

Caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de l'Ouémé supérieur (Bénin) :

Rapport d'analyse



Mission de Longue Durée IRD
Bénin ; 7 octobre - 23 décembre 2011

Aloïs RICHARD
alois.richard@ujf-grenoble.fr

Annexes préparées par Junias LOKONON (LHME), Aloïs RICHARD (LTHE) et
Mathieu HOUNSOU (LHME)

Remerciements

Pour cette étude, j'ai été aiguillé par Sylvie Galle et Marc Descloîtres, mes directeurs de thèse, que je remercie sincèrement.

Cette mission a fait l'objet d'une collaboration fructueuse avec une équipe scientifique béninoise du Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME), à savoir le professeur E. Agbossou, le docteur M. Hounsou et l'ingénieur J. Lokonon. Nous avons pu échanger autour de thématiques de recherche communes, manipuler avec des instruments de mesures de ce laboratoire et ainsi renforcer nos connaissances et compétences. Je remercie ces personnes pour leur accueil, leur intérêt pour mes travaux et pour l'énergie qu'ils ont déployés pour rendre cette collaboration vivante.

Le docteur J.-P. Vandervaere a participé à une campagne de terrain et a apporté son expertise concernant les questions de physiques du sol et les mesures associées. Je le remercie pour le temps qu'il m'a accordé et pour ces précieux conseils.

Je tiens à remercier Théo Ouani et Simon Afouda. En plus d'être volontaires et joviaux, ils ont permis le bon déroulement des campagnes de terrain.

Finalement, même si nous avons donné quelques coups de pioches, nous n'avons pas creusé les fosses de manipulations. Bio Mamadou, Honoré Agué, Biaou Gbaguidi, Marcel Akin, Cyrille Akin, Guetide Isa, Sabi Issifou, Bio Gouda, Dadoun Broubourou, Alou Samou, Iseae Aboulaï, Kpassi Boukari et Bachir Gaou les ont creusés. Je les remercie.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Contexte et Objectifs | 1 |
| 1.1 | Cadre de travail | 1 |
| 1.2 | Motivation de la mission | 1 |
| 1.3 | Missions et études antérieures | 2 |
| 1.4 | Objectifs spécifiques de la mission | 3 |
| 2 | Matériel et méthodes | 4 |
| 2.1 | Stratégie d'échantillonnage | 4 |
| 2.2 | Choix d'une variable intermédiaire | 4 |
| 2.3 | Intégration des études antérieures | 7 |
| 2.4 | Mesures sur les sites tests à l'échelle de l'Ouémé supérieur | 8 |
| 2.5 | Coupe Djougou-N'Dali | 8 |
| 2.6 | Instruments et protocoles de mesures | 10 |
| 2.7 | Anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation K_s | 12 |
| 2.8 | Variabilité inter classe intra classe | 12 |
| 2.9 | Analyse de distribution statistique | 13 |
| 2.10 | Analyse de la significativité des écarts entre les mesures | 13 |
| 2.11 | Méthodes d'analyse de la macroporosité | 13 |
| 2.12 | Estimation de la densité du couvert végétal en savane arborée | 15 |
| 2.13 | Méthode de contrôle de la cohérence d'éléments de la base de données pédologique | 15 |
| 3 | Résultats | 16 |
| 3.1 | Dispersion intrinsèque aux mesures | 16 |
| 3.2 | Résultats de l'analyse de la macroporosité par le biais d'une expérience qualitative simple | 17 |
| 3.3 | Granulométrie des sites tests | 18 |
| 3.4 | Courbes de rétention $h(\theta)$ des sites tests | 20 |
| 3.5 | Courbes $K(h)$ des sites tests | 21 |
| 3.6 | Valeurs de K_s des sites tests | 24 |
| 3.7 | Valeurs des K_s de la coupe Djougou-N'Dali | 25 |
| 3.8 | Valeurs de K_s issues de méthodes de mesures différentes | 27 |
| 3.9 | Synthèse de l'exploration de la macroporosité | 28 |
| 3.10 | Relations entre granulométrie et variables hydrodynamiques | 28 |
| 3.11 | Contrôle de la cohérence de la base de données pédologique : caractéristiques générales des sites et granulométrie | 29 |
| | Conclusion et perspectives | 31 |
| | Bibliographie | 34 |

Chapitre 1

Contexte et Objectifs

1.1 Cadre de travail

Cette étude fait partie de mon travail de thèse intitulée “Analyse et modélisation du bilan hydrologique au Bénin : rôle du couvert végétal”. Les mesures ont été réalisées dans le cadre d’une mission longue durée (MLD) qui s’est déroulée du 7 octobre au 23 décembre 2011, financée par l’Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Cette mission au Bénin m’a permis d’alterner des campagnes de terrain pour effectuer mesures in situ et prélèvements de sols et des périodes à Cotonou de mesures de laboratoire.

Cette mission a fait l’objet d’une collaboration fructueuse qui résulte du partenariat passé entre l’IRD et le Laboratoire d’Hydraulique et de Maitrise de l’Eau (LHME) du professeur E. Agbossou, laboratoire rattaché à la Faculté des Sciences Agronomiques de l’Université Abomey-Calavi.

1.2 Motivation de la mission

A l’échelle du bassin versant de la Haute Vallée de l’Ouémé (environ 15000 km²), la communauté d’hydrologues utilise le modèle numérique TopAMMA pour modéliser le fonctionnement hydrologique. Le modèle TopAMMA est une adaptation du modèle TopMODEL dans le contexte de la Haute Vallée de l’Ouémé. Ce modèle est basé sur l’hypothèse de la production des débits par nappe de versant. Comme son nom le suggère, son fonctionnement est basé sur la topographie du bassin versant au moyen de l’indice de similarité hydrologique ou indice topographique. Il simule le ruissellement de surface et les écoulements de subsurface. Ce modèle possède 6 paramètres : T_0 , la transmissivité hydraulique à saturation, m , le profil de transmissivité, d_0 le déficit seuil, K , le rapport entre la conductivité hydraulique à saturation verticale et la conductivité hydraulique à saturation horizontale, V , la vitesse de l’écoulement en rivière, V_v/V_r , le rapport entre la vitesse l’écoulement sur le versant et la vitesse d’écoulement en rivière. Quatre de ces paramètres traduisent le fonctionnement hydraulique du sol : T_0 , m , d_0 et K . Actuellement, les paramètres de ce modèle ne sont ni distribués ni spatialisés, c’est-à-dire qu’il possède une valeur constante sur l’ensemble du bassin versant. Une des questions traitées durant ma thèse consiste à discuter de l’apport de la distribution spatiale de ces paramètres à la modélisation hydrologique. L’objectif de cette mission est donc de caractériser la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface de l’Ouémé supérieur. Les mesures entreprises devraient permettre d’estimer la distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques de ces sols dans le but de proposer une distribution spatiale des paramètres d’hydrodynamique des sols dans le modèle TopAMMA.

Depuis le début du programme AMMA-CATCH en 2000, la communauté d’hydrologues a été confrontée dans cette zone à climat soudanien à la compréhension des processus hydrologiques. Pour avancer sur le plan cognitif, l’attention s’est portée sur des objets hydrologiques de tailles de plus en plus petites. A l’heure actuelle, bien que l’objectif affiché soit de proposer un bilan hydrologique à l’échelle de l’Ouémé supérieur, la majeure partie des efforts est concentrée sur le bassin versant de l’Ara, d’une superficie de 12 km². Cette descente d’échelle nécessaire à la compréhension des processus est problématique lorsqu’il faut effectuer le chemin inverse. En plus de la question du changement d’échelle en hydrologie, question complexe, se pose la question de la représentativité du site choisi. Un des enjeux de cette campagne de terrain est d’explorer les propriétés hydrodynamiques des sols de surface directement à l’échelle d’intérêt (l’Ouémé supérieur). Ceci afin d’éviter la question de la représentativité de la zone d’étude.

Les simulations du fonctionnement hydrologique de l’Ouémé supérieur par le modèle TopAMMA met en évidence la prédominance des écoulements de subsurface dans la production des débits. De plus, les ruissellements de surface ne jouent pas un rôle majeur dans la production des débits. Ces hypothèses de fonctionnement qui permettent une bonne reproduction de la relation pluie-débit à méso-échelle n’ont jamais fait l’objet d’une validation hydrodynamique in situ. Cette validation a motivé le premier volet de mon travail de thèse. En accord avec le fonctionnement hydrologique de TopAMMA basé sur la topographie, nous avons choisi d’étudier le versant, objet topographique élémentaire. De plus, le versant fait intervenir l’ensemble des termes du bilan hydrologique (précipitations, évaporation du sol, transpiration végétale, stockage hydrique du sol, production des débits). Nous avons choisi un modèle numérique à base physique pour simuler le fonctionnement hydrodynamique du versant. Cette modélisation permet de mettre en évidence des processus hydrodynamiques en jeu à l’échelle locale. Cet outil a permis de proposer des hypothèses de fonctionnement : double perméabilité, présence d’une macroporosité. La seconde motivation de cette mission est de confronter ces hypothèses de fonctionnement à la réalité de terrain.

1.3 Missions et études antérieures

La campagne de terrain effectuée en fin d’année 2000 s’est déclinée en deux grandes parties. La première a consisté à explorer les propriétés hydrodynamiques des sols du bassin versant de la Donga (586 km²). Les mesures ont été réalisées sur une grille régulière de 2 minutes de côté. La seconde partie s’est consacrée à la mesure des mêmes propriétés sur un versant, le transect d’Ananinga. Ces deux manipulations ont utilisées la méthode Beerkan. Cette campagne a donné lieu à deux rapports. Le premier document de Angulo Jaramillo et al. [2001] s’attache à décrire en détail les mesures effectuées. Les mesures sont présentées de manière exhaustive en annexe de leur rapport. Dans une seconde étude de Condappa [2006], les développements de physique du sol s’appuient sur les mesures de terrain de 2000. Cette étude est menée dans l’optique d’intégrer les paramètres obtenus au modèle numérique POWER. L’exploration de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques sur une grille régulière à l’échelle de la Donga ne semble pas être un choix judicieux. Cette démarche utilise des méthodes de géostatistique qui suppose une cohérence spatiale mesurable entre deux points de mesures voisins. Or une étude postérieure [Robert, 2010] a montré la forte variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols à l’échelle locale. L’espacement de deux points de mesures (2 minutes de côté) est donc bien plus important que la portée d’un variogramme traduisant la variabilité spatiale des sols.

Comme décrit dans le paragraphe 1.2, l’hydrodynamique d’un versant de la zone d’étude a fait l’objet d’une modélisation numérique à base physique [Richard, 2010].

En 2010, Dorothée Robert a effectué une campagne de terrain sur le bassin versant de l’Ara. Cette mission a fait l’objet d’un rapport [Robert, 2010]. L’objectif de cette étude était de caractériser la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques du premier mètre des sols du bassin versant de l’Ara. Cette mission présente l’originalité de coupler des mesures de physique du sol à des mesures de géophysique. Les cartes de résistivités électriques permettent de proposer une implantation des sites d’essais selon un probable "héritage géologique", géologie qui crée des sols de nature différentes. Les essais infiltrométriques réalisés dans des fosses permettent de dire que les propriétés hydrodynamiques du premier mètre de sol ne dépendent pas vraiment de l’organisation héritée de la géologie, car ce premier mètre est relativement "homogène". Les sols très argileux sont effectivement présents et bien détecté par la géophysique, mais ils se situent à une profondeur supérieure à 1 mètre et non pas été caractérisés. Reste à savoir si leur présence confirme les hypothèses faites par Le Lay et al. [2008] concernant la formation de nappe de versant. De part la forte variabilité locale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface, cette étude n’a pas permis de proposer une distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols du bassin versant de l’Ara.

Finalement, en 2011, Basile Hector et Sarah Soubeyran ont complétés les mesures entreprises par Dorothée Robert en effectuant des essais infiltrométriques dans d’autres fosses, plus profondément. Le chapitre "Etudes hydrologiques" du rapport "Etudes géophysiques, géologiques et hydrologiques des sites de Nalohou et Béléfougou (Djougou, Nord Bénin)" [Soubeyran et al., 2011] expose les caractéristiques et les conditions des essais. Le descriptif détaillé des mesures est en annexe de leur rapport.

De part leur échelle d’investigation (bassin versant de 12 km²) ou leur méthode d’échantillonnage inadapté, les campagnes de terrain antérieures qui se sont intéressées à l’hydrodynamique des sols ont

laissé un vide concernant la caractérisation de la distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface à l'échelle de l'Ouémé supérieur.

1.4 Objectifs spécifiques de la mission

Caractériser la variabilité des propriétés hydrodynamiques des sols de surface. Les propriétés hydrodynamiques des sols sont caractérisées, dans un premier temps, par les relations qui lient les trois principaux paramètres hydrodynamiques d'un sol. Il s'agit de la conductivité hydraulique K , la teneur en eau volumique θ et le potentiel matriciel h . Deux des trois relations suffisent. Nous retiendrons la courbe de rétention $h(\theta)$ et la courbe $K(h)$. Ces propriétés hydrodynamiques sont a priori variables horizontalement, sur l'étendu du bassin et verticalement, sur la profondeur du sol. Nous nous intéressons uniquement au sol de surface pour une raison de modélisation : le modèle numérique TopAMMA ne prend en compte que les sols de surface. Les mesures qui permettent l'obtention de ces relations de physique du sol sont coûteuses en temps et ponctuelles. D'un point de vue pratique il n'est pas possible d'envisager la mesure exhaustive de ces propriétés sur le bassin. A défaut d'une spatialisation exhaustive, force est de proposer une caractérisation de la variabilité de ces propriétés sur quelques sites tests choisis selon une stratégie d'échantillonnage raisonnée.

Nous énoncerons les éléments qui peuvent a priori expliquer une partie significative des variations spatiales des propriétés mesurées. Nous proposons via une stratégie d'échantillonnage, une méthode de mesures qui permette de rendre compte de la variabilité spatiale de ces propriétés. Nous réalisons les mesures selon le protocole mis en place. L'analyse des résultats nous permettra de confirmer ou infirmer la stratégie d'échantillonnage adoptée et ainsi pouvoir proposer une caractérisation de la variabilité de ces propriétés hydrodynamiques des sols de surface.

Tester des hypothèses de fonctionnement hydrologique. En plus de l'objectif principal, nous avons aussi exploré des questions importantes issues des hypothèses de fonctionnement hydrologique. Celles-ci conduisent, avant cette mission, à 3 questions. Les deux premières sont issues de travaux effectués à l'échelle du versant. La troisième question provient d'une volonté de validation d'une des hypothèses de fonctionnement de TopAMMA ([Le Lay et al., 2008], [Zannou, 2011]).

- Existe-t-il une macroporosité des sols de surface ?
- Si les sols de surface présentent une macroporosité, joue-t-elle un rôle dans le fonctionnement hydraulique des sols ?
- Les sols de surface présentent-ils une anisotropie de conductivité hydraulique à saturation ?

Chapitre 2

Matériel et méthodes

2.1 Stratégie d'échantillonnage

Deux stratégies d'échantillonnage sont possibles pour décrire la variabilité spatiale des propriétés étudiées. La première définit un échantillonnage sur maille régulière. La position géographique des points de mesures dépend de l'étendue de la zone à échantillonner et du temps disponible pour la mesure. Cette stratégie a été adoptée pour la mission de 2000 [Angulo Jaramillo et al., 2001]. Nous avons discuté dans le paragraphe 1.3 de la pertinence de cette stratégie. La seconde stratégie définit un échantillonnage basé sur des hypothèses de structuration des propriétés étudiées. Les sites étudiés sont choisis de telle sorte à explorer l'ensemble des configurations qui, selon les hypothèses de structuration, pourraient expliquer la variabilité des paramètres étudiés. Dans cette étude, nous avons choisi cette seconde option qui semble être plus pertinente que la première.

À défaut de spatialisation directe, il est possible de proposer une spatialisation indirecte des propriétés hydrodynamiques. Quatre éléments servant à définir la stratégie d'échantillonnage sont proposés : la variable d'intérêt, la variable intermédiaire, l'échelle de la mesure et l'échelle d'intérêt. In fine, le but est de connaître la variable d'intérêt à l'échelle d'intérêt. Cependant, la variable d'intérêt ne peut être mesurée qu'à l'échelle de la mesure. Il faut donc trouver une variable intermédiaire qui ait les deux qualités suivantes : sa connaissance est accessible à la fois à l'échelle de la mesure et à l'échelle d'intérêt ; la variable d'intérêt explique une partie significative de la variabilité spatiale des mesures de la variable d'intérêt (mesurée à l'échelle de la mesure). Dans ce cas, il est ainsi possible de proposer une spatialisation indirecte de la variable d'intérêt en s'appuyant sur la distribution spatiale de la variable intermédiaire. Dans notre cas, la variable d'intérêt est une des propriétés hydrodynamiques des sols de surface (prenons K_s pour l'exemple), l'échelle de la mesure est la section d'un cylindre de prélèvement (quelques centimètres carré) et l'échelle d'intérêt est le bassin versant (quelques milliers de kilomètres carré). Le choix de la variable intermédiaire n'est pas trivial. Nous avons basé ce choix sur un travail cartographique préliminaire. La première des qualités demandées à la variable intermédiaire (i.e. connaissance accessible à l'échelle d'intérêt et à l'échelle de la mesure) est connue a priori. Néanmoins, la seconde qualité (i.e. la variable intermédiaire explique une partie significative de la variabilité spatiale des mesures de la variable d'intérêt) n'est connue qu'a posteriori. Cette stratégie nécessite donc un postulat qui sera infirmer ou confirmer par les mesures.

2.2 Choix d'une variable intermédiaire

Nous avons réalisé un travail cartographique préliminaire. Ce travail est réalisé en grande partie avec le logiciel Quantum GIS. Les cartes de ce rapport sont dessinées avec le même logiciel¹.

À l'échelle du bassin versant, plusieurs types d'information pourraient expliquer la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface. Nous avons identifié la géologie, la pédologie, la topographie et l'occupation du sol. La géologie informe sur l'origine et la composition minéralogique des formations rocheuses qui ont, par le jeu de l'altération chimique, été ultérieurement transformées en sols épais sous les climats chaud et humides des tropiques. Par conséquent, la géologie peut expliquer la

1. Pour plus de détails, consulter la page Internet : <http://qgis.osgeo.org/>

carte de sols. Nous avons exploitée la “Carte géologique - Feuille Djougou - Parakou - Nikki” de l’office béninois des mines [Vincent and Hottin, 1984]. La carte pédologique renseigne sur l’altération du sol par les forçages climatiques : conditions de formations des sols, composition des sols, processus actuels, comportement hydraulique. L’information pédologique est issue des cartes pédologiques de reconnaissance éditées par l’ORSTOM ([Faure, 1977a],[Faure, 1977b],[Dubroeuq, 1977a],[Dubroeuq, 1977b] et [Viennot, 1978]). L’information de ces cartes est hiérarchisée (classe, sous-classe, groupe, sous-groupe, famille, unité cartographique pédologique (UCP)) selon la classification de G. Aubert de 1965. La figure 2.1 illustre la diversité pédologique de l’Ouémé supérieur.

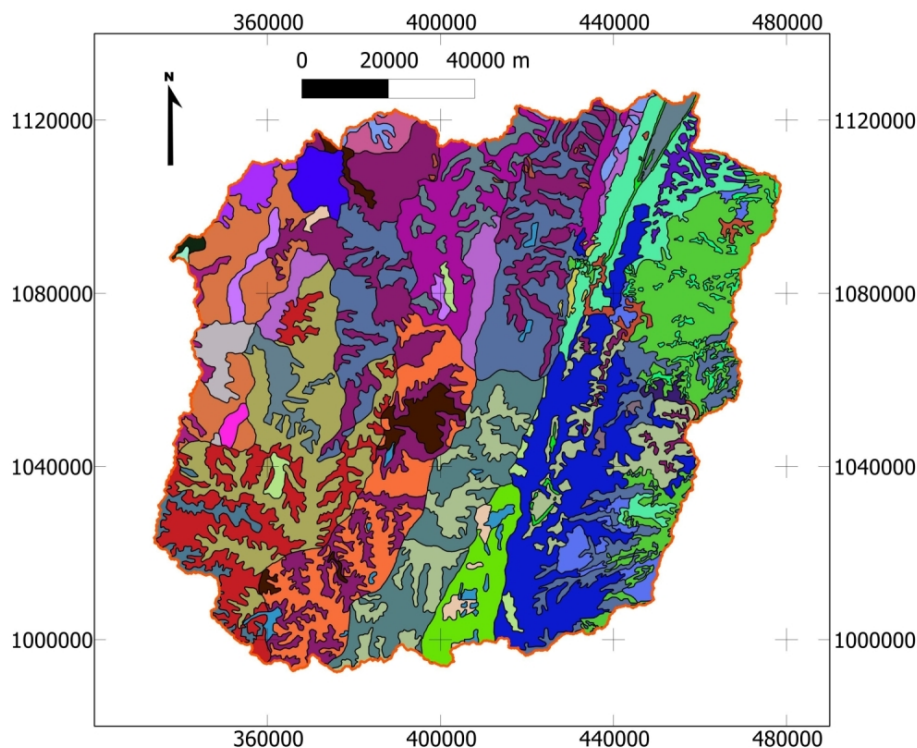


FIGURE 2.1 – Carte pédologique de reconnaissance de l’Ouémé supérieur. Unités cartographiques pédologiques. Projection : UTM 31 Nord ; unité : mètre

La topographie étant le moteur des écoulements saturés dans la plupart des processus hydrologiques, elle fournit une information sur l’altitude, la pente, l’aire drainée et la position sur le versant de chaque point du bassin versant. Nous avons utilisé le produit topographique STRM3. Il s’agit du modèle numérique de terrain (MNT) à la résolution de 3 secondes d’arc issu de la SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)². La carte d’occupation du sol renseigne sur l’impact de l’activité humaine sur les sols, ce qui peut avoir comme conséquence de modifier les propriétés hydrodynamiques des sols : culture, mise en jachère, urbanisation ... Nous avons basé notre travail sur la “Carte d’occupation du sol de l’Ouémé supérieur” [Bel, 2010]. Cette carte est réalisée à partir d’images SPOT/HRV d’octobre 2007. Elle présente 6 classes : forêt, savane boisée, jachères, zones anthropisées, ville, eau (voir la figure 2.2). Les zones anthropisées intègrent les cultures annuelles. Des zones de la carte restent non classées pour des raisons techniques.

Selon C. Prat (communication personnelle), les cartes de reconnaissance pédologiques de l’ORSTOM, construites à une échelle de 1/200000^{ème}, ne doivent pas faire l’objet d’une interprétation trop précise à propos des processus hydrodynamiques. De plus, les auteurs de ces cartes indiquent que “les unités cartographiques ci-dessus correspondent parfois à des unités pédologiques homogènes, mais assez fréquemment à des associations, qui sont alors représentées par le seul élément dominant” [Faure, 1977a]. Ainsi pour aborder ces cartes par le biais de la question hydrologique, il est sans doute judicieux de ne conserver que le premier degré d’information de la hiérarchisation de l’information pédologique, c’est à dire la classe pédologique. Les autres degrés d’information sont, à cette échelle, difficilement interprétables dans le cadre

2. Pour l’obtention de données, voir la page Internet <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>

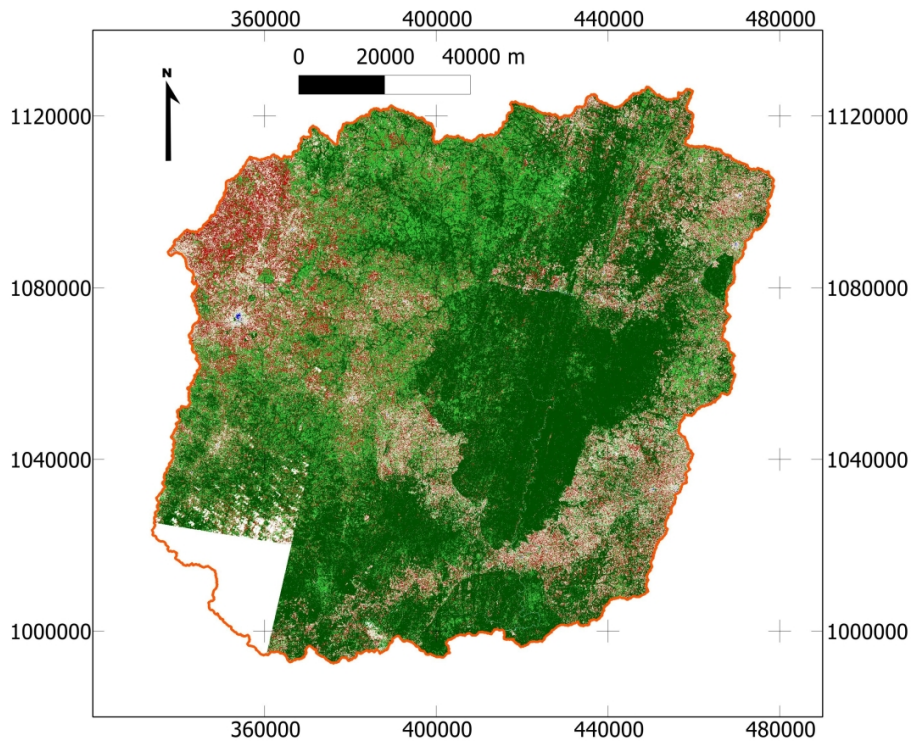


FIGURE 2.2 – Carte d’occupation du sol de l’Ouémé supérieur. Projection : UTM 31 Nord ; unité : mètre. Forêt : vert foncé ; savane boisée : vert clair ; jachère : rouge zone anthropisée : beige ; eau : bleu clair ; ville : bleu foncé.

d’une analyse hydrologique. L’information pédologique décrite en 39 unités cartographiques se réduit à 5 classes : les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse, les sols ferrallitiques, les sols minéraux bruts, les sols hydromorphes et les sols brunifiés. Le bien-fondé de cette réduction est étudiée dans la manipulation coupe Djougou-N’Dali (voir section 2.5).

Dans la classification proposée, tous les sols de classe sesquioxydes de fer et de manganèse sont des sols de sous-classe ferrugineux tropicaux et tous les sols de sous-classe ferrugineux tropicaux sont des sols de classe sesquioxydes de fer et de manganèse. Dans cette étude, nous considérerons que les sols à sesquioxydes de fer et de manganèse sont les sols ferrugineux tropicaux. Le bassin versant de l’Ouémé supérieur est composé à 92 % de sols ferrugineux tropicaux et à 5 % de sols ferrallitiques. Les 3 % restant étant des sols minéraux bruts, les sols hydromorphes et les sols brunifiés (voir figure 2.3). A ce stade de l’analyse, il paraît que malgré une certaine diversité du substratum géologique que présente le bassin versant, les sols de ce dernier sont peu diversifiés (C. Prat, communication personnelle). Ainsi, l’origine géologique des sols du bassin a peu d’impact sur leur nature pédologique. Nous avons choisi de ne pas retenir l’information géologique comme variable pouvant expliquer la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface.

La grande majorité (92 %) des sols du bassin versant d’étude étant des sols ferrugineux tropicaux. Dans ce cas, la pédologie n’est pas un critère discriminant du bassin versant.

La topographie du bassin de l’Ouémé supérieur est peu marquée. Avec le produit MNT utilisé, l’altitude est comprise entre 228 et 617 mètres, la pente moyenne est de 2,7° avec un écart-type de 2°. De plus, la corrélation entre les éléments topographiques (altitude, pente, aire drainée, position sur le versant) et l’hydrodynamique des sols de surface est faible, a priori. Les éléments topographiques ne sont pas retenus pour explorer la variabilité spatiale étudiée. Cependant, une fois les sites choisis par le biais d’une autre variable intermédiaire, nous utiliserons l’information topographique pour placer les sites de mesures au sein du versant.

Selon la carte d’occupation du sol, l’Ouémé supérieur comporte 49 % de forêt, 28 % de savane boisée, 18 % de jachères et zones anthropisées et 1 % de ville. 5 % de la superficie du bassin est non classée. Des travaux sur la dynamique d’utilisation des terres dans le centre du Bénin [Judex et al., 2009] indique que sur la période 1991-2000, l’augmentation du nombre de terres agricoles et d’agglomérations est évidente”.

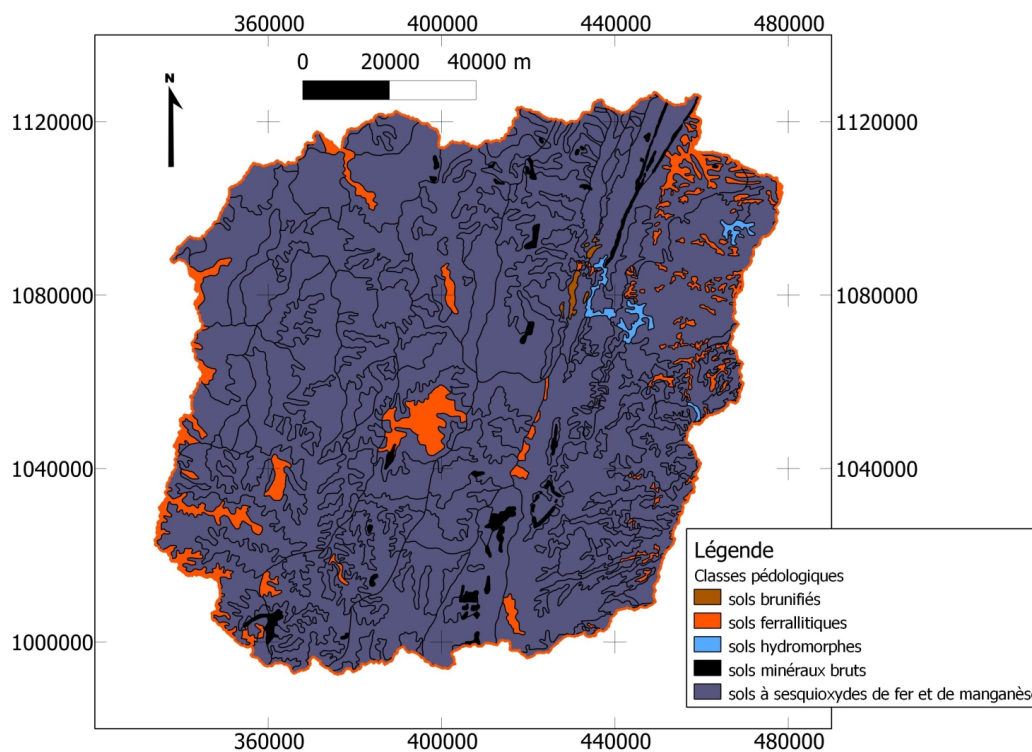


FIGURE 2.3 – Carte pédologique de reconnaissance de l’Ouémé supérieur. Classes pédologiques. Projection : UTM 31 Nord ; unité : mètre

Quant aux scénarii de modélisation de la dynamique d’utilisation des terres [Judex, 2009], chacun d’eux “montre une augmentation des terres agricoles et une perte de végétation naturelle”. Ce phénomène est déjà sensible dans la région de Djougou pour laquelle les jachères et zones anthropisées représentent 53 % de la superficie du bassin versant de la Donga, la savane boisée et la forêt représentent respectivement 37 et 10 %. Ainsi, bien que les zones anthropisées et les jachères ne représentent actuellement que 18 % de la surface du bassin de l’Ouémé supérieur, ce type d’occupation du sol a vocation à croître. L’analyse de l’occupation du sol et son évolution nous ont amené à explorer la variabilité des propriétés hydrodynamiques des sols de surface en fonction de l’occupation du sol. Cette exploration n’est bien sûr pas exhaustive. Nous explorerons des occupations du sol qui possèdent les fonctionnements hydrodynamiques a priori les plus éloignés : les cultures et les savanes arborées, couverts végétaux qui couvrent plus de la moitié du bassin (65%).

En résumé, une stratégie d’échantillonnage et un travail cartographique préliminaire nous ont permis d’établir un protocole de caractérisation de la variabilité hydrodynamique des propriétés hydrodynamiques des sols de surface. Nous avons choisi les critères de variation les plus probables en fonction de la littérature, de notre connaissance du terrain et du cas particulier de l’Ouémé supérieur, soit trois critères : la classe pédologique, l’occupation du sol et la position sur le versant. L’occupation du sol est notre variable intermédiaire.

2.3 Intégration des études antérieures

Nous avons intégré à cette étude le travail de mesures effectué dans le cadre d’autres recherches. Ces manipulations ont été réalisées de façons complémentaires et coordonnées. Nous avons intégré des mesures de Dorothée Robert [2010] et de Basile Hector et Sarah Soubeyran [Soubeyran et al., 2011].

Les cartes pédologiques de reconnaissance couvrant le bassin d’étude ont été réalisées entre 1977 et 1978. Ces cartes sont basées sur des campagnes de terrain qui ont eu lieu entre 1966 et 1971. Ces mesures ont été archivées dans une base de données pédologique ([Faure, 1977a], [Faure, 1977b], [Dubroeuq, 1977a], [Dubroeuq, 1977b] et [Viennot, 1978]) et complétées par des mesures datant de 1979, 1985 et 1996. Sur le bassin de la Haute Vallée de l’Ouémé, cette base présente 308 profils pédologiques répartis sur

73 profils. Cette base de données indique, entre autres, la granulométrie des sols étudiés. Une valorisation hydrologique de cette base de données consiste à proposer des courbes de rétention par le biais de fonctions de pédotransfert. Même si il s'agit d'une méthode indirecte d'obtention de courbes de rétention, cette procédure permet d'apporter des éléments quant à la variabilité spatiale des courbes de rétention pour les sols de surface du bassin.

2.4 Mesures sur les sites tests à l'échelle de l'Ouémé supérieur

Ces mesures ont pour vocation de mesurer l'impact de l'occupation du sol sur l'hydrodynamique des sols de surface. Nous avons choisi deux couverts végétaux qui possèdent des fonctionnements hydrodynamiques différents : Cultures et Savane arborée³ [Giertz et al., 2005]. A l'échelle régionale, pour s'affranchir de l'effet du site sur les mesures, nous avons effectué les mesures sur 3 sites différents du bassin versant. Nous avons donc défini 6 sites : Bétérou Cultures, Bétérou Savane arborée, N'Dali Cultures, N'Dali Savane arborée, Nalohou Cultures, Béléfoungou Savane arborée (voir figure 2.4). Nous avons réalisé la description qualitative des couverts végétaux rencontrés [Lokonon et al., 2012]. La qualité et la précision de ces descriptions sont cependant à pondérer par le fait que nous ne possédons pas de compétences particulières dans ce domaine. A l'échelle locale, pour s'affranchir de l'effet de l'emplacement sur les mesures, caractériser la variabilité intra site des mesures et posséder des résultats en cas de problèmes techniques sur un des emplacements (mesures manquantes, inexploitable, résultats aberrants), nous avons effectué les mesures sur 3 emplacements différents du versant. Ces emplacements sont distants d'une centaine de mètres et situés en milieu ou en haut de versant (voir en exemple la figure 2.5 pour les sites de N'Dali).

Nous nous sommes concentrés sur les sols de surface car le modèle TopAMMA ne prend pas en compte les sols plus profonds. Les propriétés hydrodynamiques étant fortement liés à la profondeur, nous avons décidé d'étudier le sol en surface et en subsurface. La subsurface correspond à l'horizon B en pédologie et présente une apparence visuelle nettement différente de celle de la surface. Ceci se traduit a priori par une modification des propriétés hydrodynamiques des sols. La profondeur correspondante est comprise entre 60 et 90 cm. Pour cela, nous avons fait creuser des fosses. Ces fosses présentent toutes une géométrie semblable. Elles mesurent 1 mètre de largeur et 1,5 à 2 mètres de longueur. Une première marche d'une profondeur variant de 60 à 90 cm est dédiée aux essais infiltrométriques. La seconde marche aux environs d'un mètre sert d'emplacement pour l'expérimentateur. Nous avons décrit les différents horizons pédologiques rencontrés sur le premier mètre de sol ('texture visuelle', couleur, présence d'éléments grossiers, de racines, profondeur des changements d'horizons). Pour ces descriptions, voir le rapport annexe de Lokonon et al. [2012]. Pour chaque emplacement, nous avons réalisé des mesures et des prélèvements en surface et en subsurface. Dans chacun des cas, nous avons effectué un essai d'infiltrométrie à disque, prélevé un échantillon remanié (ER) et un échantillon non remanié (ENR) verticalement (voir le schéma 2.6). Ceci afin d'obtenir une caractérisation complète des sols.

Nous avons réalisés des prélèvements complémentaires d'ER et d'ENR sur 2 autres emplacements du versant. Si les 3 emplacements sont en milieu de versant (respectivement en haut), nous avons prélevés en haut de versant (respectivement au milieu) et en bas de versant.

2.5 Coupe Djougou-N'Dali

La "coupe Djougou-N'Dali" est une expérience qui a pour vocation d'explorer la variabilité de la conductivité hydraulique à saturation des sols de surface en fonction du support pédologique. Ceci dans le but de juger de la pertinence de l'hypothèse faite dans le choix de la variable intermédiaire, à savoir que la pédologie n'explique pas la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface (voir le paragraphe 2.2).

La route qui relie ces deux villes (Djougou et N'Dali) traverse le bassin d'Ouest en Est. Le tracé de la route passe par 19 unités cartographiques pédologiques parmi lesquelles 4 possèdent 2 occurrences, une possède 3 occurrences et une 4 occurrences. Sur cette route, nous avons prélevé des ENR sur 21 sites répartis sur 18 UCP (voir la figure 2.7). Ces 18 UCP représente 71 % de superficie du bassin versant de

3. A noter que dans le rapport annexe de Lokonon et al. [2012], le terme de "Savane arborée" est remplacé par celui de "Forêt".

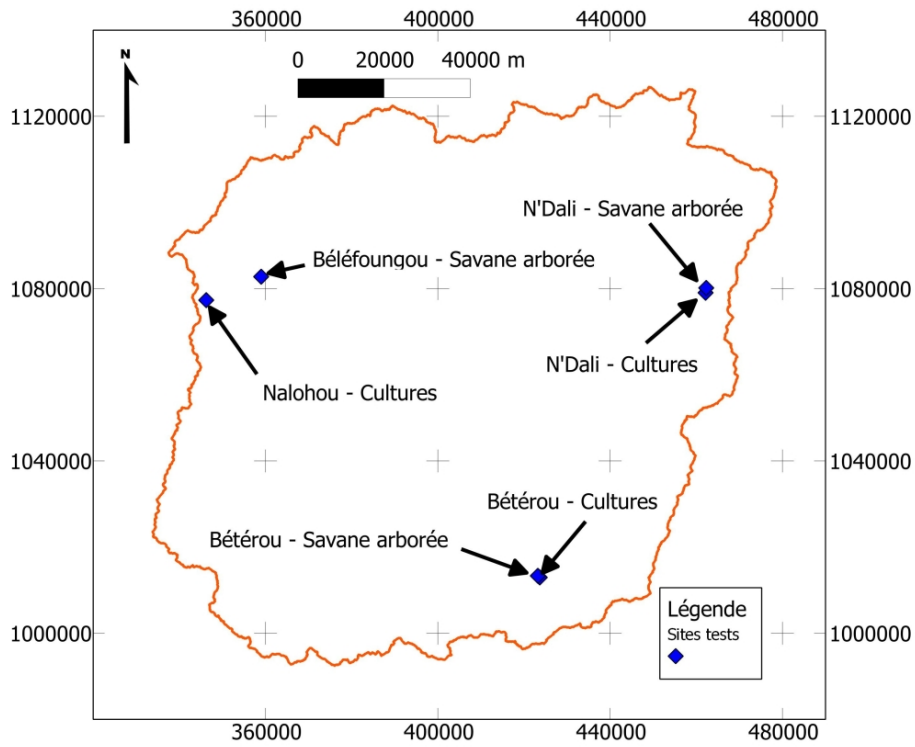


FIGURE 2.4 – Position des 6 sites tests au sein du bassin versant de l’Ouémé supérieur. Projection : UTM 31 Nord; unité : mètre

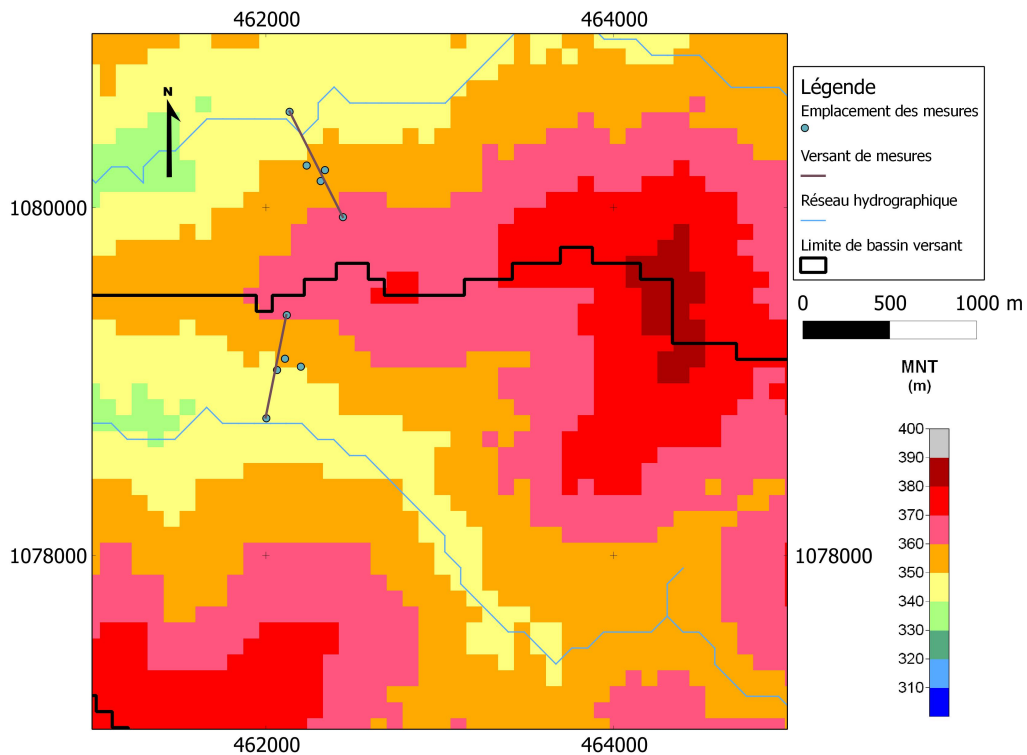


FIGURE 2.5 – Position des emplacements de mesures pour les 2 sites de N’Dali. Site de savane arborée au Nord, site de cultures au Sud. Projection : UTM 31 Nord; unité : mètre

l’Ouémé supérieur. Ces sites ont été choisis dans la mesure du possible comme ayant le même emplacement au sein du versant (milieu de versant) et étant sur le même type d’occupation du sol (jachères). Ceci afin de s’affranchir au mieux de l’impact de la position sur le versant et de l’occupation du sol et ainsi explorer uniquement l’impact du support pédologique. Sur chaque site, la manipulation a consisté à

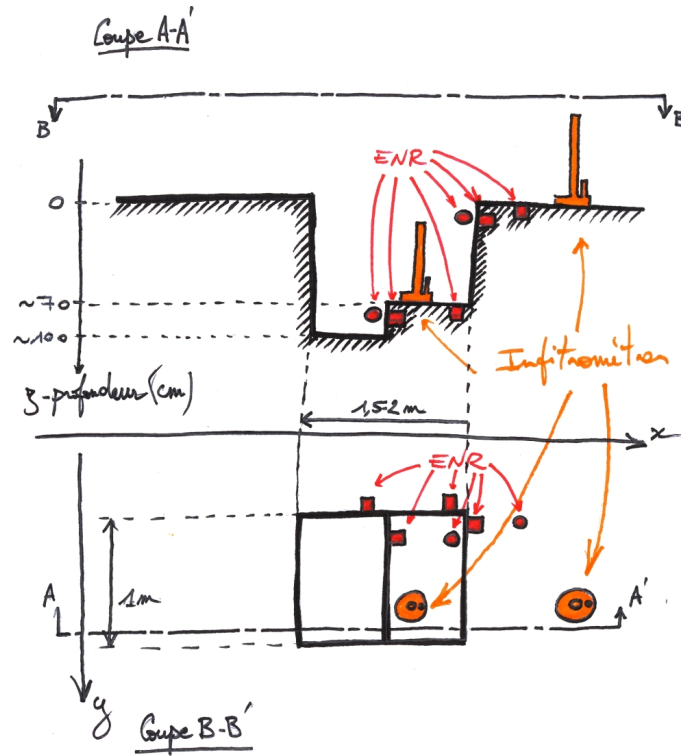


FIGURE 2.6 – Schémas d’une fosse de manipulations. La coupe A-A’ est une coupe verticale. La coupe B-B’ est une vue zénithale. Les infiltromètres sont en orange, les ENR en rouge. Sont représentés les ENR prélevés horizontalement (voir le paragraphe 2.7). Les ER, non représentés, sont prélevés à côté des ENR verticaux.

définir 3 emplacements distants de quelques dizaines de mètres. Les propriétés hydrodynamiques étant fortement liées à la profondeur, nous avons réalisé, pour chaque emplacement, les prélèvements nécessaires à l’obtention de la conductivité hydraulique à saturation K_s en surface et en subsurface immédiate (20 cm).

2.6 Instruments et protocoles de mesures

Afin de réaliser une caractérisation complète des propriétés hydrodynamiques des sols, nous réalisons différentes mesures sur les sols d’étude. Les courbes $K(h)$ sont obtenues par infiltrométrie à disque. Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation K_s sont mesurées grâce à des échantillons non remaniés. Ces derniers permettent aussi l’obtention des courbes de rétention $h(\theta)$. Finalement, les compositions granulométriques et les quantités de matière organique des sols sont déterminées grâce à des échantillons remaniés. Les trois paragraphes qui suivent présentent succinctement ces dispositifs de mesures et leur emploi dans le cadre de cette étude.

2.6.1 Infiltrométrie à disque

Les essais d’infiltrométrie ont été réalisés grâce à trois infiltromètres à disque. Deux d’entre eux sont des appareils fabriqués au LTHE (Laboratoire d’étude des Transferts en Hydrologie et Environnement), le troisième, appartenant au LHME, est un infiltromètre Eijkelkamp [Eijkelkamp Agrisearch Equipment, 2010]. Ces trois appareils possèdent un disque d’infiltration de 10 cm de rayon, échelle caractéristique de la mesure. Ce type d’instrument permet de mesurer le flux d’infiltration dans le sol d’étude pour une succion imposée. La succion est définie comme étant l’opposée du potentiel matriciel. Les essais entrepris sont à succion variable. La gamme de succions explorée s’étend de 5 à 80 mm. Les données infiltrométriques nécessitent un traitement pour passer des valeurs de flux stabilisés aux conductivités hydrauliques et ainsi obtenir la conductivité hydraulique K en fonction du potentiel matriciel imposé h . Vandervaere [1995] décrit en détail le fonctionnement de ce dispositif. Nous avons réalisé 37 essais infiltrométriques.

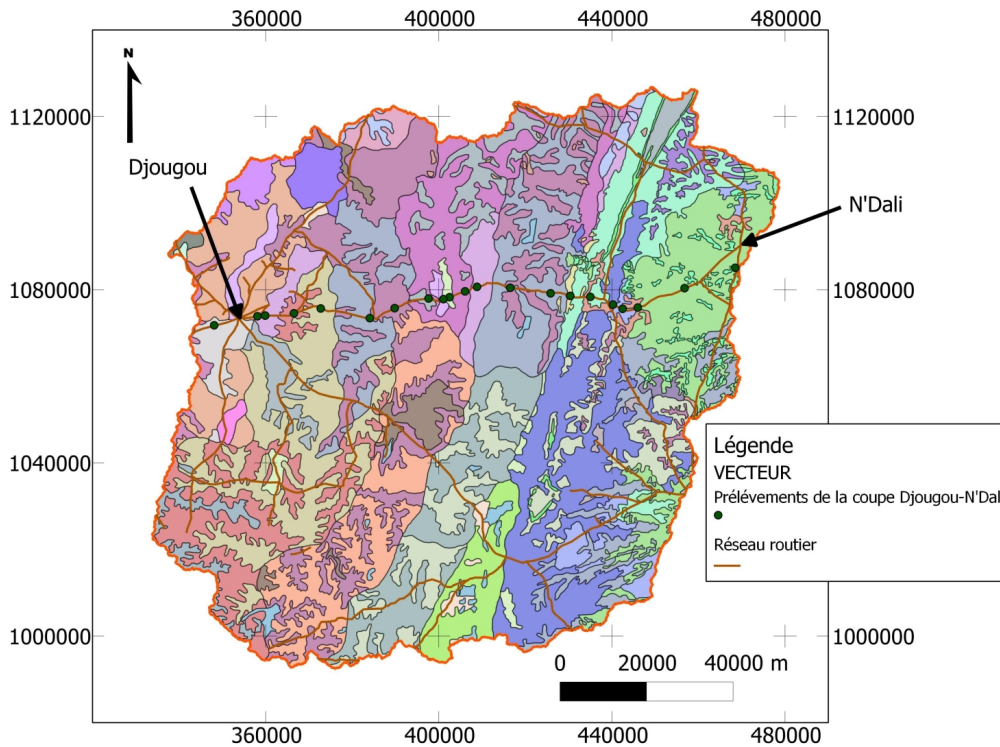


FIGURE 2.7 – Position des prélèvements de la coupe Djougou-N'Dali. Le fond de carte correspond aux unités cartographiques pédologiques. Projection : UTM 31 Nord ; unité : mètre

En infiltrométrie à disque, la conductivité hydraulique K est obtenue par la mesure de flux d'eau infiltrés dans le sol. L'expérimentateur doit attendre la stabilisation du flux pour pouvoir en déduire K . Dans la majeure partie des cas, le flux asymptotique est atteint par valeurs supérieures. Il existe des cas pour lesquels le flux asymptotique est atteint par valeurs inférieures. Une hypothèse pouvant expliquer ce comportement fait intervenir la mouillabilité de la matière organique. La matière organique est hydrophobe lorsqu'elle est sèche. Ainsi la présence de matière organique dans un sol a tendance à diminuer le flux hydrique. L'hydrophobie de la matière organique diminue à mesure de son humectation, ce qui a pour effet d'augmenter le flux hydrique de ce même sol. Le temps caractéristique de l'humectation de la matière organique pouvant être plus grand que celui de la stabilisation des flux par infiltrométrie à disque, la mouillabilité de la matière organique peut expliquer le flux asymptotique atteint par valeurs inférieures.

Lors des essais infiltrométriques, il est apparu que les essais de surface présentaient systématiquement des flux asymptotiques atteints par valeurs inférieures pour au moins une des succions explorées. Pour les essais en profondeur, les flux asymptotiques ont toujours été atteints par valeurs supérieures. Pour expliquer ce comportement, nous avons voulu connaître les teneurs en matières organiques des sols étudiés. Cette interrogation a motivé les mesures de quantification de matières organiques des sols étudiés (voir le paragraphe 2.6.3).

2.6.2 Echantillons non remaniés (ENR)

Les échantillons non remaniés (ENR) sont des échantillons de sol qui conservent le même agencement spatial que l'agencement in situ, en d'autres termes la structure du sol. La structure du sol joue un rôle majeur dans le fonctionnement hydraulique du sol proche de la saturation. Ces échantillons sont prélevés grâce à des cylindres de 53 mm de diamètre intérieur et de 60 mm de longueur. Il s'agit de cylindres de prélèvement *Eijkelkamp Agrisearch Equipment*. Les ENR sont prélevés in situ puis exploités en laboratoire. Ils permettent la mesure de la conductivité hydraulique à saturation K_s et l'obtention de la courbe de rétention $h(\theta)$. La conductivité hydraulique à saturation est obtenue par application de la loi de Darcy grâce à un perméamètre de laboratoire [Eijkelkamp Agrisearch Equipment, 2008]. La courbe de rétention est obtenue par morceaux grâce à trois appareils : le *Sand box* [Eijkelkamp Agrisearch

Equipment, 2007], le *Sand/Kaolin box* [Eijkelkamp Agrisearch Equipment, 2005a] et le *Pressure Membrane Apparatus* [Eijkelkamp Agrisearch Equipment, 2005b]. Dans le cadre de cette étude, seul le *Sand box* a été utilisé. Cet appareil explore la gamme de succion qui s'étend de 0 à 1000 mm. Nous avons prélevés 257 ENR. La courbe de rétention n'a pas été déterminée pour certains ENR.

2.6.3 Echantillons remaniés (ER)

Les échantillons remaniés (ER) sont des prélèvements de sols qui n'ont pas conservé leur structure in situ. Les prélèvements sont stockés soit dans les sacs plastiques, soit dans des boites aluminium tous les deux étanches. Les ER ont été principalement utilisés pour la détermination de la composition granulométrique 5 classes (argile, limon fin, limon gros, sable fin, sable grossier) par la méthode de Robinson effectuée par le Laboratoire des Sciences du Sol (Université d'Abomey-Calavi, Bénin). La détermination de la quantité de matière organique a été réalisée par le Laboratoire d'Analyse des Sols d'Arras (LAS)⁴. Il s'agit de la mesure SOL 04-05. L'intérêt de cette mesure est justifiée au paragraphe 2.6.1. Nous avons prélevé 58 ER au total. La quantité de matière organique a été déterminée pour 14 ER.

2.7 Anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation K_s

L'anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation est un paramètre du modèle numérique TopAMMA. Nous avons voulu mesurer cette anisotropie pour pouvoir juger de la pertinence de ce paramètre et de sa valeur dans le modèle hydrologique. Sur les sites tests, nous avons prélevé des ENR complémentaires. 2 ENR sont prélevés horizontaux et orthogonalement. Ils sont représentés sur le schéma 2.6. Nous analysons le rapport de la conductivité verticale sur la conductivité horizontale $Kratio$, défini par la relation suivante, avec K_{sh} , la conductivité hydraulique à saturation horizontale et K_{sv} la conductivité hydraulique à saturation verticale.

$$Kratio = \frac{K_{sh}}{K_{sv}}$$

2.8 Variabilité inter classe intra classe

La variabilité totale d'une propriété étudiée à méso-échelle possèdent deux composantes : la variabilité locale et la variabilité méso-échelle. L'analyse de la variabilité d'une propriété à méso-échelle est d'autant plus pertinente que la variabilité méso-échelle explique une partie importante de la variabilité totale. Pour cela nous définissons une classe qui délimite l'échelle locale de la méso-échelle. Nous quantifions le rapport entre la variabilité inter classe et la variabilité intra classe. Nous basons cette étude de variabilité sur l'analyse de variance. Définissons TSS (*Total Sum of Squares*) la somme des carrés des écarts totaux $TSS = \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x})^2$, BSS (*Between Sum of Squares*) la somme des carrés des écarts inter classes $BSS = \sum_i \sum_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$ et WSS (*Within Sum of Squares*) la somme des carrés des écarts intra classes $WSS = \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ avec la variable x , n individus i et k classes j . Ces 3 termes sont liés par la relation suivante :

$$TSS = BSS + WSS$$

Pour passer des sommes de carrés aux variances, il faut diviser ces termes par leurs degrés de libertés respectifs :

$$\sigma_{total}^2 = \frac{TSS}{n-1}; \sigma_{inter}^2 = \frac{BSS}{k-1}; \sigma_{intra}^2 = \frac{WSS}{n-k}$$

Pour comparer la variabilité inter classe à la variabilité intra classe, nous analyserons le rapport F défini par :

$$F = \frac{\sigma_{inter}^2}{\sigma_{intra}^2}$$

4. <http://www5.lille.inra.fr/las>

Nous définirons dans chacun des cas la variable, l'individu et la classe et énoncerons de manière indicative la valeur de F .

2.9 Analyse de distribution statistique

“*La compilation de nombreuses études montre que les propriétés de type statique telles que masse volumique, composants texturaux, humidité à différentes valeurs de pression sont normalement distribuées* []. *Les propriétés de type dynamique telles perméabilité à saturation, sorptivité, vitesse de pore, coefficient de dispersion hydrodynamique sont très souvent distribuées log-normalement* [].” [Vauclin, 1982]

Pour les différentes propriétés du sol étudiées, nous avons estimé la probabilité que l'échantillon soit issu d'une population dont la distribution suit une loi statistique (normale ou log-normale). Pour cela nous ajustons les paramètres de la loi statistique choisie sur notre échantillon puis nous effectuons un test de normalité. Le test de normalité utilisé est celui de Anderson-Darling. L'hypothèse nulle de ce test statistique est : “l'échantillon est issu d'une population qui suit la loi statistique choisie”. Le résultat du test (la p -value) est la probabilité de se tromper en refusant l'hypothèse nulle.

2.10 Analyse de la significativité des écarts entre les mesures

Afin de quantifier l'impact d'un paramètre (végétation, profondeur, lieu) sur la variabilité inter site des mesures, nous avons réalisé des tests statistiques sur la moyenne (test de Student), la médiane (test de Wilcoxon) et l'écart-type (test de Fischer). Ces tests ont respectivement pour hypothèse nulle : les deux populations ont des moyennes identiques, les deux populations ont des médianes identiques, les deux populations ont des écart-types identiques. Ainsi, pour une population donnée (par exemple les essais d'infiltration sur les sites de cultures), nous avons réalisé ces tests pour un paramètre donné (par exemple la profondeur). Dans ce cas les tests répondent à la question : Est-ce que les essais de cultures en surface ont la même moyenne, même médiane, même écart-type que les essais de cultures en subsurface ? Nous choisissons le seuil de 10 % pour le rejet de l'hypothèse nulle. Si le résultat du test (p -value) est inférieur à 10%, nous considérons que la variable statistique en question est significativement différente d'une population à l'autre.

2.11 Méthodes d'analyse de la macroporosité

Nous avons étudié le rôle hydrodynamique de la macroporosité grâce à 3 méthodes.

2.11.1 Analyse de la macroporosité par le biais de la rupture de pente dans les courbes $K(h)$

La présence et le rôle hydrodynamique de la macroporosité peuvent être analysés grâce à la forme des courbes $K(h)$. Si la régression linéaire de la fonction f défini par $\log(K) = f(h)$ montre une rupture de pente, cela signifie que le sol étudié ne suit pas le comportement proposé par Gardner [1958] ou le suit par morceaux. La rupture de pente peut être expliquée par la mise en fonctionnement de pores de tailles plus importantes et hydrauliquement plus actifs. Il s'agit de l'activation hydraulique d'une macroporosité (voir la figure 2.8). Pour une explication rigoureuse et détaillée, se référer au manuscrit de thèse de J.-P. Vandervaere [1995]. Nous analysons ici les ruptures de pentes, à savoir le rapport entre les coefficients directeurs des régressions linéaires avant et après la rupture de pente. Les régressions linéaires et les ruptures de pentes associées sont issues d'une optimisation par moindre carré.

2.11.2 Analyse de la macroporosité par le biais de la comparaison de Ks issus de méthodes différentes

Nous poursuivons l'analyse de la macroporosité par la comparaison de valeurs de Ks obtenus par deux méthodes différentes. D'une part, l'infiltrométrie à disque nous permet d'obtenir la courbe $K(h)$ proche de la saturation. En extrapolant cette courbe jusqu'à une succion nulle (i.e. à saturation), il est possible d'obtenir une valeur de Ks issue des mesures infiltrométriques. Cette extrapolation est réalisée selon la loi

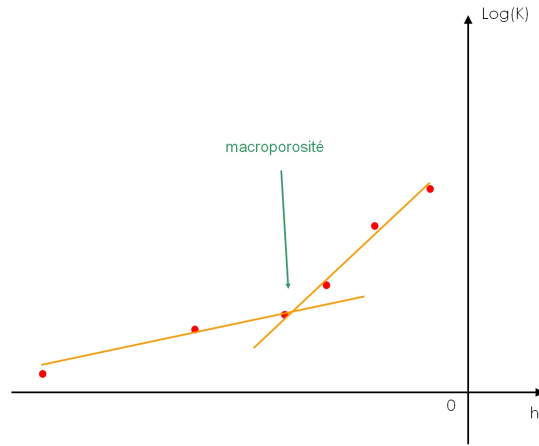


FIGURE 2.8 – Schéma explicatif de la mise en évidence de l’activation d’une macroporosité par l’analyse de la rupture de la courbe $K(h)$. Les valeurs de $\log(K)$ en fonction de h issues de la mesure sont en rouge. Les régressions linéaires en orange font apparaître une rupture.

qui relie de manière exponentielle la conductivité hydraulique à la succion [Gardner, 1958]. L’extrapolation est réalisée grâce aux 2 points disponibles ayant les plus faibles succions. D’autre part, la perméamétrie de laboratoire nous permet de mesurer le K_s d’un ENR. La comparaison de ces valeurs de K_s obtenus différemment nous renseigne sur le fonctionnement hydraulique du sol entre la plus faible succion explorée avec l’infiltromètre et la saturation (voir la figure 2.9). Si le K_s mesuré est plus grand que le K_s extrapolé, la comparaison met en avant la mise en fonctionnement hydraulique d’une macroporosité. Si les deux valeurs sont identiques, le sol ne présente pas de macropores hydrauliquement actifs. Théoriquement, le K_s mesuré ne peut pas être plus faible que le K_s extrapolé. Si le cas se présente, le couple est aberrant et ceci est sans doute du   une erreur de mesure. Malgré le fait qu’elles soient théoriquement comparables, cette comparaison fait intervenir des méthodes de mesures différentes qui ont chacune leurs erreurs de mesures propres. Il faut donc rester prudent dans cette comparaison. Nous définissons le rapport K_{pi} tel que :

$$K_{pi} = \frac{K_{spermeatre}}{K_{sinfiltrometre}}$$

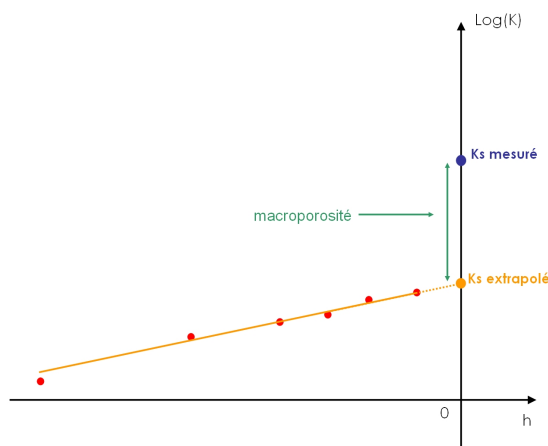


FIGURE 2.9 – Schéma explicatif de la mise en évidence de l’activation d’une macroporosité par comparaison entre K_s mesuré (perméamétrie) et K_s extrapolé (infiltrométrie à disque). Les valeurs de $\log(K)$ en fonction de h issues de la mesure sont en rouge. La régression linéaire et le K_s extrapolé en orange. Le K_s mesuré par perméamétrie est en bleu. L’écart entre les 2 K_s (en vert) met en évidence le rôle hydraulique de la macroporosité.

2.11.3 Analyse de la macroporosité par le biais d'une expérience qualitative simple

L'objectif est de mettre en évidence le rôle hydraulique de la macroporosité sur une face des fosses de manipulations. Cette expérience est basée sur la différence des temps caractéristiques de l'humectation du sol par capillarité et l'humectation du sol par advection dans les macropores. Pour se faire, nous utilisons une face verticale des fosses de manipulations. Nous alimentons la surface du sol en eau, proche de cette face. Si il y a une humectation du sol par advection dans les macropores, il y aura l'apparition de tâches humides sur la paroi verticale de la fosse avant l'arrivée du front d'humectation par capillarité. Nous avons creusé une rigole de 15 cm de largeur, 100 cm de longueur et 8 cm de profondeur. Cette rigole est parallèle à une face verticale d'une fosse de manipulations et distante de 40 cm. Nous avons arrosé le plus régulièrement possible afin d'observer une surface libre dans la rigole.

2.12 Estimation de la densité du couvert végétal en savane arborée

L'occupation du sol et en particulier le type de couvert végétal est un élément important de cette étude et plus généralement des recherches menées sur ce bassin hydrologique. Actuellement, les cartes de végétation à haute résolution utilisées pour décrire le couvert végétal du bassin manque de validation, en particulier pour les couverts denses (savane arbustive, savane arborée, forêt claire, forêt). Cette mesure de terrain a pour but d'apporter des éléments de validation dans la classification non supervisée. En cas d'invalidation, elle permet une réattribution des classes d'occupation du sol dans une classification semi-supervisée. Nous réalisons un comptage du nombre d'arbres et arbustes en savane arborée. La superficie cible est de un hectare. Le comptage est réalisé par tranche de hauteur des individus. La hauteur minimale des individus retenue est un mètre. La localisation géographique et l'aire effectives de ces comptages sont renseignées.

2.13 Méthode de contrôle de la cohérence d'éléments de la base de données pédologique

Pour espérer une valorisation de la base de données pédologique ORSTOM à l'étude actuelle, nous avons tenté de contrôler sa cohérence par de 2 aspects : (i) nous nous sommes rendus à l'emplacement géographique de 3 des 73 profils pour vérifier la cohérence des informations générales fournis (position sur le versant, pente, altitude ...), (ii) pour chacun des profils, nous avons prélevés des échantillons remaniés selon les profondeurs des horizons décrits par la base de données. Ceci afin de comparer leur granulométrie à celle de la base de données.

Chapitre 3

Résultats

Les mesures (identification et valeurs) ainsi que les descriptions réalisées durant cette mission font l'objet du rapport "Caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de l'Ouémé supérieur (Bénin) : Descriptions des sites de mesures et valeurs numériques" de Lokonon et al. [2012].

3.1 Dispersion intrinsèque aux mesures

3.1.1 Infiltrométrie à disque

Deux essais infiltrométriques ont été menés dans des conditions similaires. Cette redondance donne un ordre de grandeur de la variabilité intrinsèque à la mesure (voir le tableau 3.1). Le rapport maximal de Ks entre les deux essais est atteint pour une succion de 6 cm et est égale à 2,02.

| h (cm) | -8 | -6 | -3 | -1,5 | -0,75 | -0,5 |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 06 | $1,23.10^{-6}$ | $1,48.10^{-6}$ | $3,15.10^{-6}$ | $5,21.10^{-6}$ | $6,57.10^{-6}$ | $7,10.10^{-6}$ |
| 36 | $2,15.10^{-6}$ | $2,99.10^{-6}$ | $4,91.10^{-6}$ | $7,85.10^{-6}$ | NA | NA |
| 36/06 | 1,75 | 2,02 | 1,56 | 1,51 | NA | NA |

TABLE 3.1 – Tableau des conductivités hydrauliques K ($m.s^{-1}$) en fonction du potentiel matriciel h pour les essais 06 et 36 réalisés dans des conditions similaires. Rapport des K entre les 2 essais (sans unité). NA : indisponible.

3.1.2 Echantillons non remaniés (ENR)

Deux triplets et un couple d'ENR ont été prélevés dans des conditions similaires : (2084, 2505, 2502) ; (2092, 2617, 2507) ; (2508, 2076). Cette redondance donne un ordre de grandeur de la variabilité intrinsèque à la mesure (voir le tableau 3.2). Elle montre que ce type de mesures peut amener à des différences de Ks proche de la décade. Cette dispersion de la mesure de Ks est forte et semble avoir des conséquences sur l'analyse des résultats. Les mesures concernant les courbes de rétention étant en cours, une validation à ce sujet n'est pas possible à l'heure actuelle.

3.1.3 Echantillons remaniés (ER)

Deux couples d'ER ont été prélevés dans des conditions similaires : (18, 19) ; (15, 20). Cette redondance donne un ordre de grandeur de la variabilité intrinsèque à la mesure (voir le tableau 3.3). La détermination de la fraction sableuse est robuste d'un essai à l'autre. La détermination des fractions limoneuse et argileuse l'est moins.

| ENR | $Ks \text{ m.s}^{-1}$ |
|------|-----------------------|
| 2084 | $4,90.10^{-5}$ |
| 2505 | $6,26.10^{-5}$ |
| 2502 | $1,96.10^{-5}$ |
| 2092 | $4,83.10^{-5}$ |
| 2617 | $2,48.10^{-5}$ |
| 2507 | $1,59.10^{-4}$ |
| 2508 | $6,15.10^{-4}$ |
| 2076 | $8,58.10^{-5}$ |

TABLE 3.2 – Tableau des Ks prélevés dans des conditions similaires.

| ER | Refus (%) | Argile (%) | Limon fin (%) | Limon gros (%) | Sable fin (%) | Sable grossier (%) |
|----|-----------|------------|---------------|----------------|---------------|--------------------|
| 18 | 4.46 | 12.37 | 8.25 | 3.25 | 20.91 | 55.23 |
| 19 | 4.19 | 9.97 | 8.25 | 5.25 | 20.59 | 55.94 |
| 15 | 74.5 | 34.54 | 9.25 | 6.25 | 9.9 | 40.07 |
| 20 | 76.28 | 31.01 | 14.5 | 4.25 | 12.34 | 37.91 |

TABLE 3.3 – Tableau des compositions granulométriques pour des ER prélevés dans des conditions similaires. Le refus est la fraction massique pour laquelle les particules ont un diamètre supérieur à 2 mm.

3.2 Résultats de l'analyse de la macroporosité par le biais d'une expérience qualitative simple

Nous avons réalisé cette expérience sur les fosses de Bétérou Savane arborée Milieu 3 et Bétérou Savane arborée Milieu 1. Après 4 heures d'arrosage à 5 litres par heure, nous n'avons pas observé de tâches humides dues à la macroporosité (voir la photographie 3.1). Nous en concluons que (i) sur sol sec, il n'y a pas eu mise en évidence du rôle de la macroporosité dans des processus hydrodynamiques, (ii) la mise en évidence d'un tel processus est peut-être possible sur un sol humide. Nous ne pouvons pas répondre à cette question grâce à l'expérience mise en place ici.



FIGURE 3.1 – Photographie d'une tranchée creusée proche d'une fosse de manipulation. Les lignes noires permettent de mieux comprendre la perspective de la photographie. Les lignes bleues indiquent l'emplacement de la rigole. L'humectation du sol est continue autour de la tranchée alimentée en eau. Il n'y a pas, en profondeur, de tâche d'humectation isolée qui traduirait un fonctionnement hydrodynamique rapide associé à de la macroporosité. Photographie : Jean-Pierre Vandervaere, 2011.

3.3 Granulométrie des sites tests

3.3.1 Distribution statistique des fractions granulométriques

Après ajustement de lois normales aux 5 échantillons argile, limon fin, limon gros, sable fin et sable grossier, les p -value sont toutes inférieures à 10^{-3} . Ces tests indiquent que la probabilité de se tromper en refusant le fait que ces échantillons sont issus d'une loi normale est quasiment nulle. Ce propos peut-être simplifier en indiquant qu'il est raisonnable d'affirmer que les fractions granulométriques ne suivent pas une loi normale. Le fait qu'aucune distinction (occupation du sol, profondeur, lieu, position sur le versant) n'ait été faite dans cette analyse peut être expliquée ce non ajustement à une loi normale.

3.3.2 Une granulométrie bimodale

Nous avons regroupé les limons fin et gros au sein des limons et les sables fin et grossier au sein des sables pour pouvoir placer nos échantillons sur le triangle des textures. La figure 3.2 illustre la composition granulométrique de nos échantillons. Pour la majorité des échantillons, la texture est bimodale c'est à dire que la fraction de limon est plus faible que celle de sable et celle d'argile. de Condappa et al. [2008] ont mis en évidence le caractère bimodal de la texture des sols sub-tropicaux. Nous retrouvons ce caractère bimodal pour nos échantillons.

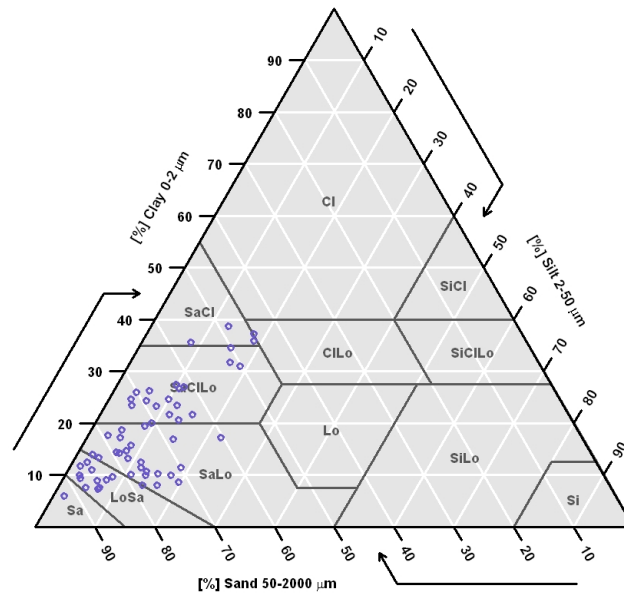


FIGURE 3.2 – Triangle des textures. Composition granulométrique des 58 échantillons prélevés. La classification proposée en fond est celle de l'USDA (*USDA soil texture classification*)

3.3.3 Variabilité inter classe intra classe

Les variables sont les fractions argileuse, limoneuse et sableuse, l'individu est l'ER et la classe est la combinaison d'un site, une occupation du sol et une profondeur. Nous disposons de 3 variables, 49 individus et 11 classes. La classe Nalohou Cultures Profondeur n'est pas représentée. Les ER complémentaires de versant sont intégrés à l'analyse.

Le rapport F est calculé pour chaque fraction granulométrique. Il est égal pour l'argile, le limon et le sable à 5,99, 10,00 et 5,86 respectivement. Ce rapport est remarquablement plus important pour les limons que pour les sables et les argiles. La fraction limoneuse est la fraction la plus stable d'un site donné. C'est ce qu'illustre la figure 3.3 qui montre que pour un site donné (par exemple Bétérou Cultures en vert sur la figure), les compositions granulométriques sont plutôt dispersées sur une droite ayant une fraction limoneuse constante (environ 5 % dans l'exemple).

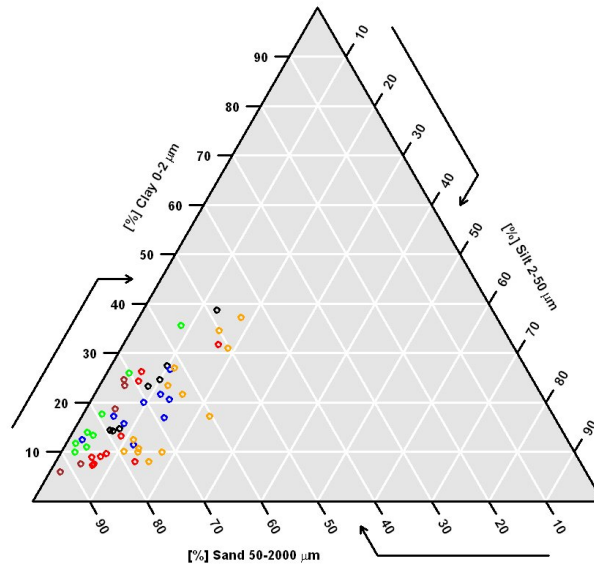


FIGURE 3.3 – Triangle des textures. Composition granulométrique des 58 échantillons prélevés. La couleur des points est fonction du lieu de prélèvement. Bétérou Savane arborée en bleu ; Bétérou Cultures en vert ; N'Dali Savane arborée en orange ; N'Dali Cultures en rouge ; Béléfoungou Savane arborée en noir ; Nalohou Cultures en marron.

3.3.4 Impacts de l'occupation du sol et de la profondeur

La composition granulométrique des sols est dépendante de l'occupation du sol. Le triangle des textures de la figure 3.4 illustre cette tendance. La fraction sableuse de la granulométrie moyenne en cultures est 10 % plus faible que la granulométrie moyenne en savane arborée. Ces 10 % sont compensés pour 6 % par les limons et 4 % pour les argiles. La significativité de cet écart dans la composition granulométrique n'a pas été vérifiée. Cette tendance peut être analysée par l'étude de la distribution statistique de chacune des fractions granulométriques. Pour chaque population granulométrique ayant la même occupation du sol (cultures ou savane arborée), nous calculons différents quantiles pour chacune des fractions granulométriques (argile, limon et sable) afin de tracer 3 diagrammes quantile-quantile (voir la partie droite de la figure 3.4). Les fractions argileuses et limoneuses en savane arborée sont plus grandes qu'en cultures sur l'ensemble de leur distribution statistique. Inversement, la fraction sableuse en savane arborée est plus petite qu'en cultures sur l'ensemble de la distribution statistique. De plus, que ce soit en savane ou en cultures, la composition granulométrique médiane présente le caractère bimodale discuté au paragraphe 3.3.2.

Une autre tendance apparaît entre la composition granulométrique et la profondeur de prélèvement. Les échantillons prélevés profondément semblent posséder une fraction sableuse plus faible et une fraction argileuse plus forte que les échantillons prélevés en surface (voir la figure 3.5). La significativité de cette tendance n'a pas été vérifiée.

En résumé, les sols étudiés présentent une texture bimodale. La fraction limoneuse est la fraction granulométrique la plus stable localement. Les processus pédologiques peuvent expliquer cette stabilité. Les échantillons issus des cultures possèdent une fraction sableuse plus importante que ceux issus de savane arborée. L'occupation du sol explique donc une partie de la variabilité spatiale de la granulométrie des sols. Ce résultat conforte le choix fait pendant le travail préliminaire d'explorer la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques de sols de surface par le biais de l'occupation du sol. De plus, les échantillons prélevés en surface possèdent une fraction argileuse plus importante que les échantillons prélevés en profondeur. Le lessivage des argiles, migration descendante des argiles dans le sol est une explication possible à ce résultat.

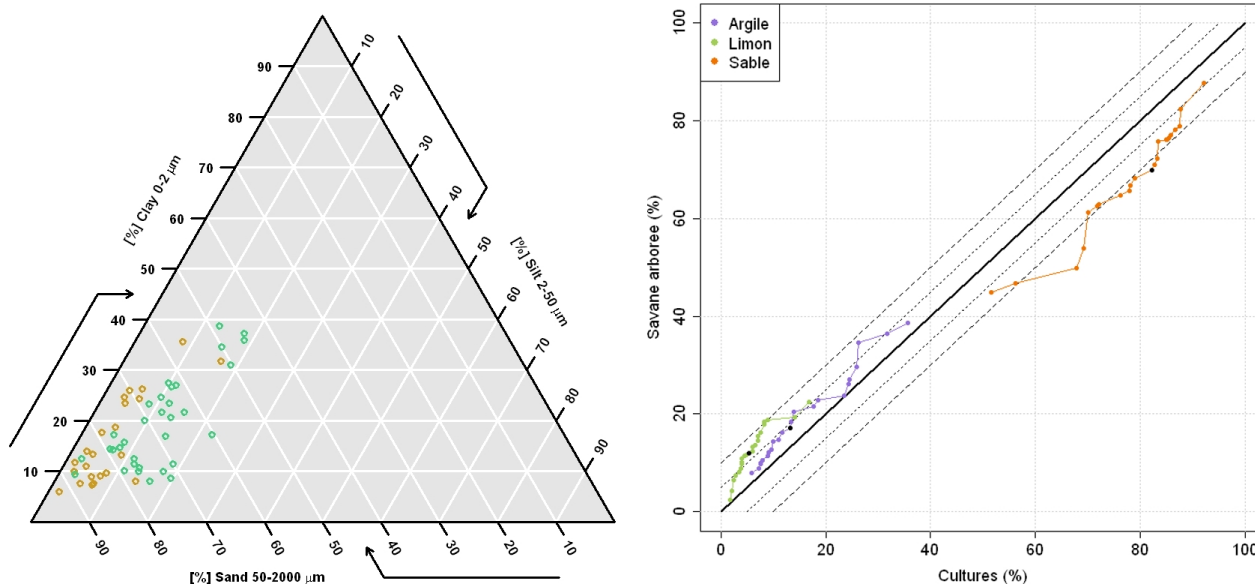


FIGURE 3.4 – **Figure de gauche** : Triangle des textures. Composition granulométrique des 58 échantillons prélevés. La couleur des points correspond au type d’occupation du sol sur lequel l’échantillon a été prélevé. Cultures en marron, Savane arborée en vert. Pas de différenciation selon la profondeur. **Figure de droite** : Diagramme quantile-quantile. Un digramme quantile-quantile est tracé pour chacune des fractions granulométriques (argile, limon et sable). Les points noirs représentent la fraction médiane. La première bissectrice est en trait continu gras. Les écarts de 5% à la première bissectrice sont en tirets courts, les écarts à 10% sont en tirets longs.

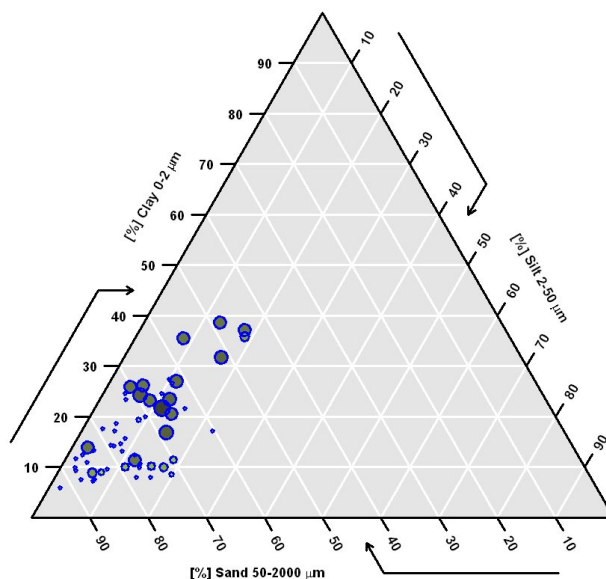


FIGURE 3.5 – Triangle des textures. Composition granulométrique des 58 échantillons prélevés. La taille et la couleur du cercle sont fonctions de la profondeur de prélèvement. La taille du cercle croît avec la profondeur, la clarté diminue avec la profondeur.

3.4 Courbes de rétention $h(\theta)$ des sites tests

L’analyse des courbes de rétention n’est pas possible en mars 2012 car les mesures sont en cours.

3.5 Courbes $K(h)$ des sites tests

3.5.1 Distribution statistique des $K(h)$

Après ajustement de lois log-normales aux 6 échantillons $K(h = -80mm)$, $K(h = -60mm)$, $K(h = -30mm)$, $K(h = -15mm)$, $K(h = -7,5mm)$ et $K(h = -5mm)$, les p -values respectives sont 0,80, 0,71, 0,64, 0,57, 0,78 et 0,88. Ces tests indiquent que la probabilité de se tromper en refusant le fait que ces échantillons sont issus d'une loi log-normale est respectivement de 80%, 71%, 64%, 57%, 78% et 88%. Il est donc raisonnable de ne pas exclure le fait que ces échantillons soient issus d'une population dont la distribution suit une loi log-normale. Ce propos peut-être simplifié en indiquant qu'il est raisonnable d'affirmer que la population de $K(h)$ suit une loi log-normale.

3.5.2 Variabilité inter classe intra classe

Dans ce cas, la variable est $K(h)$, l'individu est l'essai infiltrométrique et la classe est la combinaison d'un site, une occupation du sol et une profondeur. Nous disposons de 6 variables, 36 individus et 12 classes. Chaque classe comporte 3 individus.

Le rapport F est calculé pour chaque succion. Il s'étend de 2,98 à 5,20 avec une moyenne de 3,75. La variance inter classe est plus de 3 fois plus importante que la variance intra classe.

3.5.3 Analyse en composante principale des essais infiltrométriques

Une autre méthode permettant d'analyser la dispersion de cette population est l'analyse en composante principale (ACP). Celle-ci nous permet de trier les paramètres en fonction de leur pouvoir à expliquer la dispersion de notre population d'étude.

Une ACP est réalisée sur les 36 courbes $K(h)$. Les variables sont les 6 conductivités hydrauliques aux différentes succions. Les individus sont les 36 essais infiltrométriques. La première composante principale explique 85 % de la variance des individus, la deuxième en explique 12 %. Cette analyse inclut les variables qualitatives suivantes : occupation du sol, profondeur, lieu. Ces variables qualitatives ne sont pas utilisées pour construire les composantes principales. Chaque valeur des variables qualitatives a pour position le barycentre des individus possédant cette valeur. Ceci dans la projection des axes principaux. Le tableau 3.4 indique les coordonnées des différentes variables qualitatives renseignées. Le couple de valeur qui renseigne l'occupation du sol possède les valeurs les plus importantes. L'occupation du sol est le paramètre qui explique le mieux la variabilité des conductivités hydrauliques (voir figure 3.6). Le lieu est le dernier paramètre qui explique la dispersion des $K(h)$. Ainsi il est possible d'affirmer que le lieu de mesures n'a pas une influence prédominante sur la variabilité des mesures. Les sites tests possèdent tous la même classe pédologique (sesquioxydes de fer et manganèse) et la même sous-classe (sols ferrugineux tropicaux). Ils diffèrent néanmoins sur le groupe, le sous-groupe et la famille. Cette analyse en composantes principales, qui montre que les lieux n'ont pas une influence prédominante sur la variabilité des mesures, montre par la même occasion que les groupes, sous groupes et familles pédologiques n'ont pas d'influence prédominante non plus.

| Valeur des variables qualitatives | Coordonnées | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|
| | Dimension 1 | Dimension 2 |
| Cultures | 0.746 | 0.100 |
| Savane arborée | -0.746 | -0.100 |
| Surface | 0.613 | 0.037 |
| Profondeur | -0.613 | -0.037 |
| Bétérou | 0.494 | 0.200 |
| N'Dali | -0.198 | -0.427 |
| Djougou | -0.296 | 0.226 |

TABLE 3.4 – Tableau des coordonnées des valeurs de variables qualitatives pour les 2 premières composantes principales.

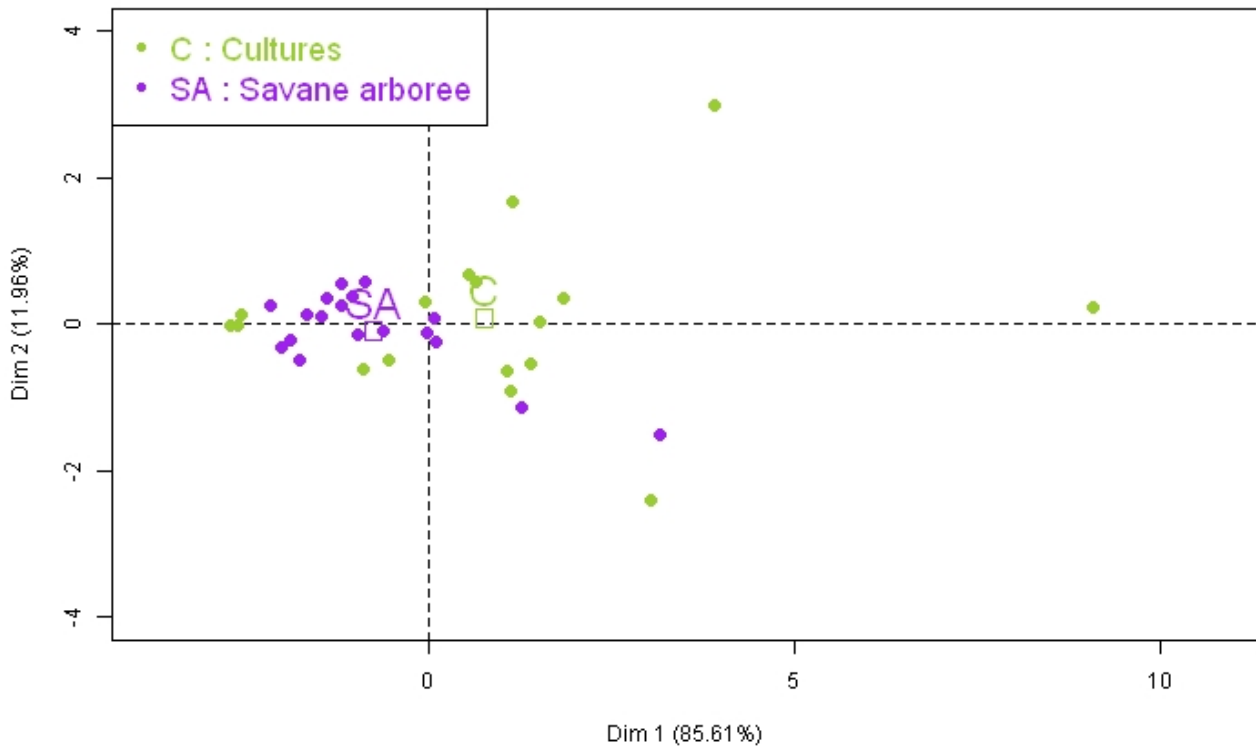


FIGURE 3.6 – Positions des individus (points ronds) sur les 2 premières composantes principales. La couleur correspond à la variable qualitative “Occupation du sol”. Cultures (C) en vert, savane arborée (SA) en violet. La position des carrés correspond au barycentre des individus possédant cette valeur de variable qualitative.

3.5.4 Paramètres explicatifs de la variabilité des mesures

Si l’on considère l’ensemble de la population des essais et que l’on réalise les tests sur la significativité des écarts de mesures décrits au paragraphe 2.10 sur le paramètre d’occupation du sol, nous ne rejetons pas l’hypothèse nulle (les moyennes et les médianes des sous populations sont égales). Si l’on réalise les mêmes tests uniquement pour les essais de surface, les moyennes et les médianes sont significativement différentes et les écart-types sont égaux. En d’autres termes, les courbes moyennes et médianes $K(h)$ en surface pour les cultures sont significativement différentes des mêmes courbes en surface pour les savanes arborées. La distribution (écart-type) autour de la courbe moyenne en surface pour les cultures n’est pas statistiquement différente de celle mesurée en surface pour les savanes arborées. Le graphique 3.7, en boîtes à moustaches, illustre ces écarts en terme de médiane. Rappelons que notre stratégie de mesures est basée sur un postulat (paragraphe 2.1) : la variable intermédiaire explique une partie significative de la variabilité spatiale des mesures de la variable d’intérêt. Le travail cartographique préparatoire (paragraphe 2.2) nous a permis de définir la variable intermédiaire : l’occupation du sol. L’analyse des courbes $K(h)$ valide, a posteriori, le choix de la variable intermédiaire. L’occupation du sol, explique une partie significative de la variabilité spatiale de la variable d’intérêt, ici la courbe $K(h)$.

En profondeur, les courbes $K(h)$ issues d’occupations du sol différentes, ne sont pas significativement différentes.

Les tests statistiques indiquent une différence significative entre les conductivités hydrauliques de surface et celles de subsurface. Cet écart reste significatif en moyenne et en médiane pour la sous population des essais de cultures alors qu’il devient non significatif pour la sous population des essais de savane arborée.

3.5.5 Analyse de la macroporosité par le biais de la rupture de pente dans les courbes $K(h)$

Nous disposons de 38 essais infiltrométriques. 17 d’entre eux, soit 45%, ne font pas apparaître de rupture de pente. Le rapport de coefficients directeurs est dans ce cas égal à 1. Pour les autres, les

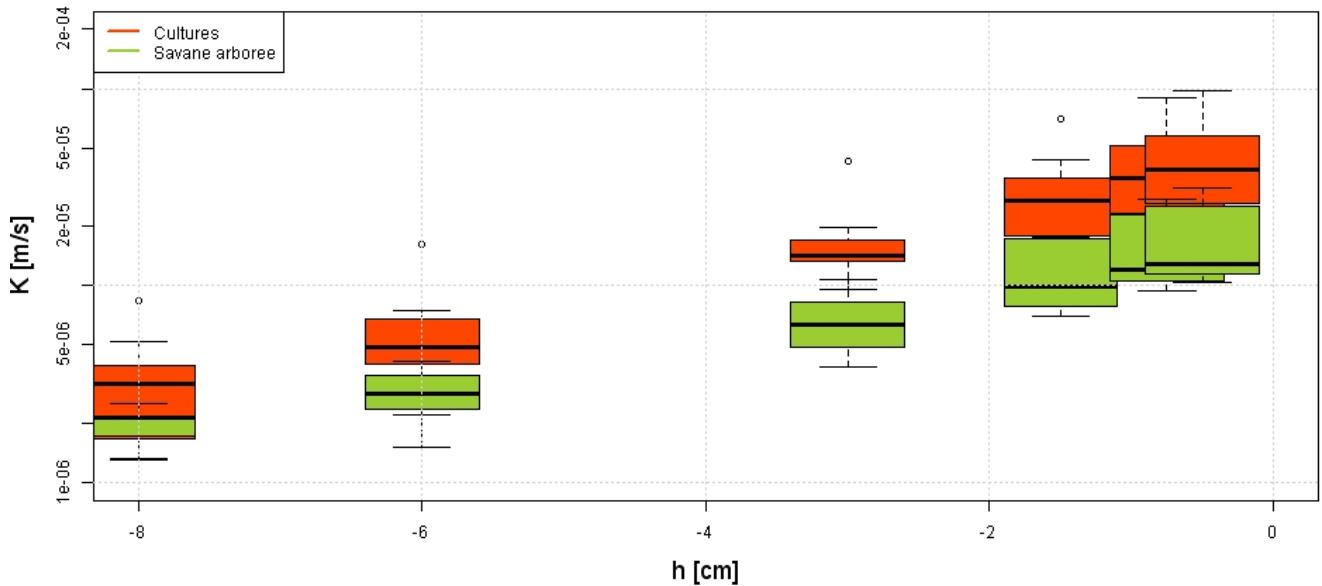


FIGURE 3.7 – Courbes $K(h)$ pour les essais de surface (profondeur = 0 cm) réparties en fonction de l’occupation du sol (cultures en orange, savane arborée en vert). Le graphique illustre la distribution statistique (“boîtes à moustaches”) des valeurs de conductivités hydrauliques pour chacune des succions explorées.

ruptures de pente sont observées sur des plages de succions différentes, à savoir [-40 cm -20 cm] et [-20 cm -10 cm]. Ces plages de ruptures sont dépendantes des succions choisies lors des essais infiltrométriques. Pour les 38 essais, les rapports minimal, médian, moyen et maximal sont respectivement 1,0, 1,85, 2,30 et 7,31. L’écart-type de cette population de rapports est de 1,62. L’analyse des ruptures de pente des courbes $\log(K) = f(h)$ fait apparaître la présence et le rôle hydrodynamique d’un type de macroporosité. Reste à vérifier que celle-ci joue un rôle sur l’hydrodynamique des versants. Cette vérification est possible grâce à la modélisation.

3.5.6 Mise en évidence du rôle de la matière organique dans la mouillabilité des sols de surface

Comme indiqué au paragraphe 2.6.1, les essais d’infiltrométrie à disque en surface possèdent une dynamique qui peut être expliquée par la présence de matière organique. Cette dynamique n’est plus observée en profondeur. Le graphique 3.8 illustre pour les 14 échantillons analysés la profondeur de prélèvement en fonction de la quantité de matière organique. Il apparaît très clairement que l’ensemble des échantillons de surface possèdent une quantité de matière organique supérieure à 10 g.kg^{-1} alors que les essais en profondeur présentent tous une quantité de matière organique inférieure à 10 g.kg^{-1} . Ce résultat confirme donc l’hypothèse faite quant au rôle de la matière organique sur la dynamique d’infiltration de l’eau dans les sols. Rappelons cette hypothèse. La matière organique présente un caractère hydrophobe. Cette hydrophobie diminue avec l’humectation de la matière organique. La présence de matière organique dans un sol sec diminue la capacité d’infiltration d’eau dans le sol. La capacité d’infiltration du sol croît à mesure de l’humectation du sol et donc de la matière organique. De nombreuses recherches ont tenté d’établir une relation générale entre la présence de matière organique des sols et le degré d’hydrophobicité des sols. Les tentatives sont contradictoires [Doerr et al., 2000]. Il n’est donc pas possible de comparer la valeur critique de notre expérience (10 g.kg^{-1}) à des valeurs critiques de la littérature. Il est à noter que la variabilité de la quantité de matière organique est bien plus forte en surface qu’en profondeur. La diversité des couverts végétaux (cultures, savane arborée) et la forte variabilité spatiale de l’humus (accumulation locale due au micro relief, densité du couvert végétal surplombant) explique la forte variabilité de matière organique en surface.

En résumé, le rapport de variance des 6 variables $K(h)$ étudié est élevé. De plus, une analyse en composante principale indique que le paramètre qui explique le mieux la dispersion des $K(h)$ est l’occu-

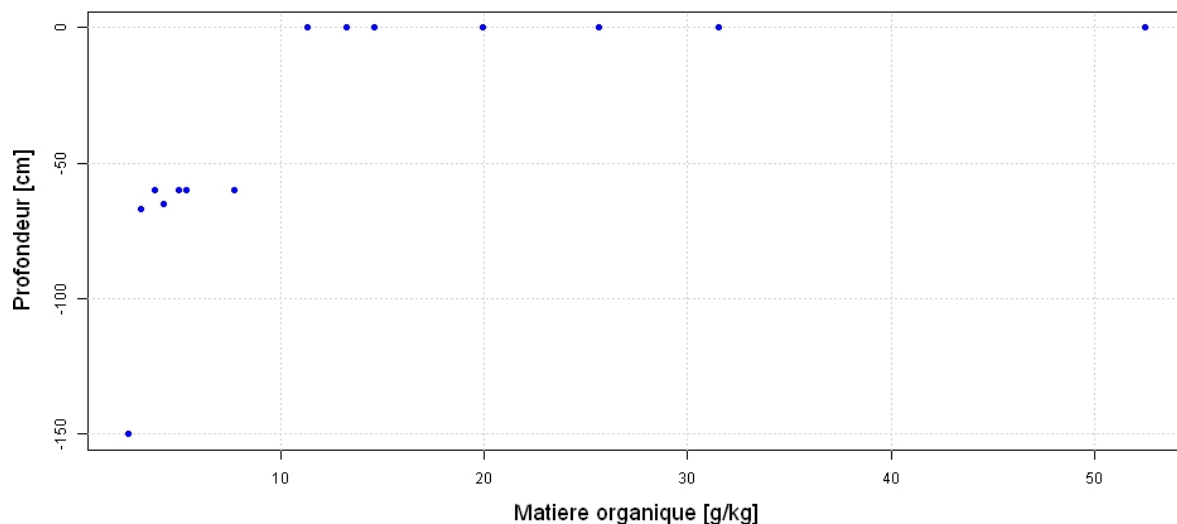


FIGURE 3.8 – Profondeur de prélèvement en fonction de la quantité de matière organique. 14 échantillons analysés

pation du sol. l'ACP montre aussi le faible impact du site de mesures sur la dispersion des conductivités $K(h)$. En surface, les courbes $K(h)$ diffèrent significativement en moyenne et en médiane en fonction de l'occupation du sol. Ce résultat confirme notre stratégie d'échantillonnage.

3.6 Valeurs de K_s des sites tests

3.6.1 Distribution statistique des K_s

La loi log-normale qui ajuste notre échantillon de 86 individus possèdent une moyenne de -9,30 et un écart-type de 1,63. La p -value du test de Anderson-Darling est de 0.76. Le test indique que la probabilité de se tromper en refusant le fait que l'échantillon étudié est issu d'une loi log-normale est de 76 %. Il est donc raisonnable de ne pas exclure le fait que notre échantillon soit issu d'une population dont la distribution suit une loi log-normale. Ce propos peut-être simplifié en indiquant qu'il est raisonnable d'affirmer que la population de K_s des sites tests suit une loi log-normale.

3.6.2 Variabilité intra site inter site

Dans ce cas, la variable est K_s , l'individu est l'ENR et la classe est la combinaison d'un site, une occupation du sol et une profondeur. Nous disposons d'une variable, 48 individus et 11 classes (la classe Nalohou Cultures Profondeur n'est pas représentée). Les ENR complémentaires de versant sont intégrés à l'analyse.

Le rapport F est de 1,32. Ce rapport semble relativement faible en comparaison aux rapports F des courbes $K(h)$. Deux explications sont envisageables : soit la variabilité inter classe est plus faible, soit la variabilité intra classe est plus forte. Dans le premier cas, cela signifie que la dépendance du K_s aux caractéristiques de la mesure (lieu, végétation, profondeur) est bien moindre que celle des courbes $K(h)$ aux mêmes caractéristiques. Cette explication n'est pas convaincante car la conductivité hydraulique à saturation K_s est plus sensible à la structure du sol que la courbe $K(h)$. Or la structure du sol est dépendante de la végétation (activité faunique, structure et densité racinaire), de la profondeur (horizon pédologique, compaction du sol) et du lieu. Dans le second cas, il existe deux hypothèses possibles. Soit la variabilité spatiale du K_s à l'échelle locale est plus forte que celle des courbes $K(h)$, soit la dispersion de la mesure du K_s est plus importante que celle de la mesure des courbes $K(h)$. Le paragraphe 3.1.2 a montré une forte dispersion de la mesure pour le K_s . Ce facteur n'est donc pas négligeable.

3.6.3 Paramètres explicatifs de la variabilité des mesures

Les écarts observés de Ks entre les mesures en forêt et en cultures ne sont pas significatifs en moyenne, en médiane et en écart-type. En réduisant les tests aux Ks de surface, ces écarts restent non significatifs. Le nombre de mesures en profondeur est trop faible pour appliquer ces tests aux Ks de profondeur uniquement.

Les tests qui mettent en jeu le paramètre de profondeur ne font pas apparaître d'écarts significatifs.

3.6.4 Mesure de l'anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation

Nous analysons 12 triplets de conductivités hydrauliques à saturation Ks . Un triplet est composé d'un Ks vertical et deux Ks horizontaux. Pour connaître l'emplacement des prélèvements, se référer au rapport annexe de Lokonon et al. [2012]. Nous ne possédons pas de mesures de Ks pour Nalohou Cultures Profondeur. Nous possédons un triplet pour N'Dali Savane arborée Profondeur de 160 cm.

Pour les 24 $Kratio$, la moyenne est de 1,83 et l'écart-type de 2,57. Les valeurs extrêmes de ce rapport sont 0,01 et 12,47. En distinguant les rapports en fonction de la profondeur de prélèvement, ces valeurs ne changent pas fondamentalement. Le rapport moyen est de 2,59 en surface et de 1,08 en profondeur. Le seul rapport supérieur à 10^1 se trouve en surface. Les 3 $Kratio$ inférieurs à 10^{-1} se situent en profondeur. En d'autres termes, 83% des rapports calculés se trouvent entre 10^{-1} et 10^1 .

Sous l'hypothèse d'un fonctionnement à deux Ks (un horizontal et un vertical), le Ks doit être isotrope dans le plan horizontal. Pour un triplet de Ks donné, il est possible de comparer les 2 valeurs de Ks horizontaux pour juger de l'isotropie dans le plan horizontal. Nous disposons de 12 rapports. La valeur médiane de ce rapport est de 1,37 et 75 % de ces rapports sont compris entre 10^{-1} et 10^1 .

L'anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation des sols de surface semble moins forte que celle implémentée dans le modèle TopAMMA et pas systématiquement dans le sens d'une conductivité hydraulique à saturation horizontale plus importante que la verticale. De plus l'anisotropie du Ks dans le plan vertical n'est pas plus marquée que l'anisotropie dans le plan horizontal. L'introduction dans le modèle TopAMMA, d'une anisotropie du Ks dans le plan vertical sans l'introduction d'une anisotropie dans le plan horizontal ne peut pas être justifiée par ces mesures. Il me semble que cela traduit le fait que l'anisotropie introduite artificiellement dans le modèle est un moyen de compenser un ou plusieurs processus qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. La mission entreprise ne permet pas de déterminer quels sont les processus en jeu, il est néanmoins possible d'émettre des hypothèses alternatives. La première alternative consiste à considérer un double fonctionnement de l'hydrodynamique des sols. Ces derniers étant composé d'une matrice poreuse et d'une macroporosité. La seconde alternative est de considérer la topographie de l'interface surface subsurface. Le seul fait que cette interface possède un relief propre permet d'expliquer la production de débits en bas de versant [Hopp and McDonnell, 2009].

En résumé, les conductivités hydrauliques à saturation mesurées sur les versants des sites tests sont distribuées selon une loi log-normale. Elles possèdent une forte variabilité locale. Il existe deux causes possibles à cette forte variabilité locale. La première hypothèse est la faible précision de mesures par cette méthode (modification voire destruction de la structure du sol lors du prélèvement de cylindre et le transport, liquéfaction des échantillons lors de leur mise à la saturation avant la mesure au perméamètre de laboratoire ...). La seconde est la forte variabilité locale de la conductivité hydraulique à saturation (forte variabilité locale de la macroporosité hydrauliquement active). Par conséquent, cette forte variabilité locale ne permet pas d'observer d'écarts significatifs selon l'occupation du sol et la profondeur. Il n'est donc pas possible de proposer, à l'échelle de l'Ouémé supérieur, une caractérisation spatiale de la conductivité hydraulique à saturation par le biais de la connaissance de l'occupation du sol. De plus ces mesures ne mettent pas en évidence l'existence d'une anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation.

3.7 Valeurs des Ks de la coupe Djougou-N'Dali

Nous disposons de 126 Ks pour la coupe Djougou-N'Dali. Ils sont répartis sur 21 sites comprenant chacun 6 Ks . 3 UCP possèdent plusieurs occurrences sur la coupe. Les UCP 28, 48, 57 sont dans ce cas et possèdent chacune 2 occurrences. Ces prélèvements sont distants et appartiennent à des occurrences différentes de chacune des UCP.

3.7.1 Distribution statistique des Ks

La loi log-normale qui ajuste notre échantillon de 126 individus possèdent une moyenne de -10,85 et un écart-type de 1,55. Selon le test statistique de Anderson-Darling, la probabilité de se tromper en refusant l'hypothèse nulle, à savoir que l'échantillon étudié est issu d'une loi log-normale est de 86 %. Ce résultat est illustré par la figure 3.9.

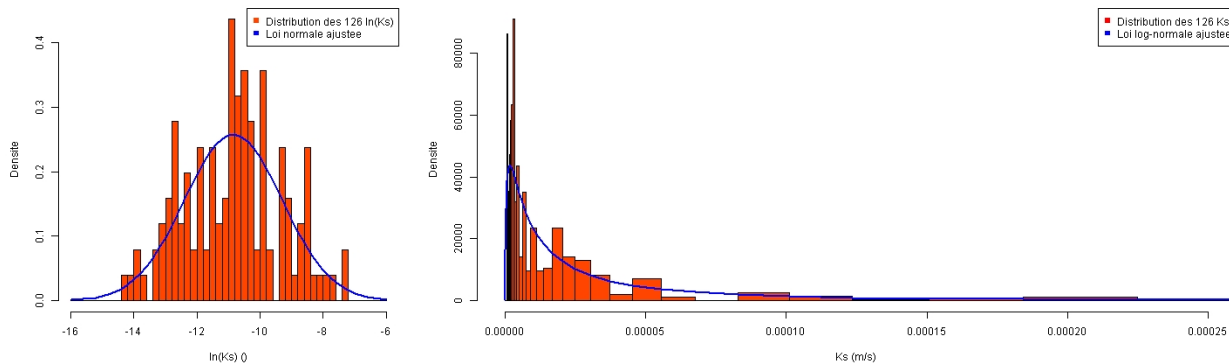


FIGURE 3.9 – Distribution des valeurs de Ks de la coupe Djougou-N’Dali avec la loi log-normale correspondante.

3.7.2 Variabilité inter classe intra classe

Dans ce cas, la variable est le Ks , l’individu est l’ENR prélevé sur la coupe Djougou-N’Dali et la classe est l’UCP. Nous disposons de 126 individus et 18 classes. 15 classes possèdent 6 individus, 3 classes possèdent 12 individus.

Le rapport F est de 3,48. Les ENR ayant été prélevés dans la majorité des cas sur le même site, cette information ne distingue pas la variance intra classe due au site de la variance intra classe due à l’UCP. Pour répondre partiellement à cette interrogation, nous avons réalisé la même analyse sur les ENR de même UCP mais prélevés dans des zones distinctes géographiquement. Dans ce cas, le rapport F est égal à 1,10. Cette chute peut s’expliquer par le fait que la variance intra classe est majoritairement portée par la variance interne à l’UCP. Ainsi les UCP n’explique pas la variabilité spatiale des Ks de la coupe. Cette chute peut aussi être expliquée par la baisse de la variance inter classe car celle-ci est basée sur 3 classes et est donc moins forte a priori que celle basée sur 18 classes. La réalité est sans doute une combinaison des deux explications.

3.7.3 Significative des écarts sur la médiane des Ks

Nous cherchons ici à savoir si les écarts entre Ks sont significatifs selon leur regroupement par UCP, sous-classe pédologique ou classe pédologique. Nous avons appliqué le test statistique de Kruskal-Wallis. Ce dernier teste si les échantillons étudiés proviennent de la même distribution en comparant leurs médianes. L’hypothèse nulle est : “Les échantillons ont la mêmes médianes”. Il nous faut tester la significativité des écarts de Ks au sein et à l’extérieur des objets (UCP, sous-classe et classe). Si les écarts sont significativement différents au sein et à l’extérieur de l’objet, cet objet n’est pas pertinent. Par contre, si les écarts ne sont pas significativement différents au sein de l’objet mais sont significativement différents à l’extérieur, alors l’objet devient pertinent.

La p -value du test de Kruskal-Wallis sur les UCP est inférieure à 10^{-2} . Les médianes des Ks regroupés par UCP sont significativement différentes. Par contre au sein des UCP 28, 48 et 57, la p -value est respectivement de 0,054, 0,52 et 0,11. Le test indique dans ce cas que pour certains UCP, les Ks sont statistiquement semblables et que pour d’autres UCP, les Ks sont statistiquement différents. Il n’est pas possible de conclure clairement sur la pertinence de l’UCP pour différencier les valeurs de Ks . La p -value du test de Kruskal-Wallis sur les sous-classes pédologiques est inférieure à 10^{-3} . Les médianes des Ks des sous-classes sont significativement différentes. La p -value au sein de la sous-classe “sols ferrugineux

tropicaux” est de 0,17. Avec le seuil critique de 0,10 sur la p -value, il est raisonnable d’indiquer que les Ks qui ont pour sous-classe “sols ferrugineux tropicaux” ne présentent pas de médianes significativement différentes. La sous-classe pédologique est ainsi un niveau de détail pédologique pertinent pour distinguer les Ks de la coupe Djougou-N’Dali. La figure 3.10 illustre ce propos. Finalement, la p -value du test de Kruskal-Wallis sur les classes pédologiques est inférieure à 10^{-2} . Les médianes des classes sont significativement différentes. La p -value au sein de la classe “Sols ferrallitiques” est inférieure à 10^{-2} . Les médianes au sein de cette classe sont significativement différentes. La classe pédologique n’est pas pertinente pour distinguer les valeurs de Ks .

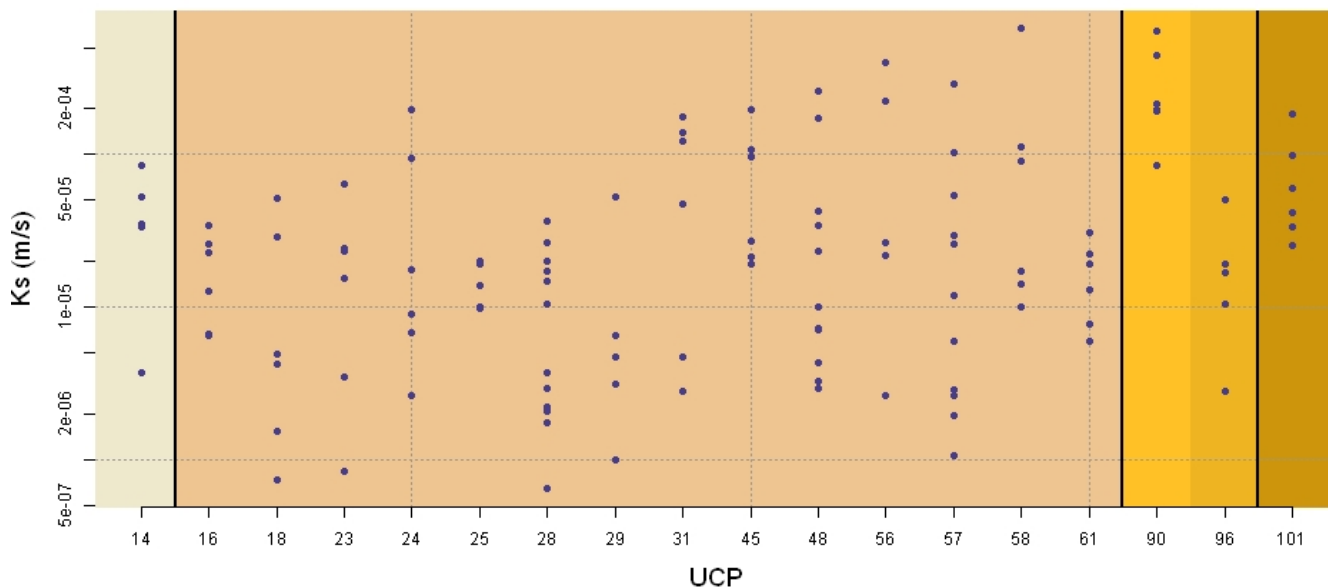


FIGURE 3.10 – Valeurs de Ks de la coupe Djougou-N’Dali en fonction des unités cartographiques pédologiques (UCP). Le fond est coloré en fonction de la sous-classe pédologique. Les lignes continues verticales noires indiquent les séparation de classes pédologiques.

La sous-classe pédologique explique au mieux la variabilité des Ks sur la coupe Djougou-N’Dali. Pour illustration, la figure 3.11 représente les sous-classes pédologiques de l’Ouémé supérieur.

En résumé, il est raisonnable d’affirmer que les Ks des 126 échantillons prélevés sur la coupe Djougou-N’Dali suivent une loi statistique de type log-normale. Chaque classe pédologique regroupe une diversité de sols trop importante, ce qui ne permet pas de distinguer les Ks par classe. Les UCP distinguent les sols de manière trop précise, ce qui rend les valeurs de Ks sensibles au lieu de prélèvement. Ces unités cartographiques pédologiques ne permettent pas de distinguer les Ks de la coupe Djougou-N’Dali. Finalement, la sous-classe pédologique est le niveau de précision pertinent pour discriminer les Ks de la coupe Djougou-N’Dali. Les Ks sont semblables au sein de chaque sous-classe et distincts d’une sous-classe à l’autre. Ce résultat conforte le choix fait pendant le travail cartographique de ne pas tenter d’expliquer la variabilité des propriétés hydrodynamiques des sols de surface grâce à l’information pédologique.

3.8 Valeurs de Ks issues de méthodes de mesures différentes

Sur les 36 essais infiltrométriques analysés, 31 possèdent une valeur de Ks associée. Nous basons notre analyse sur ces 31 couples. Un seul couple est aberrant, ce qui nous permet de considérer que nos mesures sont de qualités correctes. Les valeurs minimale, médiane, moyenne et maximale de Kpi sont respectivement : 1,1, 4,4, 6,4 et 30,6. L’écart-type est de 6,43. La valeur minimal de 1,1 indique qu’il n’y a pas pour le sol en question (à savoir N’Dali Cultures Milieu 2 Surface) de rôle hydraulique de la macroporosité. La valeur maximal de Kpi de 30,6 (atteinte à Béléfoungou Savane arborée Haut 3 Profondeur 60 cm) montre que la macroporosité joue un rôle important dans le comportement hydraulique du sol proche de la saturation. Cet effet est non négligeable car il est observé sur l’ensemble des couples avec une valeur médiane de 4,4.

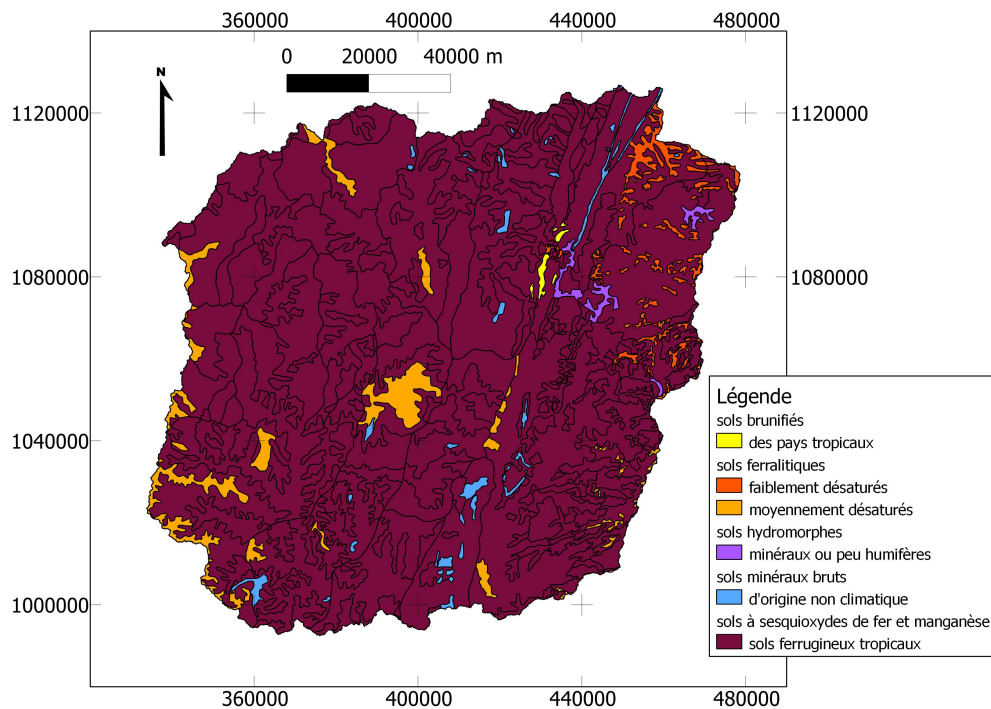


FIGURE 3.11 – Carte pédologique de reconnaissance de l’Ouémé supérieur. Classes et sous-classes pédologiques. 4 des 5 classes pédologiques ne possèdent qu’une seule sous-classe pédologique. La classe pédologique des sols ferrallitiques possèdent 2 sous-classes. Projection : UTM 31 Nord ; unité : mètre

Le rapport de variance F pour K_{pi} est égal à 1,7. Le seul élément à remarquer dans la distinction de sous-population de ce rapport est le suivant. La médiane des K_{pi} de profondeur est de 2,9 alors que celle des K_{pi} de surface est de 6,5. Cela signifie que le rôle de la macroporosité en question dans ce paragraphe est plus marqué en surface qu’en profondeur. Il est possible d’expliquer ce résultat par le fait que si la macroporosité est produite par l’activité faunique (galerie d’insectes) et la présence végétale (réseau de racines) alors il est cohérent qu’elle soit plus marquée en surface qu’en profondeur. Une distinction par rapport à l’occupation du sol n’apparaît pas.

3.9 Synthèse de l’exploration de la macroporosité

La présence d’une macroporosité est, sur certains sites, indéniables (voir la photo 3.12). Néanmoins, la mise en évidence du rôle hydraulique de cette macroporosité est moins triviale. L’exploration du rôle de la macroporosité a fait l’objet de 3 expériences et analyses. L’expérience qualitative n’a pas permis de mettre en évidence le rôle hydraulique d’une possible macroporosité. L’analyse des mesures infiltrométriques et perméamétriques met en évidence deux macroporosités et leur rôle hydraulique. Ces résultats ne sont pas contradictoires. L’état hydrique initial des sols est différent d’une expérience à l’autre. Dans le cas de l’expérience qualitative, le sol est initialement sec alors qu’il est proche de la saturation pour les deux autres analyses.

3.10 Relations entre granulométrie et variables hydrodynamiques

3.10.1 Granulométrie et courbes de rétention $h(\theta)$

Les courbes de rétention mettant pas disponibles en mars 2012, cette analyse croisée n’est pas possible actuellement. Néanmoins, rappelons l’enjeu de cette analyse. Il est question ici de savoir si les courbes granulométriques peuvent être utilisées pour produire des courbes de rétention par le biais de fonctions de pédotransfert. Il faut comparer les deux types de courbes de rétention pour pouvoir juger si les courbes granulométriques sont de bons estimateurs des courbes de rétention. L’obtention des courbes



FIGURE 3.12 – Photographie de macropores observés sur le billon d'un champ d'arachide récolté. N'Dali Cultures Milieu 2, le 23 novembre 2011. Les macropores sont très probablement le résultat de l'activité faunique.

granulométriques étant bien plus rapide et bien moins coûteuse, cette estimation serait intéressante d'un point de vue pratique, en plus de l'être d'un point de vue scientifique.

3.10.2 Granulométrie et conductivités hydrauliques

Nous avons vérifié s'il existait des corrélations statistiques entre les fractions granulométriques et les différentes conductivités hydrauliques ($6 K(h)$ issues des mesures infiltrométriques et un K_s issu de la mesure par perméamétrie). Nous n'avons relevé aucune corrélation notable. Cette absence de lien statistique entre granulométrie et conductivité hydraulique peut être expliquée par le fait que la granulométrie renseigne plutôt sur les effets de texture du sol, alors que les conductivités hydrauliques à faible désaturation ou saturation renseignent plutôt sur la structure des sols.

3.11 Contrôle de la cohérence de la base de données pédologique : caractéristiques générales des sites et granulométrie

Nous nous sommes rendus sur 3 des 73 profils de la base de données pédologiques, appartenant à l'Ouémé supérieur. Nous avons comparé les compositions granulométriques des échantillons prélevés sur ces 3 sites (8 prélèvements en fonction des horizons) aux compositions granulométriques de la base de données. Les différences observées sont importantes. Les différences maximales rencontrées pour chacune des fractions argileuse, limoneuse et sableuse sont respectivement de 8,0 %, 30,1 % et 27,3 %. La figure 3.13 illustre cette comparaison. Nous considérons qu'il n'est pas judicieux de comparer directement les granulométries de la base de données aux granulométries de nos manipulations. Néanmoins, ces deux ensembles de données peuvent être exploités indépendamment.

En résumé, la cohérence propre que possède la base de données permet d'explorer ces données granulométriques, ce que nous ferons. Néanmoins, nous ne comparerons pas les granulométries de la base de données aux granulométries issues de cette mission.

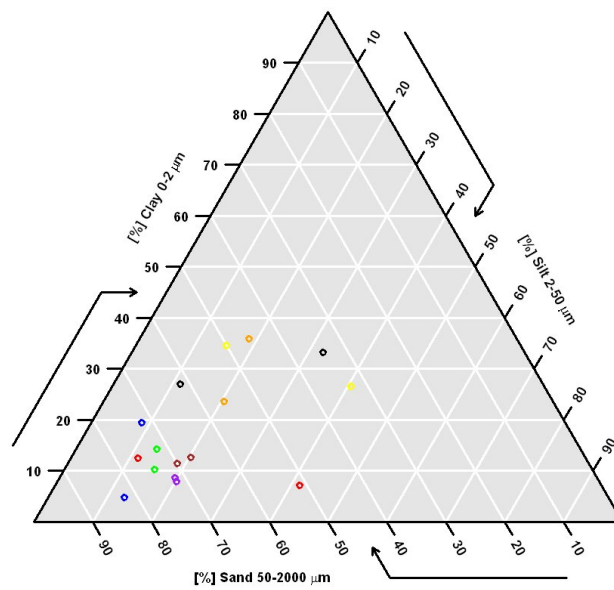


FIGURE 3.13 – Triangle des textures. Comparaison deux à deux des compositions granulométriques issues de la base de données pédologique et des mesures effectuées durant la mission. Les échantillons comparés (2 points de la même couleur) ont les mêmes coordonnées géographiques et une même profondeur.

Conclusion et perspectives

Dans la perspective de proposer une distribution spatiale des paramètres traduisant le fonctionnement hydraulique des sols dans le modèle méso-échelle TopAMMA, l'objectif principal de cette mission était la caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface de l'Ouémé supérieur. Pour atteindre cet objectif, nous avons mis en place une stratégie d'échantillonnage basée sur un travail cartographique préliminaire. Cette phase de travail nous a permis de choisir l'occupation du sol comme variable permettant d'explorer la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface. Les mesures ont été réalisées en collaboration étroite avec le LHME (Université Abomey-Calavi, Bénin). Nous avons adopté une approche basée sur la complémentarité entre des mesures de terrain in situ et des mesures de laboratoire.

Nous avons montré que la sous-classe pédologique est le degré d'information pédologique qui explique le mieux la variabilité spatiale des conductivités hydrauliques à saturation prélevés sur une coupe pédologiquement représentative de l'Ouémé supérieur. La sous-classe pédologique "sols ferrugineux tropicaux" représentant 92 % de la superficie du bassin versant, ce résultat conforte notre stratégie de mesures qui a consisté à ne pas expliquer la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface de l'Ouémé supérieur en fonction de l'information pédologique. L'analyse des mesures montrent des différences entre les compositions granulométriques des cultures et celles des savanes arborées. Les courbes $K(h)$ moyennes et médianes des sols de surface en cultures sont significativement différentes des mêmes courbes en savane arborée. Ces résultats valide le choix fait de proposer une caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface par le biais de l'occupation du sol. La forte variabilité des mesures de Ks ne permet pas de distinguer cette variable en fonction de l'occupation du sol. La dispersion intrinsèque à la mesures du Ks peut expliquée une partie de la variabilité de ces mesures.

Plusieurs objectifs secondaires ont été explorés, à savoir la mise en évidence de l'anisotropie du Ks , la mise en évidence du rôle hydraulique de la macroporosité, l'estimation de la densité du couvert végétal en savane arborée et la vérification d'une base de données pédologique.

Nous avons mesuré une faible anisotropie du Ks en comparaison aux anisotropies actuellement utilisées dans la modélisation TopAMMA. Nous pensons que cela traduit le fait que l'anisotropie introduite artificiellement dans le modèle est un moyen de compenser un ou plusieurs processus qui ne sont pas pris en compte par ce dernier.

Nous avons pu observer des macropores pour certains sols rencontrés. Concernant le rôle de la macroporosité dans le fonctionnement hydraulique des sols, différentes manipulations ont été menés. Le rôle de la macroporosité n'est pas évident, il n'est pas exclu. Les mesures mettent en évidence une macroporosité hydrauliquement active. La modélisation numérique pourra apporter des éléments de réponse au rôle de cette macroporosité que ce soit à l'échelle de la colonne de sol ou à l'échelle du versant.

L'estimation de la densité du couvert végétal en savane arborée avait pour but d'apporter des éléments de validation dans la classification non supervisée des cartes de végétation à haute résolution. Ces mesures n'ont pas fait l'objet d'analyse dans ce rapport. Elles seront exploitées dans un travail à venir.

Grâce aux prélèvements et observations réalisés, nous considérons que la base de données pédologique de l'ORSTOM possède une cohérence propre permettant de valoriser ses données granulométriques. Ce que nous ferons dans un travail à venir. Cependant, il ne nous semble pas raisonnable de comparer directement nos mesures granulométriques à celles de la base de données.

Nous avons avancé sur la connaissance des sols de l'Ouémé supérieur mais cette analyse n'est pas exhaustive. Des mesures sont actuellement en cours et les résultats doivent être analysés. Cette étude de terrain s'articule avec une modélisation à méso-échelle. Le travail à venir consiste à proposer la première distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de surface de l'Ouémé supérieur basée sur l'occupation du sol. Ces propriétés devront ensuite être traduites en paramètres du modèle TopAMMA. L'apport de la distribution spatiale de ces paramètres dans la modélisation du cycle hydrologique de l'Ouémé supérieur pourra être discutée.

Bibliographie

- Angulo Jaramillo, R., Galle, S., Boubkraoui, S., Bouchez, J., de Condappa, D., Derive, G., Gohoun Goussou, A., Haverkamp, R., Reggiani, P., Soria Ugale, J., and Afouda, S. (2001). Bénin 2000 - hydrologie du sol propriétés hydrodynamiques des sols du bassin versant de la donga et du transect d'ananinga. Rapport de mission, IRD-LTHE.
- Bel, C. (2010). Teledetection au benin - etablissement d'une carte d'occupation du sol et etude de la dynamique de la vegetation. Technical report, LTHE/Universite Joseph Fourier - Grenoble I.
- de Condappa, D. (2006). Paramétrisation du bassin de la donga en vue de la modélisation avec power. Rapport technique, IRD.
- de Condappa, D., Galle, S., Dewandel, B., and Haverkamp, R. (2008). Bimodal zone of the soil textural triangle : Common in tropical and subtropical regions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1) :33–40.
- Doerr, S., Shakesby, R., and Walsh, R. (2000). Soil water repellency : its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1-4) :33–65.
- Dubroeuq, D. (1977a). Carte pédologique de reconnaissance de la république populaire du bénin - feuille de parakou. Notice explicative, ORSTOM.
- Dubroeuq, D. (1977b). Carte pédologique de reconnaissance de la république populaire du bénin - feuille de savé. Notice explicative, ORSTOM.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2005a). *Operating instructions - 08.02 Sand/Kaolin box*.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2005b). *Operating instructions - 08.03 Pressure membrane apparatus*.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2007). *Operating instructions - 08.01 Sandbox*.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2008). *Operating instructions - 09.02 Laboratory permeameter*.
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2010). *Operating instructions - 09.09 Tension infiltrometer*.
- Faure, P. (1977a). Carte pédologique de reconnaissance de la république populaire du bénin - feuille de djougou. Notice explicative, ORSTOM.
- Faure, P. (1977b). Carte pédologique de reconnaissance de la république populaire du bénin - feuille de natitingou. Notice explicative, ORSTOM.
- Gardner, W. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil science*, 85(4) :228–232.
- Giertz, S., Junge, B., and Diekkruger, B. (2005). Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in the sub-humid tropical environment of west africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(8-10) :485–496.
- Hopp, L. and McDonnell, J. (2009). Connectivity at the hillslope scale : Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth. *Journal of hydrology*, 376(3-4) :378–391.

- Judex, M. (2009). Scénarii de modélisation de la dynamique d'utilisation des terres. In Judex, M., Röhrig, J., Schulz, O., and Thamm, H., editors, *IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de Recherche 2000 – 2007*, chapter 40, pages 89–90. Projet IMPETUS, Département de Géographie, Université de Bonn, Allemagne, 3^{eme} édition.
- Judex, M., Thamm, H., and Menz, G. (2009). Dynamiques d'utilisation des terres dans le centre du bénin. In Judex, M., Röhrig, J., Schulz, O., and Thamm, H., editors, *IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de Recherche 2000 – 2007*, chapter 39, pages 87–88. Projet IMPETUS, Département de Géographie, Université de Bonn, Allemagne, 3^{eme} édition.
- Le Lay, M., Saulnier, G., Galle, S., Seguis, L., Métadier, M., and Peugeot, C. (2008). Model representation of the sudanian hydrological processes : Application on the donga catchment (Benin). *Journal of Hydrology*, 363(1-4) :32–41.
- Lokonon, J., Richard, A., and Hounsou, M. (2012). Caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols de l'ouémé supérieur (bénin) : Descriptions des sites de mesures et valeurs numériques. Rapport de mission, LHME,LTHE.
- Richard, A. (2010). Modélisation simplifiée de la redistribution de l'eau sur un versant au bénin. sensibilité aux caractéristiques du sol et à la végétation. M2R, UJF, France, 32 pp.
- Robert, D. (2010). Caractérisation de la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques du premier mètre des sols du bassin versant de l'ara (nord bénin). Rapport de mission, IRD-LTHE.
- Soubeyran, S., Hector, B., Descloitres, M., Wubda, M., and Séguis, L. (2011). Etudes géophysiques, géologiques et hydrologiques des sites de nalohou et béléfougou (djougou, nord bénin). Rapport de mission, IRD-LTHE-HSM. 77 pages, 19 figures, 1 tableau, 10 annexes.
- Vandervaere, J. (1995). *Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encrouvés*. PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble I.
- Vauclin, M. (1982). Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. In *Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols*, pages 9–43, Avignon. Colloque SHF-INRA.
- Viennot, M. (1978). Carte pédologique de reconnaissance de la république populaire du bénin - feuille de bimbereke. Notice explicative, ORSTOM.
- Vincent, P. and Hottin, G. (1984). Carte géologique - feuille djougou - parakou - nikki. Technical report, Office béninois des mines. échelle : 1/200000.
- Zannou, A. (2011). *Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin. Cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou*. PhD thesis, Université Abomey-Calavi.