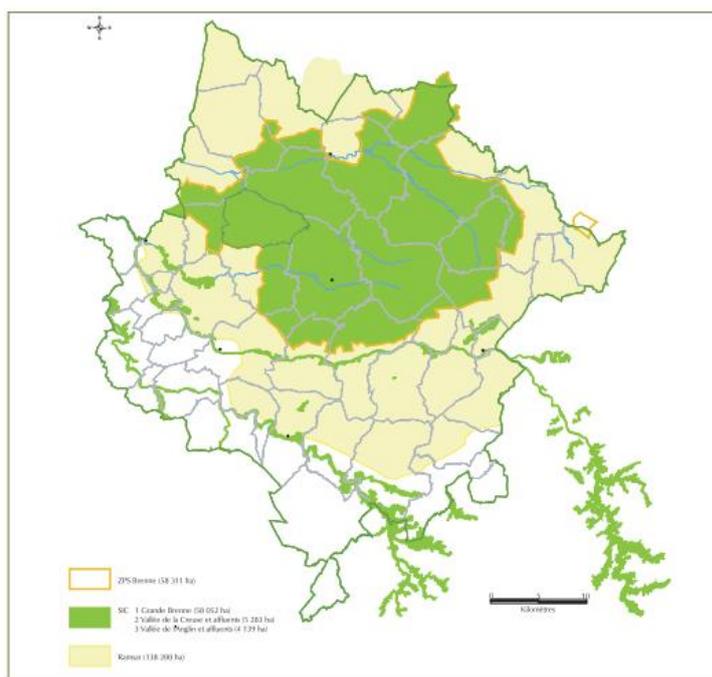


Figure 4 - Cartographie des zones classées au titre de leur intérêt environnemental (Source : PNR de la Brenne)

- Natura 2000 :

D'après le site de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), Natura 2000 est un réseau européen visant à permettre la survie pérenne des espèces et des habitats menacés, à forts enjeux de conservation. Ce réseau correspond à la mise en application de la Directive « Oiseaux » datant de 1979 et de la Directive « Habitats » datant de 1992.

Un ensemble de sites naturels, terrestres et marins constituent ce réseau, abritant des espèces florales et faunistiques considérées comme rares ou fragiles.

Des zones particulières sont comprises dans ce réseau :

- Les Zones de Protection Spéciales (ZPS) ayant pour objectif la conservation des espèces d'oiseaux sauvages,
- Les Zones Spéciales de Conservation (ZSC) ayant pour objectif la conservation des types d'habitats et des espèces animales et végétales.

Dans le cas de la Brenne, 4 de ces zones particulières sont présentes : 3 ZSC et 1 ZPS. Les trois premières correspondent à la Grande Brenne, la Vallée de la Creuse et affluents et la Vallée de l'Anglin et affluents et la dernière comprend la quasi intégralité du périmètre de la Grande Brenne.

- ZNIEFF :

Le site de l'INPN définit les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) comme des secteurs possédant de fortes capacités biologiques et un bon état de conservation.

Deux sortes de ZNIEFF existent :

- Les ZNIEFF de type I qui correspondent à des secteurs ayant un grand intérêt biologique ou écologique,
- Les ZNIEFF de type II qui correspondent à de grands ensembles naturels riches et peu modifiés, proposant des potentialités biologiques importantes.

Le secteur de la Grande Brenne a été identifiée comme ZNIEFF de type II.

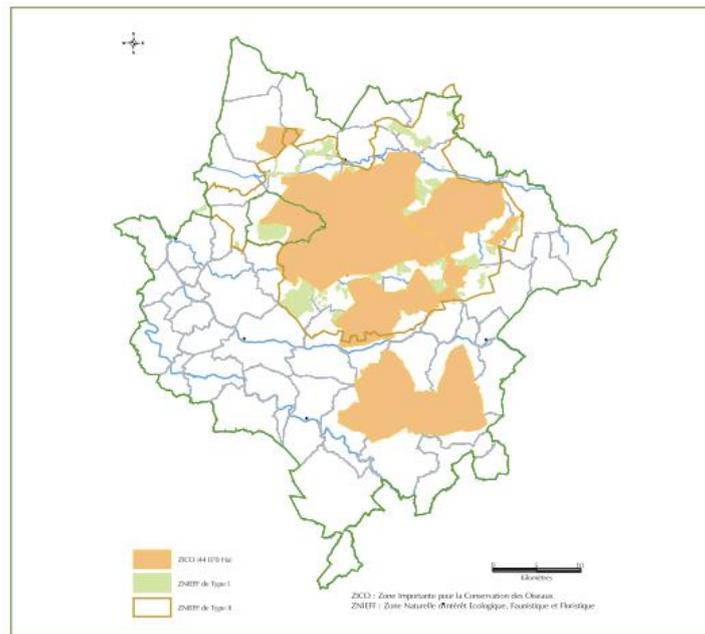


Figure 5 - Cartographie des zones inscrites aux inventaires ZNIEFF et ZICO (Source : PNR de la Brenne)

- ZICO :

La définition de cette Zone d'Importance Communautaire pour les Oiseaux proposée par le dictionnaire environnement disponible sur le site actu environnement est la suivante : il s'agit d'une zone dans laquelle des milieux jouant un rôle important dans la vie des oiseaux sont inclus. Cependant, aucune protection réglementaire n'est conférée grâce aux ZICO, mais une attention particulière leur est accordée lors de l'élaboration de projets d'aménagement ou de gestion.

Au niveau du Parc, 3 zones dans la Grande Brenne et 1 dans la Petite Brenne ont été inventoriées comme ZICO.

### 1.6. Objectifs du stage

L'étude de l'érosion hydrique au niveau d'un bassin versant inclus dans le pâturage juxtaposé à l'Ouest de l'étang Pifaudière situé dans le PNR de la Brenne et appartenant à la réserve naturelle régionale Terres et étangs de Brenne s'inscrit donc parfaitement dans le projet DynEtang et sa volonté d'en apprendre davantage sur le fonctionnement des petites étendues d'eau.

Les objectifs de ce stage sont :

- l'observation, la définition et la quantification du ruissellement de l'eau et des pertes de sol au niveau d'un bassin versant situé dans un pâturage et représentatif du fonctionnement hydro-sédimentaire au niveau de l'étang Pifaudière ;
- La compréhension des processus de ruissellement et de détachement du sol à l'échelle du site d'étude avec l'étude de certaines propriétés du sol qui influencent l'érosion hydrique et des précipitations.

Lors de cette étude, différentes méthodes seront utilisées afin d'obtenir des données permettant de répondre aux objectifs précédents. Ces méthodes seront définies dans une première partie après une présentation du site d'étude puis les principaux résultats obtenus seront présentés et discutés dans une seconde partie, avant une conclusion générale.

La Figure 6 ci-dessous synthétise les relations entre les paramètres de l'étude ainsi que le fil logique suivi dans cette présentation : partir de la gauche avec l'érosion hydrique, et remonter au fur et à mesure vers la droite pour apporter des éléments de compréhension et d'explication.

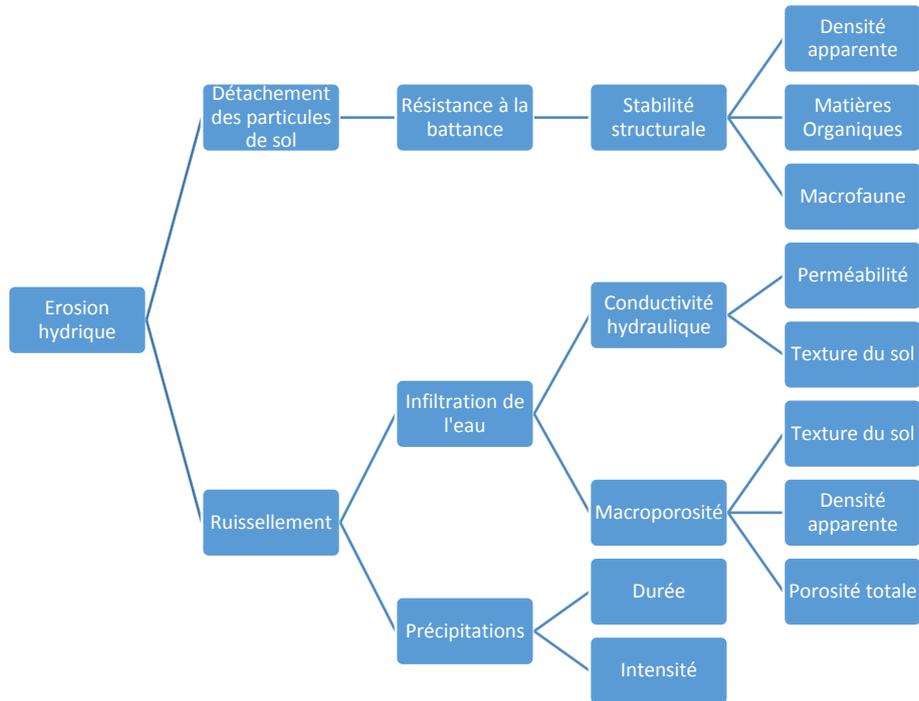


Figure 6 - Schéma représentant les liens entre les différents paramètres influençant l'érosion hydrique

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Présentation de la zone d'étude

#### 2.1.1. Un site d'étude au sein du PNR de la Brenne

Des étangs sentinelles du Parc Naturel Régional de la Brenne ont été choisis comme zone d'étude pour le projet DynEtang. Dans une optique de réalisme financier, une seule retenue d'eau a été choisie pour faire l'objet de l'expérimentation : l'étang Pifaudière.

Dans le cadre de mon stage, on étudiera une petite retenue d'eau qui se situe juste à côté de l'étang Pifaudière. Une photographie satellite de l'étang Pifaudière (point orange) et de la retenue d'eau étudiée est disponible ci – dessous (Figure 7).

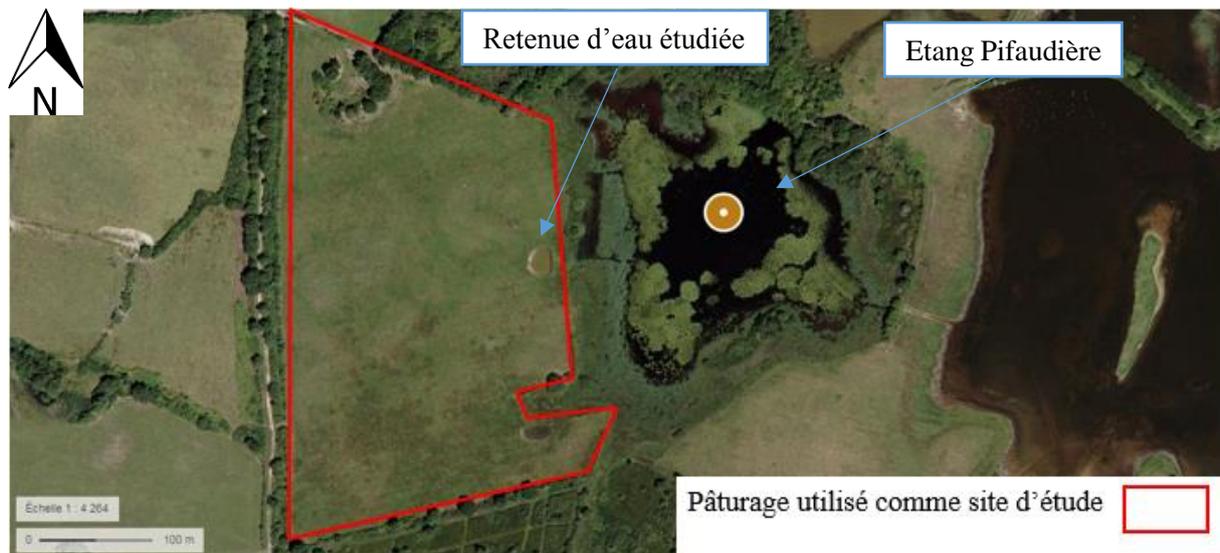


Figure 7 - Photographie satellitaire du site d'étude et de l'étang Pifaudière (Source : géoportail.gouv.fr)

Cette mare se trouve dans la commune de Rosnay, à quelques kilomètres à l'Est de la Maison du Parc, dans le département de l'Indre, à une centaine de kilomètres au Sud-Est de Tours. Une base militaire se trouve également à proximité de cet étang.

Cette localisation a été choisie pour plusieurs raisons :

- Une toposéquence représentative de la zone a été trouvée d'environ 150 mètres,
- La parcelle agricole dans laquelle seront implantés les micro parcelles appartient à la réserve naturelle régionale Terre et étang de Brenne Massé-Foucault,
- Les caractéristiques des versants de l'étang Pifaudière sont intéressantes pour le suivi hydrosédimentaire :
  - o La présence d'un bouton en haut de toposéquence,
  - o Une pente relativement homogène,
  - o Le couvert végétal est un couvert de pâture, représentatif de l'usage du sol.

La mare à proximité de l'étang Pifaudière a été préférée par rapport à celui-ci car il est beaucoup plus complexe d'étudier les apports sédimentaires de l'étang Pifaudière qui sont nombreux et dépendent de plusieurs micro bassins versants. De plus, il est plus intéressant financièrement d'étudier une petite retenue d'eau, il suffit de mettre quelques micro parcelles tandis que pour l'étang, il aurait fallu en mettre pour chaque micro bassin versant apportant de l'eau et des sédiments à l'étang Pifaudière.

Le pâturage qui accueille les micro parcelles d'étude et les différents micro bassins versants présents ont été modélisés grâce au DGPS et au logiciel Surfer. Le Differential Global Positioning System ou Système de Positionnement global différentiel (DGPS) est composé de deux constituants : un mobile et une station. Cette dernière se situe au niveau d'un point de référence dont les coordonnées sont connues. Elle peut ainsi déterminer le parcours de la partie mobile à partir de ses coordonnées. Les données X,Y et Z sont obtenues en format .txt.

Grâce à la méthode de krigeage et l'outil Watershed de Surfer, les micro bassins versants en présence dans le pâturage ont été modélisés. On remarque ainsi que les 3 micro parcelles, les 6 piézomètres et la retenue d'eau se trouvent dans le même micro bassin versant (Figure 8).

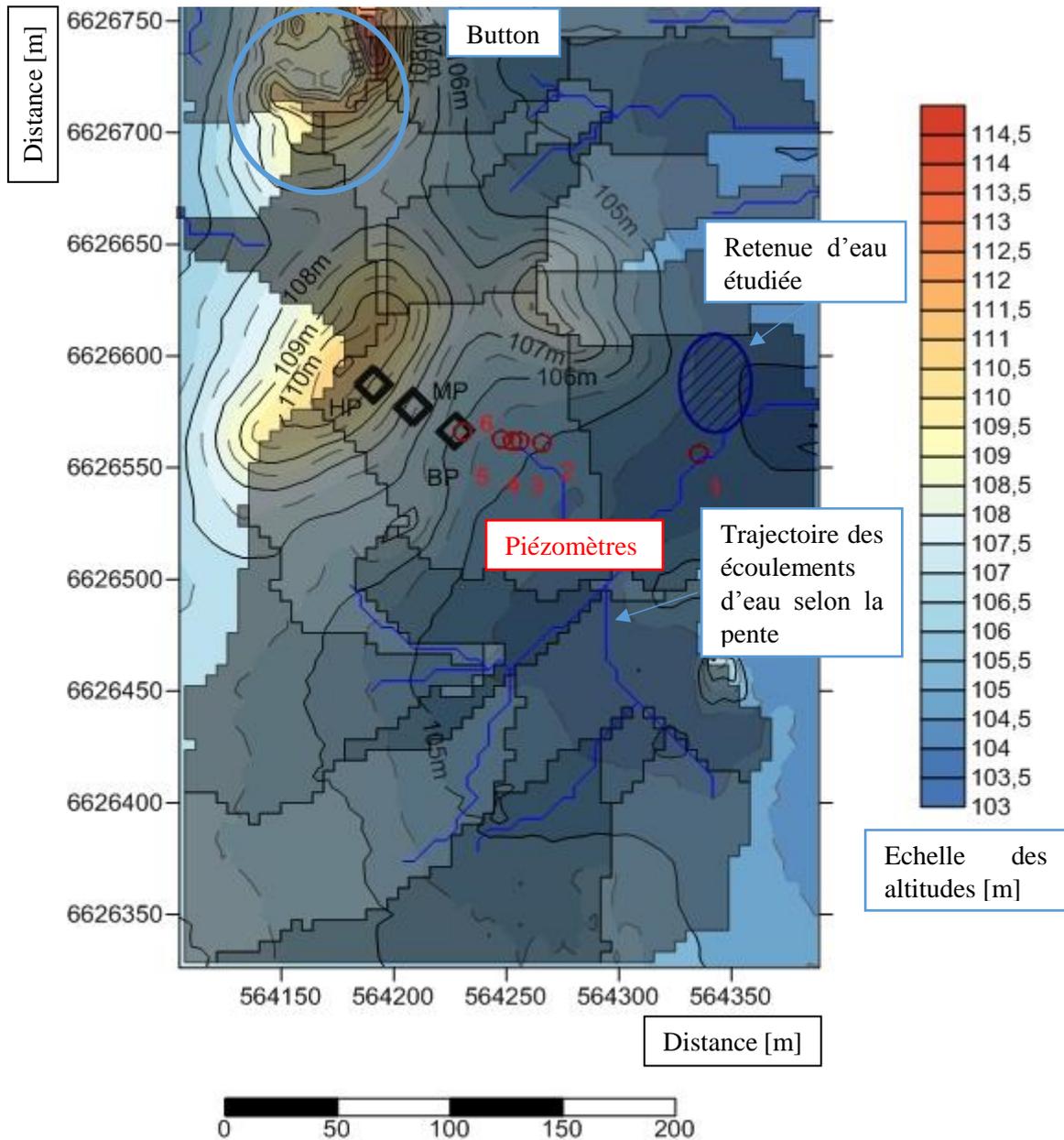


Figure 8 - Modèle numérique de terrain, obtenu avec le logiciel Surfer du pâturage, représentant les courbes de niveau, les micro bassins versants ainsi que les trajectoires d'écoulement de l'eau et les emplacements des micro parcelles selon leur position topographique : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP)

Les courants d'écoulement de l'eau sont modélisés par les traits bleus. Ces courants montrent que l'eau qui ruissellera au niveau des micro parcelles se retrouvera dans l'exutoire des micro bassins versant, la retenue d'eau étudiée. Trois micro parcelles d'érosion ont été installées le long de la pente. Ces structures de suivi de l'érosion hydrique seront présentées plus en détails dans la partie 2.2.

Le site d'étude possède une altitude comprise entre 103 mètres vers la retenue d'eau étudiée et 110 mètres en haut de pente. L'altitude maximale est atteinte au niveau du bouton, au Nord – Ouest du pâturage.

### 2.1.2. Une zone agricole dans un climat tempéré

La présentation des caractéristiques du site d'étude est intéressante car elle apporte des premières informations du site d'étude par rapport à l'érosion hydrique, en reliant ces informations avec les paramètres de la partie 1.2.

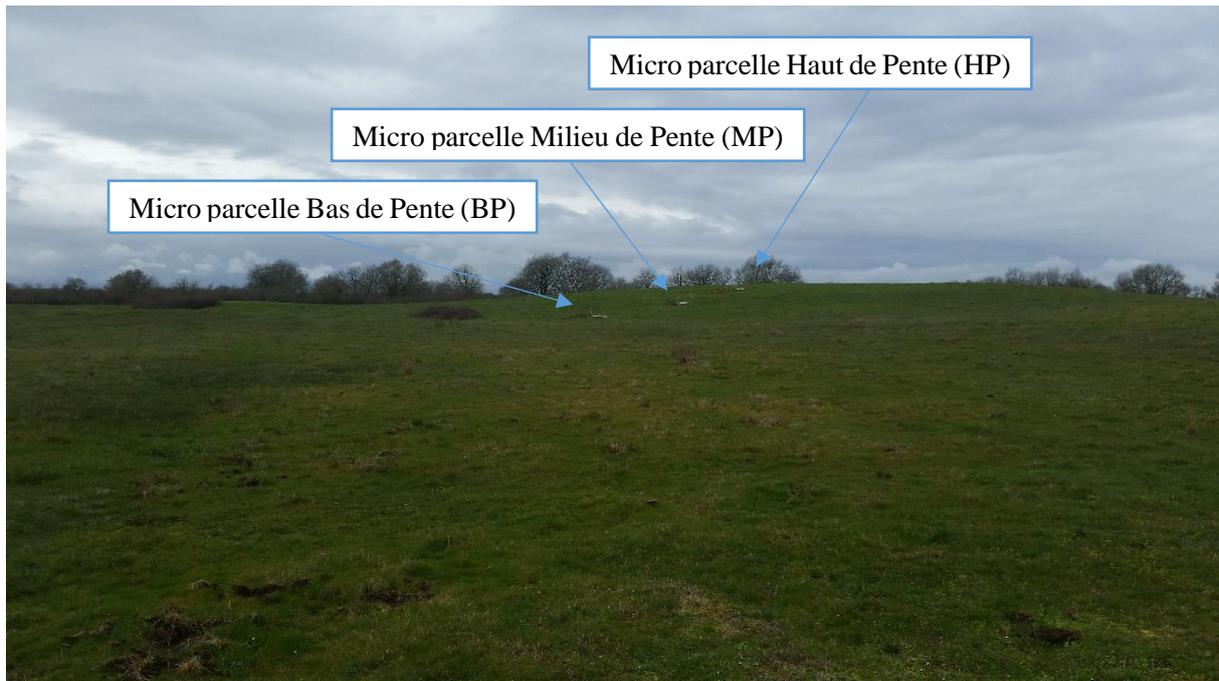


Figure 9 - Photographie des micro parcelles placées le long de la pente dans le pâturage d'étude : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP)

### ***Le climat***

Les informations sur le climat du PNR de la Brenne sont tirées du document d'objectifs des sites Natura 2000 « Brenne » et « Grande Brenne » datant de 2012.

Le climat du PNR de la Brenne est un climat tempéré de type océanique avec des vents d'Ouest ou de Sud – Ouest.

La quantité d'eau de pluie moyenne annuelle est d'environ 550 mm. Cette pluviométrie varie relativement peu au cours de l'année, d'environ 20 à 30 mm. Les eaux pluviales tombent sous la forme d'averses fréquentes mais de faible intensité avec un pic en mai et un déficit en avril.

La température moyenne annuelle est proche des 11 °C avec des températures moyennes mensuelles comprises entre 3 et 5 °C.

### ***Nature des sols***

Les sols de la Brenne forment une mosaïque à dominante sableuse reposant sur un sous – sol imperméable de grès ou d'argile situé à faible profondeur (40 à 80 cm) pour la plupart des sols.

A l'échelle du Parc, les sols possèdent une grande hétérogénéité. Néanmoins, 2 grands types de sol se distinguent principalement :

- Les sols hydromorphes liés à l'imperméabilité du terrain, riches en matière organique et très acides.
- Les sols primitifs sur buttons et affleurements de grès. Les buttons correspondent à des grès résistants qui s'organisent en reliefs résiduels. La zone d'étude où sont implantées les micro parcelles possède un bouton en haut de pente.

La prairie du site d'étude est une prairie de pâturage relativement humide, la nappe est affleurante et de petites zones humides sont observables. La présence de ces zones humides est relativement aisée à observer du fait de la présence d'espèces végétales hygrophiles et de traces d'hydromorphie notables lors des creusements à la tarière ou à la pelle. Ces petites zones humides étaient surtout visibles pendant

les mois de Mars et d'Avril mais lors de l'augmentation de la température estivale, le sol en surface s'est asséché, rendant temporaires ces zones humides.

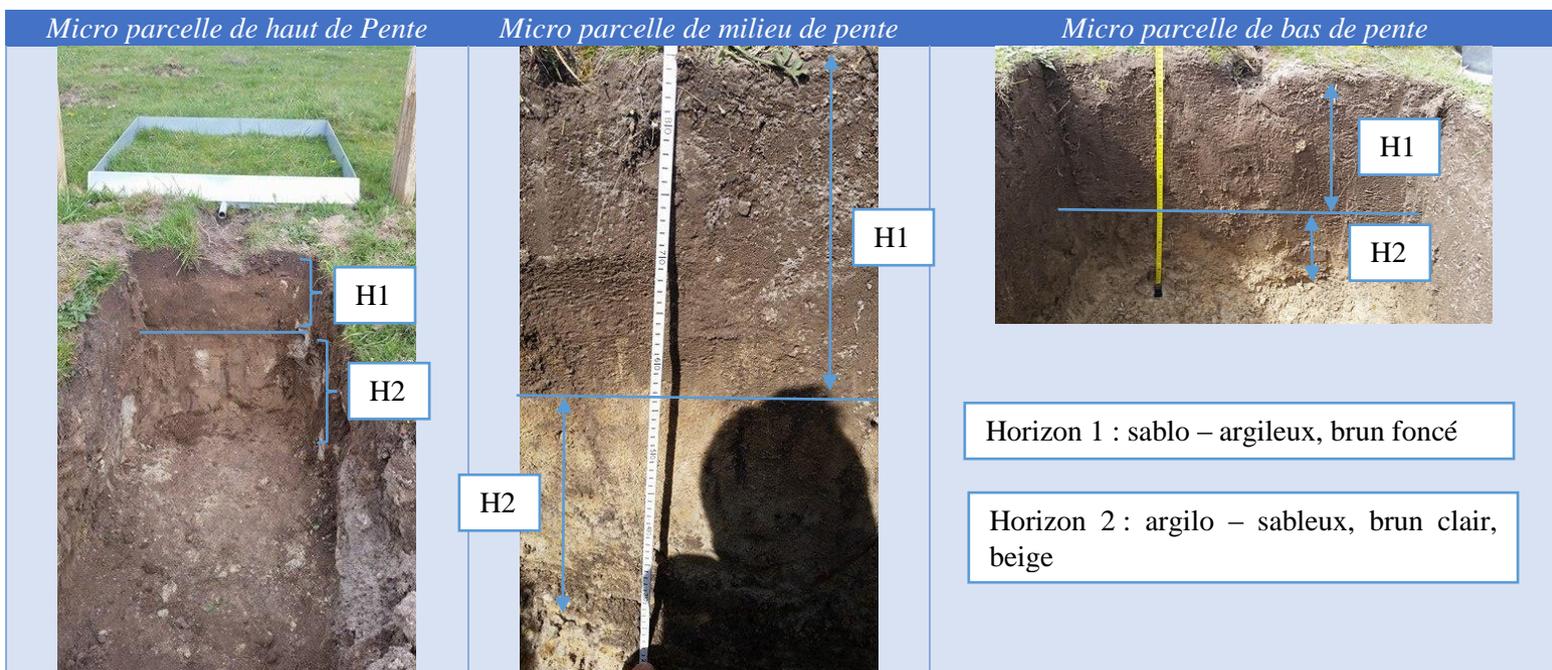
Lors de la mise en place des cuves de stockage des eaux de ruissellement, un terrassement à la pelle mécanique a été effectué. Il a ainsi été possible de s'intéresser aux profils verticaux du sol « frais » (Tableau 1). Les profils verticaux des micro-parcelles de milieu et de bas de pente sont relativement similaires. Ils sont tous les deux composés de deux horizons d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur chacun. La texture de ces horizons semble plutôt sablo – argileuse voire argilo – sableuse plus en profondeur. La couleur de l'horizon le plus proche de la surface est marron foncé tandis que celle de l'horizon plus en profondeur est davantage jaune pâle – beige. L'horizon en surface correspondrait à un horizon organique. Ce genre d'horizon n'apparaît que lorsque le sol n'a pas été travaillé en profondeur depuis des années, ce qui est le cas des prairies permanentes. L'horizon blanchâtre correspond à un horizon éluvial majoritairement minéral, pauvre en colloïdes à cause d'un lessivage vertical et de la circulation hypodermique de l'eau.

Le profil vertical de la micro-parcelle 1 est légèrement différent des deux autres. En effet, des blocs de grès de taille centimétrique à décimétrique étaient présents sur la moitié la plus profonde du profil.

Après comparaison avec l'étude agro-écologique effectuée par Perrine PUYBERTHIER des prairies du site de Foucault lors de son stage de fin d'étude, notamment avec les profils pédologiques réalisés dans d'autres pâturages à proximité du site d'étude avec l'aide de Joël MOULIN, ces profils de sols peuvent être décrits comme étant de type Planosol. Comme il l'a été mentionné précédemment, ce type de sol possède une particularité, il s'agit de sol doublement lessivé avec un lessivage vertical mais également une circulation hypodermique de l'eau.

Cette circulation hypodermique correspond à une circulation latérale de l'eau infiltrée dans le sol dans les horizons supérieurs du sol. On peut supposer que cette circulation hypodermique se fait niveau de l'horizon 2 plu en profondeur, qui semble former un horizon moins perméable.

Tableau 1 - Profils verticaux des sols au niveau des 3 micro parcelles le long de la pente (Source : B.MARION)



## ***Géomorphologie***

La Brenne se trouve sur un plateau relativement plat, avec une altitude moyenne de 100 m. Des buttes, des monticules de grès issus de l'érosion, sont néanmoins présents. Cette présence crée une légère hétérogénéité dans la topographie. Ces buttes ont une hauteur variable et peuvent atteindre jusqu'à 30 m de hauteur.

La pente du pâturage dans laquelle ont été placées les micro parcelles est relativement faible, avec une pente globale moyenne de  $10,2 \% \pm 1,4$ . Elle a été mesurée autour de chaque micro parcelle quatre fois chacune (Tableau 2).

*Tableau 2 - Valeurs de pente [%] autour des micro parcelles*

	1	2	3	4	Moyenne	Ecart type
<b>HP</b>	8,74	14,23	10,33	13,81	11,78	2,68
<b>MP</b>	10,51	10,86	7,69	9,8	9,72	1,42
<b>BP</b>	9,62	9,62	8,04	8,92	9,05	0,75

## ***Usage du sol***

La prairie où se situe la mare étudiée et où l'étude du détachement du sol se déroulera est une prairie de pâturage, plus précisément de bovins et de chevaux. Le propriétaire de cette prairie est le Parc mais ce dernier le loue à une agricultrice voisine qui l'utilise ainsi pour élever ses troupeaux de vaches ou de chevaux. Lors de certaines missions sur le terrain, des bovins étaient parfois présents dans la parcelle. Ces bovins étaient de la race « Aubrac » (Figure 10).



*Figure 10 - Photographie du troupeau bovin dans le pâturage d'étude*

Du fait de la présence assez fréquente de bovins, surtout à partir de la hausse des températures après l'hiver, des barbelés ont été installés autour des micro parcelles et de la retenue d'eau, afin que les animaux n'accèdent pas à ces zones.

### ***La flore en présence***

La flore de la parcelle est une flore spécifique au pâturage. Elle peut être rattachée à l'habitat naturel des prairies semi-naturelles humides, Prairies mésophiles améliorées. Cet habitat naturel recouvre 41 % du site Natura 2000 de la Grande Brenne (INPN, 2018), dans lequel se situe notre site d'étude. Les plantes qui se situaient à l'intérieur de la micro parcelle ont été identifiées (Figure 11).

- Brome mou (*Bromus hordeaceus*),
- Plantain (*Plantago*),
- Liseron des champs (*Convolvulus arvensis*),
- Achillée millefeuille (*Achillea millefolium*),
- Pissenlit (*Taraxacum officinale*),
- Trèfle blanc (*Trifolium repens*),
- Crépis bisannuel (*Crepis biennis*)



Figure 11 - Photographie de la flore lors de l'identification

### ***La retenue d'eau étudiée***

La retenue d'eau étudiée est l'exutoire d'un relatif petit bassin versant qui se trouve au milieu de pâturages. L'eau de cette retenue provient uniquement du bassin versant.

L'étang Pifaudière, qui se situe à proximité de la retenue d'eau, trouve son origine également des eaux en provenance uniquement de ses bassins versants : il s'agit d'un étang tête de bassin. Cet étang recouvre une surface d'environ 7 hectares.

Cet étang peut d'ailleurs rentrer en connexion avec la retenue d'eau lorsque celle-ci est suffisamment remplie lors d'événements pluvieux assez forts (Figure 12 et Figure 13).

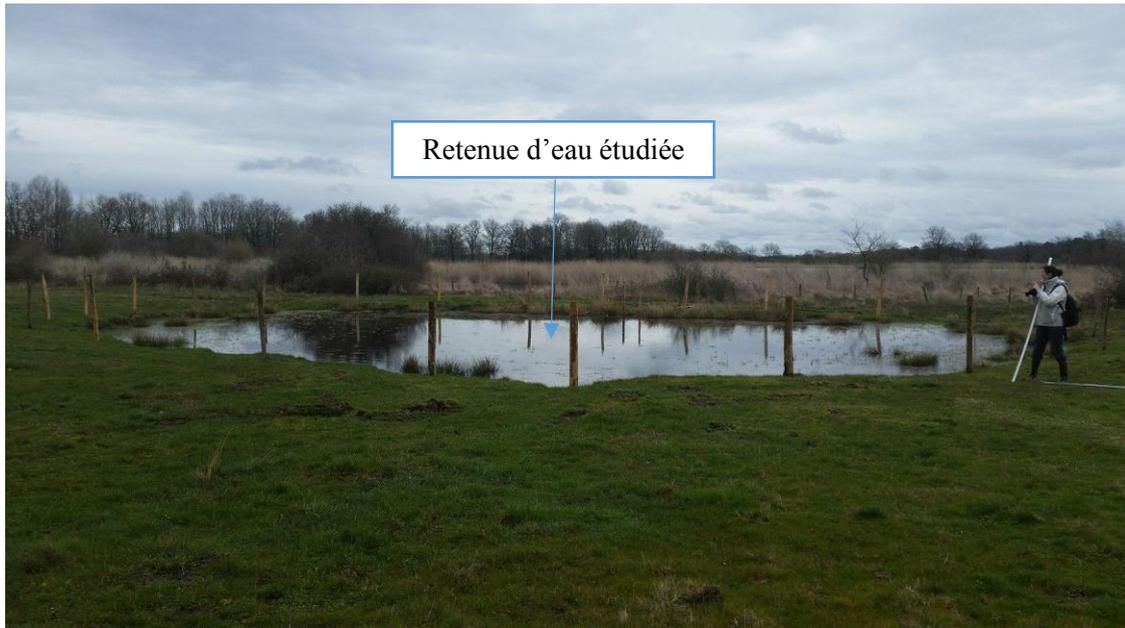


Figure 12 - Photographie de la retenue d'eau étudiée à proximité de l'étang de la Pifaudière (15/03/2018)



Figure 13 - Photographie du « débordement » de la retenue d'eau dans l'étang Pifaudière (12/04/2018)

En résumant les caractéristiques de la zone d'étude, c'est-à-dire, la présence d'une végétation de prairie toute l'année, un climat tempéré et une pente relativement faible, celles-ci sont synonymes d'une bonne protection du sol et une faible vulnérabilité de ce sol vis-à-vis de l'érosion hydrique.

A partir de cette observation, une première hypothèse, nommée H1, peut être émise : l'érosion hydrique au niveau du site d'étude choisi sera plutôt faible. Pour vérifier cette hypothèse, il est nécessaire de quantifier l'érosion hydrique.

## 2.2. Quantification de l'érosion hydrique à l'aide de la perte de sol et des eaux de ruissellement

L'érosion hydrique peut être quantifiée au travers des quantités de particules détachées et d'eau de ruissellement. Pour cela, des micro parcelles d'érosion sont utilisées. Cette quantification permettra ensuite de qualifier l'érosion hydrique, si elle est plutôt conséquente, négligeable, ...

### Description des micro parcelles

Les micro parcelles installées sont des cadres en métal carrés enfoncés dans 0.1 m dans le sol et recouvrant une surface d'1 m<sup>2</sup> (1 mètre de large par 1 mètre de longueur). Ces mini parcelles sont identiques à celles mises en place par Janeau *et al.* (2003) dans leurs études, dont un schéma représentatif se situe ci-dessous (Figure 14), ainsi qu'une photographie d'une micro parcelle « réelle » mise en place (Figure 15) dans le pâturage.

Ces micro parcelles sont orientées dans le sens de la pente. La face du cadre qui est la plus en aval possède une ligne de trous, permettant le passage de l'eau ruisselante dans une gouttière. La ligne de trou doit donc être au niveau du sol pour ne pas gêner l'écoulement des eaux ruisselantes dans la gouttière. Cette dernière est connectée, grâce à un tuyau, à un seau qui collectera ainsi l'eau de ruissellement et les sédiments.

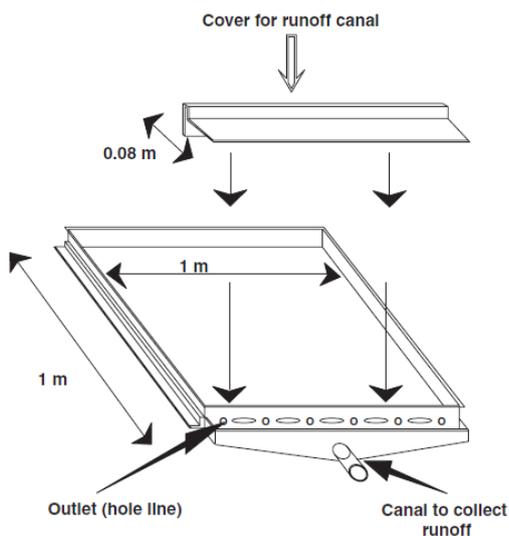
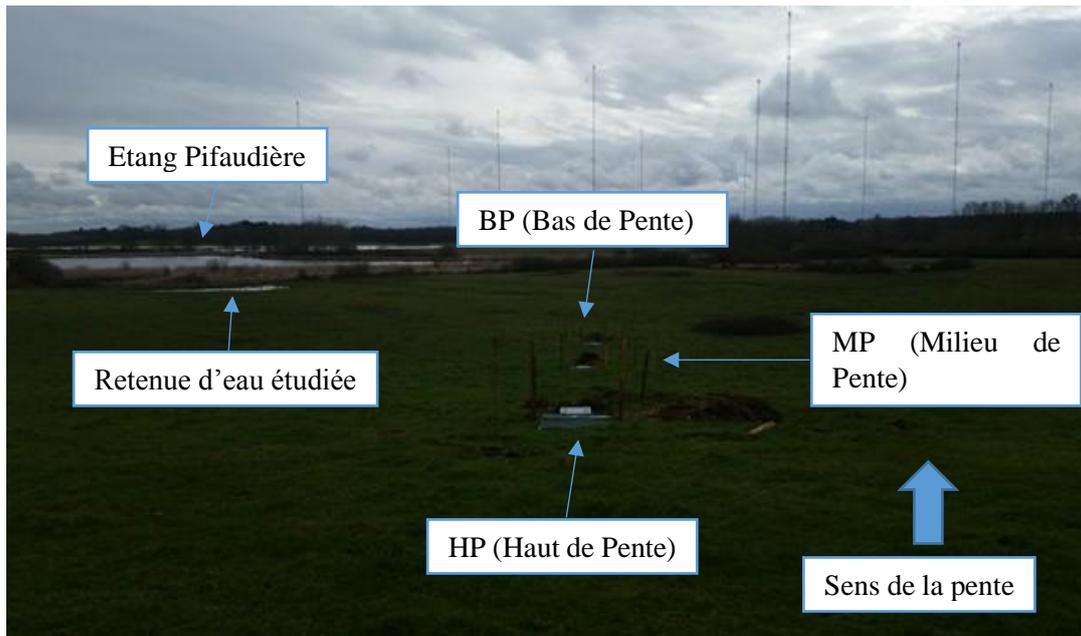


Figure 14 - Représentation schématique de la structure d'une micro parcelle (Source : Janeau *et al.*, 2003)



Figure 15 - Photographie d'une des micro parcelles mises en place sur le site d'étude

Trois parcelles au total seront installées dans le pâturage le long d'une toposéquence entière : une en amont du bassin versant et en haut de pente (HP), une un peu plus en aval et en bas de pente (BP) et la dernière entre les deux précédemment citées et en milieu de pente (MP).



### ***Prélèvement d'eau de ruissellement***

Lors de chaque passage dans le secteur d'étude, la présence d'eau dans les seaux de stockage des micro parcelles est vérifiée. Si de l'eau est présente, alors elle est prélevée dans une bouteille d'eau avec les sédiments qu'elle contient ainsi que les éventuels sédiments présents dans la gouttière. Si le volume d'eau contenu dans le seau de stockage est important alors un volume représentatif de 500 mL est prélevé en faisant attention à bien agiter l'eau afin d'homogénéiser les sédiments qu'elle contient.

Cependant, il a été observé que malgré l'absence d'eau dans les seaux, des sédiments se retrouvaient dans les gouttières. Ces sédiments sont tout de même prélevés et conservés dans des tubes.

Les échantillons relevés sur le terrain sont ensuite amenés en laboratoire afin d'être pesés. Pour cela, les échantillons d'eau seront filtrés une première fois à travers un filtre à café (Tableau 3) afin de retenir les sédiments les plus grossiers puis une filtration à l'aide de micro filtres sera effectuée.

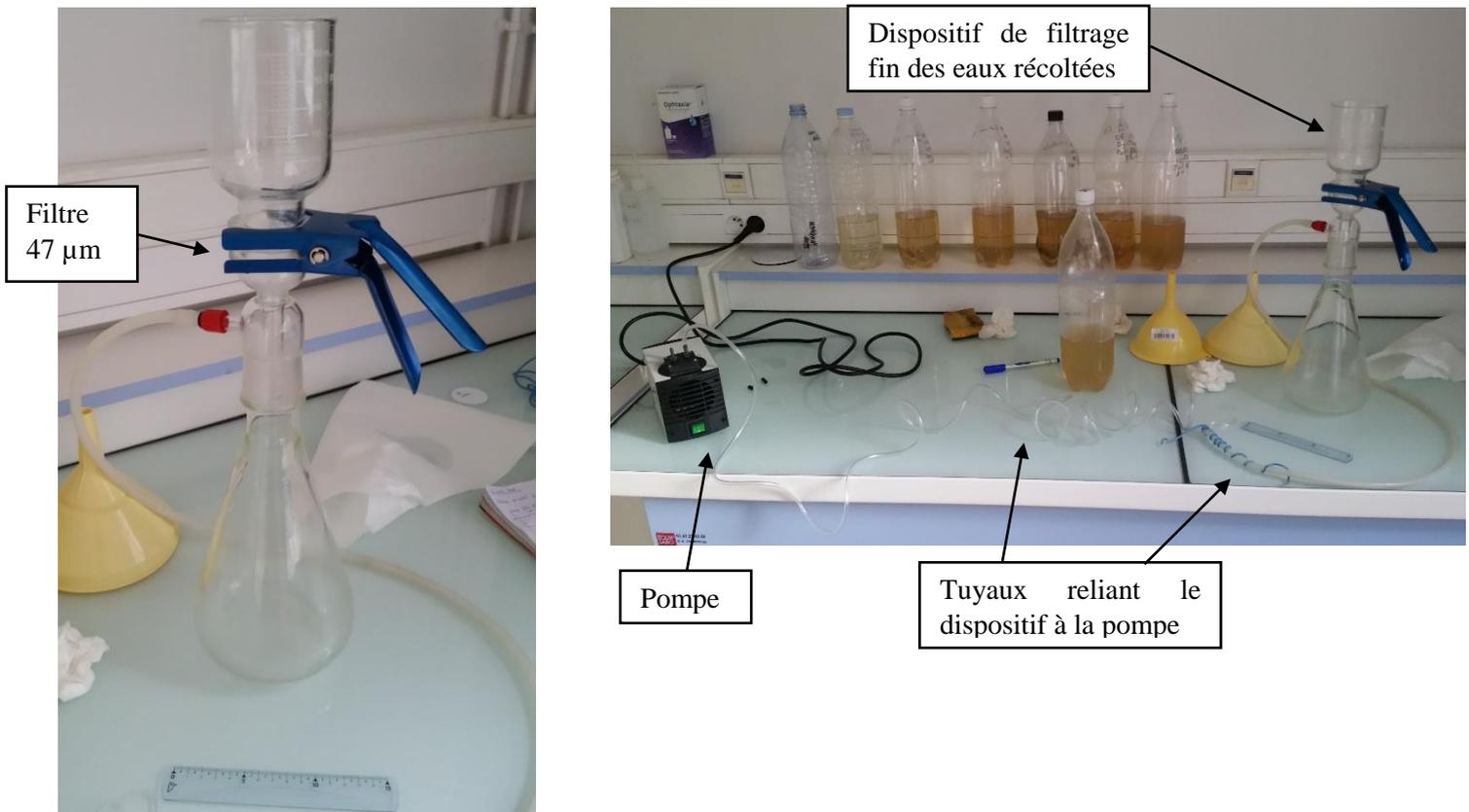
Pour la première filtration au filtre à café, une fois l'intégralité de l'échantillon versé, le filtre humide est placé dans l'étuve pendant 24 heures à 40°C afin de le sécher. Le séchage à 40°C offre la possibilité de « conserver la matière organique dans le sédiment » (Guern *et al.*, 2004). Puis, la masse de sédiments contenus sèche est pesée.

*Tableau 3 - Photographies des filtrages des éléments grossiers via filtres à café*



Le second filtrage plus fin s'effectue à l'aide d'une petite pompe afin d'aspirer l'air à l'intérieur de la structure et ainsi créer une sorte de dépression et permettre un écoulement plus rapide de l'eau à travers le filtre (Figure 16). Le filtre employé possède des petits « trous » de 47 µm de diamètre. Si le filtre se retrouve bouché par des particules fines, ce qui freine voire empêche l'écoulement de s'effectuer, alors un autre filtre est mis en place.

Préalablement au filtrage, chaque filtre est pesé sec. Une fois l'échantillon d'eau filtré, le filtre est placé dans une boîte de pétri et placé à l'étuve à 40°C durant 24 heures.



Une fois que l'érosion hydrique est qualifiée, il est intéressant de savoir pourquoi l'érosion hydrique se comporte de la sorte. Pour cela, l'intensité des pluies sera étudiée. Comme il a été vu précédemment, l'intensité des pluies est à l'origine du ruissellement.

### 2.3. L'intensité pluviale

Des données nous ont été transmises de la part d'une station météo du PNR qui se situait non loin du site d'étude, à quelques kilomètres au Nord.

La connaissance de la quantité de pluie tombée au niveau du pluviographe en fonction du temps permettra de calculer l'intensité des pluies en mm par heure. Deux sortes d'intensité sont calculables : l'intensité maximale et l'intensité moyenne. L'intensité maximale correspond à la plus grande intensité atteinte pendant une période de temps donnée tandis que l'intensité moyenne peut se calculer de la manière suivante :

$$i = \frac{rr}{\Delta t}$$

Avec :  $i$  : intensité moyenne [mm/h]

$R_r$  : quantité de précipitation [mm]

$T$  : durée de l'épisode pluvieux [h]

Ainsi, connaître la pluviométrie permet de mettre en relation l'intensité des pluies tombées avec les eaux de ruissellement. Il sera ensuite intéressant de savoir pour quelle intensité de pluie apparaît le phénomène de ruissellement.

#### 2.4. Les caractéristiques du sol jouant sur les processus influençant le ruissellement et le détachement de sol

Les parties 2.2 et 2.3 permettent d'étudier l'érosion hydrique et les précipitations. Mais il demeure un acteur majeur de l'érosion hydrique à étudier : le sol.

En effet, de nombreuses caractéristiques du sol jouent sur le comportement de l'infiltration de l'eau mais également sur la stabilité structurale du sol. La stabilité structurale correspond à la résistance d'un sol contre l'action dégradante des pluies. La Figure 17 ci-dessous rappelle ces différentes caractéristiques.

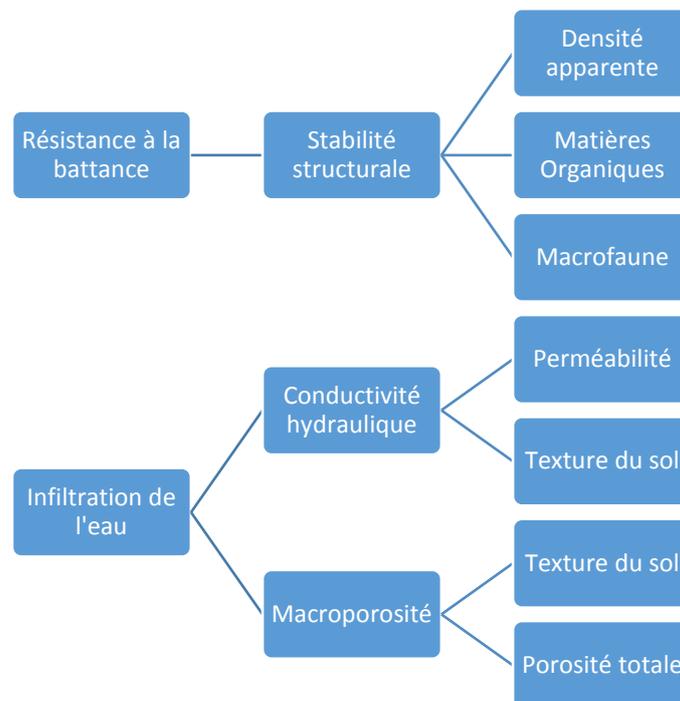


Figure 17 - Schéma synthétique présentant les liens entre certaines caractéristiques du sol et des processus impliqués dans l'érosion hydrique

Ces caractéristiques peuvent être réparties en deux catégories : la densité apparente, la teneur en matière organique, l'activité biologique et la texture du sol qui jouent sur la stabilité structurale et la perméabilité du sol, la texture du sol et la porosité totale qui influencent l'infiltration. Elles seront étudiées et mesurées grâce aux méthodes présentées dans la partie ci-dessous. Puis, une fois les résultats obtenus, cela permettra de remonter aux principaux processus de résistance à la battance et à l'infiltration de l'eau, deux phénomènes qui influent l'érosion hydrique.

### 2.4.1. La stabilité structurale du sol

Comme il a été dit précédemment, la stabilité structurale correspond à la résistance des agrégats face à des agents destructeurs, en particulier l'eau. Un sol possédant une structure stable sera moins vulnérable au détachement de ses particules.

C'est pour cela que des méthodes ont été employées pour en savoir davantage sur les paramètres influençant la stabilité structurale : la densité apparente, la texture du sol et l'activité biologique.

#### 2.4.1.1. Les densités apparentes

Les densités apparentes du sol de surface ont été déterminées au début de l'expérimentation, avant la mise en fonctionnement des mesures, lors de la mise en place des microparcelles. Cette densité apparente correspond à la masse de sol sec par unité de volume. Afin de mesurer la densité apparente, la méthode des cylindres a été employée (Figure 18).



Figure 18 - Photographie de la disposition des prélèvements d'échantillons de terre pour les densités apparentes (DA) par rapport aux micro parcelles

Cette dernière consiste à prélever un volume de sol connu grâce à des cylindres puis de sécher ces volumes de sols à l'étuve à 105 °C pendant 48 heures (Blake & Hartage, 1986). Après séchage, ces échantillons de terre ont été pesés permettant ainsi de déterminer la densité apparente en [g/cm<sup>3</sup>] (Figure 19).



Figure 19 - Photographie des étapes de séchage et de pesage des échantillons de terre pour le calcul de la densité apparente

3 volumes de sol ont été recueillis pour les 3 microparcelles, ce qui donne 9 échantillons au total.

La connaissance de la densité apparente est intéressante car :

- La densité apparente permet d'avoir une idée de l'état de compaction du matériau, un sol est d'autant plus compacté que sa densité apparente est forte et indirectement de la porosité totale (Alongo et Kambele, 2013) ;
- Elle fait partie des paramètres d'entrée du logiciel BEST, qui sera présenté dans la partie 2.4.2.3.

#### **2.4.1.2. La texture du sol**

La texture possède une forte influence sur la stabilité structurale, en particulier la teneur en argiles et en matières organiques. Un sol argileux et riche en matières organiques sera stable.

Des analyses granulométriques sur des échantillons de sol de 0 à 10 cm de profondeur environ ont été réalisées. 3 échantillons par micro parcelles ont été prélevés à proximité de chaque micro parcelle, un peu en amont de chacune d'entre elle. Ces échantillons ont ensuite été envoyés à un laboratoire d'analyse. Les teneurs en argiles, sables, limons et en matières organiques seront ainsi connues.

#### **2.4.1.3. L'activité biologique**

Un sol est une interface entre organismes vivants, matières organiques et minéraux issus de la roche mère. Il existe donc une activité biologique dans les sols, provenant de l'activité de micro ou de macro organismes. La connaissance de l'activité biologique et la présence de matière organique permet d'en savoir davantage sur la stabilité structurale. Un sol avec une bonne activité biologique et comprenant de la matière organique aura une structure stable.

Des indicateurs existent afin de juger cette activité biologique. Dans le cadre de l'étude, deux ont été retenus : la proportion de matière organique dans le sol et le fonctionnement macro biologique des sols avec les communautés de lombrics et les fourmis. D'après Podwojewski et al. (2008), les vers de terre ainsi que les fourmis jouent un rôle également important dans la porosité du sol : en creusant des galeries, ils permettent une porosité plus importante où l'eau pourra s'infiltrer mais aussi de stabiliser la structure du sol. En milieu tempéré, les ingénieurs écologiques correspondent principalement aux lombrics et aux fourmis.

C'est donc sur ces deux espèces auxquelles on s'intéressera particulièrement durant la quantification selon la méthode du TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility). Les turricules de lombrics, les rejets des lombrics, seront également quantifiés et dimensionnés (hauteur et largeur maximales) dans les micro-parcelles, afin d'estimer l'activité des lombrics.

- **Méthode du TSBF**

Cette méthode permet de déterminer la macrofaune du sol en présence. Cette macrofaune correspond aux macros invertébrés dont la taille est supérieure à 2 mm ou visibles à l'œil nu. Pour cela, un volume de sol précis délimité par 25 cm x 25 cm de surface sur 25 cm de profondeur soit 15625 cm<sup>3</sup>. Ce volume est ensuite transféré dans un sac en plastique, permettant son transport. En effet, le tri de la macro faune s'est réalisé le lendemain du prélèvement de terre, en laboratoire. Du fait du caractère relativement chronophage du tri, il a été choisi de dissocier l'étape de prélèvement et l'étape de tri. Les macro invertébrés sont triés puis récupérés dans de l'alcool afin de les conserver jusqu'à ce qu'ils soient identifiés.

Le prélèvement de terre doit s'effectuer le plus rapidement possible afin de minimiser la fuite de la macro faune, la lumière faisant fuir les vers de terre (Fayolle L. & Gautronneau Y., 1998). Cette méthode a été appliquée en haut de pente, en milieu de pente et en bas de pente, avec à chaque fois quatre répétitions (Figure 20). Par souci d'efficacité, la profondeur de prélèvement a été diminuée à 25 cm.

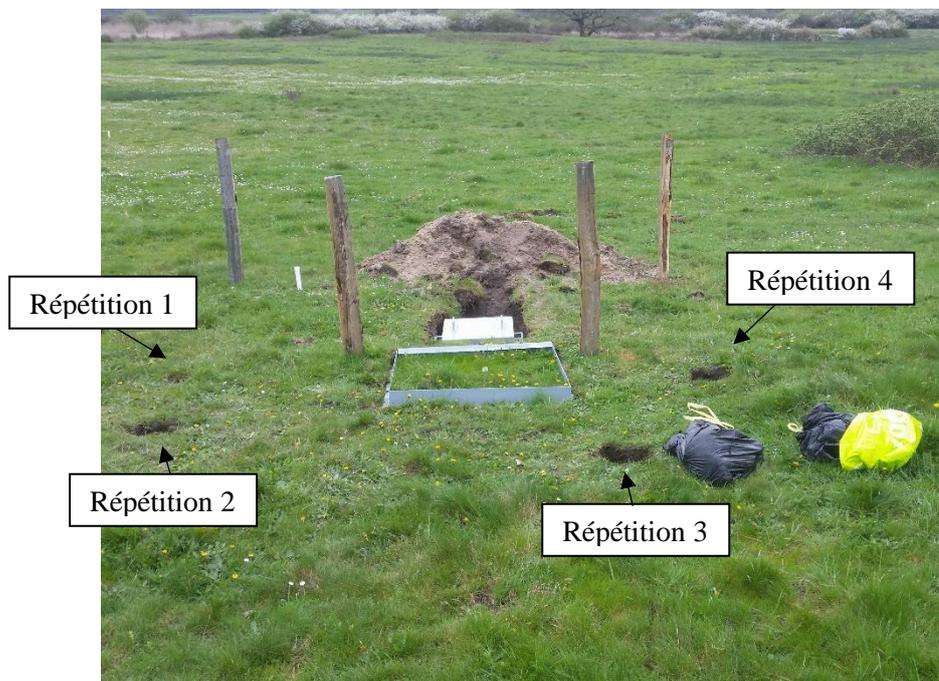


Figure 20 - Photographie représentant la disposition des prélèvements des TSBF autour de la micro parcelle de bas de pente

Il est également intéressant de quantifier les vers de terre présents car les vers de terre sont considérés comme des bioindicateurs d'après Peres G. *et al.* (2012). De fait, ils permettent d'apporter des informations à propos de l'état et des usages du sol.

- **Quantification des turricules**

Le nombre de turricules, c'est-à-dire les déjections émises par les lombrics à la surface du sol, par micro parcelle est relevé, ainsi que leurs dimensions. Ces informations permettront d'avoir une idée de l'activité lombricienne présente.

## 2.4.2. L'infiltration de l'eau dans le sol

L'infiltration correspond à l'entrée de l'eau dans un sol. Elle dépend de trois facteurs : la texture du sol, la perméabilité du sol, c'est-à-dire sa capacité à laisser pénétrer l'eau et la porosité totale.

### 2.4.2.1. La porosité totale

La porosité totale permet de représenter l'ensemble des vides présents dans un sol. Un sol riche en vides offre un espace disponible pour l'eau plus important et ainsi une bonne infiltration.

La porosité totale peut être obtenue grâce à la densité apparente et à la densité réelle. Les capacités de stockage d'un matériau sont représentées par la porosité totale. Cette dernière est composée de deux éléments : la porosité efficace et la capacité de rétention. Le premier correspond à la quantité d'eau gravitaire retenue dans une roche et le second correspond à la quantité d'eau liée aux particules.

La porosité totale est donnée par la formule suivante (Danielson et Sutherland, 1986) :

$$Pt (\%) = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) * 100$$

Avec :  $\rho_b$  : densité apparente de l'échantillon

$\rho_s$  : densité sèche de l'échantillon. Cette densité correspond au ratio de la masse de la phase solide du sol sur son volume total (Volume solide et des pores). La valeur admise est de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, valeur correspondant à la densité particulaire des sols minéraux.

### 2.4.2.2. La texture du sol

La texture possède une forte influence sur le régime hydrique du sol, notamment sur la circulation de l'eau dans le sol. Un sol sableux sera perméable et filtrant tandis qu'un sol argileux sera plutôt un obstacle à l'infiltration de l'eau.

Des analyses granulométriques sur des échantillons de sol de 0 à 10 cm de profondeur environ ont été réalisées. 3 échantillons par micro parcelles ont été prélevés à proximité de chaque micro parcelle, un peu en amont de chacune d'entre elle. Ces échantillons ont ensuite été envoyés à un laboratoire d'analyse.

D'après le profil vertical, on peut s'attendre à une texture majoritairement sableuse à la surface du sol.

### 2.4.2.3. La perméabilité

La perméabilité correspond à l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide. Dans le cadre de notre étude, il s'agit de l'aptitude du sol du site d'eau à se laisser traverser par l'eau.

Pour étudier cette perméabilité, il existe certaines méthodes comme le test de Beerkan. Ce test d'infiltration permet d'avoir une idée de la vitesse à laquelle s'infiltrent les gouttes d'eau dans le sol, dans des conditions humides.



Figure 21 - Photographie du matériel utilisé lors des tests d'infiltration dans le pâturage

### Protocole

Pour ce test, le protocole de Beerkan a été suivi. Tout d'abord, une surface plane est requise pour effectuer cette expérience. En effet, le cylindre doit être déposé sur le sol horizontalement (Figure 21). Toute la végétation était coupée et sans retirer les racines, ce qui détruirait les éléments du sol.

4 tests furent mis en place pour chaque micro parcelle, que ce soit pour le projet DynEtang soit respectivement 12 répétitions au total. Toutes les infiltrations ont été faites au-dessus de chaque micro parcelle, pas très loin les unes des autres (30 cm minimum afin d'éviter que le bulbe n'influence d'autres cylindres) et approximativement tous arrangés en ligne (Figure 22).

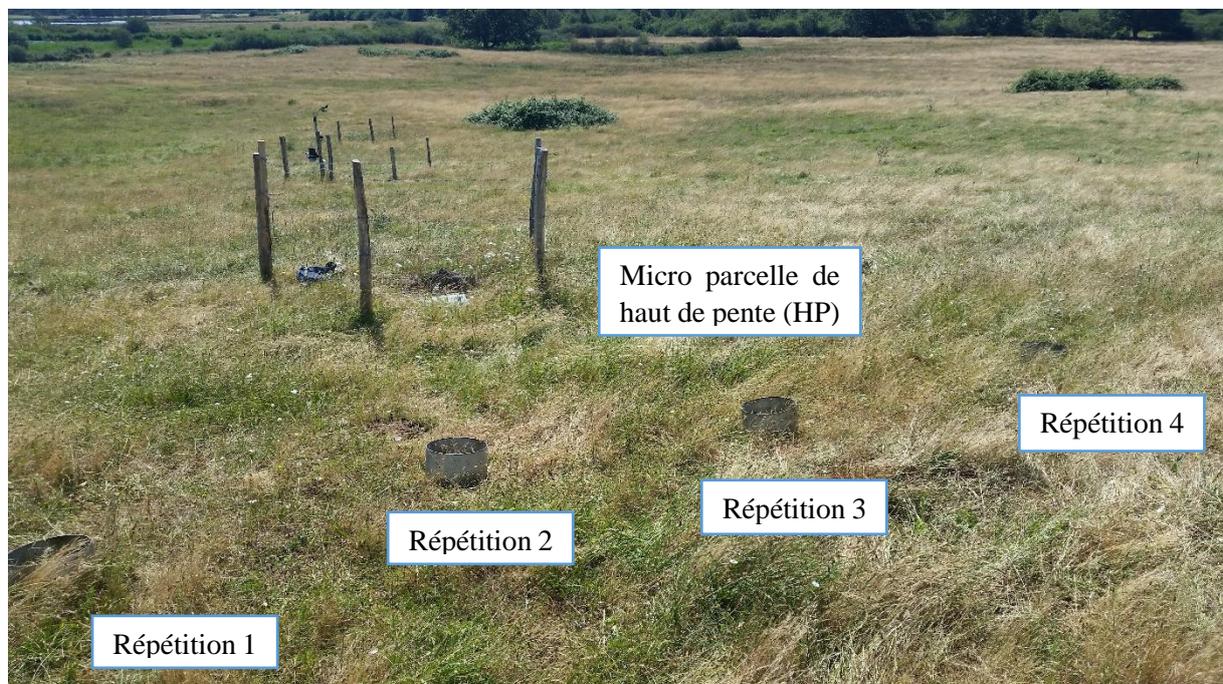


Figure 22 - Photographie de la répartition des répétitions pour les tests d'infiltration

Une fois la surface prête, un cylindre est inséré dans le sol à 2 à 3 cm de profondeur. Afin d'éviter toute perte d'eau potentielle pendant l'expérience, la terre à la base du cylindre, à l'intérieur et à l'extérieur, était pressée délicatement à l'aide d'un stylo ou d'un doigt.

Avant le début de l'expérience, un seau rempli d'eau était prêt à portée de bras ainsi que des récipients à eau comme des bouteilles d'eau en plastique de 50 cL qui ont été choisies afin de représenter une lame d'eau d'1 cm à l'intérieur du cylindre.

Pour limiter l'effet "splash", des feuilles ou une protection plastique étaient déposées sur la surface du sol pendant le dépôt d'eau. Elles étaient enlevées puis remises entre chaque versement.

L'effet « splash » correspond au phénomène d'impact des gouttes sur la surface du sol. Si l'énergie de l'impact est suffisante, cela peut briser les particules du sol. Ainsi, lorsque l'on verse le volume d'eau dans le cylindre, il y a un risque d'effet « splash ». Or, il est nécessaire que le sol reste intact durant toute la durée du test, un sachet plastique disposé sur le sol permet d'amortir la chute des gouttes d'eau, diminuant de ce fait leur impact sur le sol.

Le temps d'infiltration de chaque volume d'eau était mesuré par un chronomètre et enregistré. Le chronomètre était déclenché lorsque les premières gouttes d'eau touchaient le sol.

L'expérience prend fin lorsque le régime stationnaire est atteint. En d'autres termes, lorsque le temps entre deux versements d'eau devient constant. En pratique, le régime stationnaire était atteint après 15 versements mais ce nombre pouvait augmenter dans certains cas.

Après la réalisation sur le terrain, les courbes d'infiltration ont été dessinées sur le logiciel Excel à l'aide de l'équation de Philip suivante :

$$I(t) = S * \sqrt{t} + A * t \quad (1)$$

Avec :

I (t) : Infiltration cumulée [mm] à un moment donné (t)

S : Sorptivité [mm\* $\sqrt{s}$ ] qui correspond à la capacité du sol à absorber l'eau par capillarité

T : Temps [s]

A : Facteur gravitaire dépendant de la conductivité hydraulique à saturation [mm/t]

En divisant l'équation (1) par  $\sqrt{t}$ , on obtient alors l'équation linéaire suivante :

$$\frac{I}{\sqrt{t}} = S + A * \sqrt{t}$$

En représentant la courbe de l'équation ci-dessus en fonction de la racine carrée du temps, le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine peuvent être déterminés, correspondant respectivement à A et à S. La sorptivité S correspond à la capacité du sol à absorber l'eau par capillarité.

A l'aide de ces données expérimentales, le logiciel BEST peut être utilisé.

### ***Le logiciel BEST***

Le logiciel BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) permet d'estimer des paramètres hydrodynamiques du sol. Il a été développé en 2006 par Lassabatère *et al.* Il a été choisi d'utiliser ce logiciel car il est facilement disponible et accessible et il permet d'obtenir des paramètres intéressants à partir de données que l'on peut mesurer sur le terrain.

Ces données sont les suivantes :

- Le diamètre du cylindre utilisé lors des tests de Beerkan ;
- La densité apparente du sol ;
- La densité minérale ( $2,65 \text{ g/cm}^3$ ) ;
- La teneur en eau initiale du sol sec ;
- La répartition granulométrique du sol ;
- Les données expérimentales : la quantité d'eau infiltrée (mm) et le temps d'infiltration (s).

Ainsi, suite à cela, le modèle BEST estime plusieurs paramètres hydrodynamiques. Le plus intéressant pour notre projet et pour l'étude de l'infiltration de l'eau dans le sol est la conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ). Cette conductivité permet d'estimer la perméabilité du sol.

---

### 3. Résultats et discussion

---

Les résultats des méthodes présentés ci-dessus permettront :

- De qualifier la quantité de sédiments détachés et la quantité d'eau de ruissellement, et ainsi de confirmer ou non l'hypothèse H1 ;
- Si des eaux de ruissellement sont relevées, de mettre en parallèle l'intensité des pluies et l'apparition de ces eaux de ruissellement ;
- De décrire la stabilité structurale et la capacité d'infiltration du sol, deux propriétés influençant le ruissellement et le détachement de particules de sol.

Les tableaux comportant les valeurs numériques des résultats se trouvent dans la partie Annexes.

#### *3.1. Un détachement de sol pauvre et un ruissellement léger*

Les sédiments collectés suivent plus ou moins la tendance du ruissellement, du fait du lien entre les deux phénomènes : plus le ruissellement est fort, plus la quantité de sédiments détachés est forte.

Brunet et Brossard dans leur étude à propos de la détachabilité d'un sol et du ruissellement sur des pâturages cultivés au Brésil menée durant la saison des pluies d'octobre 1999 à avril 2000 ont considéré les quantités de sédiments et d'eau de ruissellement comme étant faibles. Ainsi, leurs valeurs peuvent servir de seuils pour qualifier le détachement de sol et de ruissellement :

- $17 \text{ g/m}^2$  pour la quantité cumulée de sédiments,
- $22 \text{ mm}$  soit  $22 \text{ L/m}^2$ , valeur cumulée maximale mesurée au bout de 6 mois.

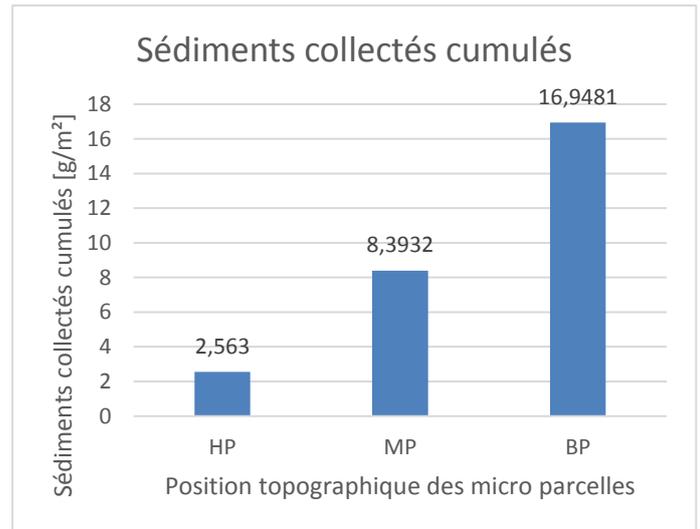
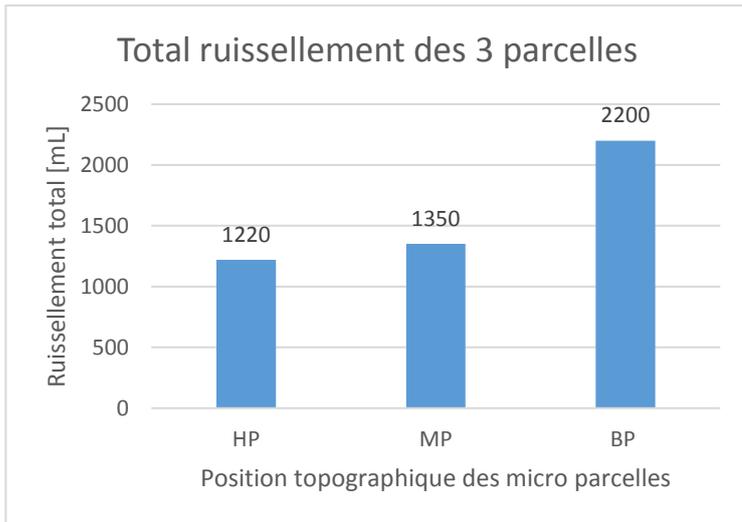


Figure 23 – Graphes du ruissellement total et des sédiments collectés dans les cuves de stockage des eaux de ruissellement pour les 3 microparcelles : celle de haut de pente (HP), celle de milieu de pente (MP) et celle de bas de pente (BP)

Les quantités de sédiments et d'eau de ruissellement peuvent ainsi être qualifiées comme faibles. La première citée ne dépassant pas 17 g/m<sup>2</sup> et la seconde n'excédant pas 2.5 L/m<sup>2</sup> (Figure 23).

On peut cependant nuancer nos propos en imaginant que Brunet et Brossard ont qualifiés leurs mesures de faibles pour un climat tropical tel que celui du Brésil.

Une deuxième hypothèse, nommée hypothèse H2, peut être formulée suite à l'observation de ces résultats : la position topographique semble ainsi jouer un rôle important sur le ruissellement, la parcelle de bas de pente (BP) ruisselant plus que les deux autres. Cette hypothèse rejoint les résultats obtenus par Brunet et Brossard. Cependant, le sol étudié dans cette étude est un latossol argileux sous pâturages, ce qui est différent du sol de notre site d'étude.

Ces résultats confirment donc l'hypothèse H1, l'érosion hydrique est faible au niveau des micro parcelles du site d'étude. Cependant, les relevés des données de ruissellement et de perte de sol ont été réalisés durant une certaine période de l'année : de mars à août. Il faut attendre la poursuite des relevés sur une année entière avant de pouvoir affirmer que l'érosion hydrique est faible durant toute l'année.

La confirmation de l'hypothèse H1 soulève trois nouvelles hypothèses :

- l'intensité pluviale au niveau des micro parcelles est faible (H3),
- une bonne infiltration s'applique sur ce sol (H4),
- la stabilité structurale du sol est bonne (H5).

Pour valider ou non ces hypothèses, on étudiera respectivement l'intensité des pluies puis les paramètres du sol qui influencent l'infiltration et la stabilité structurale. De plus, l'étude de ces paramètres du sol donnera peut-être une explication au ruissellement et détachement plus important au niveau de la micro parcelle de bas de pente et donc des éléments de réponse par rapport à l'hypothèse H2.

### 3.2. Une intensité pluviale assez faible

La pluviométrie cumulée enregistrée durant la période du 25 février 2018 au 06 septembre 2018 est de 341 mm, avec un maximum mensuel de 103 mm pour le mois de Mars (Figure 24).

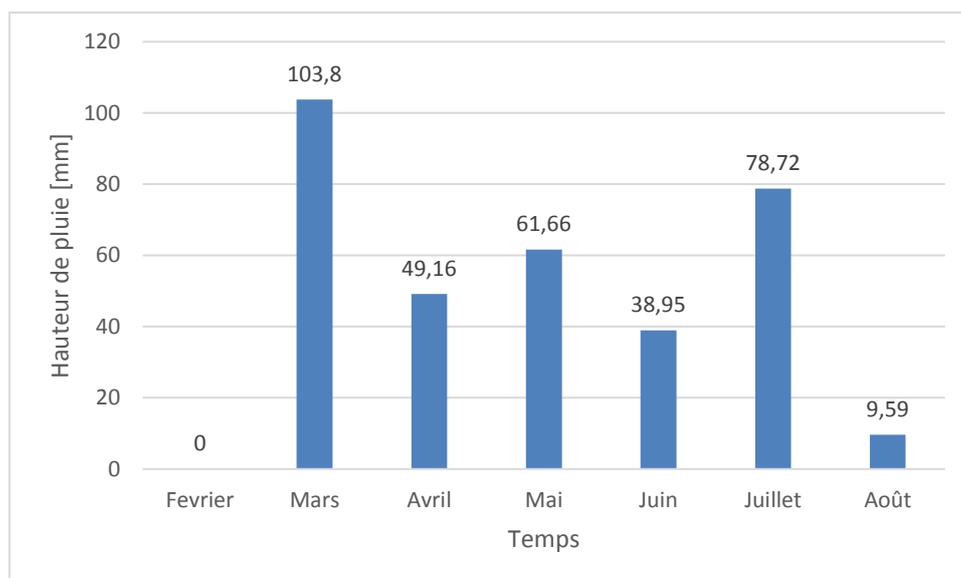


Figure 24 - Représentation des quantités de pluies cumulées mensuelles de Février 2018 à Août 2018

Cette pluviométrie cumulée permet de mettre en évidence qu'une période très sèche s'est abattue sur la Brenne depuis la fin du mois de Juillet jusqu'à la fin du mois d'août, avec pour conséquence un assèchement du sol.

L'intensité moyenne des précipitations a été calculée pour chaque période entre les missions de terrains. Ces intensités moyennes ont ensuite été mises en relation avec la quantité de ruissellement observée (Figure 25).

Date	Intensité moyenne pluviale [mm/h]	Ecart type	Ratio nombre heures de pluie sur nombre heures total [%]	Intensité maximale [mm/h]	Ruissellement [mL]
21-mars	0,529	0,48	6,2	4,57	0
03/04/2018	0,862	1,17	13,8	7,37	100
12-avr	0,637	0,74	18,05	3,56	0
24/04/2018	0,36	0,2	2,43	0,76	0
09/05/2018	0,718	0,68	8,3	2,79	0
08/06/2018	1,455	3,47	6,8	24,13	2350
19/06/2018	0,606	1,91	18,2	13,46	0
28/06/2018	0	0	0	0	0
29/06/2018	0	0	0	0	0
05/07/2018	1,35	1,32	17,4	5,59	2320
23/07/2018	4,911	7,7	2,1	24,38	0
09/08/2018	1,013	1,18	1,47	3,3	0

Figure 25 – Tableau synthétique du ruissellement mesuré [mL] à chaque mission de terrain en fonction de l'intensité pluviale moyenne [mm/h], de l'intensité maximale [mm/h] et du ratio du nombre d'heures de pluie sur le nombre d'heures total mesurés entre deux missions de terrain

Certaines équivalences existent afin de proposer une qualification des événements pluvieux. Ces équivalences proposées par le site internet de météo France sont les suivantes (Figure 26).

Pluie faible continue	1 à 3 mm par heure
Pluie modérée	4 à 7 mm par heure
Pluie forte	8 mm par heure et plus

Figure 26 - Equivalences entre intensité pluviale et qualification des pluies proposées par Météo France

En appliquant les équivalences de la Figure 26 sur les résultats de la Figure 25, on remarque que la plupart des intensités pluviales mesurées (8 sur 12) se situent en deçà de la catégorie pluie faible continue.

Quatre intensités sont supérieures à 1 mm/h, trois appartiennent à la catégorie de pluie faible continue et la dernière à la catégorie pluie modérée. Cependant, seulement deux parmi ces quatre sont accompagnées de l'apparition de ruissellement.

Cette absence de ruissellement peut être expliquée par le fait que ces intensités ont été mesurées durant le mois d'Août, période particulièrement sèche. Cette sécheresse prononcée du sol provoque une force de « succion matricielle » qui aspire fortement l'eau. Attraction de l'eau d'autant plus forte que le sol est sec.

On peut supposer que la valeur d'intensité maximale de 24.38 mm/h corresponde à l'apparition d'un orage.

Il semble ainsi que le ruissellement apparaisse avec une intensité pluviale d'au moins 1 mm/h, condition nécessaire mais pas suffisante. Une durée minimale des épisodes pluvieux semble être également nécessaire, un ratio d'au moins 7 % des heures totales soient des heures « pluviales ». Il serait intéressant de suivre ces données pluviométriques sur une autre année afin de pouvoir consolider cette observation.

Cependant, afin d'acquérir des informations plus précises, la mise en place de sondes de hauteur d'eau et de turbidité permettra d'intervenir rapidement après un événement pluvieux et de vérifier l'apparition ou non d'eau de ruissellement suite à cet événement pluvieux précis. L'intensité pluviale et la durée pourront être calculées et permettra de déterminer avec précision pour quelle durée et quelle intensité pluviale le ruissellement apparait.

Comme on a pu le constater dans la partie précédente, le ruissellement et la perte de sol sont faibles, constatation explicable du fait d'une bonne infiltration et d'une intensité des pluies relativement faible et de l'apparition d'une période sèche. On peut maintenant se poser la question suivante : quelles sont les caractéristiques du sol permettant d'expliquer cette bonne infiltration et ce faible détachement du sol ?

L'hypothèse H3 semble donc vraie, les pluies qui sont tombées au niveau du site d'étude sont globalement peu intenses ou peu longues. Cependant, certains épisodes pluvieux intenses et suffisamment longs se sont produits et ces derniers expliquent l'apparition des échantillons d'eau de ruissellement.

On peut supposer qu'un faible ruissellement implique une faible quantité de sédiments détachés. Cependant, il a un autre paramètre qui joue sur le détachement des particules de sol, il s'agit de la stabilité structurale.

### 3.3. Les caractéristiques du sol favorisent l'infiltration et la stabilité structurale

Ces caractéristiques du sol amèneront des éléments de réponse à propos des hypothèses H2, H4 et H5 précédemment formulées.

### 3.3.1. Un sol stable structurellement

#### 3.3.1.1. Un sol normalement compacté

La densité apparente permet d'estimer l'état de compaction d'un sol. Un sol peu dense sera vulnérable à l'arrachement de ses particules du fait de l'agression climatique (Young *et al.*, 1994).

#### Densités apparentes au niveau des micro parcelles

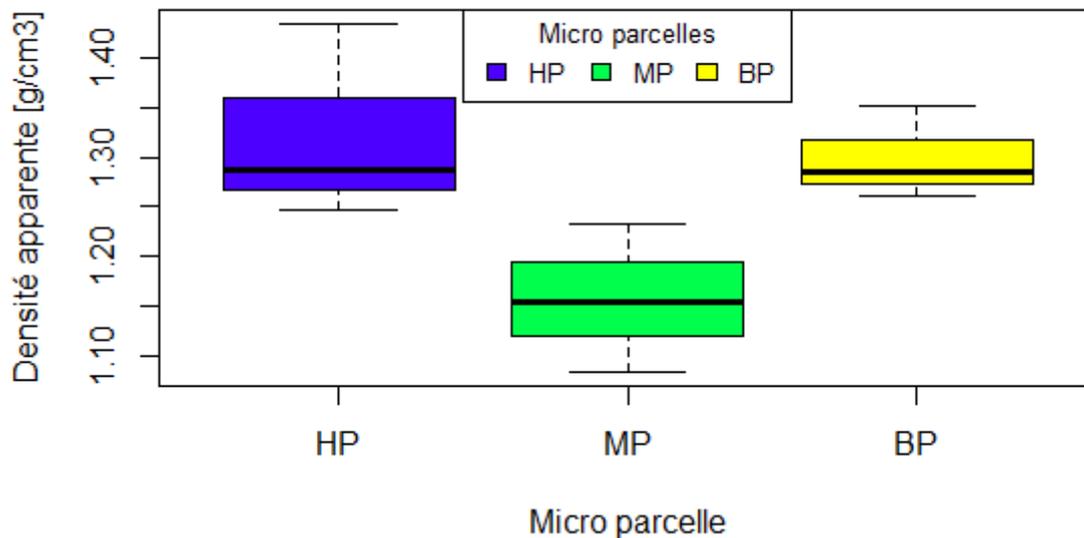


Figure 27 – Boîtes à moustache des valeurs de densités apparentes mesurées dans la Brenne au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP)

La valeur moyenne générale de tous les échantillons de la Brenne est proche de  $1,26 \pm 0,10 \text{ g/cm}^3$ . Les valeurs de densité apparente au niveau des micro parcelles de haut de pente et de bas de pente sont très proches (respectivement  $1,32 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  et  $1,3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ ), tandis que la densité apparente de la micro parcelle de milieu de pente est légèrement plus basse que les deux autres ( $1,2 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ ).

Selon Linsley *et al.* (1982) et Poffijn (1988), les densités apparentes de la plupart des sols sont comprises entre 1.1 et 1.6 g/cm³. On peut ainsi considérer qu'un sol avec une densité apparente inférieure à cette gamme de valeurs peut être qualifié de sol peu compact. Or, les densités apparentes au niveau des micro parcelles appartiennent à cet intervalle. Cela montre une compaction « normale » de ce sol, il n'est pas trop compacté ou pas assez. La compaction du sol ne devrait pas impacter négativement la stabilité structurale. La présence de vaches pendant certaines périodes de l'année ne semble pas avoir d'impact sur la densité apparente et la compaction du sol.

Le coefficient de variation (CV) correspond à la dispersion des données autour de la moyenne. Il se calcule grâce au rapport de l'écart type sur la moyenne de données. Ce coefficient permet de mettre en avant l'homogénéité ou non des données. Si le coefficient de variation est supérieur à 50 %, la variabilité est considérée comme forte. A l'inverse, s'il est inférieur à 50 %, cela indique une certaine homogénéité (Figure 28).

Densité apparente	Coefficients de variation [%]
HP (Haut de Pente)	7.4
MP (Milieu de Pente)	6.4
BP (Bas de Pente)	3.6
<b>Au niveau des 3 micro parcelles</b>	<b>7.6</b>

Figure 28 - Tableau récapitulatif des coefficients de variation (CV) exprimés en % calculés pour les données de densité apparente au niveau de chaque micro parcelle et pour toutes les micro parcelles

Les coefficients de variation calculés au niveau des micro parcelles est faible (<10%), la densité apparente est ainsi homogène au niveau de ces dernières. De plus, le coefficient de variation calculé pour l'ensemble des données de densité apparente est également faible. La densité apparente est donc homogène au niveau des 3 micro parcelles le long de la pente.

<b>Classe texturale</b>	<b>Densité apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
sable	1,55
loam sableux	1,40
loam	1,20
loam limoneux	1,15
argile	1,05

Figure 29 - Gammes de valeurs de densité apparente selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca)

Après comparaison avec les gammes de valeurs présentées ci-dessus (Figure 29), les densités apparentes des trois micro parcelles correspondent à un sol de type loam / loam sableux. Cette classe texturale est composée d'au moins 50 % de sable, 28 à 50 % de limon et 7 à 27 % d'argile.

Selon sa densité apparente, le sol serait majoritairement sableux, mais avec une part non nulle d'argile. Or il s'agit de l'argile qui maintient les agrégats et permet la résistance d'un sol face à la dégradation. Il est estimé néanmoins qu'en dessous de 15 % d'argile, l'effet de ces dernières sur la stabilité structurale est relativement faible.

Une analyse granulométrique permettra ainsi de confirmer la nature sableuse du sol et de savoir précisément la part d'argile dans la texture du sol.

### ***3.3.1.1. Un sol majoritairement sableux***

Les analyses texturales montrent que les pourcentages des classes granulométriques sont relativement proches entre les parcelles (Figure 30). En moyenne, le sol de 0 à 10 cm de profondeur est majoritairement composé de sables (>70%), principalement de sables grossiers, puis de limons (20%) et d'argiles (10%).

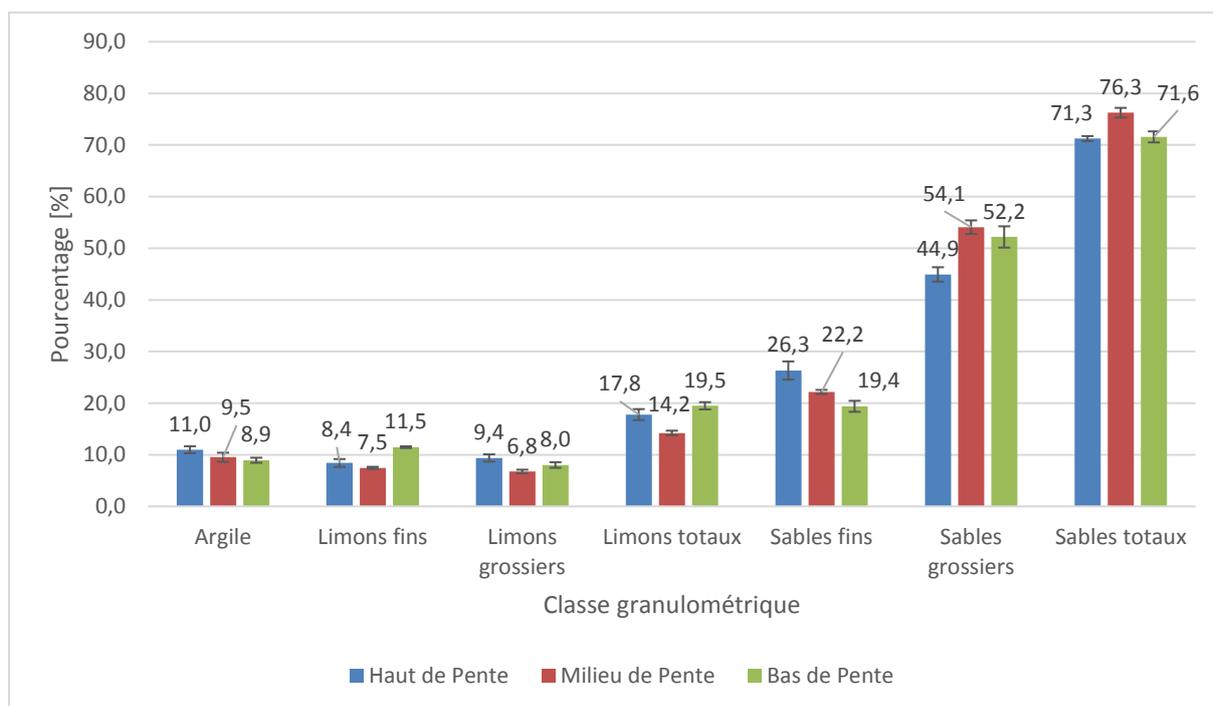


Figure 30 - Analyse granulométrique des échantillons (0 - 10 cm de profondeur) des 3 micro parcelles de la Brenne (DynEtang)

Ces résultats confirment ainsi la nature majoritairement sableuse du sol au niveau des micro parcelles.

Coefficients de variation [%]	Argile	Limons fins	Limons grossiers	Limons totaux	Sables fins	Sables grossiers	Sables totaux
<b>HP</b>	6,19	9,07	7,59	5,99	6,72	3,10	0,68
<b>MP</b>	9,19	2,70	5,38	3,20	1,78	2,43	1,23
<b>BP</b>	5,44	1,45	6,82	3,61	5,49	3,95	1,49
<b>Général</b>	10,48	19,23	14,44	13,33	13,32	8,26	3,28

Figure 31 - Tableau récapitulatif des coefficients de variation exprimés en % calculés pour les données de granulométrie au niveau de chaque micro parcelle et pour toutes les micro parcelles

Les coefficients de variation au niveau de chaque micro parcelle et pour les trois micro parcelles sont faibles, aucune ne dépasse les 20 % (Figure 31). La texture est homogène le long de la pente où sont placées les micro parcelles.

La part d'argile dans le sol de surface n'excède pas les 10 % dans la texture du sol. Le rôle des argiles dans cette partie du sol sur la stabilité structurale est plutôt faible. On peut imaginer que si les échantillons avaient été prélevés plus en profondeur, dans le deuxième horizon présenté dans le profil vertical qui semblait plus argileux, le rôle de l'argile aurait été plus important.

Ainsi, le sol est sableux, avec des grains de sable plutôt grossiers. Bunza et Schauer (1989) ont observé une quasi absence de ruissellement pour des sols sableux, indépendamment de l'utilisation du sol. La texture du sol au niveau des micro parcelle permet donc une bonne infiltration et peu de ruissellement.

Mais la composition granulométrique a également un autre intérêt : elle permet le calcul de l'indice de battance avec la connaissance de la quantité de matière organique contenue dans le sol.

### 3.3.1.2. Un sol bien pourvu en matières organiques et peu propice à la battance

L'analyse granulométrique propose également le taux de matières organiques contenues dans les échantillons de sols (Figure 32).

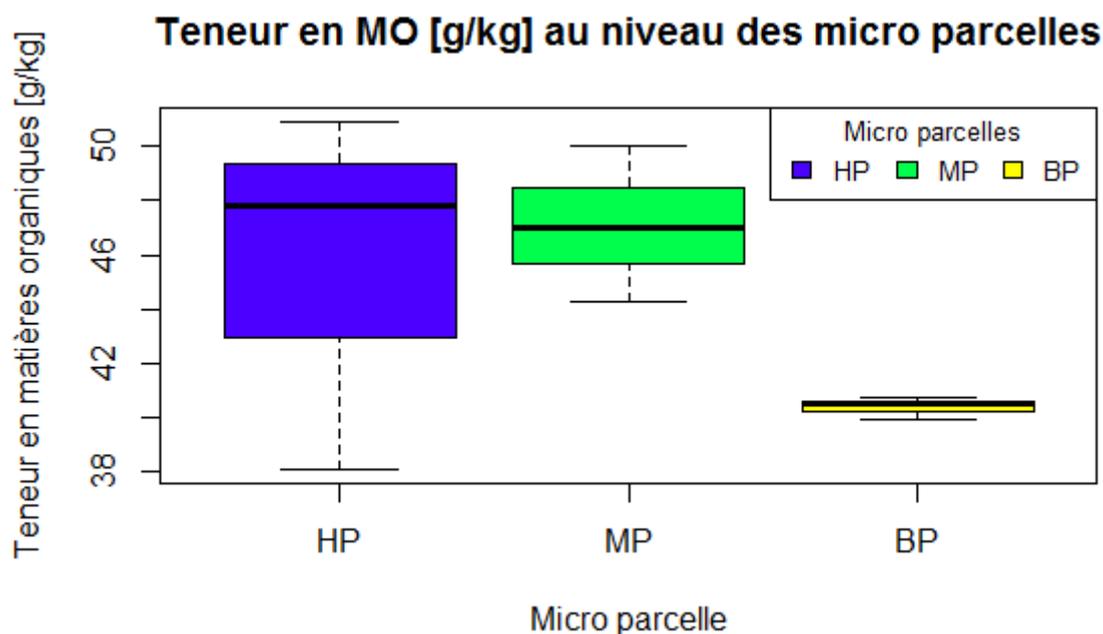


Figure 32 – Boîtes à moustache des taux en matières organiques (g/kg) obtenus grâce à la méthode normalisée internationale NF ISO 14235 au niveau des 3 microparcelles : haut de pente (HP), milieu de pente (MP) et bas de pente (BP)

Afin de déterminer si le sol est riche ou non en matières organiques, les valeurs obtenues peuvent être comparées à des valeurs d'interprétation proposées par le laboratoire agronomique de Normandie (LANO).

TENEUR EN MO	INTERPRETATION	
MO < 14 ‰	Sol très pauvre en matière organique	
14 ‰ ≤ MO < 20 ‰	Sol pauvre en matière organique	
20 ‰ ≤ MO < 30 ‰	Argile < 22%	Sol bien pourvu en matière organique
	22% < ARG. < 30% (Ou teneur en argile inconnue)	Sol moyennement pourvu en matière organique
	Argile > 30%	Sol pauvre en matière organique
30 ‰ ≤ MO < 40 ‰	Sol bien pourvu en matière organique	
MO ≥ 40 ‰	Teneur élevée en matière organique	

(Source : programme d'interprétation LANO/CA de Basse Normandie)

Figure 33 - Gammes de valeur de la teneur en matières organiques

En se basant sur les valeurs de ce tableau (Figure 33), le sol en Brenne peut être considéré comme bien pourvu en matières organiques. Un sol possédant un taux suffisant de matières organiques est synonyme de bonne stabilité structurale.

On peut ajouter que ces teneurs en matières organiques sont supérieures à 4 %. Or la teneur seuil de la stabilité du sol contre la battance est de l'ordre de 2 % pour les sols sablo-limoneux (Monnier et Stengel, 1982), teneur seuil clairement dépassée par les teneurs mesurées.

Matières organiques	Coefficients de variation [%]
<b>HP</b>	14,64
<b>MP</b>	6,05
<b>BP</b>	1,03
<b>Général</b>	10,10

Figure 34 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de matières organiques au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles

Les coefficients de variation des valeurs de matières organiques montrent une certaine homogénéité de la teneur en matières organiques dans le sol au niveau des trois micro parcelles.

A partir des quantités de matière organique et de la texture du sol, l'indice de battance peut être calculé. Cet indice permet de proposer une idée de la sensibilité d'un sol par rapport à la battance, en d'autres termes d'estimer sa stabilité structurale, en prenant en compte à la fois la teneur en matières organiques et la texture du sol. La battance est la formation de croûtes de battance sur le sol. Cet indice se calcule avec l'équation suivante :

$$Ib = \frac{1.5 * \text{limons fins} + 0.75 * \text{limons grossiers}}{\text{argiles} + 10 * \text{matière organique}}$$

Certains seuils sont proposés afin de classer le sol selon son indice de battance (Tableau 4).

Tableau 4 - Gammes de valeur des catégories de sol selon sa sensibilité à la battance (Source : J-Y MASSENET)

Indices de battance	>2,0	2,0 > IB > 1,8	1,8 > IB > 1,6	1,6 > IB > 1,4	IB < 1,4
<b>Appréciation</b>	Sol très battant	Sol battant	Sol assez battant	Sol peu battant	Sol non battant

Aucun indice de battance du sol de surface ne dépasse 0.5 au niveau des parcelles, ce qui indique que ce sol est non propice à la battance (Figure 35).

### Indice de battance pour chaque micro parcelle

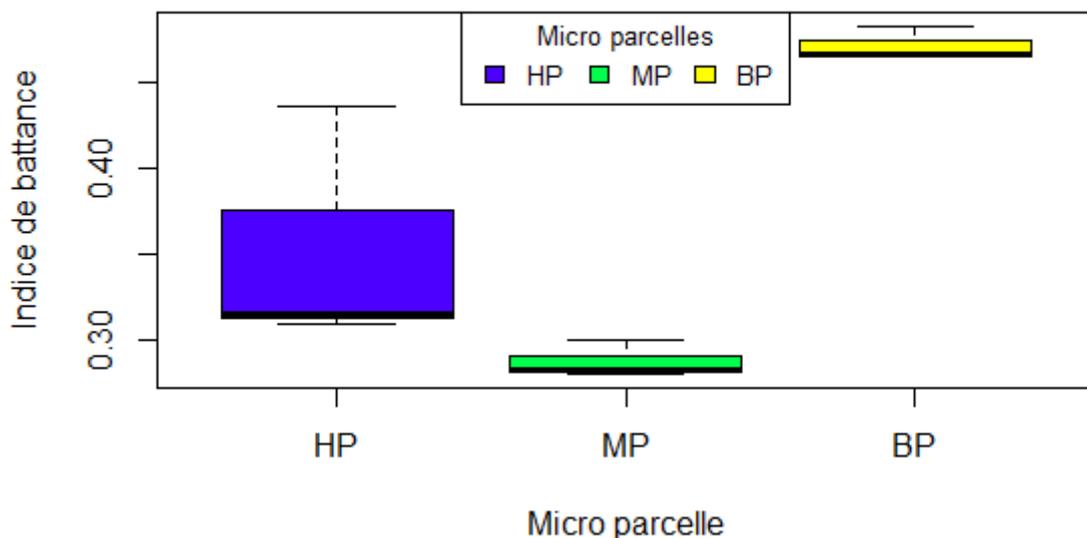


Figure 35 – Boîtes à moustache des indices de battance calculés grâce à la texture du sol et à la matière organique au niveau des microparcelles de haut de pente (HP), milieu de pente (MP) et bas de pente (BP)

Indice de battance	Coefficients de variation [%]
<b>HP</b>	20,3
<b>MP</b>	3,7
<b>BP</b>	2,1
<b>Général</b>	22,5

Figure 36 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données d'indice de battance au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles

Du fait que la granulométrie et que la teneur en matières organiques soient homogènes, l'indice de battance l'est également pour les micro parcelles, comme le confirme la Figure 36. Le taux de matière organique suffisant et l'indice de battance sont des signes d'une bonne stabilité structurale du sol.

Si on rapporte ces résultats à l'hypothèse H2, on remarque qu'ils vont dans le sens de l'hypothèse : la micro parcelle de bas de pente est celle avec l'indice de battance le plus fort et avec la teneur en matières organique la plus faible. Cependant, cette différence reste légère.

### 3.3.1.3. Identification et quantification des peuplements lombriciens et de fourmis, les « ingénieurs du sol »

#### Les peuplements de fourmis :

Il semble se dégager une tendance à propos de l'abondance des fourmis : en bas de pente, les populations de fourmis sont plus nombreuses qu'en milieu et en haut de pente (Figure 37). Cela impliquerait une meilleure stabilité en bas de pente voire même une meilleure porosité et contredirait l'hypothèse H2.

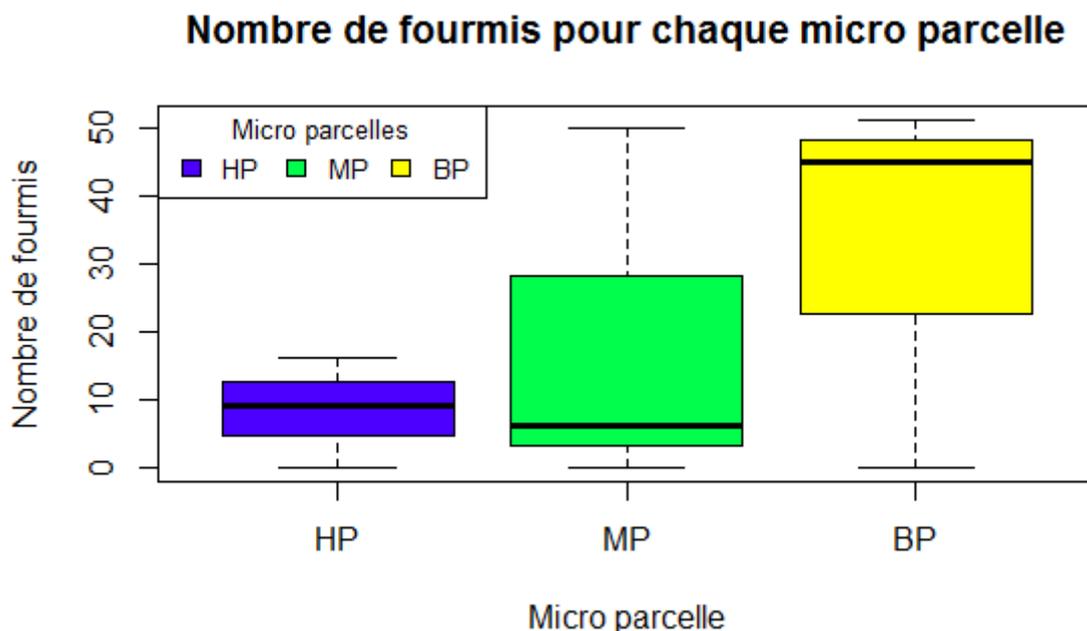


Figure 37 – Boîtes à moustache du nombre de fourmis trouvées lors du tri manuel au niveau des trois micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP)

Les boîtes à moustache montrent une forte variabilité des valeurs des populations de fourmis, au niveau des micro parcelles mais également entre elles. Le coefficient de variation montre le même résultat (Figure 38).

Données de population de fourmis	Coefficient de variation [%]
<b>HP</b>	96,2
<b>MP</b>	146,3
<b>BP</b>	87,1
<b>Général</b>	107,4

Figure 38 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de population de fourmis au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles

Cela met en avant le fait que la méthode des TSBF est soumise à la variabilité spatiale des invertébrés.

Forgeot a étudié en 2007 l'abondance de fourmis présentes dans des landes humides et des prairies tourbeuses. Elle a réalisé des quantifications des fourmis à l'aide de pièges dans des landes mésophile et hygrophile pâturées, milieux comparable au site d'étude (Figure 39).

Le caractère mésophile ou hygrophile d'un sol dépend du niveau hydrique du sol. Une lande mésophile est une lande reposant sur un sol relativement fertile et bien drainé, frais à sec. Une lande hygrophile repose sur des sols très humides. Il serait plus intéressant d'utiliser la lande mésophile pâturée pour la comparer avec nos résultats car elle est plus proche du sol au niveau des micro parcelles.

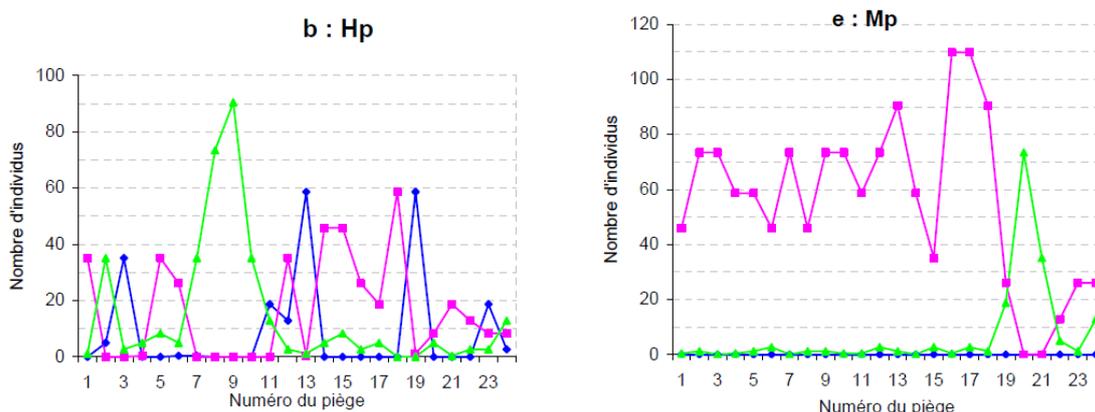


Figure 39 - Nombre d'individus de fourmis trouvées dans des pièges à appâts pour une lande hygrophile pâturée (Hp) et une lande mésophile pâturée (Mp) dans le département de la Manche (Source : D. FORGEROT)

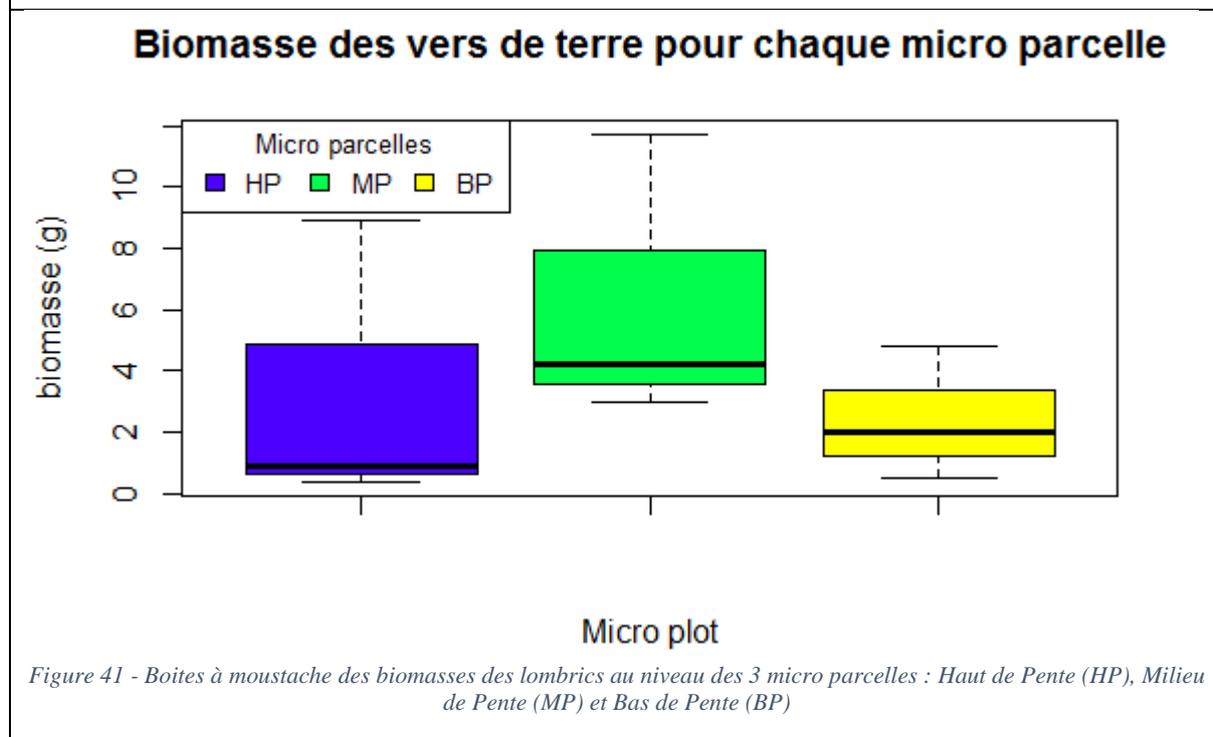
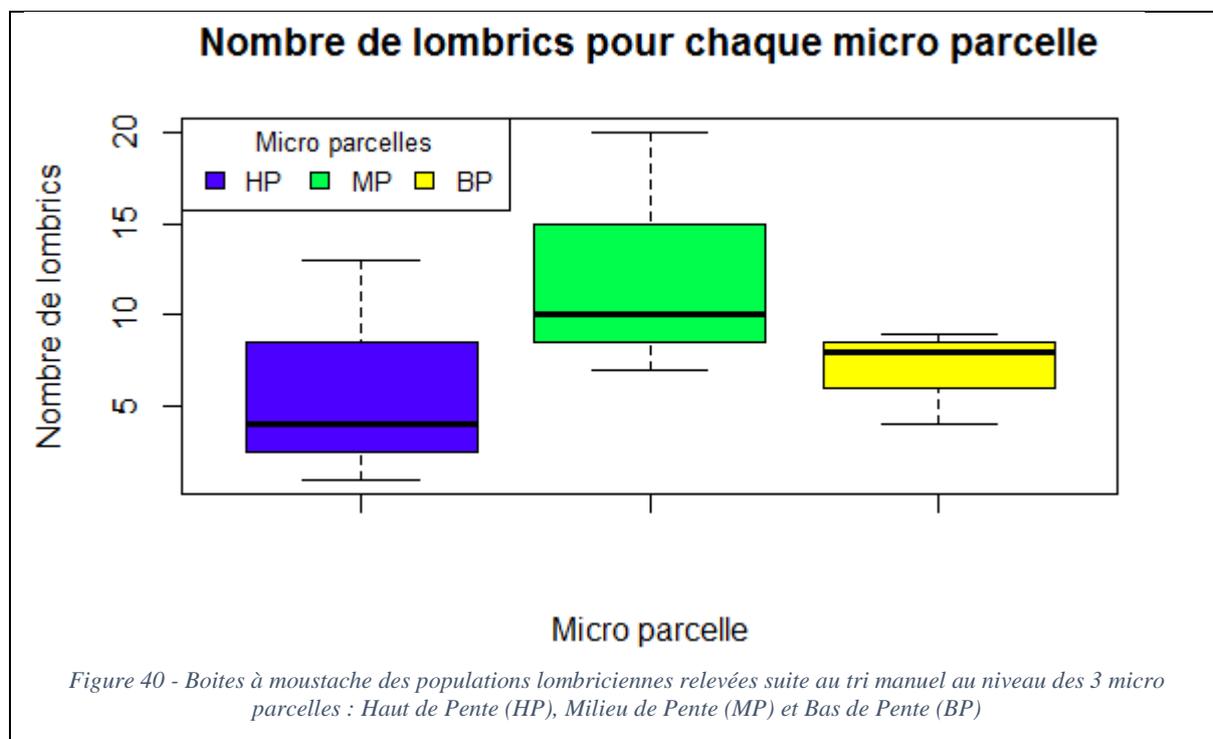
Le nombre de fourmis dans les pièges varie de 0 à 110 individus, avec une majorité de pièges comprenant entre 40 et 80 individus. Les populations de fourmis retrouvées lors des TSBF sont en accord avec ces populations mesurées. Cette population « normale » de ces ingénieurs du sol traduit une bonne stabilité structurale.

Cependant, l'étude utilisée comme repère de comparaison n'a pas utilisé la méthode de TSBF mais des pièges à parois lisses avec des appâts afin de récolter les fourmis. L'utilisation d'appâts a peut-être permis de récolter plus de fourmis qu'avec la méthode du TSBF.

Lors des TSBF, les monolithes de terres ont été creusés à proximité de fourmilières. Or, s'il avait été décidé de creuser à un autre endroit, quelques mètres à côté par exemple, les résultats auraient pu être différents et montrer un nombre très faible de fourmis.

### Les peuplements lombriciens :

La macro faune a été identifiée à l'aide d'une loupe binoculaire et de documents d'identification : une clé d'identification de la macrofaune du sol d'E. Blanchart et le cours d'écologie des lombrics de Claire Marsden.



Le nombre moyen de vers de terre pour les micro parcelles BP ( $7,0 \pm 2,6$ ) et HP ( $6,0 \pm 6,2$ ) est proche (Figure 40), tandis que celui pour la micro parcelle MP est un petit peu plus élevé ( $12,3 \pm 6,8$ ). Les biomasses n'excèdent pas 10 grammes et suivent la même tendance que l'abondance des lombrics : la biomasse est légèrement plus élevée en milieu de pente qu'en haut et bas de pente (Figure 41).

Données de population de lombrics		Coefficients de variation [%]	Données de biomasse des lombrics		Coefficients de variation [%]
HP		104,1	HP		140,3
MP		55,2	MP		74,8
BP		37,8	BP		89,7
Général		62,9	Général		91,7

Figure 42 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de population et de biomasse des lombrics au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles

Cependant, comme l'indiquent les valeurs de coefficient de variation, l'abondance des lombrics et leurs biomasses varient fortement (Figure 42). Ces fortes variations peuvent être associées à la variation spatiale assez forte des populations lombriciennes.

Ces données sont inférieures à celles de certaines études traitant des populations lombriciennes, comme la thèse de Guénola PERES, qui s'est intéressée à l'identification et la quantification in situ des lombrics dans des cultures bretonnes (Figure 43).

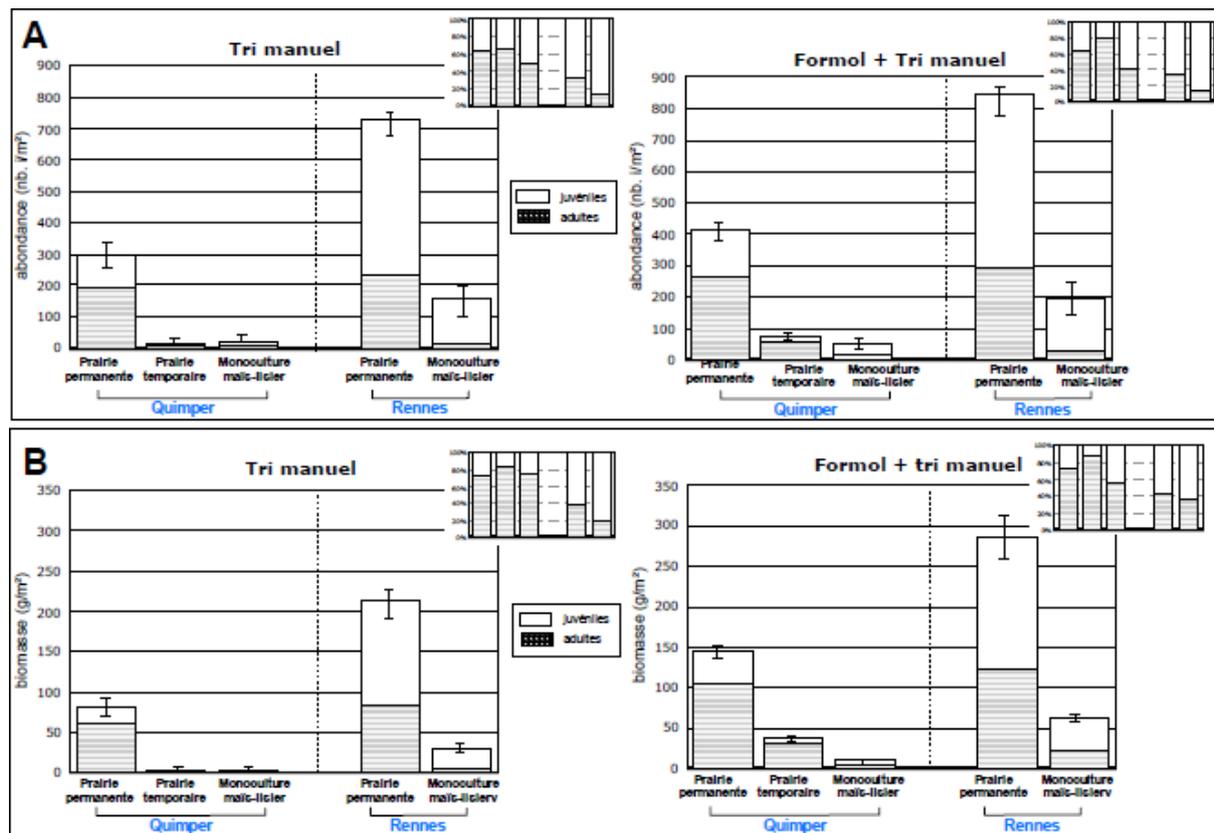


Figure 43 - Valeurs d'abondance (A) et de biomasse (B) mesurées par tri manuel et avec utilisation de formol au niveau de Quimper et de Rennes et pour plusieurs types d'usage de sol (Source : G. PERES, 2003)

La Figure 43 montre également la différence entre tri manuel uniquement et l'utilisation de formol, cette dernière permettant d'avoir des abondances et des biomasses plus élevées qu'en tri manuel. La méthode de prélèvement du monolithe de terre est relativement proche de celle utilisée pour le TSBF.

Si on compare les résultats d'abondance et de biomasse des lombrics avec ceux de l'étude, il semble que l'abondance des populations lombriciennes observées en Brenne appartiennent à la gamme de valeurs d'une prairie temporaire.

La période de prélèvement permet d'expliquer pourquoi on ne retrouve pas les valeurs d'une prairie permanente. Les monolithes de terre ont été prélevés début Avril, en début de printemps. Si les monolithes étaient creusés au milieu de l'automne, avec une terre bien humide, les résultats seraient peut être en accord avec ceux d'une prairie permanente, les lombrics préférant un sol humide.

De plus, PERES estime la valeur de 16 i/m<sup>2</sup> comme étant faible, on peut qualifier les populations de lombrics relevés lors des TSBF de faible également.

Cependant, certaines remarques peuvent être émises vis-à-vis de la méthode de TSBF :

- Les communautés de faune du sol varient assez fortement dans l'espace. Cela implique que les résultats moyens obtenus sont souvent associés à des écarts types élevés.
- Les communautés varient spatialement mais également temporellement, selon les variations saisonnières. Les échantillonnages effectués à une seule époque de l'année ne rendent compte que d'une partie de l'activité de la faune du sol. Les lombrics notamment sont plus actifs en saison humide.
- Zicsi (1962) estime que 16 prélèvements de monolithes de terre de 0.25 m<sup>2</sup> de surface et 20 cm de profondeur sont nécessaires pour appréhender l'abondance des lombriciens de taille moyenne.

Il faudrait donc répéter davantage de prélèvement de blocs mais également répéter les prélèvements selon les saisons.

Malgré cette faible abondance lombricienne, cette dernière n'est pas nulle et si leur activité est suffisante alors la stabilité structurale peut être améliorée.

- *Quantification des turricules de vers de terre*

Les turricules présents dans la surface d'1 m<sup>2</sup> des micro parcelles lors de deux passages sur le terrain (Figure 44). Aucun autre turricule n'a été observé après le mois de Juin.

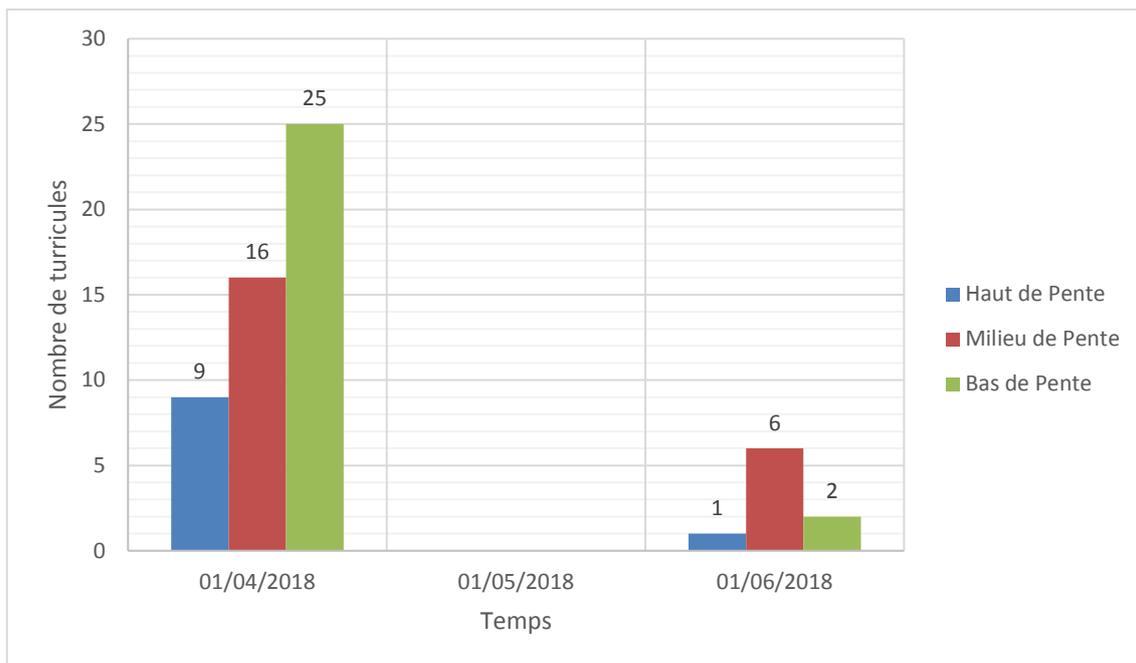


Figure 44 – Valeurs du nombre de turricules observés dans la surface d'1 m<sup>2</sup> des micro parcelles selon les missions de terrains

Les turricules étaient beaucoup moins présents au cours du mois de Juin par rapport à la période Avril – Mai. D'après les seuils proposés par Delaunois (Tableau 5), la quantité de turricules au mois d'Avril montre une activité lombricienne importante tandis que celle du mois de Juin montre une activité lombricienne moyenne.

Tableau 5 - Seuils employés pour la description de l'activité lombricienne (Source : Delaunois, 2008)

Importance des turricules de vers de terre	
<b>50 % à 100 % surface recouverte de turricules et de structures grumeleuses</b>	Activité lombricienne très élevée
<b>10 turricules / m<sup>2</sup></b>	Activité lombricienne élevée
<b>1 turricule / m<sup>2</sup></b>	Activité lombricienne moyenne
<b>1 turricule / 10 m<sup>2</sup></b>	Activité lombricienne faible
<b>Absence de turricules</b>	Activité lombricienne très faible

On peut expliquer cette observation par le fait que les vers de terre préfèrent les sols humides. La température et l'humidité influent fortement sur l'abondance et l'activité des lombrics. Or, les sols de surface étaient davantage humides en Mars – Avril, les vers de terre étaient en surface à ce moment-là et pouvaient rejeter des turricules dans les micro parcelles. A contrario, durant les mois estivaux, plutôt ensoleillés et chauds et avec une quasi-absence de précipitations à partir de fin juillet, les sols de surface étaient asséchés et les vers de terre se sont potentiellement déplacés en profondeur. Ce qui expliquerait l'absence de turricules observés pendant cette période. Il serait intéressant de reprendre les quantifications de turricules une fois que les températures auront diminuées et l'humidité des sols aura augmentée.

Il existe donc une activité lombricienne non négligeable au niveau des micro parcelles. Cette activité permet une bonne stabilité structurale du sol et une augmentation de la résistance à la battance et à l'érosion (Pelosi, 2008).

Il demeure une dernière caractéristique du sol qui joue un rôle important également vis-à-vis du ruissellement : l'infiltration au niveau du sol.

### 3.3.2. Une infiltration efficace de l'eau dans le sol

#### 3.3.2.1. Un sol poreux et filtrant

La perméabilité d'un sol dépend de sa structure : un sol est d'autant plus filtrant que sa macro porosité est forte.

La porosité moyenne du sol du site d'étude en Brenne est de  $52 \pm 3.6$  % (Figure 45). Comme pour les valeurs de densité apparente, les valeurs de porosité totale sont relativement proches, malgré une légère supériorité pour la micro parcelle de milieu de pente (MP). Davantage de répétitions de densité apparente au niveau des 3 micro parcelles permettraient de savoir s'il s'agit d'une différence significative.

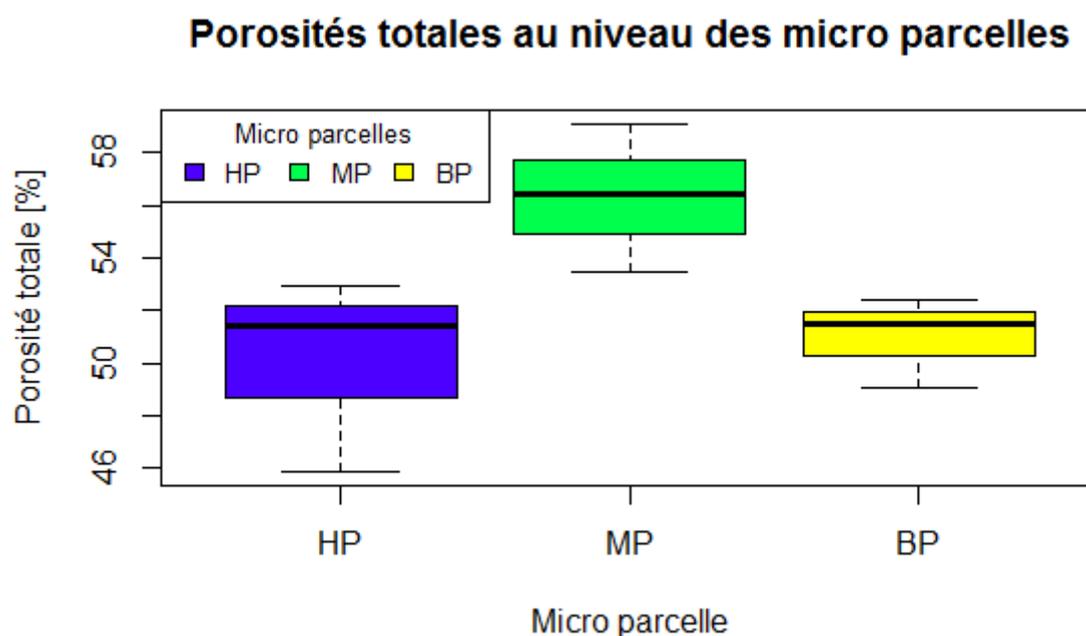


Figure 45 - Distribution des valeurs de porosité totale calculées pour les échantillons de la Brenne (DynEtang) selon les 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP)

Les valeurs moyennes au niveau des trois micro parcelles sont assez proches. Le calcul des coefficients de variation le confirme (Figure 46).

Données de porosité totale	Coefficients de variation [%]
<b>HP</b>	7,42
<b>MP</b>	4,98
<b>BP</b>	3,42
<b>Général</b>	6,90

Figure 46 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de porosité totale au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles

Les abondances de fourmis mesurées dans la partie 3.3.1.3. ne semblent donc pas jouer un rôle significatif sur la porosité totale.

A l'inverse, les résultats d'abondance de lombrics semblent correspondre à ceux de la porosité totale, cela montrerait que les lombrics joueraient effectivement un rôle sur la porosité totale : la porosité totale serait d'autant plus importante que le nombre de lombrics dans le sol augmenterait.

Le sol de la Brenne possède une porosité totale proche d'un sol de type « loam » sableux (Figure 47). Le « loam » est une classe structurale qui possède une portion de chaque texture : au moins 52 % de sable, 28 – 50 % de limon et 7 à 27 % d'argile. L'adjectif sableux signifie que la portion majoritaire est le sable. Ce qui correspond à la texture mesurée du sol. Les valeurs de porosité sont d'ailleurs cohérentes avec les valeurs de densité apparente obtenues.

### *La texture du sol et sa relation avec la densité apparente et la porosité*

<b>Classe texturale</b>	<b>Densité apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosité (%)</b>
sable	1,55	42
loam sableux	1,40	48
loam	1,20	55
loam limoneux	1,15	56
argile	1,05	60

Figure 47 - Gammes de valeurs de porosité totale et de densité apparente selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca)

Une porosité totale de 50 % est une valeur élevée. Il s'agit d'un sol assez compact, possédant une bonne proportion de vide et une faible proportion de particules fines. Cette porosité totale élevée est sûrement due à la texture du sol, à sa densité apparente et à la présence de lombrics.

#### *3.3.2.2. Un sol perméable*

La texture du sol a déjà été abordée pour l'étude de la stabilité structurale. Cependant, la texture du sol joue un rôle également sur l'infiltration. Les sols perméables sont des sols à texture grossière où dominent les sables et les graviers peu enrobés. Un sol sableux ne conservera que peu l'eau mais est naturellement perméable.

Le sol est sableux selon les résultats de l'analyse granulométrique. Il aura donc tendance à laisser filtrer l'eau et à être perméable, ce qui va dans le sens d'une infiltration efficace du sol.

Pour confirmer cette hypothèse, des tests d'infiltrations de Beerkan ont été réalisés.

#### *3.3.2.3. Une vitesse d'infiltration assez rapide*

Une grande partie de la pluie est infiltrée lorsqu'elle rencontre un sol perméable, ce qui réduit l'importance du ruissellement et donc de l'érosion (Bunza, 1984 ; Bunza et Schauer, 1989). La perméabilité d'un sol peut être estimée grâce à la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$ . Cette conductivité hydraulique à saturation correspond aux écoulements gravitaires qui s'effectuent dans le sol lorsque la porosité capillaire et matricielle est saturée en eau.

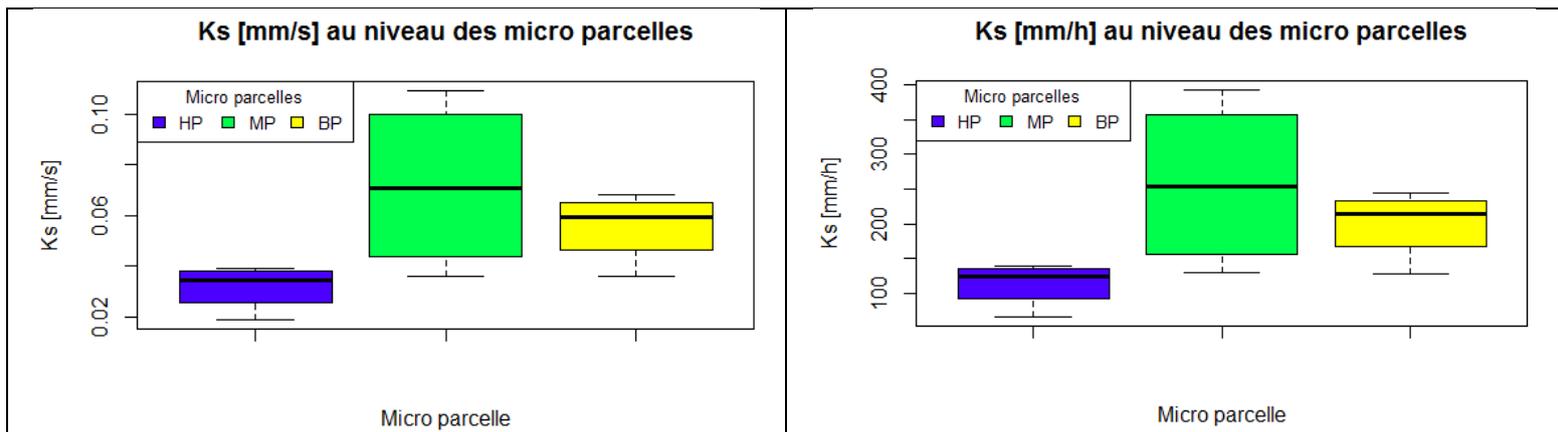


Figure 48 - Série des conductivités hydrauliques à saturation  $K_s$  mesurées regroupées par micro parcelle selon leur position topographique : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et bas de Pente (BP)

Les valeurs moyennes de conductivité hydraulique sont comprises entre 0.02 et 0.1 mm/s soit 100 et 260 mm/h (Figure 48). Cela correspond, après comparaison avec les valeurs proposées par la Figure 49, à des valeurs de conductivité hydraulique à saturation d'un sol sableux. Ce qui est cohérent avec la texture du sol mesurée, avec les valeurs de densité apparente et de porosité apparente.

Type de sol	Conductivité hydraulique saturée	
	(mm/h)	(m/s)
Sable	210	$5,83 \times 10^{-5}$
Sable limoneux	61	$1,69 \times 10^{-5}$
Limon sablonneux	26	$7,22 \times 10^{-6}$
Limon	13	$3,61 \times 10^{-6}$
Limon silteux	6,8	$1,89 \times 10^{-6}$
Limon argilo-sablonneux	4,3	$1,19 \times 10^{-6}$
Limon argileux	2,3	$6,39 \times 10^{-7}$
Limon argilo-silteux	1,5	$4,17 \times 10^{-7}$
Argile sablonneuse	1,2	$3,33 \times 10^{-7}$
Argile silteuse	0,9	$2,50 \times 10^{-7}$
Argile	0,6	$1,67 \times 10^{-7}$

Figure 49 - Valeurs de taux d'infiltration selon le type de sol (Source : mdelcc.gouv.qc.ca)

On peut remarquer cependant qu'en moyenne, la micro parcelle de bas de pente ne possède pas la conductivité hydraulique la plus faible. Cette information annule l'hypothèse d'une éventuelle infiltration moins efficace au niveau de cette micro parcelle.

La connaissance de la conductivité hydraulique permet également de décrire les possibilités d'infiltration. Le tableau ci-dessous (Figure 50) résume les possibilités d'infiltration d'un sol en fonction de la texture du sol et de sa conductivité hydraulique. En convertissant les valeurs de conductivité hydraulique de la Figure 48 en m/s, on obtient des valeurs moyennes comprises entre  $3.15 \times 10^{-5} \pm 9.05 \times 10^{-6}$  m/s et  $5.57 \times 10^{-5} \pm 1.41 \times 10^{-5}$  m/s. Ces valeurs correspondent une nouvelle fois à un sol majoritairement sableux, avec de bonnes capacités d'infiltration.

K (m/s)	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins			Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limon grossier à limon argileux			Argile limoneuse à argile homogène		
Possibilités d'infiltration	Excellentes			Bonnes		Moyennes à faibles			Faibles à nulles		

Figure 50 - Tableau reprenant les possibilités d'infiltration d'un sol selon la texture et sa conductivité hydraulique (Source : d'après Musy et Soutter (1991), cité dans Barraud (2006))

PERES (2003) a mesuré les valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation au niveau de prairies permanents (Figure 51). Ces valeurs sont équivalentes à celles mesurées au niveau des micro parcelles, ce qui signifie que nos valeurs mesurées correspondent bien à des valeurs de prairies permanentes au niveau du site de Quimper.

Site	Modalités	Répétition	Valeurs (m/s)	Moyenne (m/s)	Ecart Type	CV (%)	
Quimper	Mais Inter-rang	1	1.80E-05	1.76E-05 <sup>a</sup>	3.8917E-07	2.2	
		2	1.74E-05				
	Mais rang	1	8.02E-05	1.16E-04 <sup>b</sup>	4.99E-05	43.2	
		2	<b>1.51E-04</b>				
	Prairie permanente	1	1.34E-05	3.05E-05 <sup>a</sup>	2.29E-05	75.1	
		2	5.65E-05				
		3	2.15E-05				
	Prairie temporaire	1	9.96E-06	8.47 <sup>e</sup> -06 <sup>c</sup>	1.33E-06	15.7	
		2	7.39E-06				
		3	8.06E-06				
Significativité (Kruskall Wallis)				S			
Rennes	Mais Inter rang	1	6.60 <sup>f</sup> -07	6.59 <sup>f</sup> -07 <sup>a</sup>	2.24E-07	34	
		2	4.35 <sup>f</sup> -07				
		3	8.83 <sup>f</sup> -07				
	Mais rang	1	6.79 <sup>f</sup> -07	(1) 4.69E-05 <sup>ab</sup>	8.05E-05	171.7	
		3	1.39 <sup>f</sup> -07				
		2	<b>1.40<sup>f</sup>-04</b>	(2) 4.09E-07	3.82E-07	93.4	
	Prairie Permanente	1	1.00 <sup>f</sup> -07	1.19 <sup>f</sup> -07 <sup>b</sup>	2.70E-08	22.7	
		2	1.38 <sup>f</sup> -07				
	Significativité (Kruskall Wallis)				S		

Figure 51 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation mesurées par un perméamètre à charge constante sur les sites de Quimper et Rennes. CV signifie coefficient de variabilité. (Source : G.PERES)

Des classes de vitesse d'infiltration selon la valeur de Ks (in Chamayou et Legros, 1989) permettent de qualifier la vitesse d'infiltration. Si les capacités d'infiltration sont bonnes, la vitesse d'infiltration du sol doit être assez rapide (Tableau 6).

Tableau 6 - Qualification de la vitesse d'infiltration d'un sol en fonction des classes de conductivité à saturation  $K_s$  [mm/s] (in Chamayou et Legros, 1989)

Vitesse d'infiltration	Classes [mm/s]	Effectif	Effectif %
<b>Très lente</b>	$< 3.0 \times 10^{-4}$	0	0
<b>Lente</b>	$3.0 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-3}$	0	0
<b>Assez lente</b>	$1.5 \times 10^{-3} - 6.0 \times 10^{-3}$	0	0
<b>Moyenne</b>	$6.0 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-2}$	0	0
<b>Assez rapide</b>	$1.7 \times 10^{-3} - 3.5 \times 10^{-2}$	2	16.7
<b>Rapide</b>	$3.5 \times 10^{-2} - 7.0 \times 10^{-2}$	8	66.7
<b>Très rapide</b>	$> 7.0 \times 10^{-2}$	2	16.7

Plus de 80 % des valeurs de  $K_s$  appartiennent aux classes de vitesse d'infiltration rapide à très rapide. Ce résultat est donc cohérent avec de bonnes capacités d'infiltration du sol et montre une faible dispersion des mesures. Faible dispersion qui est confirmée par les valeurs de coefficient de variation des données qui n'excèdent pas 50 % (Figure 52).

$K_s$ [mm/s]	Coefficients de variation [%]
<b>HP</b>	28,7
<b>MP</b>	47,2
<b>BP</b>	25,4
<b>Général</b>	47,2

Figure 52 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de conductivité hydraulique au niveau de chaque micro parcelle et pour l'ensemble des micro parcelles

Ces résultats montrent ainsi que la capacité d'infiltration de ce sol est bonne, confirmant de ce fait l'hypothèse H4. Les capacités d'infiltration sont supérieures aux intensités pluviales proposées dans la partie 3.2. Ce qui constituerait une des raisons de l'absence de ruissellement. Cette forte capacité d'infiltration est la conséquence de la texture sableuse du sol et d'une bonne proportion de vides.

Cette observation est semblable à celle de l'étude de Trevisan *et al.* en 1993, qui ont observé pour un site en Lozère avec une granulométrie semblable à celle du site d'étude de Brenne (S : 70 %, L : 20 %, A : 10 % en surface) que les parcelles recouvertes de pelouse possédaient des valeurs élevées et stables d'infiltrabilité minimum et ce pour toute intensité de pluie utilisée lors des simulations de précipitation.

La connaissance de l'intensité pluviale sur toute une année permettrait de savoir si la vitesse d'infiltration est en effet toujours supérieure à l'intensité pluvieuse pour toutes les saisons.

Le calcul de la conductivité hydraulique par le logiciel BEST prend en compte la granulométrie de surface. Il serait intéressant d'avoir la granulométrie un peu plus en profondeur afin d'affiner le comportement de la conductivité hydraulique en profondeur.

### 3.3.3. Relation entre les caractéristiques du sol

La dépendance entre les caractéristiques du sol peuvent être étudiées grâce aux coefficients de corrélation. Ces coefficients sont compris entre -1 et 1. Une valeur positive signifie une corrélation positive donc si l'une des caractéristiques augmente, l'autre également. Pour une corrélation négative, si l'une des caractéristique augmente, l'autre diminue ou inversement.

La relation linéaire est d'autant plus forte entre variables que la valeur absolue du coefficient est importante. Un coefficient nul ou quasi-nul implique qu'il n'existe pas de relation linéaire entre variables.

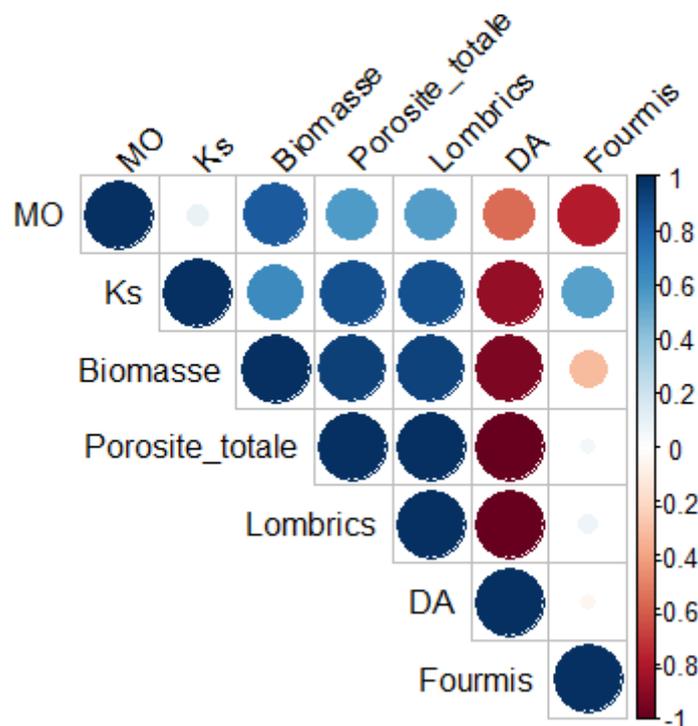


Figure 53 – Graphique mettant en évidence les corrélations (corrélogramme) des différents paramètres du sol étudié. MO = Matières Organiques ; Ks = Conductivité hydraulique à saturation ; DA = Densité Apparente.

Cependant, il est nécessaire de vérifier la significativité de la corrélation, à l'aide de la p-value :

- Si  $p \leq 0.05$ , alors la corrélation est statistiquement significative ;
- Si  $p > 0.05$ , alors la corrélation n'est pas statistiquement significative.

P	Ks	Porosite_totale	DA	Biomasse	Lombrics	Fourmis	MO
Ks		0.0053	0.0053	0.0525	0.0046	0.4690	0.4142
Porosite_totale	0.0053		0.0000	0.0006	0.0000	0.8218	0.0614
DA	0.0053	0.0000		0.0006	0.0000	0.8218	0.0614
Biomasse	0.0525	0.0006	0.0006		0.0007	0.4042	0.0069
Lombrics	0.0046	0.0000	0.0000	0.0007		0.8419	0.0659
Fourmis	0.4690	0.8218	0.8218	0.4042	0.8419		0.0499
MO	0.4142	0.0614	0.0614	0.0069	0.0659	0.0499	

Figure 54 - Niveaux de significativité des corrélations entre les caractéristiques du sol

Il existerait une corrélation significative positive ( $p \leq 0.05$ ) entre l'abondance de lombrics et Ks, entre l'abondance de lombrics et la biomasse, entre l'abondance de lombrics et la porosité totale, entre la biomasse et la teneur en matières organiques et entre Ks et la porosité totale (Figure 53). Cela signifie que si l'abondance de lombrics augmente, la biomasse augmentera aussi ainsi que la vitesse d'infiltration, la porosité totale et la teneur en matières organiques.

Le fait que la relation variables descriptives du peuplement lombricien et conductivité hydraulique à saturation soit établie est cohérent avec le résultat généralement établi que le maintien d'une importante porosité est possible grâce aux lombrics en milieu tempéré (Shipitalo & Protz, 1989 ; Urbanek & Dolezal, 1992 ; Schröder *et al.*, 1995).

De plus, la porosité totale et l'abondance lombricienne sont corrélés positivement, ce qui est dans la continuité du résultat obtenu dans la thèse de G.PERES (2003), qui écrit : « Le nombre de pores peut être considéré comme un indicateur de la densité lombricienne. »

A l'inverse, une corrélation significative négative ( $p \leq 0.05$ ) serait présente entre la densité apparente et la conductivité hydraulique à saturation, la biomasse, la porosité totale et l'abondance lombricienne. Cette corrélation négative est cohérente avec la corrélation positive : si l'abondance lombricienne augmente, la porosité augmentera et ainsi la densité apparente diminuera. Ces informations montrent ainsi l'importance des lombrics vis-à-vis des caractéristiques du sol et indirectement sur l'érosion hydrique.

Il semble n'exister aucune corrélation entre l'abondance de fourmis et la porosité totale, l'abondance lombricienne et la densité apparente.

Encore une fois, ces interprétations doivent être regardées avec une certaine réserve, le nombre de répétitions étant relativement faible pour chaque paramètre.

---

## 4. Conclusion générale

---

Ces six mois de stage ont donc permis la mise en place des micro parcelles d'érosion. Ces micro parcelles ont l'avantage d'être relativement simples à mettre en place et à utiliser. Les premières données ont pu être acquises et offrent une tendance du détachement du sol et du ruissellement au niveau du site d'étude. Les expériences permettant d'avoir des informations sur le sol, complémentaires aux mesures, ont également pu être mises en œuvre.

Ainsi, ce stage a permis d'avoir d'avantages d'informations sur le fonctionnement hydro sédimentaire au niveau d'un versant de l'étang Pifaudière. Il s'agit d'informations qui serviront de socle pour la suite du projet DynEtang qui s'intéressera à d'autres fonctionnements : biochimique, ... Ces informations peuvent intéresser notamment les chercheurs qui travaillent sur la pollution en métaux lourds.

Ce stage a mis en place une étude quantitative de la production de matériaux solides et du transfert des sédiments au niveau d'un bassin versant à proximité d'un étang.

Les résultats obtenus permettent de répondre aux hypothèses formulées :

**H1** : L'érosion hydrique est faible au niveau du site d'étude.

**H2** : Au niveau de la micro parcelle de bas de pente, les caractéristiques du sol ne montrent pas une tendance particulière montrant un ruissellement ou un détachement plus important à cette position de la pente.

**H3** : L'intensité des pluies au niveau des micro parcelles est faible et peu propice au ruissellement et au détachement.

**H4** : Les propriétés du sol montrent une bonne infiltrabilité.

**H5** : Le sol est stable structurellement.

La figure suivante (Figure 55), répondant à celle présentée dans la partie 1.6, résume et met en relation les différents résultats obtenus.

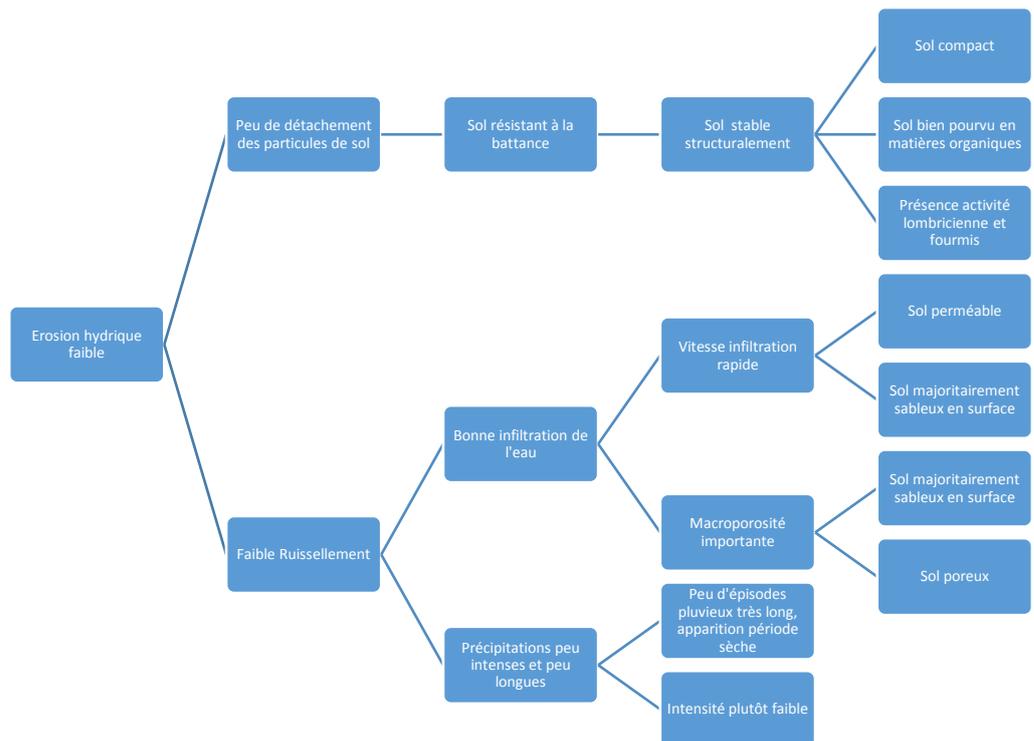


Figure 55 - Schéma représentant les liens entre les résultats obtenus d'érosion hydrique, de précipitation et de caractéristiques du sol

Pour un sol protégé par une couverture végétale toute l'année sous un climat tempéré et avec une pente faible, un sol en subsurface majoritairement sableux, très peu de ruissellement sera observé, avec un sol filtrant et stable structurellement.

L'érosion hydrique dépend d'un nombre conséquent de facteurs. La liste des caractéristiques physico-chimique du sol que nous avons étudiées n'est donc pas exhaustive. Nous avons étudié celles qui étaient applicables avec les moyens dont nous disposions.

Ce résultat est en accord avec la conclusion de l'étude de Trevisan *et al.* en 1993, qui se sont intéressés à la susceptibilité du ruissellement et de l'érosion en nappe avec des simulations de pluies sur plusieurs textures de sol. Ils ont effet conclu que la capacité d'infiltration reste, en toutes circonstances, très forte pour un site possédant une végétation naturelle qui repose sur un sol grossier et filtrant, ce qui est cas de notre site d'étude.

Dans certaines situations où il n'y avait pas d'eau de ruissellement, des morceaux de terre étaient en revanche observables dans les gouttières. Ces morceaux de terre avaient la forme de turricules de vers de terre. Il a été supposé que les vers de terre sont à l'origine de ces turricules, qui se retrouvent ensuite au niveau de la retenue d'eau étudiée. Des analyses chimiques pourraient permettre de confirmer cette hypothèse. L'érosion hydrique des berges de la retenue d'eau peuvent également être source de sédiments.

Trois micro parcelles d'érosion ont pu donc être utilisées et offrir des données. Il aurait été intéressant de mettre en place d'autres micro parcelles sur un sol avec un usage différent comme sous une forêt, sur un sol cultivé, ... afin d'avoir davantage de données mais surtout de pouvoir comparer l'influence de l'usage du sol sur les résultats de ruissellement sous un même climat. Mais du fait des limites financières, 3 micro parcelles « seulement » ont pu être mises en place, sur un seul type de sol.

Une limite technique est apparue au cours du stage : la mise en fonctionnement d'une station enregistreuse avec des sondes de hauteur d'eau et de turbidité s'est révélée plus délicate que prévue. Cela a donc retardé leur mise en place.

Avec des moyens plus importants et plus de temps, d'autres caractéristiques pourraient être mesurées comme l'étude des agrégats en laboratoire, ou encore effectuer des simulations artificielles de pluie.

Les sondes et la station enregistreuse seront mises en place, et paramétrées pour envoyer leurs données sur un serveur FTP. Un modèle numérique général plus complet pourra être créé à partir des données qui seront données par ces sondes et par les hauteurs piézométriques relevées au cours des missions de terrain. Un panneau solaire sera aussi installé, permettant à la station d'avoir une source d'énergie indépendante à disposition, évitant le risque d'une batterie complètement vide.

Le suivi des données de ruissellement et de sédiments se fera sur une année hydraulique complète, afin d'avoir une idée du comportement de l'érosion hydrique selon les saisons.

Des mesures politiques ont été mises en œuvre vis-à-vis de l'érosion hydrique, montrant ainsi qu'une prise de conscience s'est produite face à ce phénomène global. Le projet de la PAC 2014-2020 est un bon exemple d'action politique environnementale avec l'introduction des « paiements verts », des fonds que recevront les agriculteurs s'ils respectent 3 conditions. Une des conditions est le maintien des prairies permanentes ce qui offre une protection naturelle du sol face à l'érosion hydrique.

## REFERENCES :

- Alongo, S. & Kambele, F., 2013. Évolution de la densité apparente et du rapport c/n du sol sous les variétés exotiques et locale de manioc dans les conditions naturelles de Kisangani (R.D.Congo). *Annales de l'Institut Facultaires des sciences agronomiques de Yangambi*, Volume 1, pp. 197-214.
- Barraud, S. et al. (2006). Guide technique : Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. Programme MGD infiltration du RCGU, Lyon, France.
- Blake, R. & Hartage, K., 1986. Bulk density. *Methods of soils analysis. Soil science*, 1(2), pp. 363-375.
- Borges A. L. Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud. *Hydrologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I*, 1993. Français. <tel-00764428>
- Bouché, M. B., 1972. *Lombriciens de France: Ecologie et Systématique*. INRA Ann. Zool. Ecol. Anim. Publication, France, 671 pp.
- Brunet, D., Brossard M. (2000). Ruissellement et détachabilité d'un sol sous pâturages cultivés dans le Cerrado (Brésil) : premiers résultats sur micro-parcelles d'érosion. In : *Soil functioning under pastures in intertropical areas : extended abstracts*. Brasilia (BRA) ; Paris : EMBRAPA ; IRD, 4 p. Soil Functioning under Pastures in Intertropical Areas : International Symposium, Brasilia (BRA), 2000/10/16-20.
- Bunza G. und T. Schauer (1989). Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Waldbachgebieten der Bayrischen Alpen. *Informationsbericht des Bayrischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (2)*, München, 127-150.
- Chambre d'Agriculture de l'Orne. N.d. Les vers de terre les ouvriers de nos parcelles. [En ligne, consulté le 24/07/2018] [https://orne.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Normandie/ecophyto-eni-vers.pdf](https://orne.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Normandie/ecophyto-eni-vers.pdf)
- Chambre d'Agriculture du Tarn. N.d. Mieux Connaître Les Vers de Terre. [En ligne, consulté le 15/05/2018] [http://www.tarn.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Occitanie/074\\_Inst-Tarn/4-AGROENVIRONNEMENT/Ecophyto/agriculture\\_conservation/Observer\\_le\\_sol/Conna%C3%A0tre\\_et\\_Observer\\_les\\_vers\\_de\\_terre.pdf](http://www.tarn.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/074_Inst-Tarn/4-AGROENVIRONNEMENT/Ecophyto/agriculture_conservation/Observer_le_sol/Conna%C3%A0tre_et_Observer_les_vers_de_terre.pdf)
- Campy M. et Macaire J.-J., *Géologie de la surface. Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux* (2e éd.), Dunod, 2003, 440 p.
- Casenave, A, and C Valentin. 1992. "A Runoff Capability Classification-System Based on Surface-Features Criteria in Semiarid Areas of West Africa." *Journal of Hydrology* 130 (1-4): 231-49. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90112-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90112-9).
- Cerdan O, Govers G, Le Bissonnais Y. et al. 2010. "Rates and Spatial Variations of Soil Erosion in Europe : A Study Based on Erosion Plot Data Geomorphology Rates and Spatial Variations of Soil Erosion in Europe : A Study Based on Erosion Plot Data." *Geomorphology* 122 (1-2). Elsevier B.V.: 167-77. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011>.
- Chaplot V, Le Bissonnais Y. 2000. Field measurements of interrill erosion under different

slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 145-153.  
10.1002/(sici)1096-9837(200002)25:2<145::aid-esp51>3.0.co;2-3.

Chenu C., 1989 - Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biology and Biochemistry*, 21, 299-305.

Chenu C. et Guérif J., 1991 - Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 1076-1080.

Churchman G. J. et Tate K. R., 1987 – Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *Journal of Soil Science*, 38, 19-27.

Cluzeau, D., Guo, Z. T., Chaussod, D., Fedoroff, N., Normand, M. et Perraud, A., 1994. Interaction between soil, biological activities and organic matter enrichments in Champagne soils. *Transactions of the XV World Congress of Soil Sc.* INEG and CNA publishing, Mexico, 4b, pp. 149-150.

Collinet J. 1988. Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols d'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluie. Doctorat de l'Université L. Pasteur de Strasbourg, mention : géologie-pédologie. Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Danielson, R.E., and P.L. Sutherland, 1986, "Porosity," in A. Klute (editor), *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., pp. 443–462, American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America, Madison, WI.

Delaunois, Antoine, Yves Ferrie, Marcel Bouche, Carole Colin, Eau Adour-garonne, C A S Dar, Union Europ, and Albi Cedex. 2008. "Guide Pour La Description et l'évaluation de La Fertilité Des Sols," no. Chambre d'agriculture du Tarn: 37.

De Ploey J, Savat J, Moeyersons J. 1976. The differential impact of some soil loss factors on flow, runoff creep and rainwash. *Earth Surface Processes and Landforms* **1**: 151-161.

Djorovic M. 1980. Slope effect on runoff and erosion. In De Boodt MaG, D. (Eds). *Assessment of Erosion*,. 215-225.

Ecosfix. N.d. "3 . EROSION DES SOLS : MECANISMES , MODELISATION ET METHODES DE CONSERVATION." [En ligne, consulté le 04/05/2018] [http://www.ecosfix.projet-agroforesterie.net/upload/pdf/RHB%20%20Erosion%20-%20Conservation%20des%20sols%20\(Jerome%20POULENARD%20-%20EDYTEM\).pdf](http://www.ecosfix.projet-agroforesterie.net/upload/pdf/RHB%20%20Erosion%20-%20Conservation%20des%20sols%20(Jerome%20POULENARD%20-%20EDYTEM).pdf)

Eswaran H, Lal R, Reich PF. 2001. *Land degradation: An overview*. Bridges EM, Hannam ID, Oldeman LR, DeVries WTP, Scherr SJ and Sombatpanit S, Response to Land Degradation.

Fayolle, L, and Y Gautronneau. 1996. "Détermination Des Peuplements et de l'Activité Lombricienne En Grandes Cultures, à l'Aide Du Profil Cultural." *Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*, 1–10.

Forgeot, D. 2007. "Densité des nids et activité des fourmis hôtes de *Maculinea alcon* D. & S., 1775 sur la Lande du Camp, influence de l'habitat et du mode de gestion." *Environnement, Master*. 51p.

Gollany H. T., Schumacher T.E., Evenson P.D., Lindstrom M.J. et Lemme G. D., 1991 – Aggregate stability of an eroded and desurfaced Typic Argiustoll. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 811-816.

- Guern, C Le, P Conil, B Clozel, M Albrecht, D Levacher, N Proulhac, C Schwartz, and P. Baticle. 2004. "Aide à La Gestion Alternative Au Rejet En Mer de Sédiments Contaminés Provenant Du Dragage de Sites Portuaires. Rapport Final." *Brgm/Rp-53470-Fr*, 235.
- Gumbs E, Lindsay JI, Nasir M, Angella M. 1986. Soil erosion studies in the northern mountain range, Trinidad, under different crop and soil management. In: Soil erosion and conservation. Madison, USA. Soil Conservation Society of America. 90-98.
- Gyssels G, Poesen J, Bochet E, Li Y. 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography* **29**: 189-217. 10.1191/0309133305pp443ra.
- Haynes R. J., 1993 - Effect of sample pretreatment on aggregate stability measured by wet sieving or turbidimetry on soils of different cropping history. *Journal of Soil Science*, 44, 261-270.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. of the Geol. Soc. of America*, 56, pp. 275-370.
- INPN. 2018. FR2400534 – GRANDE BRENNÉ. [En ligne, consulté le 30/03/2018] <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR2400534>
- Janeau, J. L., J. P. Bricquet, O. Planchon, and C. Valentin. 2003. "Soil Crusting and Infiltration on Steep Slopes in Northern Thailand." *European Journal of Soil Science* 54 (3): 543–53. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00494.x>.
- Jean Boiffin, Jules Kéli Zagbahi, Michel Sebillotte. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais : application du modèle de Hénin-Dupuis. *Agronomie*, EDP Sciences, 1986, 6 (5), pp.437-446.
- Jouquet P, Janeau J-L, Pisano A, Hai Tran S, Orange D, Luu Thi Nguyet M, Valentin C. 2012. Influence of earthworms and termites on runoff and erosion in a tropical steep slope fallow in Vietnam: A rainfall simulation experiment. *Applied Soil Ecology* **61**: 161-168. 10.1016/j.apsoil.2012.04.004.
- Lacombe, Guillaume, Christian Valentin, Phabvilay Sounyafong, Anneke de Rouw, Bounsamai Soulileuth, Norbert Silvera, Alain Pierret, Oloth Sengtaheuanghong, and Olivier Ribolzi. 2018. "Linking Crop Structure, Throughfall, Soil Surface Conditions, Runoff and Soil Detachment: 10 Land Uses Analyzed in Northern Laos." *Science of the Total Environment* 616–617. Elsevier B.V.: 1330–38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.185>.
- Lal R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* **17**: 319-464. 10.1016/s0735-2689(98)00363-3.
- Langhor R. 1990. L'homme et les processus d'érosion des sols limoneux de Belgique et du Nord-Ouest de la France. In *Les Celtes en France et en Belgique*. Crédit communal (Ed.).
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:521–532. *Soil Physics* doi:10.2136/sssaj2005.0026
- Lavelle, P. et Spain, A. V., 2001. *Soil Ecology*. Kluwer Scientific Publications, Amsterdam, 654 pp.
- Le Bissonnais, Y., Le Souder, C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2 (1), 43-56.

- Lee, K. E., 1985. Earthworms: their ecology and relationship with soils and land use. New York, 411 pp.
- Levia DF, Frost EE. 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology* **274**: 1-29. 10.1016/s0022-1694(02)00399-2.
- Mah MGC, Douglas LA, Ringrosevoase AJ. 1992. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall. *Soil Science* **154**: 37-43. 10.1097/00010694-199207000-00005.
- Marsden, C. 2016. "Earthworm Ecology Outline Earthworm Taxonomy , Biology & Ecology Measuring Earthworm Populations Earthworms in Mauguio Extras," no. February.
- MASSET J.-Y. 2012. Chapitre IV : Propriétés physiques du sol. [En ligne, consulté le 20/08/2018] <http://jymasset-foret.fr/cours/pedologie/PEDO4-2012.pdf>
- Mattheys E., 1983. Global vegetation and land use : new high-resolution data bases for climates studies. In *J. of Climate and Applied Meteorology*, 22, pp. 274-287.
- Mauchamp, Bernard. 1988. "La Diapause / Insectes N° 89" 69: 2-6.
- Ministère de la Transition Énergétique et Solidaire. 2017. L'érosion hydrique des sols. [En ligne, consulté le 30/03/2018] <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/essentiel/ar/2699/0/lerosion-hydrique-sols-1.html>
- Monnier G., 1965 – Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Paris.
- MONNIER (G.), STENGEL, 1982. - La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. *BTI* 370/372 : 503-511.
- Moussa Malam Abdou, Jean-Pierre Vandervaere, Luc Descroix, Ibrahim Bouzou Moussa, Oumarou Faran Maiga, Souley Abdou, Bachirou Bodo Seyni & Maman Laouali Ousseini Daouda, «Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé dans l'Ouest du Niger», *BASE* [En ligne], Volume 19 (2015), numéro 3, 270-280 URL : <https://popups.uliege.be:443/1780-4507/index.php?id=12228>.
- Musy A., Soutter M. (1991). *Physique du sol*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 335 p.
- Neave M, Rayburg S. 2007. A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover. *Geomorphology* **87**: 378-390. 10.1016/j.geomorph.2006.10.007.
- Parc Naturel Régional de la Brenne. 2012. Document d'objectifs ZSC Grande Brenne ZPS Brenne. P. 97. [En ligne, consulté le 20/03/2018] [www.parc-naturel-brenne.fr/fr/telechargements/category/27-sites-brenne-et-grande-brenne?download=160:document-d-objectifs-brenne-grande-brenne-04-2012](http://www.parc-naturel-brenne.fr/fr/telechargements/category/27-sites-brenne-et-grande-brenne?download=160:document-d-objectifs-brenne-grande-brenne-04-2012)
- Podwojewski, P., D. Orange, P. Jouquet, C. Valentin, Van Thiet Nguyen, J. L. Janeau, and Duc Toan Tran. 2008. "Land-Use Impacts on Surface Runoff and Soil Detachment within Agricultural Sloping Lands in Northern Vietnam." *Catena* 74 (2): 109-18. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.013>.

- Pelosi, Céline. 2008. "Modélisation de La Dynamique d ' Une Population de Vers de Terre Lumbricus Terrestris Au Champ . Contribution à l'étude de l'impact Des Systèmes de Culture Sur Les Communautés Lombriciennes," 143.
- Peres, Guénola. 2003. "Identification et Quantification in Situ Des Interactions Entre La Diversité Lombricienne et La Macro-Bioporosité Dans Le Contexte Polyculture Breton . Influence Sur Le Fonctionnement Hydrique Du Sol" 1.
- Peres, G, D Cluzeau, H Hotte, and N Delaveau. 2012. "Fiche Indicateur : Les Vers de Terre," 4. [En ligne, consulté le 28/06/2018] [http://www.agripsol.projet-agroforesterie.net/docs/Vers\\_de\\_terre-bioindicateurs.pdf](http://www.agripsol.projet-agroforesterie.net/docs/Vers_de_terre-bioindicateurs.pdf)
- Puyberthier, P. 2013. Etude agro-écologique des prairies du site de Foucault. VetAgro Sup. 172 p.
- Quinn NW, Laflen JM. 1983. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy. *Transactions of the Asae* **26**: 1445-1450.
- Rakotomanga, Diane, Éric Blanchart, and Bodovololona Rabary. 2016. "Diversité de La Macrofaune Des Sols Cultivés Sur Les Hautes- Terres de Madagascar" 20 (4): 495–507.
- Rey F, Ballais JL, Marre A, Rovéra G. 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique. *C.R. Geoscience* **336**: 991-998.
- Rhizobiome. Delaunois, A. 2014. Mieux connaître son sol et son fonctionnement Approche Agricole Un Sol Vivant. [En ligne, consulté le 15/05/2018] <http://www.rhizobiome.coop/IMG/pdf/2014-04-sol-rhizobiome-v2.pdf>
- Roberson E. B., Sarig S. et Firestone M. K., 1991 - Cover crop management of polysaccharides-mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 734-739.
- SCHRÄDER S., JOSCHKO M., KULA H., LARINK O., 1995. Earthworm effects on soil structure with emphasis on soil stability and soil water movement. In *Soil structure – Its development and function*. Lewis Publishers., p 109-133.
- Sharma K, Singh H, Pareek O. 1983. Rain water infiltration into a bar loamy sand. *Hydrological Sciences Journal* **28**: 417-424.
- SHIPITALO M.J., PROTZ R., 1989. Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma*, 45: 357-374.
- Stern R., Ben-hur M. et Shainberg I., 1991 - Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation et soil losses. *Soil Science*, 152, 455-462.
- Sundborg A., 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. UNESCO
- SupAgro. La PAC et l'environnement. [En ligne, consulté le 30/07/2018] <https://www.supagro.fr/capeye/pac-environnement>
- Tisdall J. M. et Oades J. M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Trevisan, Dominique. 2015. "Susceptibilité Au Ruissellement et à l'érosion En Nappe de Divers Types Texturaux de Sols Cultivés Ou Non Cultivés Du Territoire Français. Expérimentation Au Champ Sous Pluies Simu..., " no. January 1993.

URBANEK J., DOLEZAL F., 1992. Review of some case studies on the abundance and on the hydraulic efficiency of earthworms channels in Czechoslovak soils, with reference to the subsurface pipe drainage. *Soil Biol. Biochem.*, 24: 1563-1572.

Valentin C, Poesen J, Li Y. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* **63**: 132-153. 10.1016/j.catena.2005.06.001.

van dijk, Paul. (2013). Estimer la densité apparente pour ABC-Terre. Comparaison des fonctions de pédotransfert.. 10.13140/RG.2.2.13005.03040.

Winterer L. 2011. Détermination des paramètres hydrodynamiques des sols alsaciens en fonction des techniques culturales. Master 2 Génie Agronomique et Alimentaire de Colmar. 76 p.

Wischmeier, W.H., et D.D. Smith, 1978, « Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning ». *Agriculture Handbook*, n° .537, Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA. U.S.

ZICSI A., 1962. Determination of number and size of sampling unit for estimating lumbricid populations of arables soils. In: PW Murphy (Ed.), *Progress in Soil Zoology*, Butterworth, London, p 68-71.

## **ANNEXE 1 : PRESENTATION DU TRAVAIL REALISE POUR PROJET SEAWEED**

Durant mon stage, j'ai pu assister à la mise en place de micro parcelles d'érosion supplémentaires et à la réalisation de certaines mesures semblables à celles utilisées en Brenne au niveau d'un site d'étude en Thaïlande.

Du fait que toutes les données d'érosion hydrique ne sont pas encore disponibles, cette partie présentera uniquement les méthodes de caractérisation du sol auxquelles j'ai participées et les résultats obtenus.

---

### **1. Présentation du projet SeaWeed – Soil Erosion in Agricultural Watersheds**

---

Il s'agit d'un projet d'étude de la formation de ravine et l'impact que peuvent avoir ces ravines sur la biodiversité en devenant des corridors de biodiversité. Ces corridors permettent le transfert en aval par les eaux de ruissellement des graines proches de la surface et libérées par le détachement du sol.

Ce projet est un projet de coopération internationale car l'Université François Rabelais de Tours et l'Université de Phitsanulok en Thaïlande travaillent ensemble sur ce sujet.

Les projets Seaweed et DynEtang possèdent un axe d'étude commun, celui du détachement du sol. Ils partagent un certain nombre des méthodes utilisées similaires. Des micro parcelles d'érosion ont été placées le long de la pente et d'autres ont été installées lors de la mission de terrain courant mai 2018 à laquelle j'ai pu participer.

Au total, 24 micro parcelles d'érosions sont présentes sur le site d'étude. 6 micro parcelles par « section » du micro bassin versant, d'amont en aval, nommées respectivement selon leur position dans la pente : « Top », « Up », « Middle » et « Down ».

---

### **2. Caractéristiques du site d'étude de SeaWeed**

---

#### *2.1. Un site d'étude localisé dans le Nord rural de la Thaïlande*

Le site d'étude se situe dans la province de Nan, qui est composée de plusieurs parcs nationaux et est considérée comme une zone avec une biodiversité d'intérêt national. Plus précisément, le site d'étude se trouve dans le bassin versant de Na Noi. La situation géographique du bassin versant de Na Noi est représentée ci-dessous (Figure 56).



Figure 56 - Localisation géographique de la région de Na Noi (Source : Google Map)

Ce site d'étude a été choisi car il est caractéristique de l'usage des sols majoritaire dans cette région de la Thaïlande, à savoir l'agriculture dans de fortes pentes. Des ravines ont été formées à proximité de la zone d'étude. Les données obtenues pourront potentiellement servir de seuils d'apparition des ravines pour ce type de climat et de sol.

## *2.2. Un site d'étude reposant sur une parcelle de culture de maïs et soumis à un climat tropical*

Une photographie du site d'étude où sont placées les micro parcelles est disponible ci-dessous (Figure 57).



Figure 57 - Photographie du site d'étude (Source : B. MARION)

Des ravines assez profondes étaient visibles sur le versant en face du site d'étude. Une ravine était également présente à proximité des micro parcelles. La présence de ravine signifie un ruissellement très prononcé, un ruissellement concentré et donc un détachement important des particules de sol et un fort ruissellement.

### ***Le climat***

Le climat de la Thaïlande est de type tropical, avec une saison sèche de Novembre à Avril qui précède une saison des pluies de Mai à Octobre. Cette saison des pluies qui se caractérise par des orages puissants et des intensités pluviales très fortes. Notre mission sur place s'est déroulée au milieu du mois de Mai, au début de la mousson.

### ***Usage du sol***

Le sol est utilisé par les agriculteurs locaux afin de cultiver des plants de maïs, malgré la forte pente de la zone (40 % environ). La terre est labourée en utilisant un tracteur à disque. D'ailleurs, il est à noter qu'un labourage relativement récent a été effectué sur la zone d'étude, ce qui n'était pas prévu initialement.

Suite à la découverte de ce labourage, il a été décidé de changer la question scientifique et de comparer désormais les propriétés du sol en fonction de la présence ou non de biochar sur la micro parcelle. Le biochar, ou bio-charcoal, correspond à du charbon à usage agricole. Il est issu de la décomposition de matière organique (résidus forestiers, ...) par la chaleur en absence d'oxygène. Ce biochar permet d'augmenter le rendement des sols en améliorant leur fertilité :

- Augmentation de la capacité du sol à retenir l'eau ;
- Augmentation du taux de matière organique ;
- Stimulation de la vie du sol (augmentation de la biomasse de la microflore totale du sol).

Le sol était nu lors de la mission de terrain en Mai 2018. Du maïs sera planté ultérieurement.

---

## **3. Méthodes utilisées**

Les méthodologies utilisées dans les deux projets étaient quasi-identiques. Cette partie rappellera brièvement les méthodes décrites précédemment, en mettant en avant les possibles distinctions entre les deux projets.

Hormis la mise en place des micro parcelles, ce sont surtout des méthodes d'étude des caractéristiques du sol qui ont été appliquées : les méthodes de densité apparente, de porosité totale et de conductivité hydraulique.

### ***3.1. La densité apparente et la porosité totale***

3 volumes de sol ont été prélevés pour chaque micro parcelles en Thaïlande mais sur chaque micro parcelle les plus en amont par rapport au bassin versant uniquement, c'est – à – dire les 6 micro parcelles nommées « Top », soit au total 18 répliqués pour la densité apparente du sol. Le séchage a été fait de retour à Bangkok, au bâtiment du Land Development Department. Les échantillons ont été transportés dans des sachets plastiques individuels.

Une grande différence demeure cependant dans le protocole utilisé sur le terrain en Thaïlande : du fait de la pente importante (40 % environ) du site d'étude, il était nécessaire d'essayer de trouver des surfaces planes pour effectuer les prélèvements des échantillons de mesure.

### *3.2. La conductivité hydraulique à saturation*

Deux vagues de données sont disponibles pour la conductivité hydraulique à saturation : la première courant Mai 2018 et la seconde durant le mois de Juillet 2018. L'équipe thaïlandaise s'est chargée d'effectuer les tests d'infiltration lors de la deuxième vague de mesure.

Pendant la mission de terrain Mai 2018, 4 répétitions des tests de Beerkan ont été réalisés pour les 6 micro parcelles « Top », les plus en amont de la pente. Tandis que pendant la mission de terrain Juillet 2018, 3 répétitions ont été réalisées au niveau des micro parcelles « Top », les plus en amont, et 2 pour les micro parcelles « Up », « Middle » et « Down », respectivement légèrement en aval des micro parcelles « Top », au milieu de la pente et en bas de pente.

---

## **4. Résultats obtenus et discussion**

---

D'après les informations obtenues sur le site d'étude, il est logique de s'attendre à une érosion hydrique importante du fait du climat tropical, synonyme de forte intensité pluviale lors de la mousson, mais également du ravinement présent dans la zone et du sol nu.

### *4.1. Les caractéristiques du sol*

#### **4.1.1. La stabilité structurale**

##### *4.1.1.1. Un sol argileux mais labouré*

La composition précise nous a été transmise par l'équipe thaïlandaise. Cette composition est la suivante : environ 55 % d'argile, 30 % de limon et 15 % de sable. Le sol est ainsi globalement argilo-limoneux.

La teneur en argile est un paramètre qui joue sur la stabilité structurale d'un sol. Plus cette teneur en argile est importante plus le sol est stable. Il est considéré qu'en dessous d'une teneur de 15 % d'argile, l'effet des argiles est assez faible. Une teneur de 55% d'argile montre ainsi un effet stabilisateur effectif sur la structure du sol.

Cette stabilité structurale doit être nuancée du fait du labour qui a été effectué sur le site d'étude. Le travail mécanique détruit les agrégats et la structure du sol ce qui engendre une baisse de la teneur en matières organiques et de ce fait, de la stabilité structurale.

##### *4.1.1.2. Une densité apparente de sol argileux et labouré*

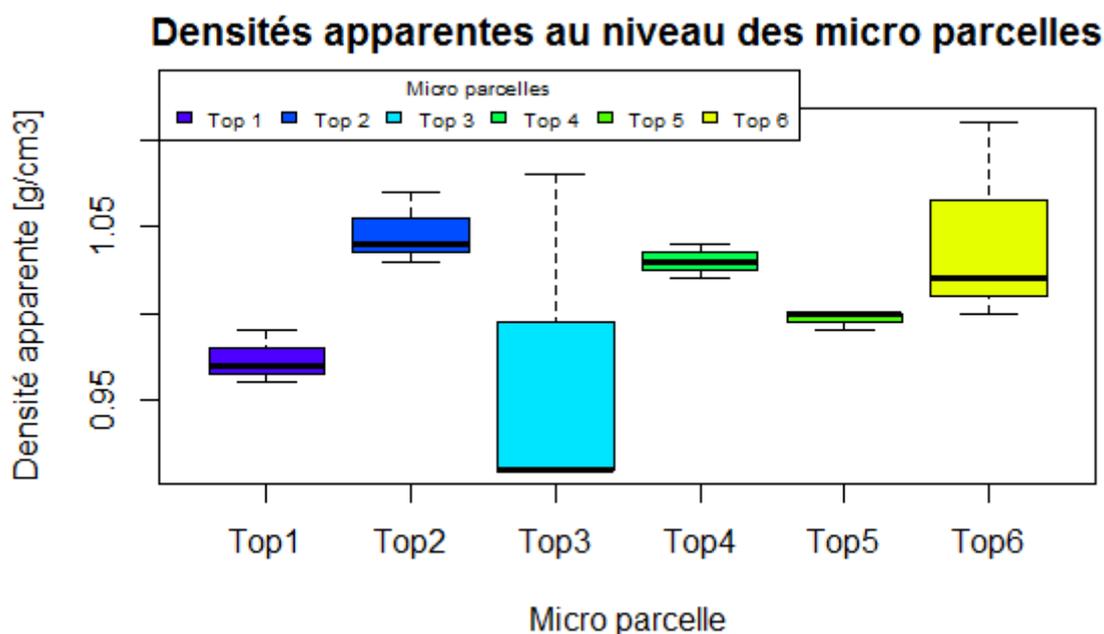


Figure 58 - Série des densités apparentes mesurées pour les microparcelles de la section "Top" regroupées par micro parcelle

Densité apparente	Coefficient de variation [%]
<b>Top 1</b>	1,60
<b>Top 2</b>	2,12
<b>Top 3</b>	10,2
<b>Top 4</b>	1,12
<b>Top 5</b>	0,88
<b>Top 6</b>	5,67
<b>Général</b>	5,11

Figure 59 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de densité apparente au niveau de chaque micro parcelle les plus en amont de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles les plus en amont de la pente sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed

Les valeurs de densité apparente sont globalement homogènes. Elles correspondent à un sol argileux, la valeur moyenne de la densité apparente étant de  $1.01 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ . Ce qui est conforme aux teneurs granulométriques utilisées précédemment et rappelées ci-dessous (Figure 60).

Classe texturale	Densité apparente ( $\text{g/cm}^3$ )
sable	1,55
loam sableux	1,40
loam	1,20
loam limoneux	1,15
argile	1,05

Figure 60 - Gammes de valeurs de densité apparente selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca)

De plus, cette valeur de densité apparente appartient à l'intervalle mesuré par Boiffin J. *et al.* en 1986 sur des sols labourés et argileux dans les Hauts-de-France. Ils ont remarqué que les sols labourés les

plus argileux étaient les moins denses, avec une densité apparente qui variait entre 0.9 et 1.6 g/cm<sup>3</sup>. La compaction du sol est donc normale en vue de son usage et de sa granulométrie.

#### 4.1.1. L'infiltration

##### 4.1.1.1. Une texture peu favorable à l'infiltration verticale

La composition du sol est majoritairement argileuse. Or, un sol argileux correspond à un milieu mal aéré et qui peut former un obstacle à l'infiltration verticale. La texture du sol indiquerait une capacité assez faible du sol à infiltrer l'eau.

De plus, certaines croûtes de battance étaient visibles dans la surface de certaines micro parcelles, ce qui favorise le ruissellement.

##### 4.1.1.2. Une porosité totale forte

#### Porosités totales au niveau des micro parcelles en amont

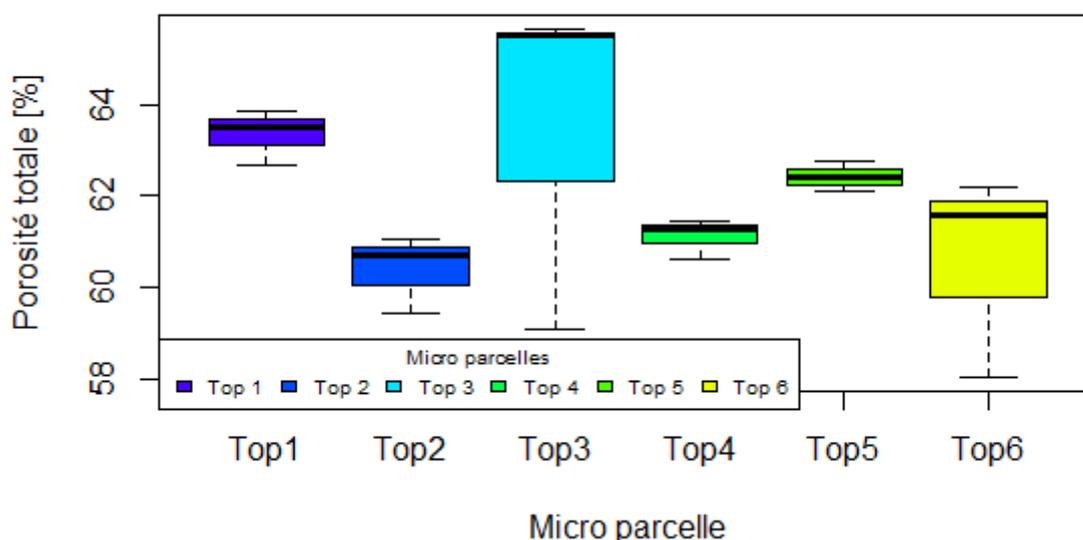


Figure 61 - Série des densités apparentes mesurées pour les microparcelles de la section "Top" regroupées par micro parcelle

Les valeurs de porosité totale élevées ( $\geq 58\%$ ) signifient que le sol possède une bonne portion de vide et devrait avoir une « bonne » vitesse d'infiltration. Cependant, la composition granulométrique du sol laisse penser le contraire avec sa composition majoritairement argileuse.

Classe texturale	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)
sable	1,55	42
loam sableux	1,40	48
loam	1,20	55
loam limoneux	1,15	56
argile	1,05	60

Figure 62 - Gammes de valeurs de densité apparente et de porosité totale selon la texture du sol (Source : cef-cfr.ca)

La porosité totale est en accord avec sa composition granulométrique et sa densité apparente (Figure 62).

Porosité totale	Coefficients de variation [%]
<b>Top 1</b>	0,92
<b>Top 2</b>	1,39
<b>Top 3</b>	5,90
<b>Top 4</b>	0,71
<b>Top 5</b>	0,53
<b>Top 6</b>	3,68
<b>Général</b>	3,14

Figure 63 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de porosité totale au niveau de chaque micro parcelle les plus en amont de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles les plus en amont de la pente sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed

De même que les densités apparentes, les données de porosité totale ne varient peu entre elles (Figure 63). Le sol est homogène d'un point de vue granulométrique et aussi compact que sa texture lui permet.

L'étude de la conductivité hydraulique à saturation permettra d'apporter des informations supplémentaires à propos du comportement de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol.

#### 4.1.1.3. Conductivité hydraulique à saturation

Première vague de mesures - Mai 2018 :

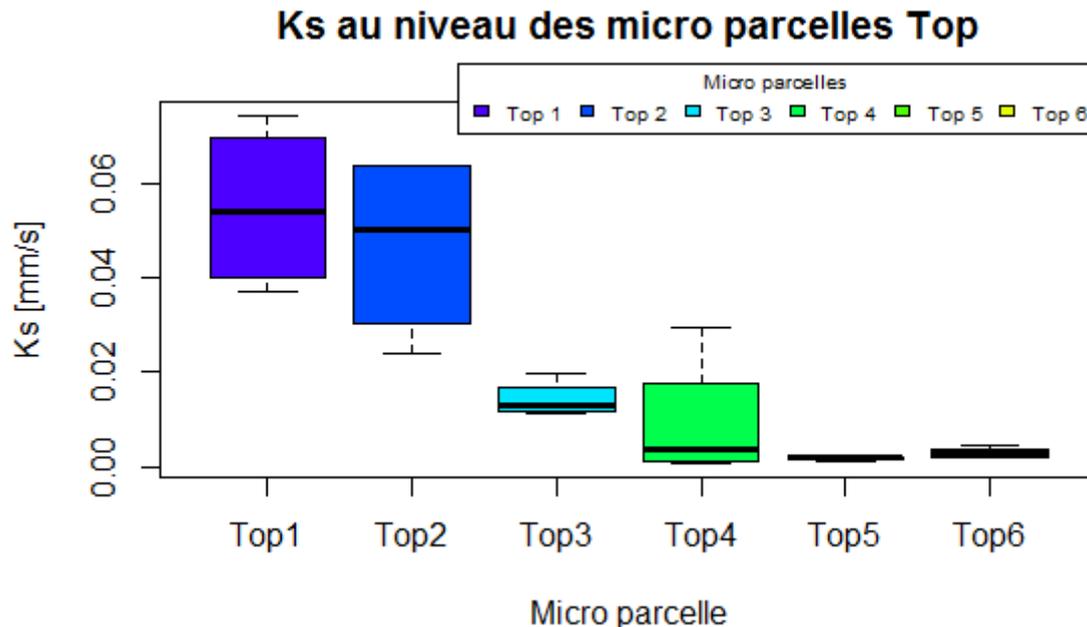


Figure 64 - Série des conductivités hydrauliques à saturation mesurées pour les microparcelles de la section "Top" regroupées par micro parcelle

Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation sont comprises en moyenne entre 0.002 et 0.055 mm/s (Figure 64), soit  $1.9 \cdot 10^{-6}$  et  $5.5 \cdot 10^{-5}$  m/s. En utilisant les gammes de valeurs de la Figure 65, il vient que ces valeurs correspondent à des sols sableux ou limoneux, avec des possibilités d'infiltration allant de bonnes à faibles ou moyennes.

K (m/s)	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins			Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limon grossier à limon argileux			Argile limoneuse à argile homogène		
Possibilités d'infiltration	Excellentes			Bonnes		Moyennes à faibles			Faibles à nulles		

Figure 65 - Tableau reprenant les possibilités d'infiltration d'un sol selon la texture et sa conductivité hydraulique (Source : d'après Musy et Soutter (1991), cité dans Barraud (2006))

Cette information va à l'encontre des informations recueillies précédemment. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un labour, non prévu dans le protocole, a été réalisé sur le site d'étude avant les essais d'infiltration. Or, après un travail du sol, la vitesse d'infiltration augmente, de façon temporaire, grâce à la création d'une macro porosité de surface. Macro porosité de surface qui a du être prise en compte par la porosité totale, ce qui explique sa forte valeur.

Ks mai 2018	Coefficients de variation [%]
<b>Top 1</b>	32,19
<b>Top 2</b>	42,12
<b>Top 3</b>	26,96
<b>Top 4</b>	143,23
<b>Top 5</b>	21,54
<b>Top 6</b>	36,78
<b>Général</b>	108,94

Figure 66 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de conductivité hydraulique à saturation au niveau de chaque micro parcelle « Top » les plus en amont de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles les plus en amont de la pente sur le site d'étude de Thailande – Projet SeaWeed

Les valeurs de Ks sont comprises des classes de vitesse d'infiltration lente à très rapide (Tableau 7). Ce résultat montre une dispersion des mesures assez prononcée. Les valeurs des coefficients de variation vont dans ce sens, les coefficients de variation au niveau de chaque micro placette sont inférieurs à 50%, hormis pour une Top 4, mais sur l'ensemble des micro parcelles « Top », une forte variabilité des valeurs règne. Le labour du sol peut être aussi à l'origine de cette forte variabilité.

Tableau 7 - Qualification de la vitesse d'infiltration d'un sol en fonction des classes de conductivité à saturation Ks [mm/s] (in Chamayou et Legros, 1989)

Vitesse d'infiltration	Classes [mm/s]	Effectif	Effectif %
<b>Très lente</b>	$< 3.0 \times 10^{-4}$	0	0
<b>Lente</b>	$3.0 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-3}$	3	12.5
<b>Assez lente</b>	$1.5 \times 10^{-3} - 6.0 \times 10^{-3}$	8	33.3
<b>Moyenne</b>	$6.0 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-2}$	3	12.5
<b>Assez rapide</b>	$1.7 \times 10^{-2} - 3.5 \times 10^{-2}$	3	12.5
<b>Rapide</b>	$3.5 \times 10^{-2} - 7.0 \times 10^{-2}$	6	25
<b>Très rapide</b>	$> 7.0 \times 10^{-2}$	1	4.2

## Seconde vague de mesure - Juillet 2018 :

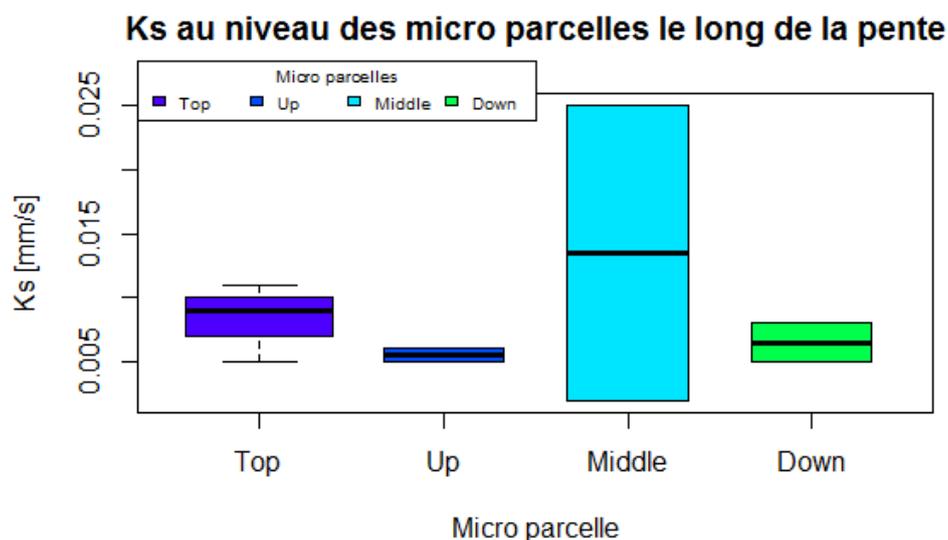


Figure 67 - Série des conductivités hydrauliques à saturation ( $K_s$ ) mesurées pour les microparcelles le long de la pente regroupées par micro parcelle

En moyenne, les valeurs de conductivité hydraulique à saturation sont comprises entre 0.005 et 0.014 mm/s soit  $5 \cdot 10^{-6}$  et  $14 \cdot 10^{-6}$  m/s. Ce qui correspond à un sol sableux, avec des conditions d'infiltration moyennes, comme ce qu'indiquaient les valeurs de  $K_s$  de la mission de mai 2018.

Les valeurs des coefficients de variation montrent que les coefficients de variation au niveau de chaque micro placette sont inférieurs à 50%, hormis pour les micro parcelles «Middle». Cependant, d'un point de vue global le long de la pente, la variété de vitesse d'infiltration du sol est forte.

Ks juillet 2018	Coefficients de variation [%]
<b>Top</b>	36,8
<b>Up</b>	15,8
<b>Middle</b>	118,1
<b>Down</b>	27,0
<b>Général</b>	75,1

Figure 68 – Coefficients de variation [%] calculés pour les données de conductivité hydraulique à saturation au niveau de chaque micro parcelle le long de la pente et pour l'ensemble des micro parcelles sur le site d'étude de Thaïlande – Projet SeaWeed

Les valeurs de  $K_s$  sont comprises dans des classes de vitesse d'infiltration assez lente à assez rapide (Tableau 8). La dispersion des mesures est assez faible, plus de 80 % de l'effectif est compris entre vitesse d'infiltration assez lente à moyenne.

Tableau 8 - Qualification de la vitesse d'infiltration d'un sol en fonction des classes de conductivité à saturation  $K_s$  [mm/s] (in Chamayou et Legros, 1989)

Vitesse d'infiltration	Classes [mm/s]	Effectif	Effectif %
<b>Très lente</b>	$< 3.0 \times 10^{-4}$	0	0
<b>Lente</b>	$3.0 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-3}$	0	0
<b>Assez lente</b>	$1.5 \times 10^{-3} - 6.0 \times 10^{-3}$	4	44.4
<b>Moyenne</b>	$6.0 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-2}$	4	44.4
<b>Assez rapide</b>	$1.7 \times 10^{-2} - 3.5 \times 10^{-2}$	1	11.1
<b>Rapide</b>	$3.5 \times 10^{-2} - 7.0 \times 10^{-2}$	0	0
<b>Très rapide</b>	$> 7.0 \times 10^{-2}$	0	0

Les coefficients de variation montrent une certaine homogénéité au niveau des micro parcelles Top, les plus en amont. Or, les coefficients de variation des données de  $K_s$  de Mai 2018 montrent l'inverse : une forte variété au niveau de ces micro parcelles. Cela peut être dû au faible nombre de répétition lors de la deuxième mission de terrain, 3 uniquement, qui n'est pas assez représentatif.

### **$K_s$ au niveau des micro parcelles Top (05/18 et 07/18)**

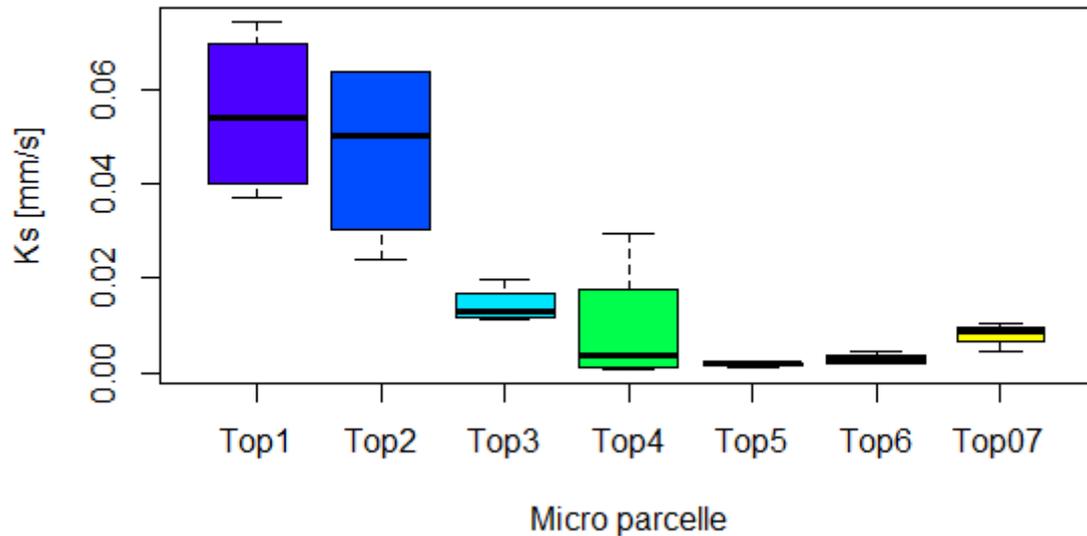


Figure 69 - Boîtes à moustache des valeurs de conductivité hydraulique à saturation  $K_s$  [mm/s] au niveau des micro parcelles les plus en amont "Top". Top 07 = répétition de Juillet 2018 ; Top 1 à 6 = répétitions de Mai 2018

La valeur de  $K_s$  moyenne au niveau des micro parcelles « Top » de la vague de mesure de Juillet 2018 est comprise dans l'intervalle des valeurs de la première vague de mesure de Mai 2018 (Figure 69). La conductivité hydraulique à saturation est ainsi supérieure à la gamme de valeurs associée à sa granulométrie. Une explication à cette différence pourrait être que l'influence du travail mécanique est toujours présente sur la vitesse d'infiltration.

---

## **5. Conclusion**

---

La mission de terrain de mai 2018 a permis la mise en place au total de 24 micro parcelles d'érosion et d'acquérir des informations sur les caractéristiques du sol, plus précisément la stabilité structurale et les capacités d'infiltration (Figure 70), avant le suivi des données de ruissellement et de détachement du sol.

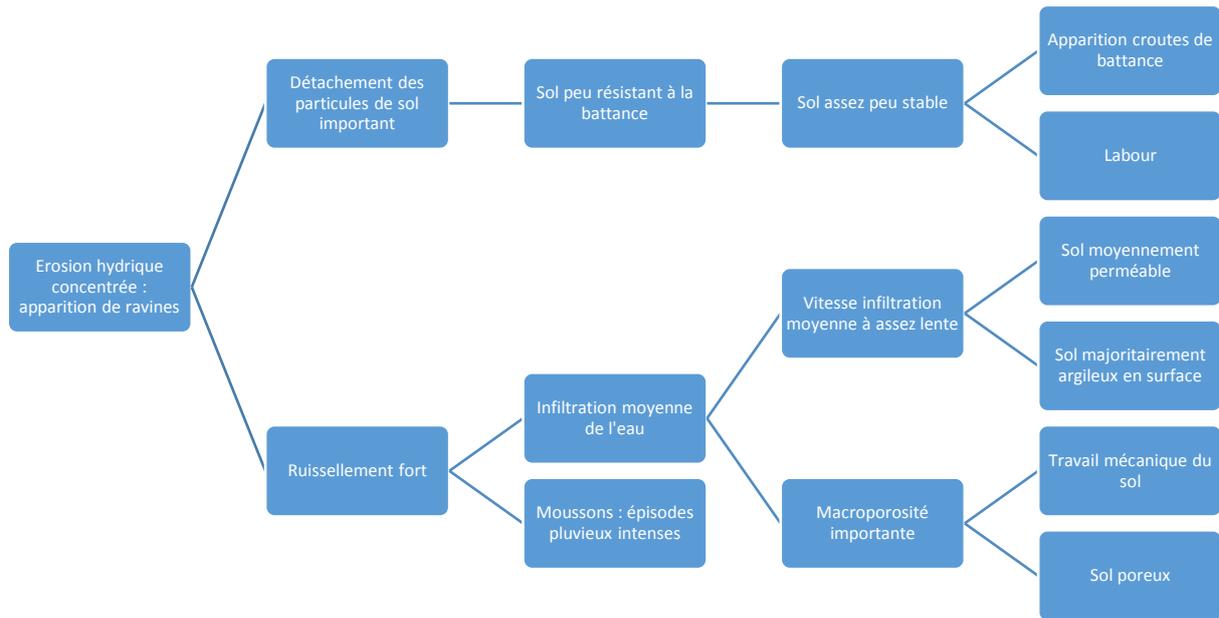


Figure 70 - Schéma représentant les liens entre les résultats obtenus d'érosion hydrique, de précipitation et de caractéristiques du sol pour le site d'étude en Thaïlande

Lors de la mission de terrain en mai 2018 le sol était nu, situation où le sol est le plus vulnérable à l'érosion hydrique. Mais le sol n'est pas voué à rester nu. Des plantations de maïs seront cultivées dans un futur proche.

Ainsi, les caractéristiques mesurées sont valables pour la période pré-mousson en sol nu. Il serait intéressant de réaliser ces mesures une fois les plants de maïs en place et comparer ces données afin de déceler un éventuel changement parmi les propriétés du sol.

On s'attend à de fortes valeurs de ruissellement et de détachement de sol du fait de la formation de ravine et du climat tropical. Il serait intéressant également de voir si l'érosion hydrique, et donc les quantités d'eau de ruissellement et de sédiments détachés, sera atténuée ou non par l'apparition des plants.

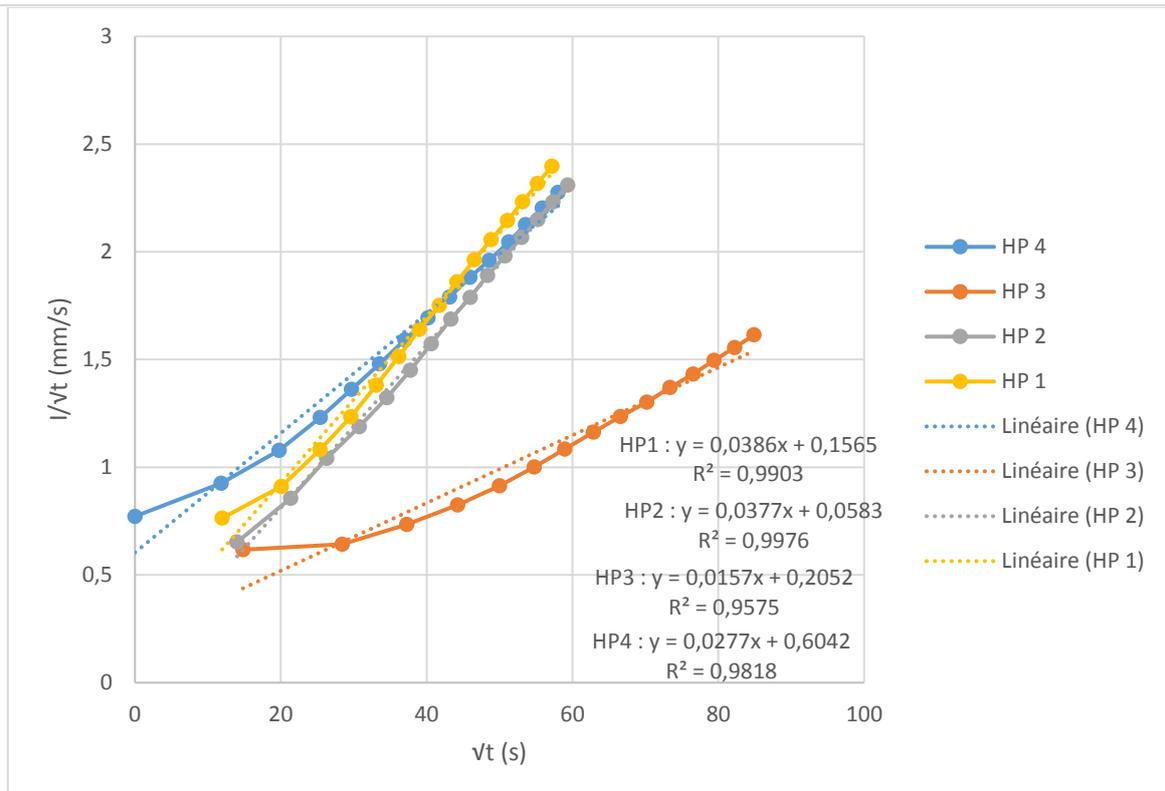
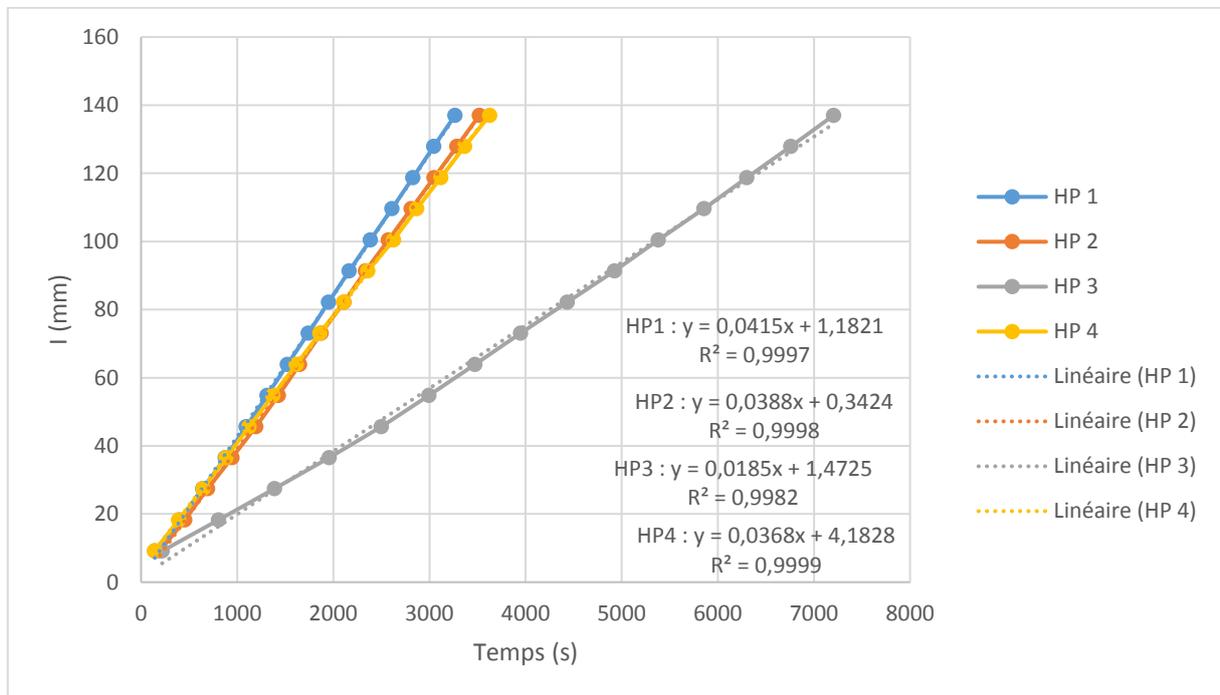
## PRESENTATION DE LA QUANTIFICATION DES INVERTEBRES VISIBLES A L'ŒIL NU SUITE AUX PRELEVEMENTS DE BLOCS DE TERRE LORS DE LA METHODE DES TSBF

	HP1	HP 2	HP3	MP1	MP2	MP3	BP1	BP2	BP3
Nom espèce	Nombre d'individu								
Anécique	3	1			1		1		
Endogé	2			1	10	5	3	2	3
Epigé	2		4	3	5	2	3	4	
Larve lombrics trop jeunes	4								1
Larve lépidoptère	5	1	1	2					1
Larve lombrics non complets	2			3	4	3	2	2	
Staphylin			1	2		1	3	2	
Larve de staphylin	7	1	2				2	1	
Larve non identifiable	1							1	20
Nymphe d'hanneton	1								
Larve hanneton							3		8
Scarabée	1								
Larve scarabée			1						
Larve coléoptère	1		3		1	1	6	7	8
Œufs orange d'1 mm de longueur	8		6				1		1
Sorte d'œufs blancs de 3 - 4 mm de longueur	10			4	11	2			
Coléoptère		1							
Carabe		3							
Larve de scarabées		11							1

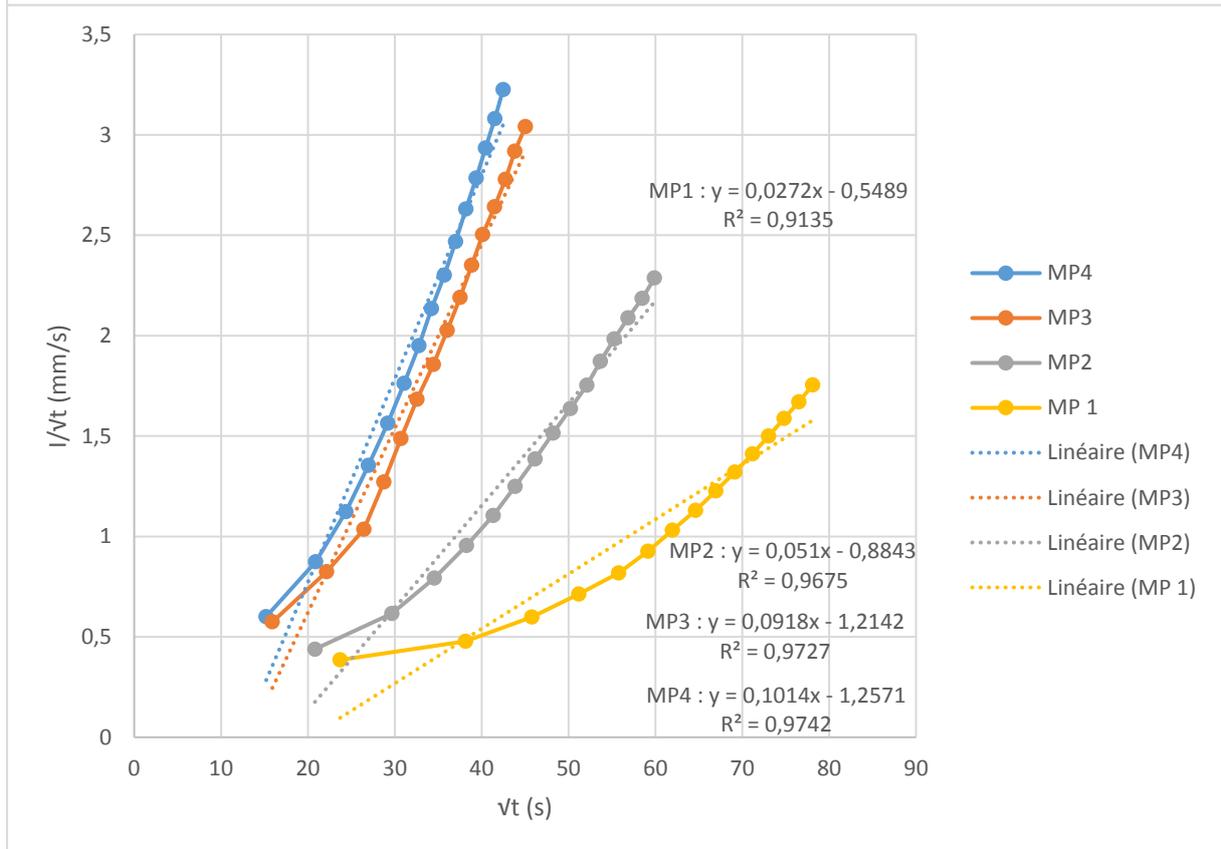
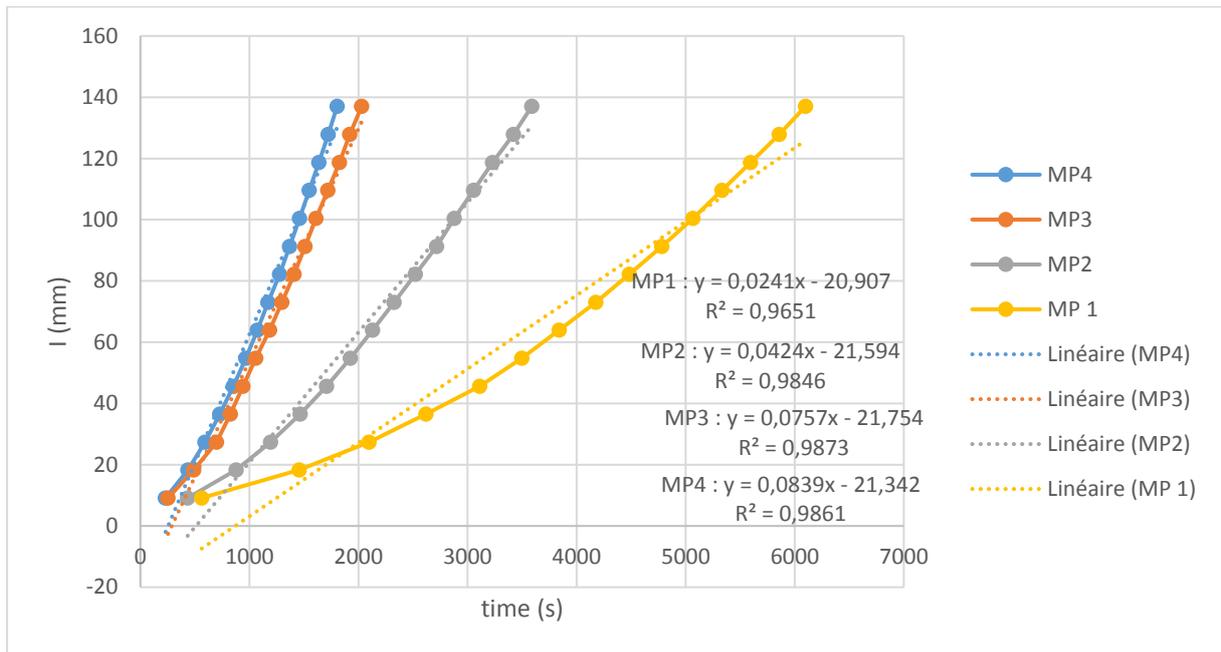
Larve de taupin		1	1			2			
Larve de diptère							1	2	1
	<b>HP1</b>	<b>HP 2</b>	<b>HP3</b>	<b>MP1</b>	<b>MP2</b>	<b>MP3</b>	<b>BP1</b>	<b>BP2</b>	<b>BP3</b>
Fourmi noire					2			1	
Fourmi orange		9	16	50	4		45	50	
Araignée		1	2			1		1	
Dermaptère			1						
<b>Total</b>	47	25	38	15	38	17	70	23	44

*Annexe 1 - Tableau des espèces identifiées suite aux prélèvements TSBF*

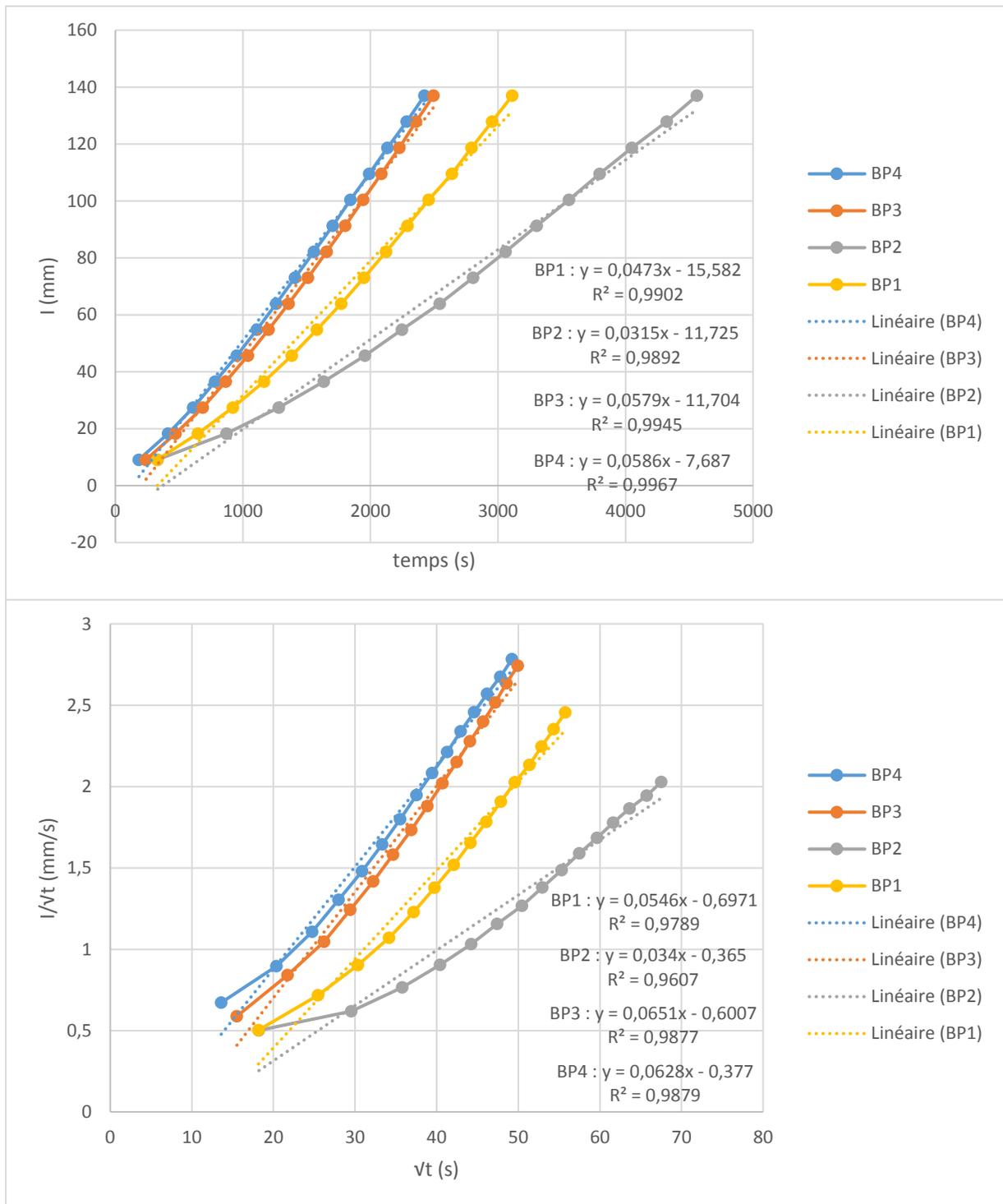
## COURBES D'INFILTRATION OBTENUS POUR LES PROJETS SEAWEED ET DYNETANG



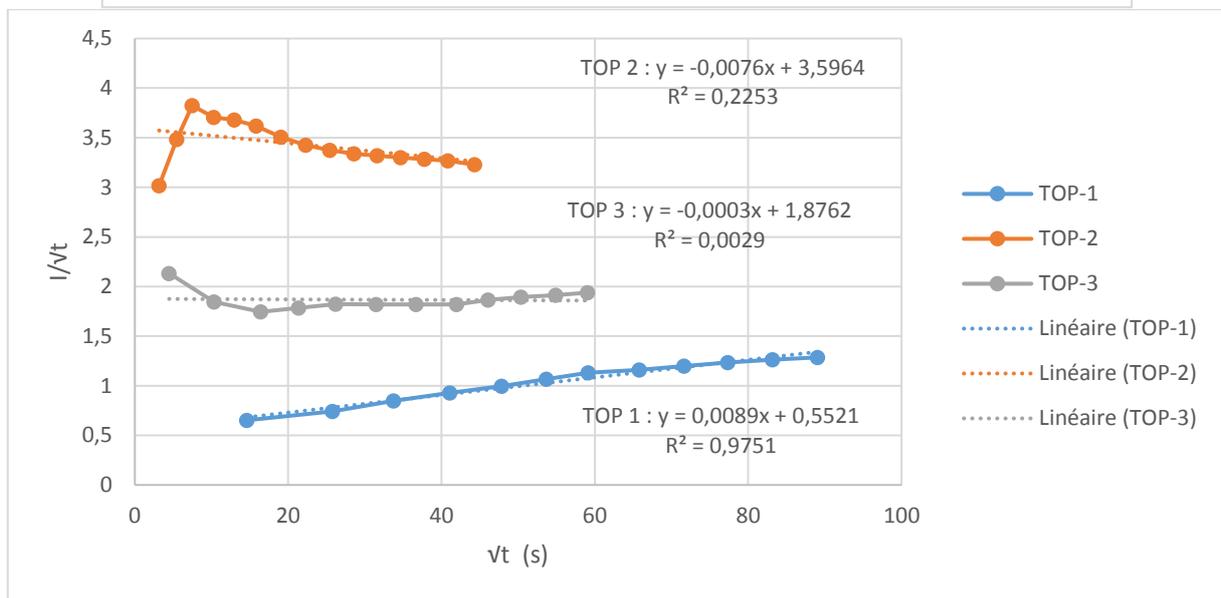
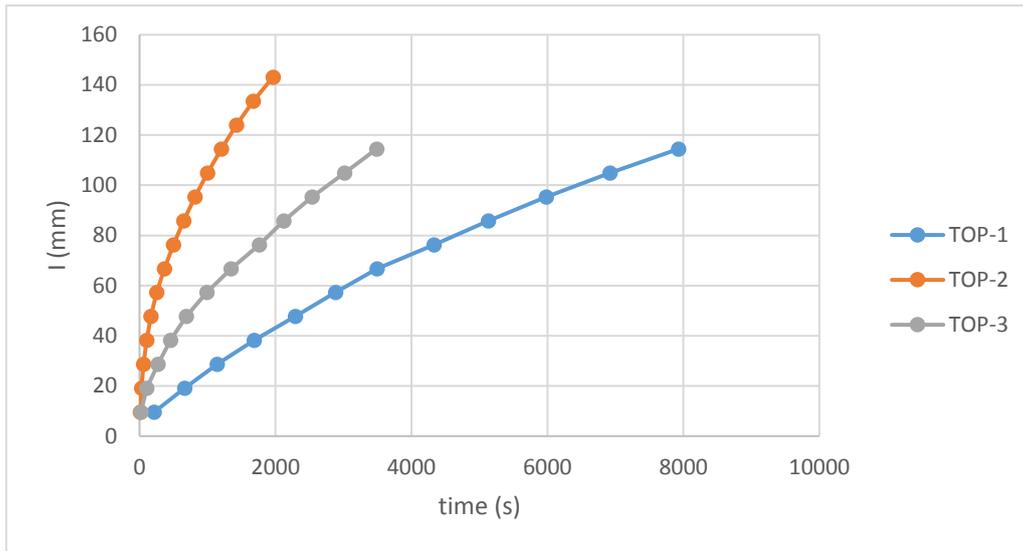
Annexe 2 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $i/t^{1/2}=f(t^{1/2})$  pour la micro parcelle HP et pour les 4 répétitions réalisées



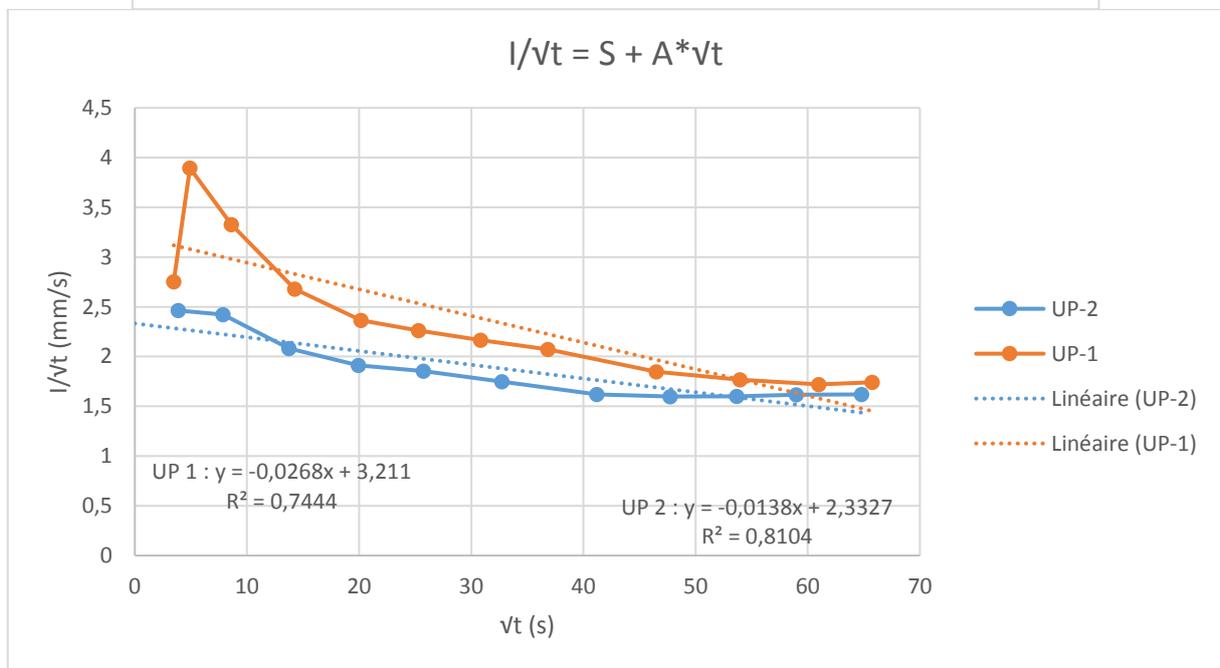
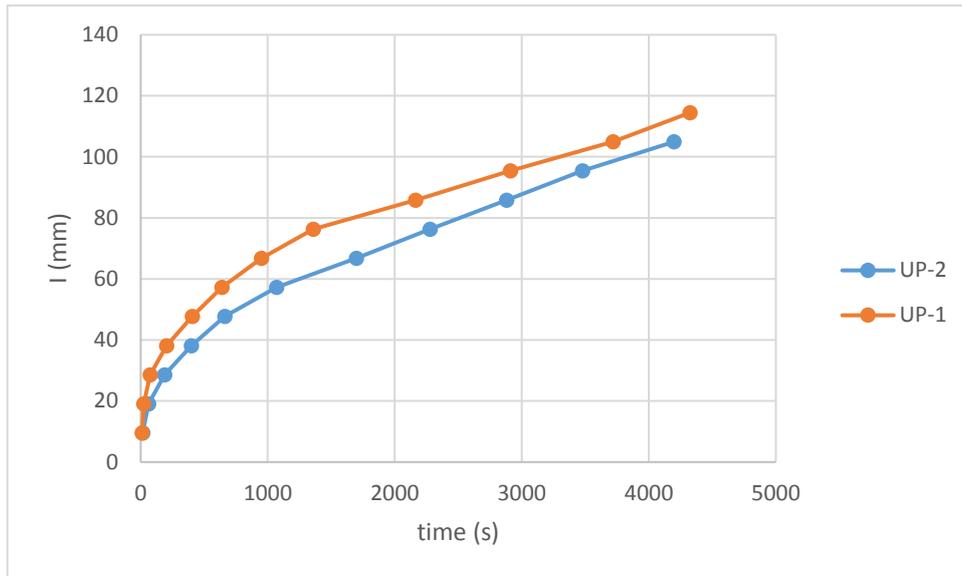
Annexe 3 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $i/t^{1/2}=f(t^{1/2})$  pour la micro parcelle MP et pour les 4 répétitions réalisées



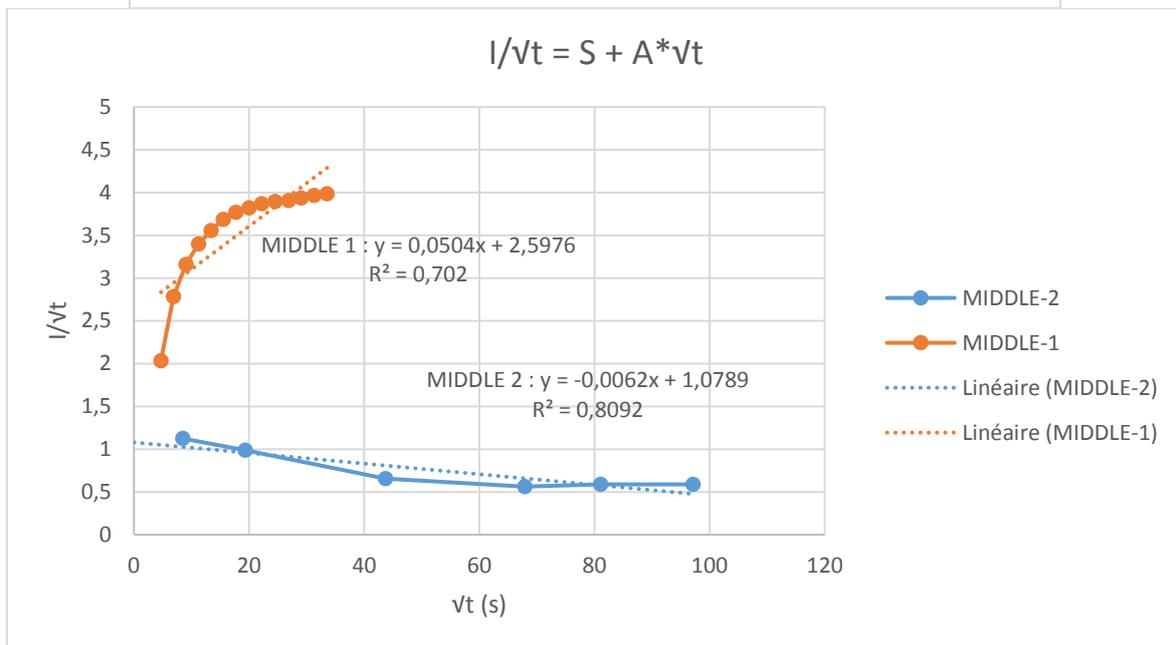
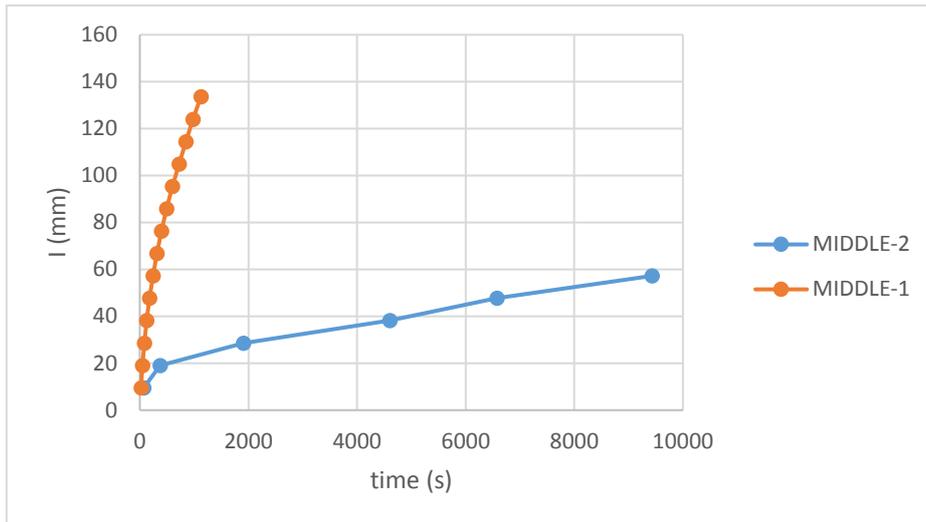
Annexe 4 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$  pour la micro parcelle BP et pour les 4 répétitions réalisées



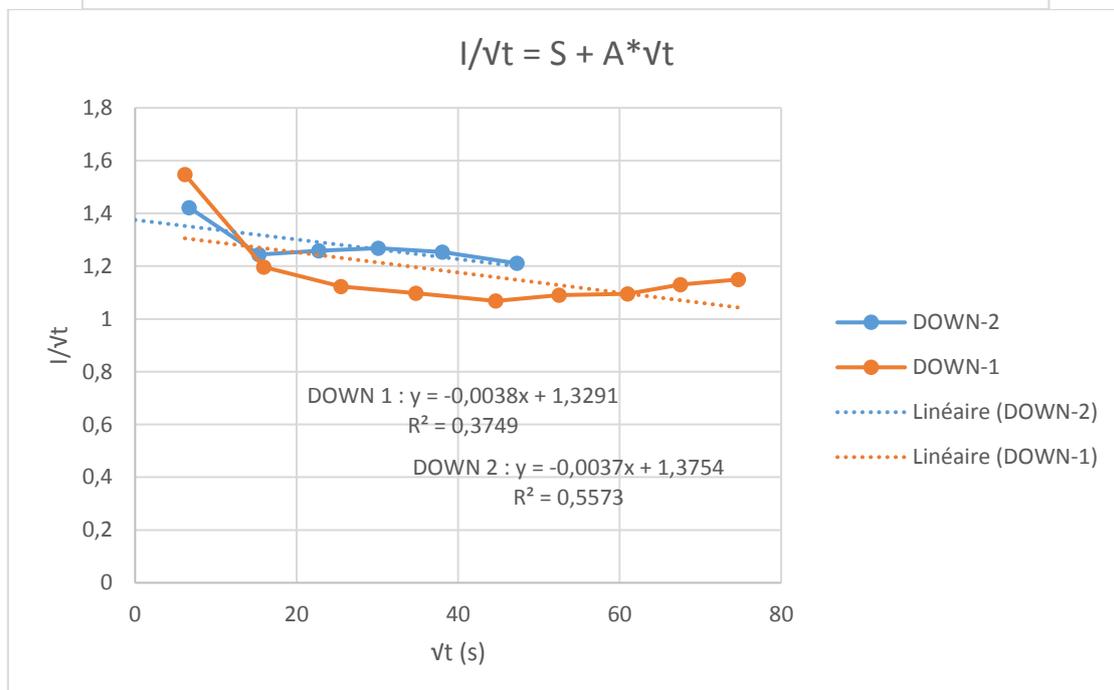
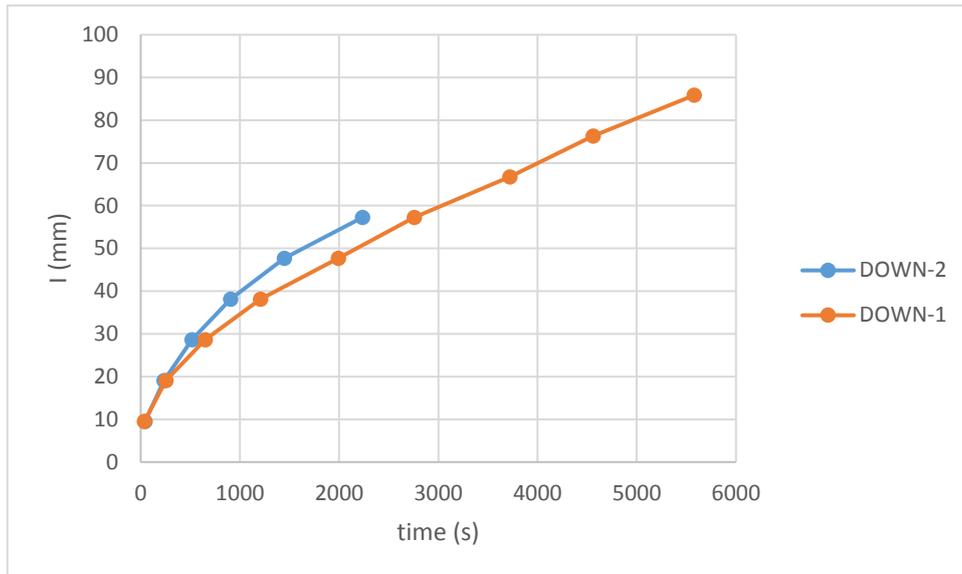
Annexe 5 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $I/\sqrt{t}=f(\sqrt{t})$  pour l'emplacement TOP et pour les 3 répétitions réalisées



Annexe 6 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $I/\sqrt{t} = f(\sqrt{t})$  pour l'emplacement UP et pour les 2 répétitions réalisées



Annexe 7 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $I/t^{1/2} = f(t^{1/2})$  pour l'emplacement MIDDLE et pour les 2 répétitions réalisées



Annexe 8 - Courbe d'infiltration cumulée et celle de la relation  $I/t^{1/2}=f(t^{1/2})$  pour l'emplacement DOWN et pour les 2 répétitions réalisées

## PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS AU TRAVERS DES METHODES EMPLOYEES DANS LES PROJETS DYNETANG ET SEAWEED

### Projet Dynetang

Echantillon	Densité apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Moyenne par micro parcelle	Ecart type	CV [%]
<b>HP DA 1</b>	1,29	1,32	0,10	7,45
<b>HP DA 2</b>	1,43			
<b>HP DA 3</b>	1,25			
<b>MP DA 1</b>	1,23	1,16	0,07	6,42
<b>MP DA 2</b>	1,15			
<b>MP DA 3</b>	1,08			
<b>BP DA 1</b>	1,26	1,30	0,05	3,55
<b>BP DA 2</b>	1,28			
<b>BP DA 3</b>	1,35			

Annexe 9 - Valeurs des densités apparentes mesurées au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). DA = Densité apparente. CV = Coefficient de Variation.

Echantillon	Porosité totale [%]	Porosité totale moyenne [%]	Ecart type	CV [%]
<b>HP 1</b>	51,43	50,08	3,72	7,42
<b>HP 2</b>	45,88			
<b>HP 3</b>	52,94			
<b>MP 1</b>	53,48	56,33	2,81	4,98
<b>MP 2</b>	56,42			
<b>MP 3</b>	59,09			
<b>BP 1</b>	52,38	50,97	1,74	3,42
<b>BP 2</b>	51,51			
<b>BP 3</b>	49,02			

Annexe 10 - Valeurs des porosités totales mesurées au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.

Echantillon	Teneur en matières organiques [g/kg]	Moyenne [g/kg]	Ecart type	CV [%]
<b>HP1</b>	38,1	45,6	6,68	14,64
<b>HP2</b>	50,9			
<b>HP3</b>	47,8			
<b>MP1</b>	50	47,1	2,85	6,05
<b>MP2</b>	47			
<b>MP3</b>	44,3			
<b>BP1</b>	40,7	40,37	0,42	1,03
<b>BP2</b>	39,9			
<b>BP3</b>	40,5			

Annexe 11 - Valeurs des teneurs en matières organiques mesurées par un laboratoire d'analyse au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.

Echantillon	Abondance fourmi (nbre ind/TSBF)	Moyenne (nbre ind/TSBF)	Ecart type	CV [%]
<b>HP1</b>	0	8,33	8,02	96,25
<b>HP 2</b>	9			
<b>HP3</b>	16			
<b>MP1</b>	50	18,67	27,30	146,25
<b>MP2</b>	6			
<b>MP3</b>	0			
<b>BP1</b>	45	32,00	27,87	87,11
<b>BP2</b>	51			
<b>BP3</b>	0			

Annexe 12 - Valeurs des abondances de fourmis mesurées par la méthode des TSBF au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.

Echantillon	Abondance lombricienne (nbre ind/TSBF)	Moyenne (nbre ind/TSBF)	Ecart type	CV [%]
<b>HP1</b>	13	6	6,24	104,08
<b>HP 2</b>	1			
<b>HP3</b>	4			
<b>MP1</b>	7	12,33	6,81	55,19
<b>MP2</b>	20			
<b>MP3</b>	10			
<b>BP1</b>	9	7	2,65	37,80
<b>BP2</b>	8			
<b>BP3</b>	4			

Annexe 13 - Valeurs des abondances lombriciennes mesurées par la méthode des TSBF au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.

Echantillon	Indice de battance	Moyenne	Ecart type	CV [%]
<b>HP1</b>	0,436	0,353	0,072	20,256
<b>HP2</b>	0,309			
<b>HP3</b>	0,315			
<b>MP1</b>	0,282	0,287	0,011	3,671
<b>MP2</b>	0,280			
<b>MP3</b>	0,299			
<b>BP1</b>	0,465	0,471	0,010	2,087
<b>BP2</b>	0,466			
<b>BP3</b>	0,482			

Annexe 14 - Valeurs des indices de battance calculés au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.

Echantillon	Ks (mm/s)	Ks moyen (mm/s)	Ecart type	CV [%]
<b>HP 1</b>	0,039	0,032	0,009	28,71
<b>HP 2</b>	0,037			
<b>HP 3</b>	0,019			
<b>HP 4</b>	0,032			
<b>MP 1</b>	0,036	0,071	0,034	47,22
<b>MP 2</b>	0,051			
<b>MP 3</b>	0,090			
<b>MP 4</b>	0,109			
<b>BP 1</b>	0,057	0,056	0,014	25,38
<b>BP 2</b>	0,036			
<b>BP 3</b>	0,068			
<b>BP4</b>	0,062			

Annexe 15 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation Ks (mm/s) mesurées par la méthode de Beerkan au niveau des 3 micro parcelles : Haut de Pente (HP), Milieu de Pente (MP) et Bas de Pente (BP). CV = Coefficient de Variation.

## Projet Seaweed

Nom échantillon	Densité apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Moyennes [g/cm <sup>3</sup> ]	Ecart type	CV [%]
Top 1 BD 1	0,989	0,971	0,016	1,596
Top 1 BD 2	0,958			
Top 1 BD 3	0,967			
Top 2 BD 1	1,041	1,050	0,022	2,122
Top 2 BD 2	1,075			
Top 2 BD 3	1,032			
Top 3 BD 1	0,911	0,970	0,099	10,222
Top 3 BD 2	0,914			
Top 3 BD 3	1,084			
Top 4 BD 1	1,026	1,031	0,012	1,120
Top 4 BD 2	1,022			
Top 4 BD 3	1,044			
Top 5 BD 1	0,987	0,996	0,009	0,876
Top 5 BD 2	1,004			
Top 5 BD 3	0,996			
Top 6 BD 1	1,111	1,044	0,059	5,667
Top 6 BD 2	1,019			
Top 6 BD 3	1,001			

Annexe 16 - Valeurs des densités apparentes (g/cm<sup>3</sup>) au niveau des micro parcelles « Top » les plus en amont de la pente pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; BD = Bulk Density = Densité Apparente.

Nom échantillon	Porosité totale [%]	Moyenne [%]	Ecart type	CV [%]
Top 1 PT 1	62,69	63,34	0,59	0,92
Top 1 PT 2	63,83			
Top 1 PT 3	63,49			
Top 2 PT 1	60,70	60,39	0,84	1,39
Top 2 PT 2	59,44			
Top 2 PT 3	61,04			
Top 3 PT 1	65,63	63,41	3,74	5,90
Top 3 PT 2	65,51			
Top 3 PT 3	59,09			
Top 4 PT 1	61,29	61,11	0,44	0,71
Top 4 PT 2	61,43			
Top 4 PT 3	60,61			
Top 5 PT 1	62,75	62,42	0,33	0,53
Top 5 PT 2	62,10			
Top 5 PT 3	62,41			
Top 6 PT 1	58,06	60,61	2,23	3,68
Top 6 PT 2	61,56			
Top 6 PT 3	62,21			

Annexe 17 - Valeurs des porosités totales [%] au niveau des micro parcelles « Top » les plus en amont de la pente pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; PT = Porosité Totale.

Nom échantillon	Ks [mm/s]	Moyenne [mm/s]	Ecart type	CV [%]
<b>Top1 KS1</b>	0,065	0,055	0,018	32,185
<b>Top1 KS2</b>	0,074			
<b>Top1 KS3</b>	0,043			
<b>Top1 KS4</b>	0,037			
<b>Top2 KS1</b>	0,063	0,047	0,020	42,118
<b>Top2 KS2</b>	0,037			
<b>Top2 KS3</b>	0,064			
<b>Top2 KS4</b>	0,024			
<b>Top3 KS1</b>	0,020	0,014	0,004	26,964
<b>Top3 KS2</b>	0,012			
<b>Top3 KS3</b>	0,011			
<b>Top3 KS4</b>	0,014			
<b>Top4 KS1</b>	0,029	0,009	0,014	143,233
<b>Top4 KS2</b>	0,006			
<b>Top4 KS3</b>	0,001			
<b>Top4 KS4</b>	0,001			
<b>Top5 KS1</b>	0,002	0,002	0,000	21,535
<b>Top5 KS2</b>	0,002			
<b>Top5 KS3</b>	0,001			
<b>Top5 KS4</b>	0,002			
<b>Top6 KS1</b>	0,002	0,003	0,001	36,776
<b>Top6 KS2</b>	0,002			
<b>Top6 KS3</b>	0,003			
<b>Top6 KS4</b>	0,004			

Annexe 18 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation [mm/s] obtenues lors de la mission de terrain de Mai 2018 au niveau des micro parcelles « Top » les plus en amont de la pente pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; KS = Conductivité hydraulique à saturation.

Nom échantillon	Ks [mm/s]	Moyenne [mm/s]	Ecart type	CV [%]
<b>Top KS1</b>	0,005	0,008	0,003	36,817
<b>Top KS2</b>	0,011			
<b>Top KS3</b>	0,009			
<b>Up KS1</b>	0,005	0,005	0,001	15,820
<b>Up KS2</b>	0,006			
<b>Middle KS1</b>	0,025	0,014	0,016	118,109
<b>Middle KS2</b>	0,002			
<b>Down KS1</b>	0,005	0,007	0,002	27,009
<b>Down KS2</b>	0,008			

Annexe 19 - Valeurs des conductivités hydrauliques à saturation [mm/s] obtenues lors de la mission de terrain de Juillet 2018 au niveau des micro parcelles selon leur position dans la pente : Top, Up, Middle et Down pour le projet Seaweed. CV = Coefficient de Variation ; KS = Conductivité hydraulique à saturation.