



CARACTERISATION DE L'ERODIBILITE DES SOLS A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT DU BARRAGE DE MOGTEDO AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 26/01/2016 par

Yamgouba Jules Stanislas ROMBA

Travaux dirigés par :

Dr. Eric HALLOT

Maître de Conférences au Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale de l'Université de Liège

M. Francis GUYON

Assistant technique APEFE du projet, basé à la DGADI au Ministère de l'Agriculture des Ressources Hydrauliques de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire du Burkina Faso

Dr Dial NIANG

Enseignant Chercheur à 2iE/ Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Dr Lawani Adjadi MOUNIROU

Enseignant Chercheur à 2iE/ Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Abdou LAWANE

Membres et correcteurs : Dr Fowé TAZEN
Dr Amadou KEÏTA
Dr Dial NIANG

Promotion [2014/2015]

CITATIONS

***"Il faut que l'école nouvelle et l'enseignement nouveau
concourent à la naissance de patriotes et non
d'apatrides"***

Thomas Isidore Noël SANKARA

***"Le succès est une science; si vous avez les conditions,
vous avez le résultat"***

Oscar WILDE

***"Ne soyez pas tout le monde. Soyez vous-même et vous
réussirez d'une manière authentique et sans souffrance
intérieure"***

Roch Armel BAK YONO

***"Quand vous vous demandez où est Dieu pendant les
périodes difficiles de votre vie, souvenez-vous que le
professeur reste toujours silencieux pendant l'examen"***

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Je voudrais manifester ma reconnaissance aux personnes physiques ou morales qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document.

Je voudrais en premier lieu remercier mon directeur de mémoire, Dr Dial NIANG Enseignant-Chercheur au laboratoire LEAH de 2iE. Tout d'abord, merci de m'avoir proposé ce sujet. Merci pour votre disponibilité et votre implication dans le projet. Vous avez toujours été là lorsque j'avais besoin de vos conseils avisés malgré les nombreux mémoires que vous suivez.

Je voudrais également remercier tout particulièrement Mr Francis GUYON. Merci Mr Guyon pour tout le travail que vous avez fait en ce qui concerne l'organisation de mon travail de terrain. Merci pour la disponibilité et pour tout le temps que vous avez consacré à suivre mon travail et à répondre à mes nombreux mails.

Je remercie la DGADI et son personnel à travers le Directeur des Aménagements Agricoles, Mr B. V. C. Adolphe ZANGRE. Merci particulièrement à vous Mr B. V. C. Adolphe ZANGRE d'avoir accepté m'accueillir dans votre structure pour ce merveilleux stage que j'ai accompli dans les meilleures des conditions.

Je remercie aussi le Dr Lawani Adjadi MOUNIROU, Enseignant-Chercheur au laboratoire LEAH de 2iE. Merci d'avoir contribué à la réalisation de ce travail en tant que co-encadreur. Vos conseils m'ont beaucoup orienté au moment où j'étais le plus embarrassé par certaines questions relatives à mon mémoire.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Mr Mathieu KABORE, au laboratoire LEAH de 2iE, pour m'avoir formé à l'utilisation de l'instrument de mesure de perméabilité. Merci Mr KABORE, votre aide a contribué considérablement à mes travaux de mesures sur le terrain

Je n'oublie pas Mr Bertrand LINGANI en service au PADI/BF-103, à qui je dis un grand merci pour m'avoir aidé dans les travaux de mesures effectués sur le terrain et d'avoir été mon compagnon de distraction à mes heures de pause.

Merci au Dr Eric Hallot pour avoir contribué à ce travail malgré la distance qui nous sépare.

Je n'oublie pas non plus mon père, Aristide ROMBA, pour m'avoir beaucoup soutenu et encouragé durant ma formation de master à 2iE. Merci, papa, pour m'avoir aidé également à corriger ce document en le lisant et relisant.

Merci à mon épouse Safirata, mes enfants Slim et Shari pour la joie qu'ils me procurent et le soutien inestimable dont ils me font montre. En eux, j'ai puisé beaucoup de force et de ressources pour avancer dans mon travail, surtout dans mes moments les plus difficiles.

Un grand merci à ma mère pour tout ce qu'elle a fait et continue de faire pour moi. Merci à mes frères et sœurs, à toute ma famille, à mes amis et connaissances. Vous avez tous contribué à faire de moi, l'homme que je suis aujourd'hui.

RESUME

Le barrage de Mogtedo est situé dans la province du Ganzourgou au Burkina Faso. Il est soumis à un régime climatique de type soudano-sahélien, avec une moyenne pluviométrique interannuelle de l'ordre de 720 mm. Il est de plus en plus menacé par l'ensablement et l'envasement de son lit, dûs en grande partie par la dégradation continue des ressources naturelles, particulièrement des sols. Cette dégradation des sols sous les effets conjugués du climat et de l'homme, favorise l'apparition de plusieurs états de surfaces avec comme conséquences des différences d'infiltrabilité au niveau des sols.

Pour mieux comprendre le comportement des sols autour du barrage de Mogtedo, notre étude a été initiée en vue d'apporter quelques pistes de solutions pour la protection et la sauvegarde de la retenue. Pour mener cette recherche, nous avons d'abord procédé à une cartographie des états de surface selon la nomenclature de l'Institut de Recherche et de Développement. Puis, nous avons procédé à des prélèvements d'échantillons de sols sur chaque état de surface où des analyses granulométriques ont été effectuées au laboratoire pour la détermination des différentes composantes des unités prélevées. Nous avons aussi effectué des mesures d'infiltrométrie sur les différents états de surface du bassin versant de Mogtedo dans le but de mieux comprendre le ratio entre infiltration et ruissellement.

Les résultats montrent des comportements différents d'érodibilité des sols. En effet, les valeurs obtenues varient de $0,15 \frac{t \cdot \text{acre} \cdot h}{100 \cdot t \cdot \text{acre} \cdot \text{pied} \cdot \text{pouce}}$ pour les croûtes de décantation à $0,29 \frac{t \cdot \text{acre} \cdot h}{100 \cdot t \cdot \text{acre} \cdot \text{pied} \cdot \text{pouce}}$ pour les espaces cultivés. Quant aux valeurs de la conductivité hydraulique non saturée, nous avons respectivement $2,03 \times 10^{-5}$, $0,69 \times 10^{-5}$ et $0,17 \times 10^{-5}$ m/s pour les espaces cultivés (les plus filtrants), les croûtes structurales limoneuses et les croûtes de décantation (les moins filtrantes).

Mots Clés :

1 – Erodibilité des sols

2 - RUSLE

3 – Retenue de Mogtedo

4 – Etat de surface

5 – Burkina Faso

ABSTRACT

Mogtedo's reservoir is located in the province of Ganzourgou, Burkina Faso. It is under the Soudano-sahelian climate regime, with an interannual average rainfall of about 720 mm. It is increasingly threatened by the sedimentation and deposition at the bed of the dam, largely caused by the continuous degradation of natural resources, especially the soil. This degradation, mainly caused by combined effects of climate and human activities, favors the appearance of different types of crusts that cause differences in soil infiltration rate.

This study was initiated to better understand the characteristics of soils around Mogtedo's reservoir, and to provide some possible reservoir protection measures. To conduct this research, we first conducted a mapping of different types of land surfaces using the nomenclature of the Institute for Research and Development. Then, we conducted soil samplings from each type of crust which were for analysis in the laboratory to determine the various components of the sampled units. We also carried out measurements of infiltration rate on the different types of crusts of the watershed in order to better understand the ratio of infiltration and runoff.

The results showed different soil erodibility for the different types of land surface. As a result, the values varied from $0.15 \frac{\text{t}\cdot\text{acre}\cdot\text{h}}{100\cdot\text{t}\cdot\text{acre}\cdot\text{feet}\cdot\text{inch}}$ for decantation crusts to $0.29 \frac{\text{t}\cdot\text{acre}\cdot\text{h}}{100\cdot\text{t}\cdot\text{acre}\cdot\text{feet}\cdot\text{inch}}$ for cultivated areas. The values of the unsaturated hydraulic conductivity were 2.03×10^{-5} ; 0.69×10^{-5} ; and 0.17×10^{-5} m/s for cultivated areas (most filtering), silty structural crusts and decantation crusts (less filtering) respectively.

Key words:

- 1 – Soil erodibility**
- 2 - RUSLE**
- 3 – Mogtedo's reservoir**
- 4 – Type of crust**
- 5 – Burkina Faso**

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AEN	Agence de l'Eau du Nakanbé
APEFE	Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger
DCENN	Direction des Cours d'Eau Non Navigables
DGADI	Direction Générale des Aménagements et du Développement de l'Irrigation
DRARHASA	Direction Régionale de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire
GPS	Global Position System
FAO	Food and Agriculture Organisation/Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
MO	Matière Organique
MEE	Ministère de l'Environnement et de l'Eau
MES	Matière En Suspension
MNT	Modèle numérique de terrain
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PADI	Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
Ref3D	Reference 3D : Modèle numérique de terrain (Spot Image)
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SI	Système International
SIG	Système d'information géographique
SPOT	Système probatoire d'observation de la Terre
SLEMSA	Soil Loss Estimation Model for Southern Africa
ULg	Université de Liège
USLE	Universal Soil Loss Equation
WAIPRO	West African Irrigation Project
WATEM/SEDEM	<u>Water and Tillage Erosion Model</u> / <u>Sediment Delivery Model</u>
WBI	Wallonie Bruxelles International
WCD	World Council Development

TABLE DES MATIERES

CITATIONS	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS	v

LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	3
I. Introduction.....	5
Problématique.....	5
Contexte	6
Objectifs	6
II. Revue bibliographique	7
II.1...Érosion et érodibilité des sols.....	7
II.2...L'érodibilité des sols en Afrique de l'Ouest et au Burkina Faso en particulier.....	11
II.3...Le modèle (R)USLE et le facteur d'érodibilité K.....	13
III. Matériel et Méthodes	18
III.1...Présentation de la zone d'étude.....	18
III.1.1...Climat et pluviométrie.....	20
III.1.2...Formation géologique, relief et sol.....	20
III.1.3...Concept d'état de surface	21
III.1.4...Végétation	26
III.2...Matériel utilisé	26
III.3...Méthodes.....	27
III.3.1...Caractérisation des données d'entrée pour la détermination du facteur K.....	27
III.3.2...Traitement des données	31
IV. Résultats et discussions.....	38

IV.1...Principaux paramètres de l'érodibilité des états de surface	39
IV.1.1...Pourcentage d'argile, de limon et de sable.....	39
IV.1.2...Matière organique.....	41
IV.1.3...Structure du sol.....	43
IV.1.4...Infiltrabilité.....	44
IV.2...Calcul du facteur d'érodibilité K des états de surface	46
V. Conclusion.....	49
VI. Recommandations - Perspectives	50
VI.1. Recommandations.....	50
VI.2. Perspectives.....	51
VII. Bibliographie	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des sols selon Bolline et Rosseau (1978) en fonction de l'érodibilité	11
Tableau 2: Proportion des différents types de sols au Burkina Faso d'après la classification française	11
Tableau 3: Types de sols du bassin versant de Mogtedo	21
Tableau 4: Essai n°1 d'infiltrométrie effectué au point Mogt B1 du Transect B	33
Tableau 5: Paramètres de VAN GENUCHTEN et Zhang pour $h_0 = 2$ cm	34
Tableau 6: Type de structure – critère du code nomographique	36
Tableau 7: Composition texturale de chaque état de surface	39
Tableau 8: Taux de matière organique des états de surface	42
Tableau 9: Code de structure des états de surface	43
Tableau 10: Classe de perméabilité des états de surface	45
Tableau 11: Détails des caractéristiques et valeurs de K pour les différents états de surface ..	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Nomographe de détermination du facteur K de Wischmeier, Johnson et Cross (1971)	15
Figure 2: Plan de situation du bassin versant de Mogtedo (source Abi, 2014)	19
Figure 3: Carte des isohyètes du Burkina Faso (source Abi, 2014)	20
Figure 4: Croûte structurale (PADI/BF-103)	22
Figure 5: Croûte de dessiccation (à gauche) et croûte d'érosion (à droite) (Source PADI/BF-103)	23
Figure 6: Croûte de décantation	24
Figure 7: Croûte grossière	24
Figure 8: Clef de détermination des principales croûtes sahéniennes (Casenave et Valentin, 1989)	25
Figure 9: Tensio-infiltromètre à mini-disque fabriqué par Decagon Devices	27
Figure 10: Positionnement des transects de mesure sur la carte des états de surface	29
Figure 11: Classification texturale des sols selon l'USDA (1960) (cité par Bachir Dridi & Samia Zemmouri, 2012)	32
Figure 12: Les six classes nomographiques de perméabilité des sols	32
Figure 13: Classes nomographiques de structure des sols de Wischmeier et Smith (1971)	35

Figure 14: Code de structure basé sur la classification texturale (Ontario Center for Soil Resource Evaluation, 1993 cité par Wall et al. 1997)	37
Figure 15: Classes texturales des sols dans le système canadien de classification des sols (Groupe de travail sur la classification des sols, 1998 cité par Wall <i>et al.</i> , 1997)	38
Figure 16: Analyse texturale des échantillons par état de surface: Proportions moyennes et écarts types des argiles (< 2 µm), des limons (2-50 µm) et de sable (50-2000 µm).....	40
Figure 17: Taux de matière organique dans les échantillons des différents états de surface ...	43
Figure 18: Capacités d'infiltration moyennes et écarts types des états de surface	46
Figure 19: Valeurs d'érodibilité K des différents états de surface.....	48

I. INTRODUCTION

PROBLEMATIQUE

L'érosion hydrique est un problème majeur au Burkina Faso (Kabré 2010). Aggravée par l'action de l'homme, elle est à l'origine de la dégradation des sols et de l'envasement de plusieurs barrages dont les capacités de stockage, selon la WCD (2000), baissent chaque année de 1% dans le monde. Ce fait constitue, plus particulièrement au Burkina Faso, une menace très importante, d'une part du fait de la grande sensibilité à l'érosion des sols, et d'autre part à cause de l'importance de l'agriculture comme moyen de subsistance (Moreaux, 2014). Le climat du pays est de type tropical à dominante sahélienne, caractérisé par deux saisons contrastées (une saison de pluies, courte en général et une saison sèche longue) couplées avec deux régimes de vents (les vents humides de mousson porteurs de pluies et les vents secs et chauds d'harmattan). En ce qui concerne les réserves souterraines, environ 82% du territoire repose sur le socle cristallin où les eaux souterraines, en quantité insuffisante, se localisent uniquement dans les fissurations, les altérations ou les fracturations des roches. On enregistre des taux de réussite faibles pour les forages et des débits insuffisants pour la satisfaction des besoins d'approvisionnement en eau des agglomérations importantes ou pour l'irrigation à grande et moyenne échelles; ou encore pour l'élevage et les activités industrielles (FAO, 2015). En conséquence, ces types de besoins, estimés à environ 505 millions de m³/an, ne peuvent être satisfaits que par le recours à l'eau de surface, avec tout ce que cela implique en termes de risques liés à la qualité bactériologique, et en termes de coût de mobilisation (barrages) et d'exploitation de l'eau, etc. (Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2001). Les retenues d'eau sont pourtant menacées, principalement, par le comblement par transport de solides, surtout dans la zone sahélienne, marquée par une érosion intense, conséquence de la dégradation des sols (Maïga *et al.*, 2007). Par exemple, des études réalisées sur la retenue de Mogtedo par le Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation (PADI), ont conclu en 2014 que celle-ci, depuis sa mise en eau en 1964, a déjà perdu 32.77% de sa capacité de stockage, soit l'équivalent de 3 461 100 m³ et se retrouve donc à ne plus pouvoir contenir que 7 100 000 m³ d'eau. Dès lors, il convient de développer des mesures antiérosives afin de conserver l'eau et le sol qui sont des richesses naturelles et des éléments de base de la vie. Pour ce faire, un des préalables qui offrirait des outils d'aide à la décision et permettrait ainsi de mieux cerner le problème est de quantifier l'érosion et surtout d'en déterminer les facteurs (Bergaoui et Ziadi, 1993). L'un de ces facteurs déterminants est l'érodibilité des sols,

représentée par le « facteur K » dans le modèle de Wischmeir (1978), le modèle le plus commun dans le Sahel et dans beaucoup d'autres parties du monde (Angima *et al.*, 2003; Payet *et al.*, 2011; Roose et De Noni, 2004).

CONTEXTE

Notre travail est effectué dans le cadre du Programme de la DGADI intitulé « Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation 2014 – 2016 », impliquant l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger (APEFE). Ce programme veut atteindre quatre (04) résultats dont l'un vise à mettre à la disposition de la Direction Générale des Aménagements et du Développement de l'Irrigation (DGADI), de l'Agence de l'Eau du Nakanbé (AEN) et des Directions Régionales de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques de l'Assainissement, de la Sécurité Alimentaire (DRARHASA) du Centre, du Centre Sud et du Plateau Central, des outils opérationnels de protection des retenues d'eau d'irrigation. Ce résultat de programme s'appuie sur une approche de type recherche/développement impliquant aussi deux partenaires wallons : la Direction des Cours d'Eau Non Navigables (DCENN) du Service Public de Wallonie et le Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale de l'Université de Liège (ULg). Il vise principalement le développement d'outils d'aide à la décision pour la limitation de la sédimentation des retenues d'eau à travers l'aménagement des terres et des berges des cours d'eau à l'échelle des bassins versants alimentant les retenues. Ces outils seront mis à profit à travers l'élaboration de plans d'aménagement pour 03 sites pilotes (Mogtedo, Wedbila et Kierma). Parmi ces outils d'aide à la décision, il est prévu le développement d'un modèle de risques d'érosion à l'échelle des bassins versants. Ce qui permettra de déterminer les zones à aménager en priorité, lesquelles ont déjà été identifiées pour les bassins versants de Kierma et Wedbila, dans un précédent travail effectué par Moreaux en 2014. Le présent travail, réalisé dans le cadre d'un stage effectué au PADI, est une contribution à l'identification des zones à risque du bassin versant de Mogtedo et ce, par la détermination de l'érodibilité des sols.

OBJECTIFS

L'objectif global de cette étude est de proposer des pistes de protection et de sauvegarde du barrage à travers une étude de caractérisation de l'érodibilité des sols à l'échelle du bassin versant. Il s'agira de façon spécifique de:

- Caractériser les paramètres de l'érodibilité des sols par état de surface suivant le modèle RUSLE;
- Déterminer les valeurs de l'infiltrabilité par état de surface.

Le présent travail est structuré en trois grandes parties. La première est une étude bibliographique faisant l'état des connaissances sur les processus érosifs, l'érodibilité des sols et la détermination de cette dernière selon le modèle (R)USLE. La deuxième partie aborde les caractéristiques générales de la zone d'étude ainsi que la méthodologie adoptée pour la collecte et l'exploitation des données. La troisième partie présente les différents résultats obtenus à l'issue de l'exploitation des données ainsi que les analyses et discussions y afférentes.

II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. ÉROSION ET ERODIBILITE DES SOLS

Érosion vient de « ERODERE », verbe latin qui signifie « ronger » (Roose, 1994). Selon Girard *et al.*, (2005), " l'érosion peut être définie comme un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité " (cité par Paul-Hus, 2011). L'érosion qui se produit sous l'action de l'eau est appelée érosion hydrique. Ce type d'érosion est celui dans lequel s'inscrit plus précisément le présent travail. Et, dans ce cadre précis, Roose (1994) parle de l'érosion comme étant un processus naturel qui ronge la terre, abaisse toutes les montagnes et engraisse les vallées. L'érosion est un phénomène naturel, mais elle est souvent amplifiée par l'action humaine. Les problèmes que ce phénomène occasionne sont, entre autres, la réduction des surfaces cultivables et la pérennité du sol par les pertes des éléments fertilisants, comme le souligne Moukhchane (2001); auxquels il ajoute le problème de la mauvaise utilisation même des sols. « Mais les plus importants impacts à travers le monde sont l'augmentation des charges des sédiments transportés par les réseaux hydrographiques qui envasent les retenues de barrages et leurs équipements annexes », poursuit-il. Roose et De Noni (2004) distinguèrent la variété des processus d'érosion en trois grandes catégories:

- L'érosion en nappe qui a lieu lorsque l'énergie des gouttes de pluie s'attaque à toute la surface du sol et que le transport des matériaux arrachés s'effectue par le ruissellement en nappe.
- L'érosion linéaire en rigoles et ravines qui a lieu lorsque les pluies sont abondantes et la pente forte ou longue, de sorte que le ruissellement en nappe se hiérarchise, se concentre en filets entre les touffes végétales, prend de la vitesse et développe une énergie propre capable de creuser des griffes profondes de quelques centimètres ou des rigoles de 10 à 50 cm de profondeur à la surface du sol, avec des zones d'érosion et des zones de dépôt des particules les plus grossières.
- L'érosion en masse: alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique et des déformations géologiques tendres: on distingue trois (3) formes d'érosion en masse à savoir, l'érosion aratoire due à l'usage d'un outil agricole, les glissements de terrain et les coulées boueuses qui sont d'origine hydrique.

Quelle que soit la catégorie dans laquelle on se situe il est à observer que le concept "érosion", comme le signifient Dautrebande et Sophier (2006), inclut donc les notions:

- D'arrachement des particules,
- De transport,
- De dépôt ultérieur.

De plus, précise-t-elle, "le processus de dépôt des particules transportées à une certaine distance de l'endroit originel s'appelle la "sédimentation", et les particules déposées "sédiments". Une autre chose importante à mentionner dans le concept d'érosion hydrique est le fait qu'il faut à la fois une pluie ou un ruissellement érosif et un sol sensible à l'érosion pour que celle-ci ait lieu.

L'érosion en nappe sur laquelle nous allons nous appuyer dans notre étude, a pour conséquence de modifier progressivement la surface rugueuse d'un champ labouré. Ce qui laisse observer selon Roose (2010):

- Le nivellement de la surface par rabotage des mottes et remplissage des creux, avec la formation de pellicules de battance d'épaisseur 1 mm, de croûtes d'érosion et de sédimentation en plusieurs couches dépassant 1 à 30 mm;

- La squelettisation des horizons superficiels par perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sables et de graviers, plus claire que le sol initial;
- Le décapage de l'horizon humifère laissant apparaître des plages de l'horizon minéral de couleur plus claire.

L'équation universelle de pertes en sol USLE, en anglais Universal Soil Loss Equation (Wischmeier et Smith, 1978) et ses successeurs: l'équation universelle de pertes en sol révisée RUSLE, en anglais Revised Universal Soil Loss Equation, version 1 (Renard *et al.*, 1997) et version 2 (Foster *et al.*, 2003), sont de loin les modèles les plus utilisés pour la prédiction de l'érosion des sols, selon Auerswald *et al.* (2014), et s'appliquent à l'érosion en nappe. L'érodibilité des sols se réfère au facteur nommé "K" de l'équation USLE et de ses successeurs RUSLE et RUSLE2. Villemure (2006) la définit comme un facteur représentant la sensibilité d'un sol au détachement des particules et au transport des sédiments.

Le modèle empirique USLE est déterminé par les différentes conditions de sols, de climat, de couvert végétal et de topographie. Bien que développé initialement pour les terres de cultures, le modèle fut étendu à d'autres types d'occupation des sols (Wischmeier et Smith, 1978). Son domaine de validité reste l'érosion en nappe (Roose, 1994), mais il eut tout de même l'avantage d'avoir été testé et calibré dans de nombreux pays où le ruissellement influence la dégradation des sols.

D'autres modèles comme SLEMSA et WATEM/SEDEM furent développés respectivement pour «l'Afrique de l'Est et du Sud» et «l'Afrique de l'Ouest». Cependant, comme le fit remarquer Moreaux (2014), le choix le plus commun dans le sahel et dans d'autres parties du monde reste le modèle USLE de Wischmeier (1978) qui, par la suite fut amélioré et revisité par Renard *et al.* (1997) pour donner RUSLE, lequel semble assez bien s'appliquer à des sols riches en kaolinite, des sols bruns lessivés tempérés, des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, à l'exclusion des sols riches en argiles gonflantes qui manifestent très rapidement un ravinement important (Moreaux, 2014).

Quand en est-il de l'érodibilité des sols? Tout en traitant de la question dans le contexte tropical il est à noter que l'érosion accélérée des sols cultivés est régie par les facteurs majeurs

que sont le couvert végétal, la pente, les techniques culturales conservatoires et l'agressivité des pluies (Roose 1977). Toutefois, il fut reconnu depuis longtemps que les propriétés intrinsèques des sols influencent l'intensité du phénomène d'érosion (Roose, 1989-90). Villemure (2006) aussi le reconnut et alla plus loin en mentionnant qu'en plus des facteurs internes, la sensibilité du sol à l'érosion est aussi expliquée par des variables externes aux sols. En effet, plusieurs auteurs ont attesté du lien entre l'érodibilité (facteur K) d'avec «la structure et la granulométrie du sol». Foster *et al.* (2003) complètent en précisant qu'une granulométrie fine et grossière serait à l'origine d'une faible valeur du facteur K pendant qu'une valeur modérée de celui-ci s'expliquerait par une granulométrie moyenne, et, une forte érodibilité par une granulométrie pourvue abondamment en limons. Les travaux d'expérimentation en zone tropicale effectués par Roose entre 1989 et 1990 lui permirent d'observer que «l'érodibilité des sols mesurée sur parcelles à partir des pertes en terre et de l'agressivité des pluies naturelles est fortement influencée par les taux de cailloux, de limon et de sables très fins ainsi que par les taux de matières organiques de l'horizon superficiel». Au sujet des sols argileux en particulier, Morel (1989) releva que ceux-ci présenteraient des valeurs de K faibles du fait de leur résistance au détachement due aux forces de LONDON-VAN DER WAALS et des propriétés propres aux argiles (cité par Villemure, 2006). Les loams, qui sont des sols constitués de sable et d'argile, sont à l'origine d'un ruissellement modéré de par leur résistance moyenne au détachement. Pour ce qui est des sols sableux, il ressort que, ceux-ci bien qu'ils soient sensibles au détachement se prêtent moins au déplacement par le ruissellement. Les sols limoneux, par contre, du fait de leur facilité à se laisser détacher et du ruissellement abondant qu'ils produisent, sont sensibles à l'érodibilité et sont caractérisés par un transport de sédiments fins dû en effet au ruissellement. Les sols gravillonnaires ou caillouteux, dès la surface, présentent une érodibilité de plus en plus faible avec le départ progressif et sélectif des particules fines qui laisse sur place les particules grossières, lesquelles forment une sorte de mulch protecteur à la surface du sol (Roose, 1989-90). Ainsi donc "la piérosité est aussi une variable du facteur K", reconnu Villemure (2006) avant de citer au demeurant Foster *et al.* (2003) qui reviennent dans le même sens que Roose à propos de l'effet mulch, mais en allant plus loin en précisant la taille minimale des particules grossières considérée qu'ils fixèrent égale à 5 mm.

Enfin, Bolline et Rosseau (1978) (cités par Roose et Sarrailh, 1990) proposèrent une classification des sols selon leur érodibilité qui est la suivante:

Tableau 1: Classification des sols selon Bolline et Rosseau (1978) en fonction de l'érodibilité

Erodibilité	Nature de sol
$K < 0,10$	Sols très résistants à l'érosion
$0,10 < K < 0,25$	Sols assez résistants à l'érosion
$0,25 < K < 0,35$	Sols moyennement sensibles à l'érosion
$0,35 < K < 0,45$	Sols assez sensibles à l'érosion
$K > 0,45$	Sols très sensibles à l'érosion

II.2. L'ERODIBILITE DES SOLS EN AFRIQUE DE L'OUEST ET AU BURKINA FASO EN PARTICULIER

Les proportions des différents types de sols au Burkina Faso d'après la classification française sont les suivantes (Sibomana, 2015):

Tableau 2: Proportion des différents types de sols au Burkina Faso d'après la classification française

Type de sol	Proportion (%)
Sols ferrugineux tropicaux	39
Sols peu évolués	26
Sols hydromorphes	13
Sols bruns eutrophes	6
Sols halomorphes à structure dégradée	5
Sols minéraux brut	3
Sols ferralitiques	2

L'étude des sols ferrugineux en particulier dans 8 régions différentes du pays indique qu'en général il s'agit de sols pauvres en matière organique qui présentent un taux de grailonnement parfois élevé (60 à 80%), une structure peu favorable à la pénétration racinaire (horizon supérieure) et un encroûtement en surface (pellicule de battance).

Sur un autre registre, on observe dans la littérature sur l'érosion et l'érodibilité des sols, plusieurs publications dont Roose est l'auteur. Ce chercheur s'est aussi investi dans des

recherches, en Afrique tropicale et en Afrique de l'Ouest. Pour y avoir beaucoup travaillé, on comprendra donc que l'essentiel des informations relatives à l'érodibilité des sols dans les milieux précités, qui serviront à mieux appréhender le sujet traité dans notre mémoire, soient tirés essentiellement, des travaux qu'il effectua pendant près de 20 ans dans ces régions.

Dans un premier travail effectué en Afrique de l'Ouest avec plusieurs de ses pairs et collaborateurs à la fois, dans le cadre de l'ORSTOM dont le rapport fut publié en 1977, Roose après 20 années de recherche sur l'érosion parvint à mesurer sur des parcelles expérimentales mais aussi à évaluer à partir du nomographe de Wischmeier et Smith (1978), quelques valeurs de l'indice d'érodibilité des sols. Parmi les sites expérimentaux il y eut sept (07), répartis dans plusieurs pays tels que la Côte d'Ivoire (Adiopodoumé, Korhogo et Bouaké), le Bénin (Agonkamey), le Burkina (Gampela et Saria) et le Sénégal (Sefa), pour lesquels ces valeurs furent déterminées. Les sols observés sur les sites du Bénin et de la Côte d'Ivoire étaient de type ferralitique avec des valeurs de $K_{\text{mesuré}}$ comprises entre 0,02 et 0,12, tandis que ceux observés au Sénégal et au Burkina étaient de type ferrugineux pour des valeurs de K variant de 0,20 à 0,25. Il est à préciser, au passage, que ces valeurs sont exprimées en $[t \cdot \text{acre} \cdot h / 100 \cdot \text{acre} \cdot \text{pied} \cdot \text{us} \cdot \text{pouce}]$ dans le système américain (comme le sont d'ailleurs toutes valeurs lues dans le nomographe de Wischmeier) et, au besoin, sont multipliées par 0,1317 pour être exprimées en $[t \cdot ha \cdot h / (h \cdot MJ \cdot mm)]$ dans le système métrique international (SI) (MDE, PNUD). Pour le Burkina en particulier, il fut mesuré comme valeur 0,20 dans le village de Saria et 0,25 dans celui de Gampela, le site le plus proche de Mogtedo. Toutefois, des valeurs de K furent déterminées à partir du nomographe, suite à l'analyse de l'horizon labouré. Ce qui a conduit aux résultats suivants:

➤ Sols ferralitiques divers:	$\left\{ \begin{array}{l} * \text{ issus de sables tertiaires} \\ * \text{ issus de granites} \\ * \text{ issus de schistes} \end{array} \right.$	0,05 – 0,10
		0,10 – 0,15
		0,15 – 0,18
➤ Sols ferrugineux tropicaux divers:	{ * issus de granites	0,20 – 0,30

Ces résultats permirent à Roose (1977) et ses collaborateurs de conclure que "les sols ferralitiques sont très résistants à l'érosion et les sols ferrugineux tropicaux le sont nettement moins après deux ou trois années de culture" et que "les valeurs d'érodibilité estimées à l'aide du nomographe, ou mesurées, sont voisines pour l'ensemble des sols étudiés, sauf pour les sols gravillonnaires" du fait que le nomographe ne tient pas compte du pourcentage de la

surface du sol couverte par les graviers, gravillons et débris de roche (effet mulch).

Dans un autre travail effectué toujours par Roose (1990) et son équipe de chercheurs en zone tropicale, et dont le rapport fut publié cette fois-ci en 1989-90, des valeurs de K furent déterminées pour quelques sites expérimentaux et se présentaient comme suit:

- Gampela, sol ferrugineux tropical: 0,24
- Saria, sol ferrugineux tropical: 0,24
- Linoghin, sol brun vertique: 0,14

Les observations faites de manière générale, mais concernant la zone tropicale cette fois, furent entre autres les suivantes:

- Les sols se montraient très stables ($K < 0,10$) les deux premières années après défrichement pour ensuite voir leur érodibilité évoluer en fonction de la minéralisation des matières organiques et des remontées d'éléments provenant du sous-sol, plus riches en argile, en R_2O_3 , ou en cailloux;
- Les périodes suivantes, les sols ferralitiques ($K = 0,01$ à $0,2$) se montraient généralement plus stables que les vertisols et les sols bruns tropicaux ($K = 0,1$ à $0,2$) et surtout que les sols ferrugineux lessivés ($K = 0,2$ à $0,3$), tandis que tous les sols gravillonnaires dès la surface se montraient stables.

II.3. LE MODELE (R)USLE ET LE FACTEUR D'ERODIBILITE K

L'équation Universelle de Pertes en Sol (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978), qui est l'équation de prédiction de l'érosion la plus largement utilisée dans le monde (Kinnell, 2010), permet de prédire la moyenne annuelle à long terme de perte en sol causée par l'érosion en nappe et en rigole en ayant recours à six facteurs (Moreaux, 2014). Ces derniers sont représentés par:

- **R_{us} le facteur ou l'indice d'érosivité de la pluie.** Lié à la pluie et au ruissellement, il est un indicateur des deux variables les plus déterminantes de l'érosivité des orages que sont la quantité des pluies et l'intensité maximale soutenue sur une longue durée (Wall *et al.*, 2002). Dans le système américain, il s'exprime dans l'unité suivante: $[100 \cdot t_{us} \cdot \text{pied} \cdot \text{pouce} / (\text{acre} \cdot \text{h})]$;
- **K_{us} le facteur ou l'indice d'érodibilité du sol.** Lié à la sensibilité du sol à l'érosion, il s'exprime dans le système américain en $[t \cdot \text{acre} \cdot \text{h} / (100 \cdot \text{acre} \cdot \text{pied} \cdot t \cdot \text{pouce})]$. En la

multipliant par 0,1317 on passe à l'unité la plus utilisée dans le système métrique: la $[t \cdot ha \cdot h / (ha \cdot MJ \cdot mm)]$ qui est équivalente à la $[t \cdot h / (MJ \cdot mm)]$, cette dernière forme plus simplifiée étant préférée par quelques rares auteurs. Une autre unité métrique qui existe et qui est utilisée est la $[t \cdot h / (ha \cdot N)]$ que l'on obtient aisément par la conversion $[t \cdot h / (ha \cdot N)] = 10 \cdot [t \cdot h / (MJ \cdot mm)]$ (Auerswald *et al.*, 2014).;

- **LS le facteur topographique**, lié à la topographie du terrain et désignant le **facteur de longueur de la pente (L)** et le **facteur d'inclinaison de la pente (S)**. Ils sont calculés sur la base des longueurs et angle de la pente du terrain (MDE, PNUD) et sont des facteurs sans unité;
- **C le facteur de protection par les cultures (couvert végétal)**. Facteur sans unité, son estimation requiert des paramètres définis sur la base du couvert végétal ou des types de cultures pratiqués, des pratiques de travail du sol et de la quantité de pluie érosive annuelle (Wall *et al.*, 2002);
- **P le facteur des pratiques anti-érosives ou facteur de mesure de conservation du sol**. Facteur adimensionnel, il tient compte de l'efficacité des pratiques anti-érosives et soutient donc le facteur de culture. Il peut s'agir des cultures en bandes en courbe de niveau isolées par des bandes d'arrêts enherbées et la culture en pente transversale.

Ainsi, les pertes en sol selon le modèle empirique USLE qui est le résultat d'une fonction multiplicative s'exprime par l'équation suivante:

$$A_{us} = R_{us} K_{us} LSCP \quad \text{(Équation 1)}$$

Où A_{us} désigne la perte moyenne annuelle en sol sur le long terme. Elle est exprimée en $[t_{us} / (acre \cdot an)]$ dans le système américain et en $[t / (ha \cdot an)]$ une unité du système métrique.

Le facteur K peut être déterminé à partir de deux méthodes, à savoir celle qui consiste à utiliser le nomographe élaboré par Wischmeier *et al.* (1971), et celle consistant à faire usage de l'équation donnée par ce dernier. Avant l'utilisation du nomographe, K était déterminé de manière empirique en fonction des propriétés inhérentes au sol, sans l'effet de l'occupation de celui-ci (Kinnell, 2010, cité par Moreaux, 2014) et ce, sur la base d'une calibration de K faite à l'aide de parcelles unitaires. L'utilisation du nomographe intervenue plus tard facilitera et

rendra plus précise les valeurs de l'érodibilité des sols. Cette méthode se base sur une étude préalable de sol faisant ressortir le pourcentage de limon (0,002 à 0,100 mm), de sable (0,10 à 20 mm) et de matière organique de même que la structure du sol et de sa perméabilité déterminées in situ (Wischmeier et al., 1971). La valeur de K lue sur le nomographe est exprimée en [t•acre•h/(100•acre•pie•t_{us}•pouce)] qui est une unité anglo-saxonne.

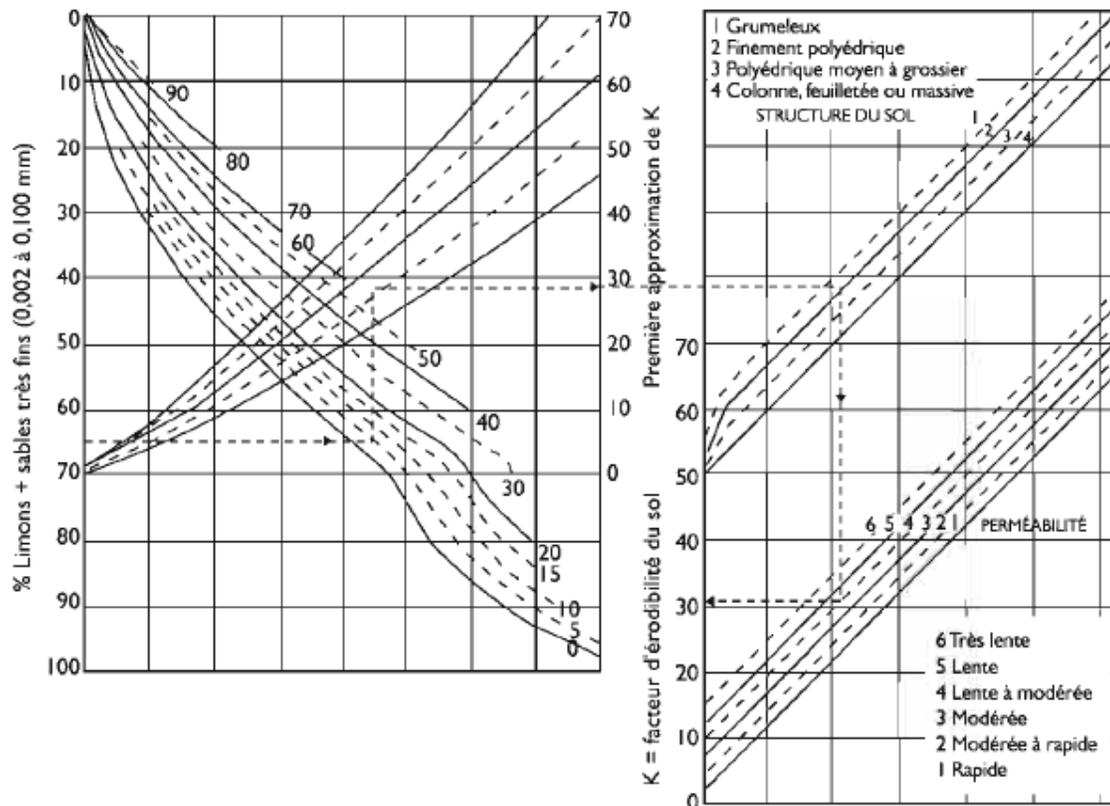


Figure 1: Nomographe de détermination du facteur K de Wischmeier, Johnson et Cross (1971)

Outre le nomographe, une équation développée par Wischmeier et Smith (1978), par laquelle sont approximées les valeurs de K lues sur le graphique, peut être utilisée à condition que le pourcentage de limon et de sable du sol n'excède pas 70%. Selon Auerswald *et al.* (2014) l'équation classique pour le calcul de K, donnée par Wischmeier et Smith (1978) et adaptée au système métrique, peut s'écrire comme suit:

$$K = K_1 K_2 + 0,043 * (A - 2) * 0,033 * (P - 3) \quad \text{(Équation 2)}$$

avec K exprimé en [t•h/(ha•N)]

$$\text{et } K_1 = 2,77 * 10^{-5} * (f_{\text{Si+vfSa}} * (100 - f_{\text{Cl}}))^{1,14} \quad \text{(Équation 3)}$$

$$\text{et } K_2 = (12 - f_{\text{OM}})/10 \quad \text{(Équation 4)}$$

où:

$f_{\text{Si+vfSa}}$ fraction massique (en %) de [limon (2 à 50 μm) + sable fin (50 à 100 μm)]

f_{Cl} fraction massique (en %) d'argile (< 2 μm)

f_{OM} fraction massique (en %) de matière organique

A code de structure du sol (1, 2, 3 ou 4) utilisé dans la classification

P classe de perméabilité du profil (1, 2, 3, 4, 5 ou 6)

L'alternative pour le calcul de K au cas où $f_{\text{Si+vfSa}}$ excéderait 70% consiste à remplacer l'équation (3) par l'équation (5) qui se lit:

$$K_1 = 0,631 * 2,77 * 10^{-5} * (f_{\text{Si+vfSa}} * (100 - f_{\text{Cl}}))^{1,14} + 0,0024 * f_{\text{Si+vfSa}} + 0,161 \quad \text{(Équation 5)}$$

En ce qui concerne les sols de faible érodibilité pour lesquelles une première approximation de K serait inférieure à 0,2, Foster *et al.* (2003) proposa d'utiliser l'équation (6) qui donne une meilleure approximation aux valeurs lues dans le nomographe:

$$K = 0,091 - 0,34 * K_1 K_2 + 1,79 * (K_1 K_2)^2 + 0,24 * K_1 K_2 * A + 0,033 * (P - 3) \quad \text{(Équation 6)}$$

Quant aux sols dont le taux de matière organique excède 4%, cette teneur sera fixée et considérée à son niveau de 4% pour le calcul de K avec l'équation, afin de rester en accord avec le nomographe de Wischmeier et al. (1971) sur lequel n'apparaissent que les courbes de teneur en matière organique de 0 à 4%. D'ailleurs, Aueswald *et al.* (2014) signalèrent que Trott et Singer (1983) avaient trouvé qu'une teneur en matière organique excédant ce seuil n'entraînait aucun effet additionnel sur K. Et donc on prendra pour:

$$f_{\text{OM}} > 4\%, \quad K_2 = 0,8 \quad \text{et} \quad K_2 = (12 - f_{\text{OM}})/10 \quad \text{si} \quad f_{\text{OM}} < 4\% \quad \text{(Équation 7)}$$

Ensuite, pour tenir compte de l'effet mulch des sols caillouteux, dû justement à la présence des cailloux qui réduisent l'érosion, Wischmeier et Smith (1978) proposèrent un facteur multiplicatif (c) à considérer lors des calculs de K:

$$\begin{cases} c = 1 & \text{pour } f_{rf} < 1,5\% \\ c = 1,1e^{-0,0024*f_{rf}} - 0,06 & \text{pour } f_{rf} > 1,5\% \end{cases} \quad (\text{Équation 8})$$

f_{rf} représente la proportion de la surface du sol couverte par les fragments caillouteux.

Notons que ce facteur positif (c) a une valeur qui est toujours inférieure ou égale à 1.

En résumé, incorporer les restrictions du nomographe à l'équation du facteur K , nous mène aux extensions suivantes qui requièrent quatre (04) étapes pour le calcul de l'érodibilité K :

$$1) \quad K_1 = 2,77 * 10^{-5} * (f_{Si+vfSa} * (100 - f_{Cl}))^{1,14} \quad \text{si } f_{Si+vfSa} < 70\%$$

$$K_1 = 1,75 * 10^{-5} * (f_{Si+vfSa} * (100 - f_{Cl}))^{1,14} + 0,0024 * f_{Si+vfSa} + 0,16 \quad \text{si } f_{Si+vfSa} > 70\%$$

$$2) \quad K_2 = (12 - f_{OM})/10 \quad \text{si } f_{OM} < 4\%$$

$$K_2 = 0,8 \quad \text{si } f_{OM} > 4\%$$

$$3) \quad K_3 = K_1 K_2 + 0,043 * (A - 2) * 0,033 * (P - 3) \quad \text{si } K_1 * K_2 > 0,2$$

$$K_3 = 0,091 - 0,34 * K_1 K_2 + 1,79 * (K_1 K_2)^2 + 0,24 * K_1 K_2 * A + 0,033 * (P - 3) \quad \text{si } K_1 * K_2 < 0,2$$

$$4) \quad K = K_3 \quad \text{si } f_{rf} < 1,5\%$$

$$K = K_3 * (1,1e^{-0,0024*f_{rf}} - 0,06) \quad \text{si } f_{rf} > 1,5\%$$

(Équation 9)

Avec K exprimé en $[t \cdot h / (ha \cdot N)]$

Auerswald *et al.* (2014), dans leur conclusion suite à l'étude comparative entre les valeurs d'érodibilité de sols déterminées sur la base des deux méthodes, soulignèrent que le nomographe reste le meilleur outil pour la détermination du facteur K tout en faisant remarquer que plus de 50% des erreurs de prédiction résultent de l'utilisation de l'équation classique (équation2). Il est donc recommandé d'utiliser la série d'équations qui imite et traduit le nomographe en lieu et place de l'équation classique là où cette dernière présente ses limites.

III. MATERIEL ET METHODES

III.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le barrage de Mogtedo, est situé au Burkina Faso, à 85 Km à l'Est de Ouagadougou dans la province du Ganzourgou, qui fait partie, de la région du Plateau Central. Il est situé plus précisément dans la commune de Mogtedo. Construite en 1963 et localisée dans un bassin versant de 478 km², la retenue a une capacité estimée en 2014 à 7 100 000 m³; elle est accessible par la Nationale n° 4, communément appelée "route du Niger". La digue est géographiquement localisée sur le parallèle 00°50' Ouest et le méridien 12°11' Nord à une altitude de 272 m au-dessus du niveau de la mer.

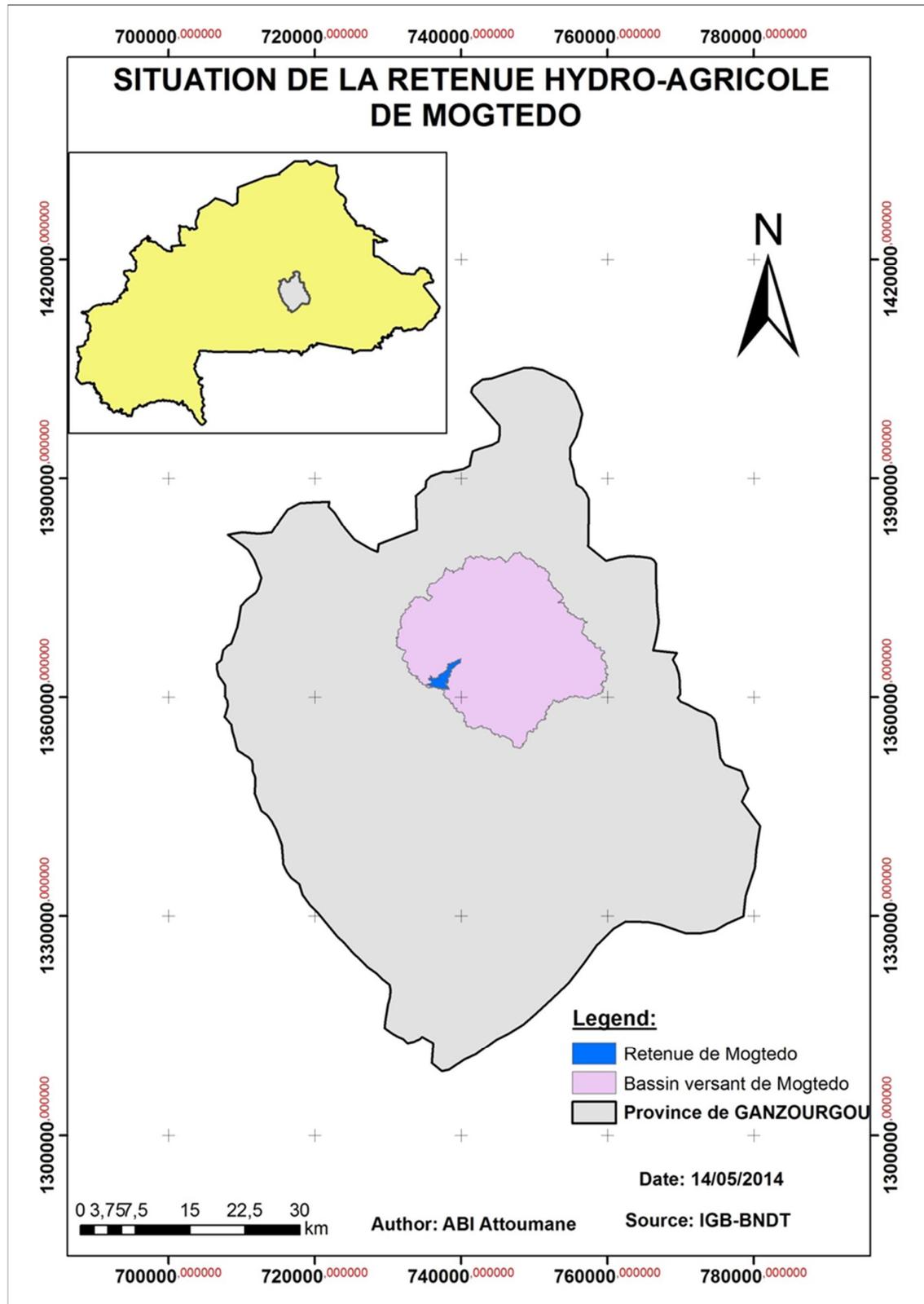


Figure 2: Plan de situation du bassin versant de Mogtedo (source Abi, 2014)

III.1.1. Climat et pluviométrie

La zone d'étude appartient à la bande climatique soudano-sahélienne; elle enregistre une pluviométrie annuelle moyenne de 720 mm déterminée sur la base des pluies annuelles relevées à la station de Mogtedo de 1970 à 2002 (PADI/BF-103). Cette valeur corrobore bien les données de la FAO qui permettent de situer le bassin versant de la retenue de part et d'autre de l'isohyète 700 mm, mais non au-delà des isohyètes 650 mm et 750 mm qui l'encadrent parfaitement bien.

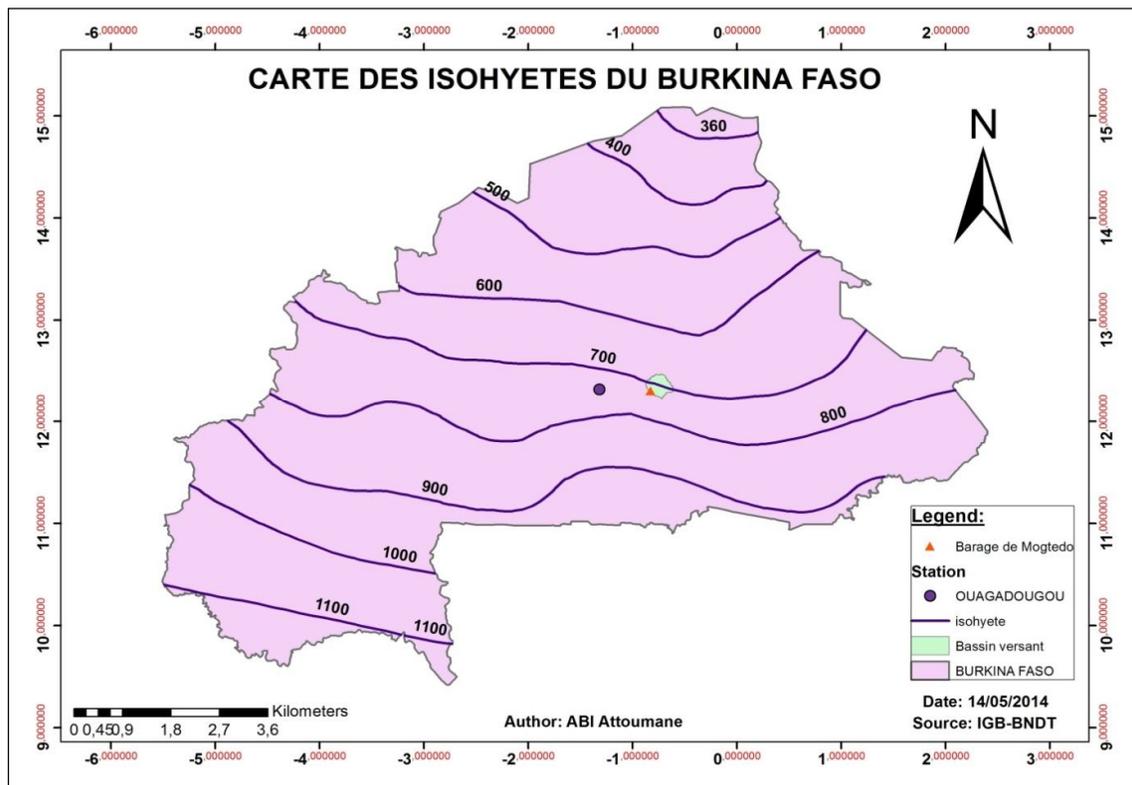


Figure 3: Carte des isohyètes du Burkina Faso (source Abi, 2014)

III.1.2. Formation géologique, relief et sol

L'aspect géologique reste marqué par une domination des migmatites et granites indifférenciés qui représentent 62,5% de la superficie du bassin versant. Les autres formations géologiques observables sont les granites à biotite (parfois muscovite) (26,1%), les volcano-sédimentaires (10,1%) et enfin les amphibolo pyroxénites et metabasites noritiques (1,3%) (Abi, 2014).

Le relief de Mogtedo est celui du plateau central qui est relativement plat et marqué par

quelques petites élévations çà et là. On y trouve aussi quelques bas-fonds dont certains ont fait l'objet d'aménagement pour la riziculture.

Les sols à l'échelle du bassin versant de Mogtedo, vus selon leur capacité à favoriser le ruissellement, sont résumés dans le tableau 3:

Tableau 3: Types de sols du bassin versant de Mogtedo

Association de sols	Classe	Sous-classe	Surface (km ²)	Surface (%)
Association de sols halomorphes sur matériau argilo-sableux et sols peu évolués hydromorphes sur matériau gravillonnaire	Vertisols et paravertisols	Lithomorphes	231,1	48,7
Association à sols lithosols sur cuirasses ferrugineuses	Sols peu évolués	D'origine non climatique	36,5	7,7
Association de sols peu évolués hydromorphes sur matériau gravillonnaire et sols à pseudogley structuré sur matériau argileux d'origines diverses	Sols à sesquioxydes	Sols ferrugineux tropicaux	207,2	43,6

(Source Abi, 2014)

III.1.3. Concept d'état de surface

L'approche méthodologique de notre étude s'appuie sur l'hypothèse prise par le PADI/BF-103 qui, pour cerner le problème d'érosion des sols et prévenir ses conséquences néfastes sur les retenues d'eau, a choisi dans sa démarche, de travailler à l'échelle des états de surface qu'il considère comme « unité homogène » d'un type de sols avec ses propriétés d'érodibilité (en lien avec les phénomènes d'encroûtement de surface).

L'état de surface renvoie au type de croûte qui colonise une superficie donnée de terre. En 1979, Collinet et Lafforgue cités par Casenave et Valentin (1989), montrent qu'il existe une relation nette entre les états de surface et l'hydrodynamique superficielle. Trois variables (le pourcentage de couvert végétal, l'activité faunique et la réorganisation de surface) suffisent à expliquer de manière significative le coefficient d'infiltration sous pluies simulées (Casenave et Valentin, 1989).

Les croûtes structurales (figure 4) résultent d'un "effondrement sur place de la structure". Elles ont comme processus dominant une mobilisation des particules et un rejaillissement. Il existe deux grands types de croûtes structurales. Le premier est constitué des croûtes structurales argileuses (ST1 pour certains auteurs), formées d'un micro-horizon, qui se développent dans les matériaux suffisamment riches en argile ($> 15 - 20 \%$) (Mounirou, 2012). Le second type est la croûte structurale limoneuse (ST2 pour 2 micro-horizons et ST3 pour 3 micro-horizons) qui contient moins de 15-20% d'argile en surface.



Figure 4: Croûte structurale (PADI/BF-103)

Les **croûtes d'érosion** (figure 5) proviennent de l'arrachement par l'eau ou par le vent. Elles peuvent se former au départ d'une croûte structurale argileuse suite aux chocs répétés des gouttes de pluie. Il en résulte une diminution de la rugosité et une disparition progressive des agrégats. Elles peuvent également se former à partir d'une croûte structurale sableuse dont seul le niveau le plus dur, constitué des éléments les plus fins, subsiste. Elles peuvent finalement provenir d'une croûte de ruissellement. Plus la rugosité diminue, plus la vitesse de ruissellement augmente, ce qui diminue le mécanisme de dépôt et accentue l'arrachement (Casenave et Valentin, 1989).



Figure 5: Croûte de dessiccation (à gauche) et croûte d'érosion (à droite) (Source PADI/BF-103)

Les **croûtes de dessiccation** (figure 5) apparaissent suite aux seuls cycles d'humectation-dessiccation. Les premiers millimètres d'un matériau très sableux voient leur cohésion légèrement augmentée. Casenave et Valentin (1989) attribuent cela à la formation de ponts de gels de silices entre les grains de quartz. Ce type de croûte colonise couramment les micro-buttes sableuses enherbées et doit avoir au moins une épaisseur de 7 cm, sinon il est considéré comme une croûte structurale sableuse à 2 micro-horizons si toutefois une pellicule plasmique est rencontrée à moins de cette profondeur (Mounirou, 2012).

Les **croûtes de décantation** (figure 6) se forment après sédimentation de particules dans un liquide au repos. Il en résulte un tri granulométrique (particules les plus fines au-dessus) qui favorise la formation de fissures ou de fentes de retrait au cours de la dessiccation.



Figure 6: Croûte de décantation

Les **croûtes grossières ou gravillonnaires** (figure 7) sont observées lorsque les éléments grossiers excèdent 40% de la surface. En effet, elles incluent des gravillons grossiers et des petits gravillons dans leur organisation qui les distinguent de ST3 (Mounirou, 2012)



Figure 7: Croûte grossière

Ces différentes croûtes peuvent être identifiées à l'aide de la clé de détermination présentée en figure 8.

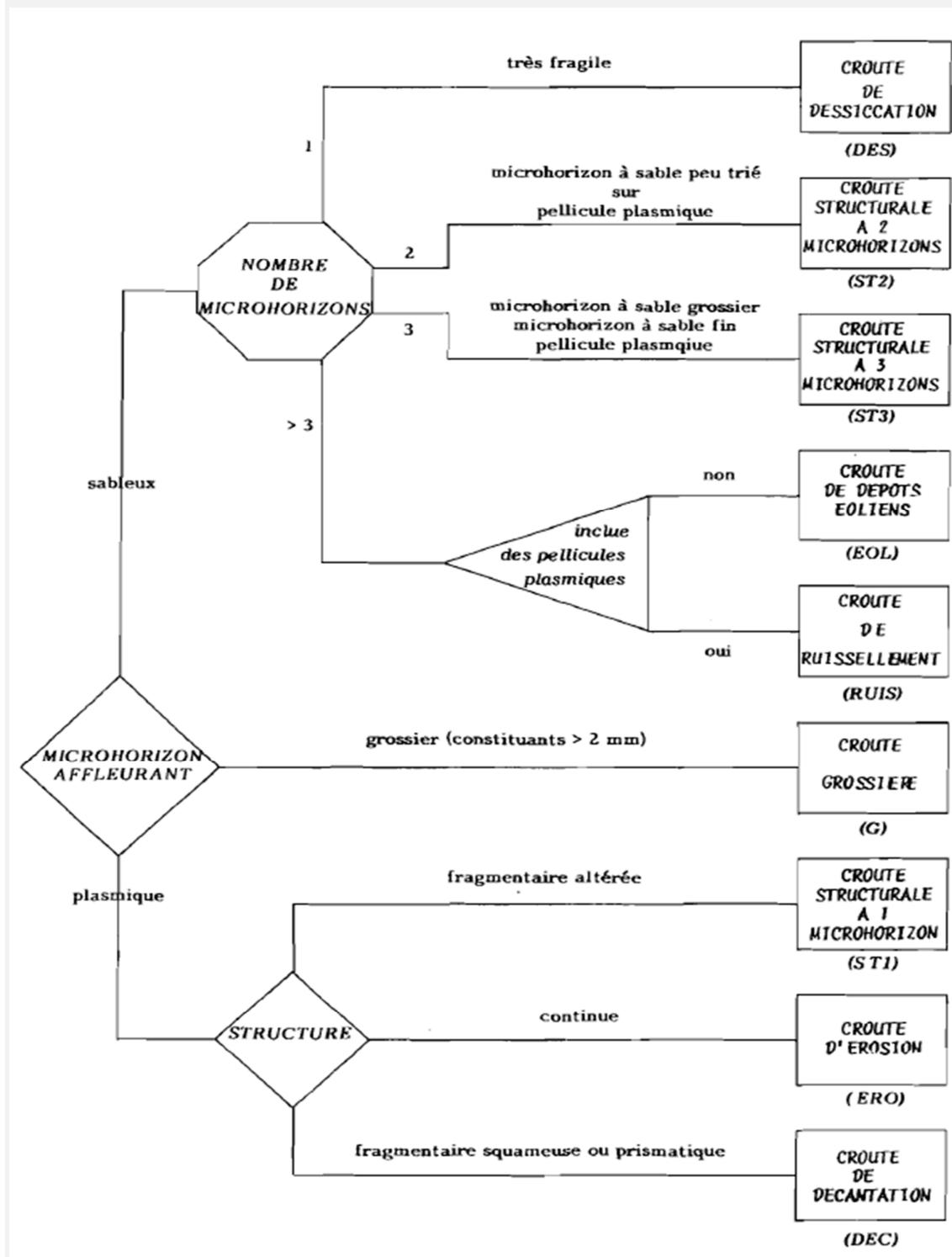


Figure 8: Clé de détermination des principales croûtes sahéliennes (Casenave et Valentin, 1989)

Sur la base de ces mêmes images SPOT5 couleur, une carte des états de surface (figure 9) a été réalisée par le PADI/BF-103. Cette carte a été établie à partir d'observations réalisées sur le terrain suivant la clé d'identification des états de surfaces réalisée par Casenave et Valentin (1989). Elle fut ensuite extrapolée à l'échelle de la carte à partir d'appréciations visuelles des images SPOT5.

Cette carte délimite les zones de cultures, les croûtes d'érosion, les croûtes de dessiccation, les croûtes grossières, les croûtes structurales limoneuses, les croûtes de décantation, les buttes rocheuses et les plans d'eau (figure 9).

III.1.4. Végétation

Le bassin versant de Mogtedo est recouvert de végétations de différents types. Le climat ainsi que la pluviométrie moyenne de 720 mm de la localité lui confèrent une végétation de type "savane arborée à arbustive" marquée par la présence de *Combretum* spp, d'*Anogeisus léiocarpus*, *parkii*, *laenna* spp, de *Butyrospermum parkii* qui occupent près de 65% de la superficie du bassin versant. On note également la présence de formations mixtes associées aux cultures, des parcs à *Butyrospermum parkii*, à *Acacia Albida* sur 34% de la surface, les plans d'eau se partageant le reste de la superficie.

III.2. MATERIEL UTILISE

Le matériel utilisé lors de la campagne terrain est le suivant:

- Matériel de prélèvements de sol, composé d'une cuillère et d'un marteau ;
- Un tensio-infiltromètre à mini-disque produit par Decagon Devices Inc (figure 9) ainsi qu'un chronomètre pour les essais d'infiltrométrie;
- Un GPS à main de marque Garmin pour le repérage des points de prélèvement;
- Images SPOT5

Le traitement des données aussi bien avant qu'après la campagne terrain s'est fait à l'aide du logiciel suivant:

- ESRI Arcgis 10.2



Figure 9: Tensio-infiltromètre à mini-disque fabriqué par Decagon Devices

III.3. METHODES

La méthode pour la détermination de l'érodibilité des sols du bassin versant de Mogtedo, utilisée dans le présent travail, se base sur le choix du PADI/BF-103 porté sur l'utilisation du modèle (R)USLE qui servira à la prédiction des pertes en sols. Parmi les deux méthodes de détermination du facteur K existantes (graphique et analytique), nous avons opté de procéder analytiquement en faisant usage de l'équation classique de Wischmeier *et al.* (1978) (équation 2) et des séries d'équations proposées par Auerswald *et al.* (2014) (équations 3 à 8).

Les valeurs de K sont calculées par type d'état de surface sur des parcelles réduites du bassin versant (échelle de transects), où les données de terrain sont collectées. Ces valeurs de K sont ensuite extrapolées à l'ensemble du bassin versant en se servant de la cartographie des états de surface réalisée par le PADI/BF-103, laquelle d'ailleurs est en cours de révision en vue d'intégrer certaines corrections et d'autres spécificités.

III.3.1. Caractérisation des données d'entrée pour la détermination du facteur K

Les données d'entrée pour le calcul de K proviennent des données primaires collectées sur le site concerné par l'étude. De plus, cette collecte de données sur site doit se faire de manière à s'assurer que les échantillons prélevés sont représentatifs des réalités du terrain.

Avant le prélèvement des échantillons et des mesures proprement dits, une première visite de terrain a été entreprise en compagnie d'une équipe composée du maître de stage, d'un agent de terrain du projet et de l'encadreur de 2iE. Cette visite de reconnaissance a permis d'avoir un premier contact avec le site d'étude et de découvrir les voies d'accès des différentes parties du bassin versant. S'en est suivi, quelques jours après, soit du 24 au 29 mars, la campagne de mesures de terrain au cours de laquelle ont été réalisés les prélèvements d'échantillons et les essais de conductivité hydraulique.

a. Plan d'échantillonnage

Une méthode d'échantillonnage composite est utilisée: les sols de chaque état de surface sont prélevés de manière indépendante et régulière tout au long du transect. Il en est de même pour les mesures d'infiltrométrie, mais avec des espacements plus importants comparativement aux prélèvements de sols.

Avant le terrain, l'échantillonnage des sites de mesure et de prélèvement s'est fait à l'aide de la carte des états de surface de Mogtedo, mise à disposition par le PADI/BF-103. Bien que cette carte ne soit pas très précise, elle permet d'avoir une position approximative des principaux états de surface où les interventions de mesures et de prélèvement ont été effectuées quitte à procéder à des rectifications, une fois sur place.

Ainsi, quatre (04) transects ont été effectués, placés et repartis sur l'ensemble du bassin versant, de manière à traverser le profil des vallées et le maximum des états de surface qui se distinguent par leur grande taille et qui s'alternent sur le profil (figure 10).

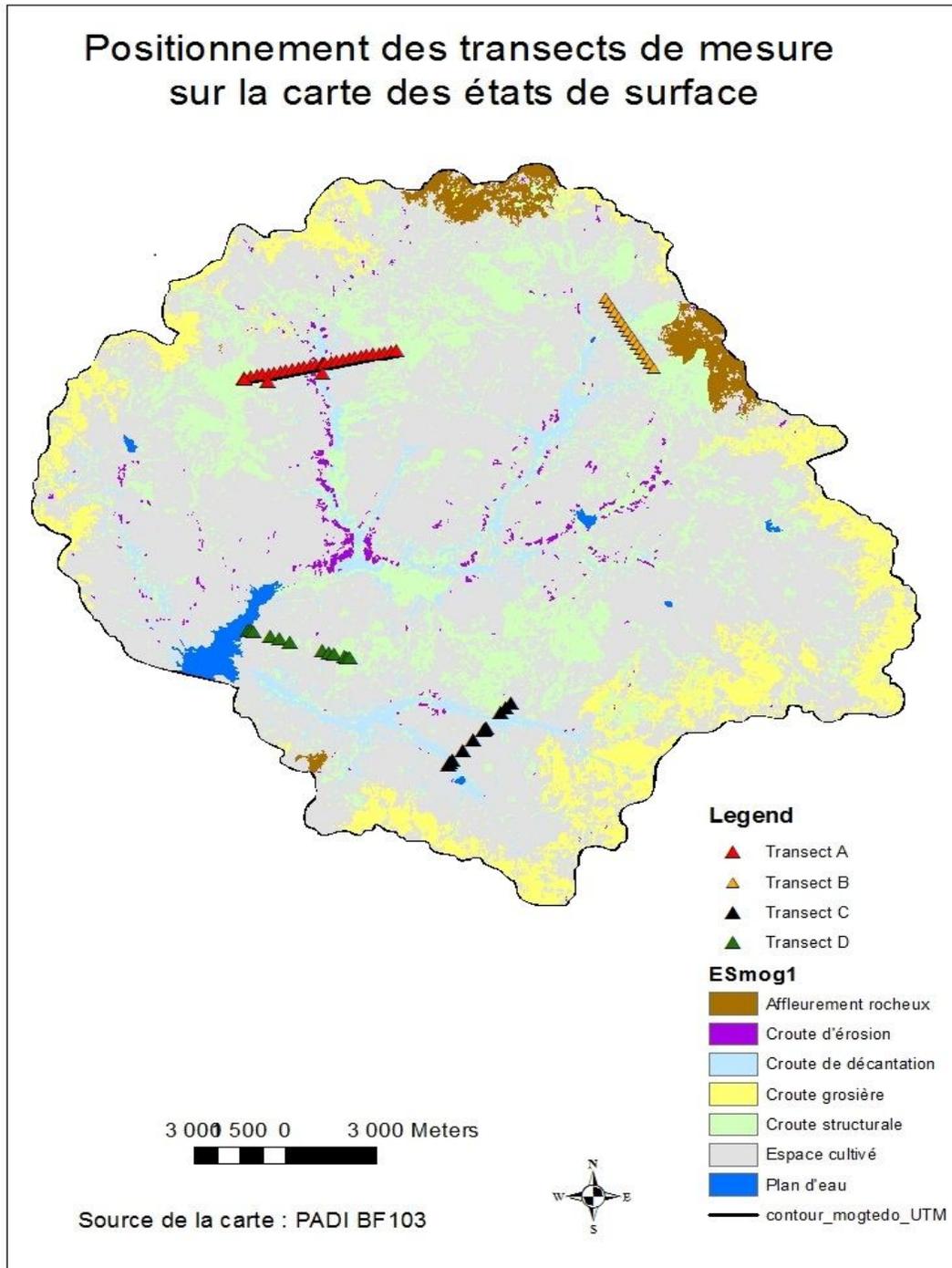


Figure 10: Positionnement des transects de mesure sur la carte des états de surface

Sur chaque transect, les points de mesure et de prélèvement ont été placés préférentiellement à des intervalles plus ou moins réguliers de 200 m. Mais compte tenu des différences de taille de ces différentes surfaces, cette équidistance a été par endroit réduite ou agrandie de sorte à

réunir trois ou quatre de ces points d'intervention successifs sur le même état de surface avant le passage à une autre surface.

Le logiciel de SIG Arcgis 10.2 a été utilisé au cours de cette étape. Il a permis de définir, à partir de la carte des états de surface géoréférencée, les coordonnées des points de prélèvement des échantillons de sol et des essais de conductivité hydraulique

b. Prélèvement des échantillons de sols

Les transects ont été suivis à l'aide d'un GPS à main sur le terrain. Sur place, il est arrivé parfois qu'un état de surface donné soit marqué à certains endroits par la présence de surfaces secondaires d'autres natures. Les points de prélèvement ont alors été ajustés de sorte que ceux-ci coïncident avec l'état de surface dominant.

Un prélèvement d'échantillons composites de sols a été effectué lors de chaque transect pour chaque état de surface rencontré. Un total de 43 échantillons ont été prélevés. Chaque état de surface a fait l'objet d'au moins trois (3) prélèvements, sauf la butte rocheuse qui en a connu deux mais furent abandonnés par la suite, du fait qu'ils ne présentaient aucun intérêt significatif pour l'étude.

Le prélèvement se fait à l'aide d'une cuillère à 2 cm de profondeur, après avoir cassé la croûte de surface au marteau. Les échantillons sont ensuite mis en sachet, étiquetés avant d'être envoyés au laboratoire pour analyse.

c. Infiltrométrie des états de surface

Les mesures de conductivité hydraulique ont été effectuées par type d'état de surface à un point choisi parmi les trois ou quatre points successifs de prélèvement de sol qui se trouvent sur chaque surface de notre transect, en se rassurant toujours de son effectivité sur l'état de surface dominant. Au total, 15 mesures d'infiltrométrie ont été réalisées avec le tensio-infiltromètre. Chaque mesure a été faite en réalisant trois essais espacés les uns des autres de quelques dizaines de cm de sorte à prélever la moyenne des informations qui soit la plus proche possible de la réalité de chaque état de surface .

Le mode opératoire pour chaque essai consistait à remplir l'infiltromètre avec de l'eau courante (ne pas utiliser de l'eau distillée). Après avoir réglé au niveau supérieur de l'instrument, le tube de succion à 2 cm comme généralement recommandé, le disque poreux à la base de l'infiltromètre a été placé sur une surface lisse du sol préparée à cet effet, afin d'assurer un bon contact. Le niveau initial de l'eau dans l'infiltromètre a été noté à $t = t_0$ qui est l'instant de mise en contact de l'infiltromètre avec le sol. Les instants d'après, ce volume d'eau est suivi et noté à des intervalles de temps réguliers de 30 s au fur et à mesure que l'eau s'infiltré dans le sol. La verticalité du tube, qui est un impératif lors des mesures, a été respectée.

III.3.2. Traitement des données

a. Analyse des échantillons de sols

Les 43 échantillons de sol à analyser ont été envoyés au laboratoire du BUNASOLS situé à Ouagadougou afin d'y réaliser une étude granulométrique par la méthode dérivée de NF X 31-107 et une analyse du carbone organique (méthode dérivée de NF ISO 10 694).

Sur les 43 échantillons remis pour analyse, 12 appartenaient à la croûte grossière, 10 à la croûte structurale limoneuse, 10 autres à l'espace cultivée, 6 à la croûte de décantation, 3 à la croûte d'érosion et les 2 derniers à la croûte de dessiccation. La moyenne des pourcentages (ou fractions) de chaque constituant (argile, limon, sable et matière organique) est faite par état de surface en vue de déterminer les classes texturales des six états de surface qu'on retrouve sur le bassin versant. Le taux de matière organique interviendra directement dans le calcul du facteur d'érodibilité (K) tandis que les classes texturales serviront d'abord au calcul de la conductivité hydraulique (k), laquelle interviendra directement ensuite, comme paramètre du facteur K.

Les classes texturales au nombre de 12 dans le système américain, sont définies à partir du diagramme triangulaire des classes texturales de sols de l'USDA (figure 11)

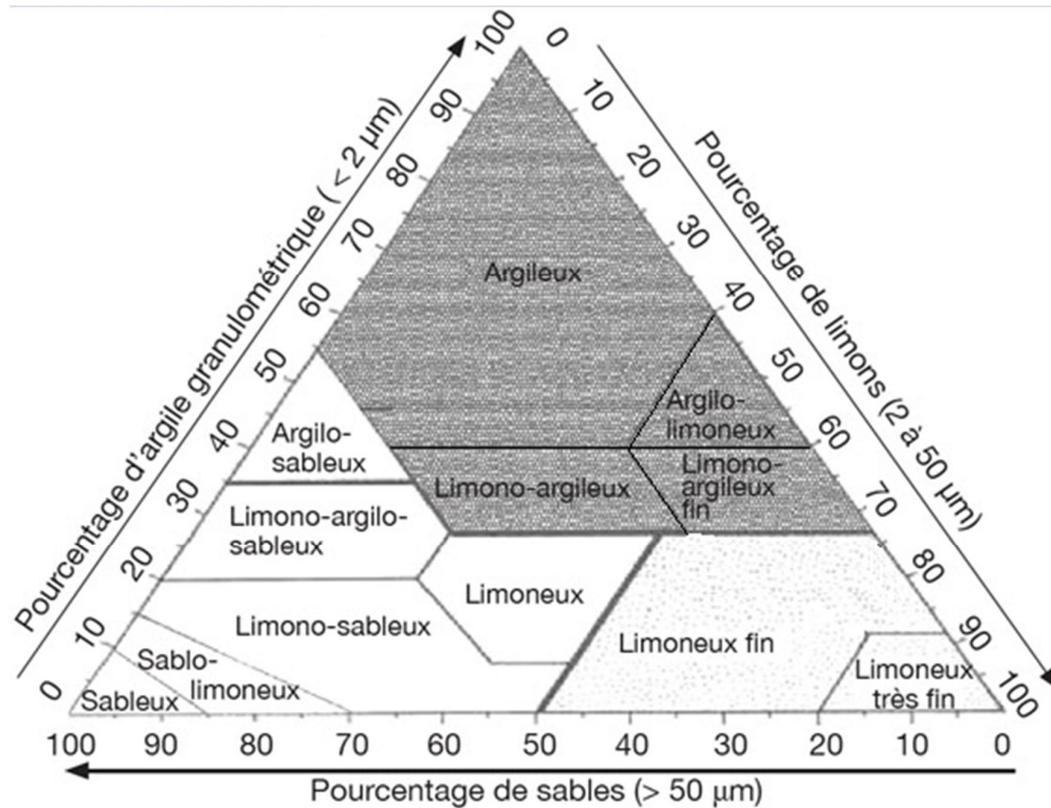


Figure 11: Classification texturale des sols selon l'USDA (1960) (cité par Bachir Dridi & Samia Zemmouri, 2012)

b. Détermination des classes de perméabilité des états de surface

Les 6 classes nomographiques de perméabilité du sol qui entrent en ligne de compte dans le calcul de K sont les suivantes:

Valeur de perméabilité	Perméabilité	Classe de perméabilité
$> 4,4 \times 10^{-5}$	Rapide	1
$1,4 \times 10^{-5} - 4,4 \times 10^{-5}$	Moyenne à rapide	2
$0,4 \times 10^{-5} - 1,4 \times 10^{-5}$	Moyenne	3
$0,14 \times 10^{-5} - 0,4 \times 10^{-5}$	Lente à moyenne	4
$0,04 \times 10^{-5} - 0,14 \times 10^{-5}$	Lente	5
$< 0,04 \times 10^{-5}$	Très lente	6

Figure 12: Les six classes nomographiques de perméabilité des sols

Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer la conductivité hydraulique d'un sol à partir de mesures effectuées à l'aide d'un infiltromètre à disque. La méthode que nous avons

utilisée est celle suggérée par le fabricant de l'infiltromètre à minidisque, Decagon Devices Inc, qui a même proposé un programme sur tableur Excel fourni sur CD avec l'instrument de mesure. Dans le manuel d'utilisation de l'infiltromètre de Decagon que nous avons utilisé il est dit que la méthode est de Zhang. Elle consiste à mesurer l'infiltration en valeur cumulée en fonction du temps et de faire correspondre les résultats avec la fonction suivante (Decagon, 2011):

$$I = (C_1 t + C_2 \sqrt{t}) \quad (\text{Équation 10})$$

Un exemple type de résultats obtenus des mesures réalisées pour une succion de 2 cm est présenté en colonne 1 (temps t) et en colonne 3 (volume lu en ml), du tableau 4 ci-dessous. Le volume est converti en hauteur d'eau infiltrée I (en colonne 4 du tableau) en soustrayant le volume initial et en divisant par la surface du disque de l'infiltromètre: 15,47 cm² (Decagon, 2011).

Tableau 4: Essai n°1 d'infiltrométrie effectué au point Mogt B1 du Transect B

TEMPS t (s)	RACINE CARRE DU TEMPS	VOLUME (ml)	INFILTRATION I (cm)
0	0	85	1.03
30	5.48	69	0.58
60	7.75	60	0.39
90	9.49	54	0.45
120	10.95	47	0.45
150	12.25	40	0.39
180	13.42	34	0.39
210	14.49	28	0.39
240	15.49	22	0.32
270	16.43	17	0.39
300	17.32	11	0.39
330	18.17	5	0.32
360	18.97	0	1.03

La conductivité hydraulique du sol est alors calculée à partir de la formule suivante proposée dans le manuel d'utilisateur de Decagon (2011):

$$k = C_1/A \quad (\text{Équation 11})$$

où A est calculé selon les formules ci-après:

$$A = \frac{11,65(n^{0,1}-1)\exp[2,92(n-1,9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0,91}} \quad \text{pour } n \geq 1,9$$

(Équation 12)

$$A = \frac{11,65(n^{0,1}-1)\exp[7,5(n-1,9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0,91}} \quad \text{pour } n \leq 1,9$$

où n et α sont les paramètres de VAN GENUCHTEN du sol, r_0 le rayon du disque et h_0 la succion à la surface du disque (Decagon, 2011).

Les paramètres de VAN GENUCHTEN sont fonction de la classe texturale du sol où les essais d'infiltrométrie ont été effectués.

Le disque de l'infiltromètre, utilisé lors des mesures effectuées, a pour rayon $r_0 = 2,2$ cm pour sept valeurs de succion allant de 0,5 cm à 6 cm de hauteur d'eau. Une position fixe de $h_0 = 2$ cm a été utilisée pour toutes les mesures.

Les paramètres de VAN GENUCHTEN déterminés pour le rayon $r_0 = 2$ cm par CARSEL et PARRISH (1998) cités par le fabricant (Decagon, 2011), lui ont permis de calculer A pour différentes valeurs de succion. Le tableau 3 en est un extrait:

Tableau 5: Paramètres de VAN GENUCHTEN et Zhang pour $h_0 = 2$ cm

TEXTURE (français et équivalent anglais)	α (cm ⁻¹)	n	A ($h_0 = 2$ cm)	
sable	sand	0,145	2,68	2,4
sable limoneux	loamy sand	0,124	2,28	3,3
limon sableux	sandy loam	0,075	1,89	5,4
limon	loam	0,036	1,56	8,6
silt (limon très fin)	silt	0,016	1,37	12,0
limon silteux (limon fin)	silt loam	0,020	1,41	10,9
limon argileux sableux	sandy clay loam	0,059	1,48	5,8
limon argileux	clay loam	0,019	1,31	9,1
limon silteux argileux (limon argileux fin)	silty clay loam	0,100	1,23	11,7
argile sableuse	sandy clay	0,027	1,23	5,6
argile limoneuse	silty clay	0,005	1,09	8,7
argile	clay	0,008	1,09	5,9

c. Détermination des classes de structure des états de surface

La structure fait partie des paramètres qui servent au calcul de l'érodibilité K. Elle correspond au mode d'agencement des différentes particules solides (sables, limons, argiles, matières organiques) et se réfère précisément aux agrégats des particules primaires du sol qui sont séparés des agrégats adjacents par des surfaces de rupture (Wall *et al.*, 1997). Une bonne stabilité structurale permet au sol de résister à toutes les agressions physiques et à l'érosion, tout en favorisant une bonne infiltration, utile pour les agriculteurs.

Wischmeier et Smith (1971) ont défini quatre classes nomographiques de structure de sol qui sont:

Structure	Code de structure
Classe granulaire très fine (sans structure)	1
Classe granulaire fine	2
Classe granulaire moyenne ou grossière	3
Classe polyédrique, lamellaire ou massive	4

Figure 13: Classes nomographiques de structure des sols de Wischmeier et Smith (1971)

La caractérisation de la structure des sols, de façon précise, se fait de préférence in situ et demeure la partie la plus délicate de la détermination des paramètres de K, en ce qu'elle nécessite un niveau de maîtrise qui ne s'acquière qu'avec l'expérience. Toutefois, les Canadiens ont développé un code de structure basé sur la classification texturale des sols, qui est inexistant dans le système américain. Cette classification structurale canadienne est celle utilisée dans le cadre de notre travail. Ces classes de structures canadiennes ont été harmonisées avec celles de l'USDA en ce qui concerne le nombre (4 classes), mais pas au niveau des classifications texturales où une petite différence demeure. En effet, le système américain en dénombre 12 alors que le canadien compte une classe texturale de plus, qui est l'argile lourde (figure 14). Fort heureusement, l'argile lourde dans la classification canadienne n'est rien d'autre que la sous classe du sol argileux du système américain dont la proportion texturale en argile dépasse 60%. De plus, les limites des classes granulométriques pour le sable, le limon et l'argile sont les mêmes dans les deux systèmes. Ces précisions ont été apportées par Gagné *et al.* (2013) qui renvoient le lecteur à la référence suivante: "SISCAN, 1982, pages 76 à 79".

Le tableau 6 ci-dessous compare la classe nomographique, le type de structure et la taille des agrégats du Canada et des Etats-Unis.

Tableau 6: Type de structure – critère du code nomographique

Agrégat du Canada			Agrégat des Etats-Unis
classe	taille (mm)	type de structure	taille (mm)
1	< 1	granulaire fine ou sans structure	--
2	1 – 2	granulaire fin	< 2
3	2 – 10	granulaire moyenne	2 – 5
	2 – 10	granulaire grossière	5 – 10
4	> 10	polyédrique, lamellaire, massive ou prismatique	> 10

(Cool et al., 1985, cité par Wall et al., 1997)

A la suite de ce tableau, Wall *et al.*, (1997) ont attiré l'attention sur les sols à texture moyenne tels les loams, les loams limoneux et les limons, qui sont classés en général dans la classe 2 ou 3 dans le système américain, mais répondent parfois aux critères de la classe 1 ou 4 dans la classification canadienne (Wall *et al.*, 1997). En observant la figure ci-dessous on constate que cela se vérifie aisément pour la texture "loam limoneux" qui se retrouve de part et d'autre de la ligne de démarcation des classes de structure 3 et 4 sans toutefois créer de confusion si l'on s'appuie sur rien d'autre que la classification de la figure. Enfin, les loams se retrouvent clairement dans la classe 2 qui n'est pas loin de la classification américaine, sauf les limons, qui au lieu d'appartenir à l'une des classes 2 et 3, se retrouvent dans la classe 4 de la classification canadienne.

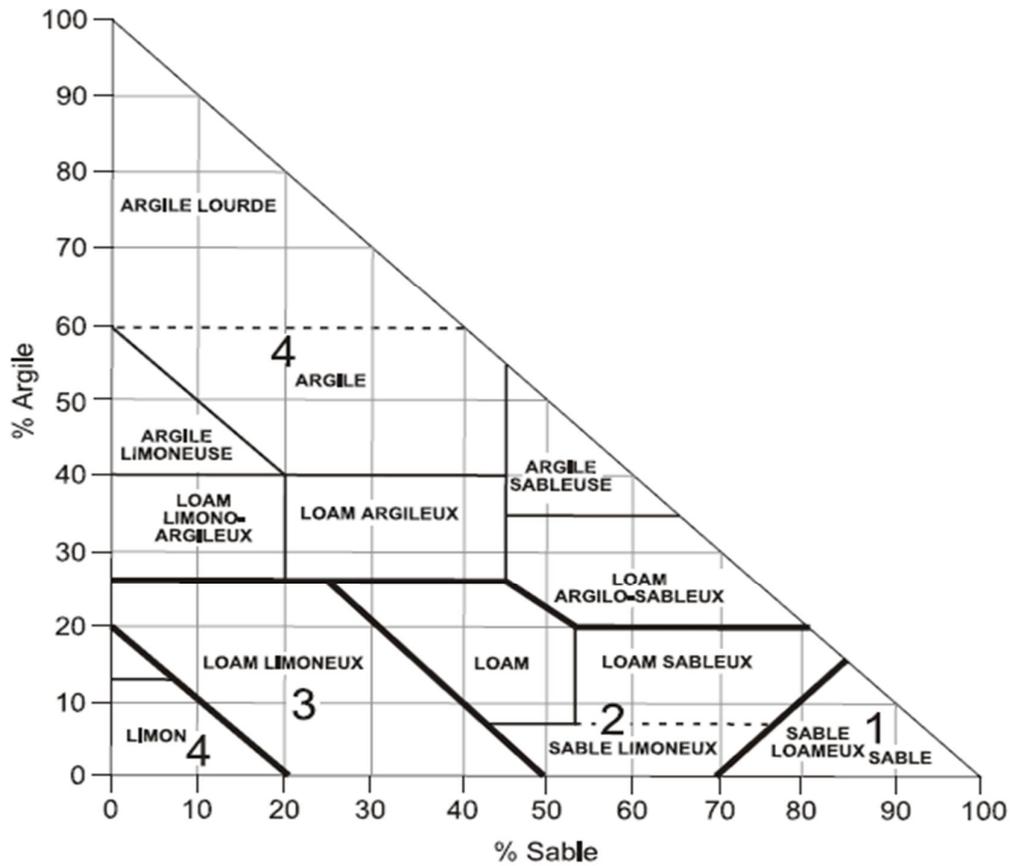


Figure 14: Code de structure basé sur la classification texturale (Ontario Center for Soil Resource Evaluation, 1993 cité par Wall *et al.* 1997)

La figure 14 ci-dessus a été obtenue en superposant les classes de structures sur la figure 15 ci-dessous qui représente la classification texturale canadienne.

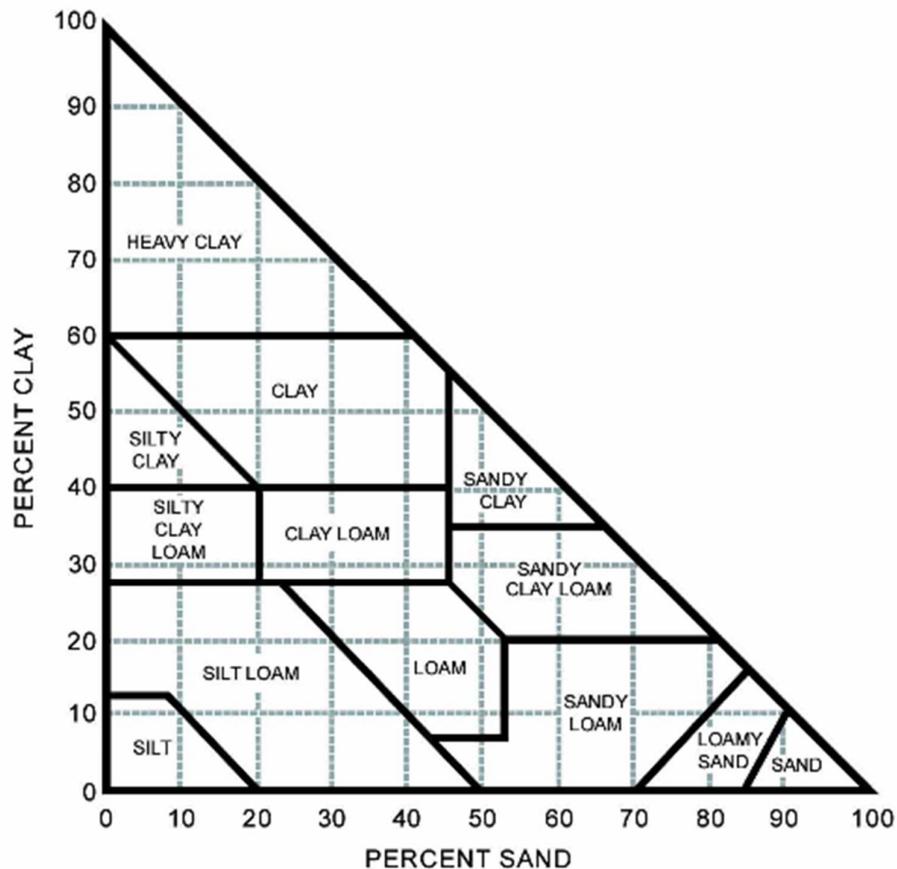


Figure 15: Classes texturales des sols dans le système canadien de classification des sols (Groupe de travail sur la classification des sols, 1998 cité par Wall *et al.*, 1997)

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats issus du traitement des données et présentés dans la suite de notre travail ont été obtenus en s'appuyant sur la méthodologie décrite à la section III.3. Les données requises pour le calcul de K ont été obtenues, soit des données primaires provenant des prélèvements de terrain, soit après un premier traitement. Les résultats obtenus sont transcrits dans les lignes qui suivent selon une démarche qui présente par étape, et ce avant les résultats de l'érodibilité des états de surface obtenus, les différents paramètres utilisés pour son calcul.

IV.1. PRINCIPAUX PARAMETRES DE L'ERODIBILITE DES ETATS DE SURFACE

IV.1.1. Pourcentage d'argile, de limon et de sable

Les résultats des analyses de sols ont fait ressortir pour chaque échantillon cinq fractions texturales que sont les argiles, les limons fins, les limons grossiers, les sables fins et sables grossiers ainsi que les taux de carbone organique.

Les principaux états de surface rencontrés sur le terrain et qui ont effectivement fait l'objet de mesures sont résumés dans le tableau 7. Les types de croûtes qui ont été le plus rencontrés sur les transects réalisés sont les croûtes grossières, suivies des croûtes structurales et les espaces cultivés. Pour ces derniers, le plus grand nombre d'échantillons a été prélevé. Les croûtes qui se prêtaient moins aux mesures, du fait de leur rareté étaient celles de dessiccation et d'érosion. Les résultats des analyses granulométriques seront utilisés dans le calcul du facteur d'érodibilité K des sols pour chaque état de surface.

Tableau 7: Composition texturale de chaque état de surface

Etat de surface (I)	Echantillon de sol prélevé (II)	Grandeur statistique (III)	argile (< 2µm) (%) (IV)	limon fin (2 à 20 µm) (V)	limon grossier (20 à 50µm) (VI)	sable fin (50 à 200 µm) (VII)	sable grossier (200 à 2000 µm) (VIII)	Total limon (2 à 50µm) (IX)	Total sable (50 à 2000 µm) (X)	limon + sable (2 à 100 µm) (XI)
Croûte de dessiccation	2	Moyenne	3.92	12.42	6.21	64.54	12.91	18.63	77.45	40.14
		Ecart type	2.77	6.47	3.23	10.39	2.08	9.70	12.47	
		Coefficient de variation	70.71	52.07	52.07	16.11	16.11	52.07	16.11	
Croûte d'érosion	3	Moyenne	16.34	21.35	10.67	43.03	8.61	32.02	51.63	46.37
		Ecart type	2.26	3.99	2.00	3.77	0.75	5.99	4.53	
		Coefficient de variation	13.85	18.70	18.70	8.77	8.77	18.70	8.77	
Croûte grossière	12	Moyenne	6.46	14.74	7.49	60.30	12.26	19.97	69.48	42.33
		Ecart type	4.56	7.96	4.21	12.21	2.16	10.30	21.23	
		Coefficient de variation	70.57	54.04	56.19	20.26	17.61	51.55	30.56	
Croûte de décantation	6	Moyenne	45.10	24.18	12.09	15.53	3.11	36.27	18.63	41.45
		Ecart type	11.89	6.44	3.22	3.06	0.61	9.67	3.67	
		Coefficient de variation	26.37	26.65	26.65	19.68	19.68	26.65	19.68	
Croûte structurale (limon)	10	Moyenne	12.94	19.74	9.87	47.88	9.58	29.61	57.45	45.57
		Ecart type	8.78	7.66	3.83	15.73	3.15	11.49	18.88	
		Coefficient de variation	67.85	38.79	38.79	32.86	32.86	38.79	32.86	
Espace cultivé	10	Moyenne	7.65	15.69	7.84	57.35	11.47	23.53	68.82	42.65
		Ecart type	5.58	6.69	3.35	11.72	2.34	10.04	14.06	
		Coefficient de variation	73.00	42.66	42.66	20.43	20.43	42.66	20.43	

Les analyses granulométriques montrent pour chaque état de surface une proportion élevée de sable (plus de 50%), suivie de celle du limon, sauf pour la croûte de décantation dont la proportion d'argile est de l'ordre de 45% et celle de limon 36%. Cette exception perd son sens lorsqu'on la considère indépendamment et qu'on tient compte de la définition même de la croûte de décantation qui se forme essentiellement à partir d'un tri granulométrique, lequel favorise un dépôt abondant de particules fines au niveau supérieur (Casenave et Valentin, 1989). De plus, ces propensions dominantes des sables et des limons pour les autres états de surface, se comprennent très bien, étant entendu qu'en dehors des croûtes de décantation, seules les croûtes structurales d'érosion admettent une fraction de "limon + sable" inférieure à 80-85%. On observe également que la plus forte proportion de sable (77%) est enregistrée dans les croûtes de dessiccation. Ce taux élevé corrobore bien la définition de cet état de surface, formé d'un épais dépôt de sable structuré. Enfin, il se dégage que les plus fortes disparités concernent surtout la fraction d'argile.

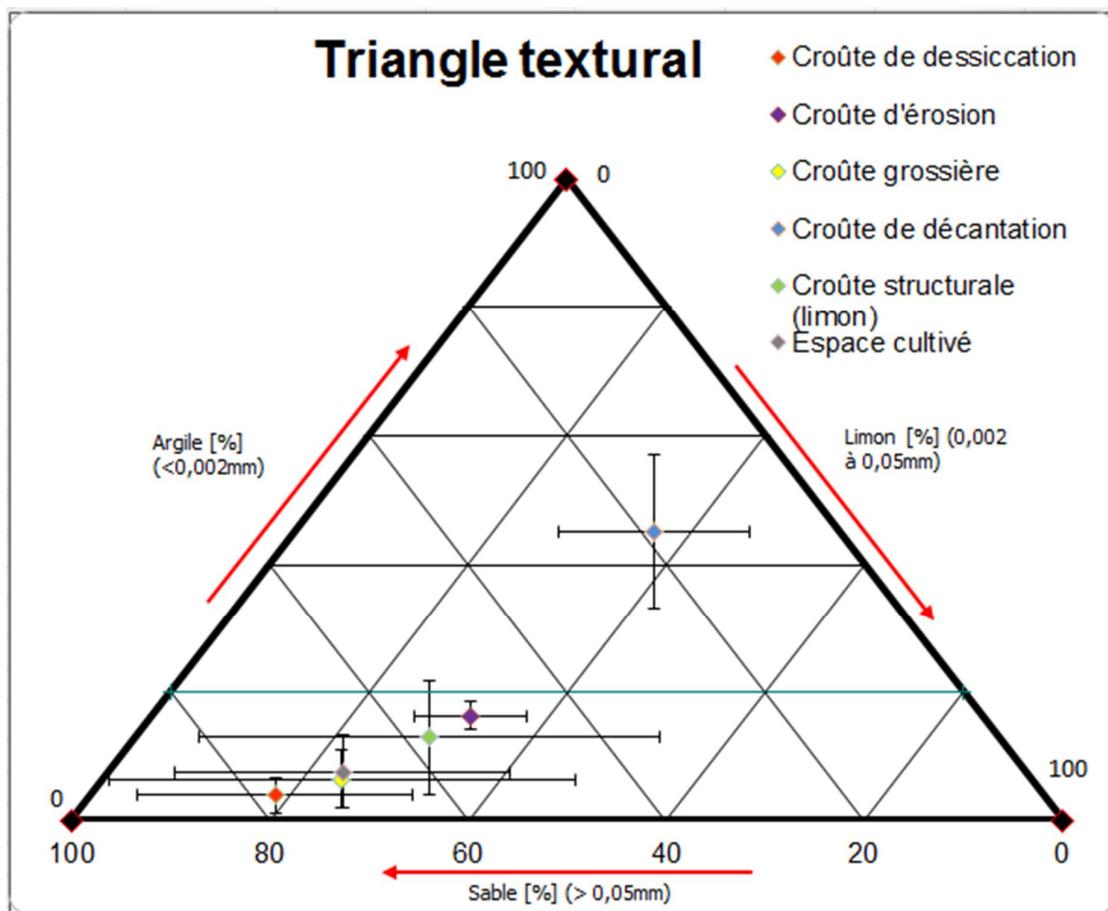


Figure 16: Analyse texturale des échantillons par état de surface: Proportions moyennes et écarts types des argiles (< 2 µm), des limons (2-50 µm) et de sable (50-2000 µm)

Sur la figure 16, nous constatons, en nous basant sur la classification texturale des sols selon l'USDA (figure 14), que la majorité des états de surface, à savoir la croûte grossière, la croûte structurale limoneuse et l'espace cultivé, appartiennent à la classe des limons sableux. Quant à la croûte de décantation le taux d'argile est beaucoup plus important comparé à ceux observés pour les autres états de surface. Par contre la croûte d'érosion se place dans la classe des limons tandis que la croûte de dessiccation se positionne dans la classe des sablo- limoneux.

IV.1.2. Matière organique

«Les matières organiques favorisent l'agrégation des particules entre elles et le développement d'une activité biologique qui entraîne une plus grande infiltration aux dépens du ruissellement» (Mounirou, 2012). Ainsi donc, elles influencent positivement la stabilité structurale et ce, pour des teneurs en argile de plus en plus faibles. Donc, plus le taux de matières organiques est élevé moins un sol est susceptible d'être érodé. Il convient tout de même de rappeler qu' au-delà d'un certain seuil du taux de matières organiques dans le sol, fixé à 4%, leur influence demeure inchangée. Le taux de matière organique s'obtient par convention en multipliant celui du carbone déterminé au laboratoire par 1,72. Les résultats de l'analyse des sols, effectuée pour la détermination des fractions texturales et le taux des matières organiques par le BUNASOLS donnent, après le traitement statistique, ce qui suit:

Tableau 8: Taux de matière organique des états de surface

Etat de surface	Echantillon de sol prélevé	Grandeur statistique	Taux de matière organique (%)
Croûte de dessiccation	2	Moyenne	0.96
		Ecart type	0.07
		Coefficient de variation	7.38
Croûte d'érosion	3	Moyenne	1.09
		Ecart type	0.18
		Coefficient de variation	16.10
Croûte grossière	12	Moyenne	1.37
		Ecart type	0.71
		Coefficient de variation	51.65
Croûte de décantation	6	Moyenne	1.47
		Ecart type	0.22
		Coefficient de variation	15.14
Croûte structurale (limon)	10	Moyenne	1.33
		Ecart type	0.26
		Coefficient de variation	19.62
Espace cultivé	10	Moyenne	0.94
		Ecart type	0.19
		Coefficient de variation	20.22

Le tableau 8 et la figure 17 révèlent un taux relativement faible de matière organique (moins de 1,47%) pour l'ensemble des états de surface; ceci est très en deçà des 4%, qui représentent le seuil limite pour que les matières organiques cessent d'influencer la structure du sol (Trott et Singer, 1983). Ces faibles taux (en considérant les croûtes entre elles), relativement proches pourraient s'expliquer par la sécheresse persistante que connaît le Burkina Faso depuis les années 1970 et au cours de laquelle le pays a été le plus durement touché par ce fléau. Cette sécheresse a entraîné «une forte dégradation des sols (diminution progressive ou disparition de la couverture végétale et de l'activité biologique des sols, encroûtement des sols)» (Mounirou, 2012). Ce phénomène a, par la suite, été accéléré par les activités humaines par l'accroissement des surfaces cultivées en réponse au déficit pluviométrique. On peut remarquer aussi que les espaces cultivés ont la moyenne de taux des matières organiques la plus faible. Enfin, l'analyse des coefficients de variation montre clairement une disparité faible à moyenne de la MO pour chaque type d'état de surface.

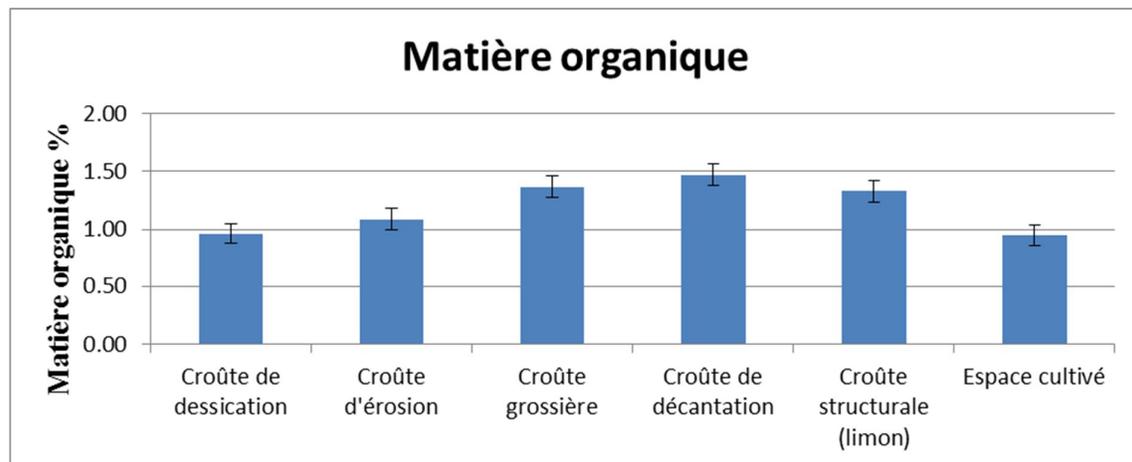


Figure 17: Taux de matière organique dans les échantillons des différents états de surface

IV.1.3. Structure du sol

Après avoir analysé et discuté le taux de matières organiques relevé dans les différents états de surface, il sera question dans ce point de la structure des sols des différents états de surface dont la classification est consignée dans le tableau 9. Selon Foster *et al.* (2003), la valeur de K est liée à la structure et serait faible pour une granulométrie fine et grossière, modérée pour une granulométrie moyenne et élevée pour les granulométries riches en limon. Les 4 classes de structure déterminées l'ont été sur la base de la classification canadienne qui s'appuie sur la classification texturale des sols.

Tableau 9: Code de structure des états de surface

Etat de surface	Echantillon de sol prélevé	Classe texturale (USDA)	Classe texturale (système canadien)	Classe de structure
Croûte de dessiccation	2	Sable limoneux	sable loameux	1
Croûte d'érosion	3	limon	loam	2
Croûte grossière	12	limon sableux	sable limoneux	2
Croûte de décantation	6	argile	argile	4
Croûte structurale (limon)	10	limon sableux	loam sableux	2
Espace cultivé	10	limon sableux	loam sableux	2

L'analyse du tableau 9 montre que la croûte de décantation avec un code de structure égal à 4 est la plus facilement érodible. Certes, cela semble contradictoire avec les allégations de

Foster *et al.* (2003), mais pourrait s'expliquer par le fait que de l'argile à l'état granulaire fin serait naturellement, plus facilement transportée par l'eau de pluie et de ruissellement, mais développerait ses forces de cohésion internes après s'être imbibée d'eau. Elle serait alors apte à s'opposer plus durement au détachement de ses particules. "En raison de leur perméabilité, les sols sableux s'exposent moins au transport par le ruissellement, mais sont sensibles au détachement" (Mounirou, 2012). Ce qui corrobore plus ou moins bien avec le code 1. Par ailleurs, il est bien connu que les sols limoneux se prêtent très facilement au détachement de leurs particules en produisant beaucoup de ruissellement avec des sédiments pouvant être transportés. Ces sols (loam, loam limoneux et limon) se classent généralement dans la classe 2 ou 3 (Wall *et al.*, 2002). Et tel est le cas pour les trois autres états de surface qui contiennent une proportion moyenne de limon.

IV.1.4. Infiltrabilité

Les mesures de la conductivité hydraulique non saturée effectuées sur les différents états de surface ont été traitées par la méthode de Zhang (1997), disponible sous forme de programme, fourni par le fabricant de l'infiltromètre à mini-disque, utilisé sur le terrain. Un total de 45 essais d'infiltrométrie ont été effectués à raison de 3 essais par point de mesure, les trois essais étant placés et séparés d'au moins 1 m les uns des autres. Les résultats obtenus se lisent dans le tableau 10:

Tableau 10: Classe de perméabilité des états de surface

Etat de surface	Nombre d'essais d'infiltrométrie	Grandeur statistique	Perméabilité (m/s)	Classe de perméabilité	Classe texturale (USDA)
Croûte de dessiccation	3	Moyenne	0.67E-5	3 (moyenne)	Sable limoneux
		Ecart type	0.80E-5		
		Coefficient de variation	119.18		
Croûte d'érosion	3	Moyenne	0.33E-5	4 (lente à moyenne)	limon
		Ecart type	0.03E-5		
		Coefficient de variation	9.34		
Croûte grossière	9	Moyenne	0.63E-5	3 (moyenne)	limon sableux
		Ecart type	0.62E-5		
		Coefficient de variation	102.33		
Croûte de décantation	6	Moyenne	0.16E-5	4 (lente à moyenne)	argile
		Ecart type	0.17E-5		
		Coefficient de variation	108.00		
Croûte structurale (limon)	12	Moyenne	0.69E-5	3 (moyenne)	limon sableux
		Ecart type	0.42E-5		
		Coefficient de variation	61.63		
Espace cultivé	12	Moyenne	2.09E-5	2 (moyenne à rapide)	limon sableux
		Ecart type	1.62E-5		
		Coefficient de variation	77.35		

Une lecture rapide du tableau 10 montre que les espaces cultivés sont les surfaces qui infiltrent le plus avec une vitesse d'infiltration moyenne de $2,09 \times 10^{-5}$ m/s. Ils sont suivis de la croûte structurale limoneuse qu'ils dépassent d'au moins 200%. Casenave et Valentin (1989), au cours de leurs travaux de recherche en zone sahélienne ont trouvé, sur les espaces cultivés dont le couvert végétal dépasse 50% de la surface, les plus grandes valeurs d'intensité limite de ruissellement (pour un sol saturé), parmi lesquelles la maximum est de 35 mm/h soit 1×10^{-5} m/s environ. En comparant avec nos résultats, nous voyons que cette dernière valeur est bien en deçà de la perméabilité mesurée sur les espaces cultivés de Mogtedo. Toutefois, en se basant sur la classification texturale de ces espaces cultivés, qui est de type "limono sableux", leur perméabilité se trouve bien dans les fourchettes données par la FAO (1990) ($0,36 \times 10^{-5}$ – $2,11 \times 10^{-5}$ m/s) et celle de Wall et al. (2002) ($1,4 \times 10^{-5}$ – $4,4 \times 10^{-5}$). La croûte de décantation est celle qui infiltre le moins avec une perméabilité de $0,16 \times 10^{-5}$ m/s, alors que les croûtes grossières et de dessiccation présentent des conductivités hydrauliques contenues dans les fourchettes des intensités limites de ruissellement de Casenave et Valentin (1989). Les croûtes de décantation et d'érosion laissent observer plutôt des valeurs au-delà des fourchettes données par les deux auteurs. La croûte structurale limoneuse quant à elle, n'a pas fait l'objet d'une étude de perméabilité par ces derniers. Outre ces constats, nous notons que seule la perméabilité de la croûte d'érosion respecte la série de fourchettes donnée par Wall *et al.*

(2002) en s'appuyant sur la texture. En allant plus loin pour s'intéresser aux références de la FAO, nous réalisons, à l'image des espaces cultivés, que les perméabilités de tous les états de surface sont conformes aux valeurs indiquées par celles-ci. Enfin, nous lisons sur le tableau 8 que toutes les surfaces affichent des perméabilités avec des disparités élevées à très élevées, sauf la croûte d'érosion qui manifeste une uniformité bien perceptible sur la figure 15.

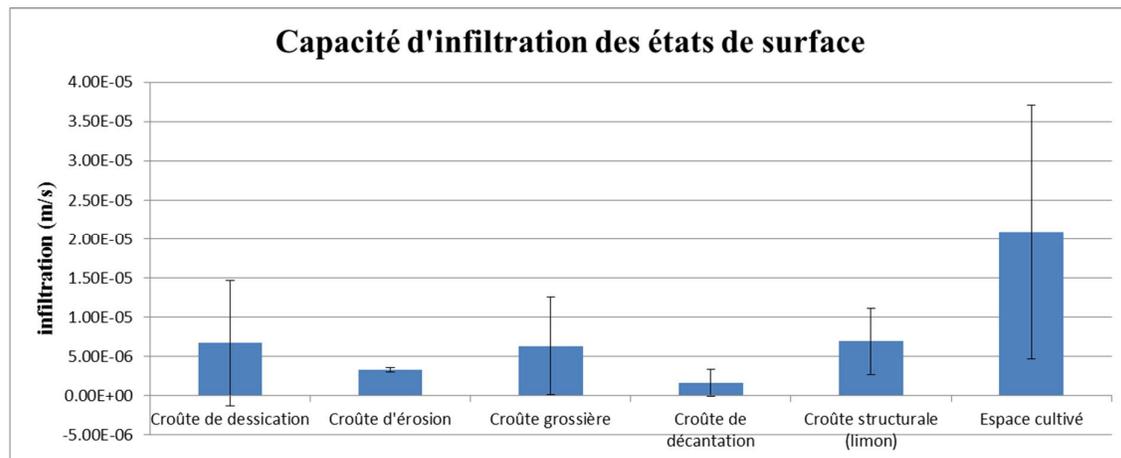


Figure 18: Capacités d'infiltration moyennes et écarts types des états de surface

IV.2. CALCUL DU FACTEUR D'ERODIBILITE K DES ETATS DE SURFACE

L'érodibilité des différents états de surface a été calculée en utilisant les équations 2 à 9 décrites à la section II.3, et en tenant compte des paramètres déterminés précédemment (fraction de limon+sable comprise entre 2 μm et 100 μm , fraction de tout ce qui n'est pas argile, taux de matière organique, code de structure du sol et classe de perméabilité). Le taux d'occupation des croûtes grossières par les éléments caillouteux ($\varnothing > 5\text{mm}$) a été évalué sur le terrain à 40% en moyenne. L'application de la série d'équations aux différentes échelles d'observations nous donne les résultats consignés dans le tableau 11. Pour chaque état de surface, deux résultats de K sont donnés, le premier exprimé en $\frac{\text{t}\cdot\text{h}}{\text{ha}\cdot\text{N}}$ (unité métrique) et le

second en $\frac{\text{t}\cdot\text{acre}\cdot\text{h}}{100\cdot\text{acre}\cdot\text{pied}\cdot\text{pouce}\cdot\text{t}}$ (unité anglo-saxonne).

Tableau 11: Détails des caractéristiques et valeurs de K pour les différents états de surface

Etat de surface	Classe de structure du sol	Classe hydrologique	Matière organique (%)	argile (<2µm) (%)	limon (2 µm-100µm) (%)	K1	K2	K1*K2	K	Kus*
(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)	(VII)	(VIII)	(IX)	$\frac{t \cdot h}{ha \cdot N}$ (X)	(XI)
Croûte de dessiccation	1	3	0.96	3.92	40.14	0.34	1.10	0.37	0.37	0.28
Croûte d'érosion	2	4	1.09	16.34	46.37	0.34	1.09	0.37	0.37	0.28
Croûte grossière	2	3	1.37	6.46	42.33	0.35	1.06	0.37	0.35	0.27
Croûte de décantation	4	4	1.47	45.10	41.45	0.19	1.05	0.20	0.20	0.15
Croûte structurale (limon)	2	3	1.33	12.94	45.57	0.35	1.07	0.37	0.37	0.28
Espace cultivé	2	2	0.94	7.65	42.65	0.35	1.11	0.38	0.38	0.29

* *Kus* est exprimé en $\frac{t \cdot \text{acre} \cdot h}{100 \cdot t \cdot \text{acre} \cdot \text{pied} \cdot \text{pouce}}$ (unité anglo-saxonne); pour passer de cette unité aux trois autres formes d'unités métriques communément utilisées dans le monde, ou vice-versa, on se sert des relations suivantes: $\frac{t \cdot h}{ha \cdot N} = 10 \frac{t \cdot ha \cdot h}{ha \cdot MJ \cdot mm} = 10 \frac{t \cdot h}{MJ \cdot mm} = 10 \times 0.1317 \frac{t \cdot \text{acre} \cdot h}{100 \cdot \text{acre} \cdot \text{pied} \cdot \text{pouce} \cdot t}$.

L'observation des valeurs dans la colonne XI du tableau 11 révèle que l'érodibilité des principaux états de surface varie de 0,15 à 0,29 soit une variation forte de 93,33%. En s'appuyant sur la classification de Bolline et Rosseau (1978), il ressort que nos états de surface sont moyennement sensibles à l'érosion sauf la croûte de décantation qui est assez résistante à l'érosion. Les valeurs de K calculées sont supérieures à celles déterminées par Mounirou (2012) sur le bassin versant de Tougou situé au nord du Burkina Faso. Les valeurs d'érodibilité obtenues à Tougou varient de 0,03 à 0,13. Nos valeurs cependant sont proches de celles trouvées par Roose (1977) de ses recherches effectuées sur certains sols en Afrique de l'Ouest dont le Burkina Faso; en effet, pour tous les sites étudiés, Roose avait trouvé, entre autres, des valeurs de K comprises entre 0,10 et 0,15 pour les sols ferrallitiques divers issus de granites, entre 0,15 et 0,18 pour les sols ferrallitiques divers issus de schistes et entre 0,20 et 0,30 pour les sols ferrugineux tropicaux divers issus de granites. En se servant aussi du graphique 19, on note que la croûte de décantation est la moins érodible du bassin versant de Mogtedo; ce qui est presque identique à la valeur de K (0,15) trouvée par Roose et Sarrailh

(1990) à Linoghin (Burkina Faso) pour les sols bruns vertiques, dans le cadre d'un autre travail qu'il a effectué pendant près de 20 ans, cette fois-ci en Afrique tropicale. De plus il peut être compréhensible que les croûtes de décantation soient les plus érodibles car riches en argile, ses sols sont très résistants au détachement grâce aux propriétés des argiles (Morel, 1989). Ce qui n'est pas le cas pour nos croûtes d'érosion si on les compare aux autres ; en effet, avec une valeur de K identique et égale à 0,28 , les croûtes d'érosions constituent avec celles de dessiccation et celles structurales limoneuses les croûtes les plus érodibles de nos états de surface immédiatement après les espaces cultivés pour lesquels K vaut 0,28. Ce qui classe les croûtes d'érosion comme faisant partie des plus productifs de ruissellement alors que celles-ci sont connues pour être des moins érodibles des états de surface de façon générale. Cette situation pourrait s'expliquer par la particularité que présentent nos croûtes d'érosion qui contiennent des taux de matières organiques faibles comparativement à celles de décantation. Le tableau 11 et le graphique 19 révèlent clairement que les espaces cultivés sont les plus érodibles avec une valeur de K égale à 0,29; cette valeur classe les espaces cultivés dans les sols ferrugineux tropicaux divers issus de granites de Roose (1977). Enfin, les croûtes grossières, avec une valeur de K égale à 0,27 diffèrent peu des croûtes de dessiccation, des croûtes d'érosion et des croûtes structurales limoneuses , et, s'identifient aussi avec elles, aux sols ferrugineux tropicaux divers issus de granites sur lesquels Roose (1977) a conduit des études.

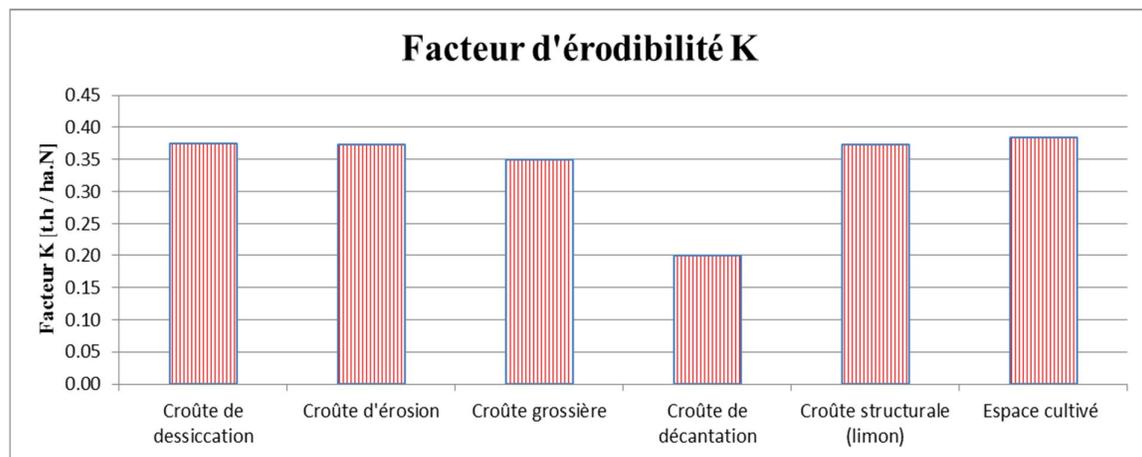


Figure 19: Valeurs d'érodibilité K des différents états de surface

Contrairement à Wischmeier qui suggère qu'à chaque sol doit correspondre un indice d'érodibilité, Roose et Sarrailh (1990) ont observé pour une même station, une évolution de

l'érodibilité du sol en fonction du temps, des techniques culturales, du climat, du type de sol et des caractéristiques du profil de terrain. Étant donné que le modèle USLE vise l'estimation des pertes en terre moyennes sur 20 ans il faudrait pour les besoins d'estimation de ces pertes en terre prévoir un modèle où l'érodibilité du sol évoluerait dans le temps avec l'évolution des facteurs d'influences précités et des propriétés du sol, en particulier les différents paramètres structuraux et les composantes des matières organiques (Mounirou, 2012).

La carte des états de surface, utilisée pour la localisation des surfaces, présente des limites car elle n'est pas précise. En effet sur le terrain, nous avons observé que certaines surfaces ne correspondaient pas à celles indiquées sur la carte. Cela n'a pas empêché de faire les mesures. Toutefois, le nombre d'échantillons minimal prévu pour être récolté par état de surface n'a pu être aisément respecté. Nous avons néanmoins veillé à ce que les états de surface, sur lesquelles nous avons effectué les mesures, soient clairement identifiés et considérés comme tels dans le traitement des données.

V. CONCLUSION

Le phénomène d'ensablement des retenues d'eau, conséquence de l'érosion hydrique, a toujours été un problème majeur dans le monde et au Burkina Faso en particulier, de par la réduction de la capacité de stockage des barrages qu'il favorise. Dans le souci de lutter efficacement contre ce phénomène, nous avons entrepris des études au niveau du barrage de Mogtedo. La démarche a consisté à utiliser le modèle RUSLE en vue de comparer les pertes simulées avec les valeurs obtenues in situ.

Les échantillons de sols analysés au laboratoire ont permis de ressortir le taux des matières organiques, compris entre 0,94 et 1,47%, et les fractions texturales à partir desquelles les classes structurales des états de surface ont été définies. La conductivité hydraulique des états de surface, comprise entre $0,16 \times 10^{-5}$ et $2,09 \times 10^{-5}$ m/s, a été calculée à partir des mesures d'infiltrabilité. Ces quatre paramètres (matières organiques, fractions texturales, codes de structure et perméabilités) influencent l'érodibilité des sols et ont été utilisés avec les séries d'équations de Auerswald *et al.* (2014) pour le calcul des valeurs de K.

De notre étude, il ressort que les valeurs de l'érodibilité des sols déterminées sur le bassin versant de Mogtedo, comprises entre 0,15 et 0,29 (exprimées dans l'unité anglo-saxonne), sont voisines de celles trouvées par d'autres auteurs ayant travaillé en Afrique tropicale, en Afrique de l'Ouest et au Burkina Faso. Notre bassin versant est constitué de sols moyennement sensibles à l'érosion sauf la croûte de décantation qui est constituée de sols assez résistants. De plus, on observe que les espaces cultivés sont les états de surface les plus susceptibles d'être érodés avec une valeur de K égale à 0,29. Ils sont suivis des croûtes de dessiccation, des croûtes d'érosion et des croûtes structurales limoneuses avec une valeur de K égale à 0,28. Enfin, les croûtes de décantation sont les plus stables avec une valeur d'érodibilité égale à 0,15.

VI. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

VI.1. RECOMMANDATIONS

La carte des états de surface utilisée pour le choix des points de collecte des données n'étant pas suffisamment précise pour bien orienter sur les états de surface présents sur le terrain, nous n'avons pu collecter qu'un nombre insignifiant d'informations pour certaines croûtes que sont celles de dessiccation et celles d'érosion.

Il serait judicieux de prélever le maximum de données pour chaque état de surface afin de donner plus de représentativité aux valeurs calculées pour chacune de ces surfaces. Cela dit, il faudrait procéder à une relecture de la cartographie des états de surface de Mogtedo afin de la rendre plus précise pour mieux orienter et faciliter la collecte d'informations sur chaque état de surface.

Ainsi, on pourrait définir des valeurs de référence de l'érodibilité des sols à l'échelle du bassin versant, par type d'état de surface, en déterminant pour chacun, plusieurs valeurs de K. Ce qui permettra d'appliquer des tests statistiques pour vérifier si les valeurs de K sont spécifiques à un état de surface donné.

VI.2. PERSPECTIVES

Prenant en compte l'objectif du PADI/BF-103 de procéder bientôt à la cartographie des zones à risques d'érosion du bassin versant de Mogtedo; en plus de procéder éventuellement à une cartographie plus précise des états de surface pour ressortir de nouvelles valeurs de K, l'essentiel du travail en lien avec l'objectif sus cité devra porter dans les jours à venir sur:

- La détermination des autres paramètres de l'équation RUSLE pour l'estimation des pertes en sol à l'échelle du bassin versant;
- Le dressage de la carte des risques d'érosion à l'échelle du bassin en faisant ressortir clairement les zones produisant le plus de sédiments;
- La proposition de mesures antiérosives adaptées au milieu et faciles à mettre en œuvre en vue de la limitation du phénomène d'érosion et de ses conséquences.

VII. BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES ET ARTICLES

- Abi, A., (2014). «Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : Application du modèle WEAP à la retenue de Mogtedo.» Mémoire de master, 2iE, Ouagadougou.
- Angima, S. , D. Stott, M. O'Neill, C. Ong, et G. Weesies, (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. Vol. 97, chez Agriculture, Ecosystems & Environment, p. 295-308.
- Auerswald, K., P. Fiener, W. Martin, et D. Elhaus, (2014). «Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values.» Catena, p. 220-5.
- Bergaoui, M., et K. Ziadi, (1993).«Quantification de l'érosion à l'échelle du bassin versant de l'oued El Koudgi.» De Réseau Erosion - Bulletin 13 - Neuvième réunion, p. 1992-9. Poitiers.
- Casenave, A., et C. Valentin, (1989). «Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration.» Paris. Collection Didactique: ORSTOM. 229 p.
- Dautrebande, S., et C. Sophier, (2006). «L'érosion hydrique et les pertes en sol agricoles en Région Wallone.» Dossier scientifique - Rapport analytique 2006 sur l'Etat de l'Environnement Wallon, FUSAGx, Gembloux. 122 p.
- DECAGON DEVICES, (2011), Mini disk infiltrometer- User's manuel, Version 9. Pullman: DECAGON DEVICES.
- FAO, (1990). «Etudes et prospections pédologiques en vue de l'irrigation.» Bulletin pédologique n°42, Rome. 192 p.
- Foster, G. R., T. E. Toy, et K. G. Renard, (2003). «Comparison of the USLE, RUSLE1.06 and RUSLE2 for application to highly disturbed lands.» Dans First Interagency Conference on Research in Watersheds, de K. G. Renard, S. A. Mc Ilroy, W. J. Gburek, H. E. Cranfield et R. L. Scott. US Département of Agriculture.
- Gagné, G., et al., (2013) «Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques.» Rapport final. IRDA, Québec, Canada. 81 p.
- Kabré, M., (2010). «Vulnérabilité des sols a l'érosion dans la région du Centre Nord du Burkina Faso : approche par télédétection et SIG (Système d'Information Géographique).» Mémoire de master, RECTAS, Osun state.

- Kinnell, P. I. A., (2010). «Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review.» *Journal of Hydrology*, n° 385. p. 384-97.
- Maïga, A. H., Y. Konaté, K. Denyigba, H. Karambiri, et J. Wethé, (2007). «Eutrophisation et comblement des petites retenues d'eau en zone soudano-sahélienne du Burkina faso.» Dans *Actes des JSIRAUF*, 6 p. Hanoi, 6-9 Novembre.
- MDE, PNUD, «Unité Hydrographique Aqwi-Saint Louis du Sud - Rapport de l'Etude sur l'Erosion des sols MUSLE.» Aqwi-Saint Louis Haïti, s.d.
- MEE, Ministère de l'Environnement et de l'Eau, (2001). «Etat des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion.»
- Moreaux, S.,(2014). «Protéger les sols pour maintenir les capacités d'irrigation au Burkina Faso: Application aux bassins versants de Kierma et Wedbila.» *Mémoire de master*, Université de Liège, Gembloux. 74 p.
- Moukhchane, M., (2002). «Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant du Nakhla (Rif occidental, Maroc).» Tétouan. p. 255-66.
- Mounirou, A., (2012). «Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahéenne du Burkina Faso: Quantification et transposition des données.» *Thèse de doctorat en cotutelle*, Université Montpellier II et 2iE, Montpellier et Ouagadougou.
- Paul-Hus, C., (2011). «Méthode d'étude de l'érosion et gestion des sites dégradés en Nouvelle-Calédonie.» *Mémoire de maîtrise*, Université de Sherbrooke, Nouméa, Nouvelle-Calédonie. 115 p.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. McCool, et D. Yoder. (1997) «Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil loss equation (RUSLE).» Dans *Agriculture Handbook*. Vol 703. Washington: USDA.
- Roose, E., (1977) «Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest: vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales.»
- Roose, E., (2010), «La lutte antiérosive conventionnelle en fonction des processus et des facteurs de l'érosion hydrique.»
- Roose, E., et G. De Noni., (2004). «Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique: revue et perspectives.»
- Roose, E., et J.M. Sarrailh., (1990). «Erodibilité de quelques sols tropicaux - Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles.» *Pédologie*. Vol. 25. n° 1-2. Montpellier: ORSTOM.
- Roose., E., (1994) «Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la

- fertilité des sols (GCES).» Rome: FAO.
- Sibomana, P., (2015). «Contribution de l'association zaï-mulch à l'alimentation hydrique du sorgho dans le dispositif crops-news de kamboinsé.» Mémoire de master, 2iE, Ouagadougou. 64 p.
- USDA, (1951). «Soil Survey Manual.» n° 503.
- Villemure, N., (2006). «Spatialisation des facteurs de l'érosion en nappe pour une gestion durable des sols en Afrique de l'Ouest à l'aide des SIG et du modèle RUSLE2.» Mémoire de maîtrise, Université de Québec à Montréal, Montréal, 197 p.
- Wall, G. J., D. R. Coote, E. A. Pringle, et I. J. Shelton, (2002). Equation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, agriculture et agroalimentaire Canada, N° de la contribution AAC2244F.
- WCD, World Commission on Dams, (2000). Dams and development. Report, London: Earthscan, 404 p.
- Wischmeier, W. H., et D. Smith, (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Vol. 537, chez Agriculture Handbook, de USDA, 58 p.
- Wischmeier, W. H., C. B. Johnson, et B. V. Cross, (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J. of Soil and Water Conservation, 26, 5, p. 189-192.

SITES INTERNET

- Dridi, B., et S. Zemmouri, (2012) «Fonctions de pédotransfert pour les vertisols de la plaine de la Mitidja (Algérie) : recherche de paramètres les plus pertinents pour la rétention en eau.» 16, n° 2, 193-201, URL : <http://popups.ulg.ac.be/1780-4507/index.php?id=8650>. (consulté le 28/11/2015)
- FAO, (2013). Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/bfa/printfral.stm (consulté le 06/06/2015).
- Payet, E., P. Dumas, et G. Pennober., (2011). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. Vol. 11, chap. 1 dans VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne].