



REPUBLIQUE DU NIGER

Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche
et de l'Innovation

UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY

*Ecole Doctorale des Lettres, Arts, Sciences
de l'Homme et de la Société (ED LARSHS)*

THESE DE DOCTORAT EN GEOGRAPHIE

Présentée pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE ABDOU
MOUMOUNI DE NIAMEY

Par

Aghali INGATAN WARZAGAN

Spécialité : Géographie physique / hydrologie, géomorphologie et aménagement

Thèse dirigée par **Ibrahim BOUZOU MOUSSA** et codirigée par **Jean-Pierre VANDERVAERE**
Préparée au sein du Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens
(LERTESS) et de l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, Grenoble)

Evaluation de l'efficacité d'ouvrages antiérosifs sur la rétention d'eau et l'hydrologie des bassins versants du Sud-Ouest du Niger : cas des banquettes et du sous-solage

Thèse soutenue publiquement le **07 Décembre 2020** à Niamey,
devant le jury composé de :

M. Boureima AMADOU, Professeur, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger,
Président

M. Evariste Constant DA DAPOLA, Professeur, Université Joseph Ki Zerbo de
Ouagadougou, Burkina Faso, Rapporteur

M. Mahaman Moustapha ADAMOU, Maître de Conférences, Université Abdou Moumouni de
Niamey, Niger, Rapporteur

M. Ibrahim BOUZOU MOUSSA, Professeur, Université Abdou Moumouni de Niamey,
Niger, Directeur

M. Jean-Pierre VANDERVAERE, Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes, IGE
(Grenoble), France, Co-directeur

A ma mère

A mon père

A mon grand frère Attoubil

A mon épouse et ma fille

A mes frères et sœurs

Table des matières

Table des variables utilisées	vii
Sigles et abréviations	viii
Remerciements	x
Résumé	xiii
Abstract	xiv
Introduction générale	1
Chapitre 1. Cadre théorique de l'étude	5
1.1. Contexte scientifique et problématique de l'étude	5
1.2. Etat de l'art sur les facteurs de genèse et d'augmentation du ruissellement	8
1.2.1. Influence des facteurs climatiques.....	9
1.2.2. Influence des facteurs anthropiques et leurs conséquences.....	10
1.2.3. Etat de connaissances sur les technologies de limitation de ruissellement	12
1.2.3.1. Rappel sur l'évolution des techniques d'aménagement au Niger	12
1.2.3.2. Interventions réalisées dans le domaine de CES/DRS.....	13
1.2.3.3. Rôle des techniques de réhabilitation des sols au niveau de la parcelle	14
1.2.3.4. Bassin versant comme unité spatiale de gestion des ressources naturelles .	16
1.2.3.5. Impacts des aménagements à l'échelle du bassin versant.....	17
1.3. Questions scientifiques de l'étude	19
1.4. Hypothèses de la thèse.....	19
1.5. Objectifs de la thèse.....	20
1.6. Difficultés rencontrées.....	21
Conclusion partielle.....	21
Chapitre 2. Présentation de la zone d'étude et des aménagements étudiés	23
2.1. Contexte géologique de la zone d'étude.....	23
2.2. Unités morpho-pédologiques et leurs occupations	25
2.3. Fonctionnement et dynamique hydrologiques de la zone d'étude	29
2.4. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude.....	32
2.5. Dynamique démographique et ses conséquences sur l'environnement	37
2.6. Quelques indicateurs de l'augmentation du ruissellement et leurs effets.....	46
2.7. Site expérimental de l'étude et ses caractéristiques	48
2.7.1. Bassins versants expérimentaux de Tondi Kiboro	48
2.7.1.1. Présentation.....	48
2.7.1.2. Caractéristiques morpho-pédologiques spécifiques des BV étudiés	50
2.7.1.3. Etats de surface et leur répartition sur la toposéquence du site d'étude	51
2.7.1.4. Caractéristiques morphométriques des bassins versants étudiés	52
2.7.2. Techniques d'aménagement des bassins versants et leur réalisation	53
2.7.2.1. Motifs du choix des types d'aménagement.....	54
2.7.2.2. Technique de banquettes : description et réalisation sur TK amont Nord ...	54
2.7.2.3. Technique d'aménagement par sous-solage du sol.....	56
2.7.2.3.1. Définition et description du sous-solage.....	56
2.7.2.3.2. Réalisation du sous-solage sur le sous bassin TK amont Sud	56
2.7.2.4. Différence entre les techniques d'aménagement utilisées	57
Conclusion partielle.....	57
Chapitre 3. Matériels et méthodes des mesures de l'humidité du sol et de l'écoulement à l'échelle du bassin versant	59

3.1. Dispositif de mesure de la pluie sur le site d'étude	59
3.2. Méthode gravimétrique : mesure par pesés	60
3.2.1. Définitions : teneur en eau.....	60
3.2.2. Principe de mesure : teneur en eau et densité apparente	60
3.2.3. Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique	61
3.3. Matériels et méthodes des mesures indirectes de l'humidité du sol.....	61
3.3.1. Mesure de l'humidité du sol par la sonde à neutrons (échelle ponctuelle)	61
3.3.1.1. Description et fonctionnement de la sonde à neutrons utilisée.....	62
3.3.1.2. Sphère d'influence et principe de mesure	63
3.3.1.3. Contraintes liées à l'utilisation de la sonde à neutrons	63
3.3.2. Protocole de mesures d'humidité dans les surfaces aménagées.....	63
3.3.2.1. Présentations des sites aménagés et du témoin	64
3.3.2.2. Campagnes de mesures	64
3.3.2.3. Tubes d'humidité et leur installation	65
3.3.2.4. Répartition des tubes d'humidité selon les sites aménagés	65
3.3.2.5. Suivi temporel de l'humidité du sol.....	67
3.3.2.6. Prélèvement des échantillons de sol (non remanié).....	68
3.3.3. Méthodes d'analyse des données de l'humidité du sol	69
3.3.3.1. Analyse des données gravimétriques	69
3.3.3.2. Analyse granulométrique laser	70
3.3.3.3. Etalonnage de la sonde à neutrons	70
3.3.3.4. Analyse des profils d'humidité	71
3.3.3.5. Calculs de stock et de la variation de stock hydrique	71
3.3.3.6. Détermination du front d'infiltration	72
3.3.4. Analyse des incertitudes liées aux mesures.....	72
3.3.4.1. Erreur sur l'étalonnage.....	72
3.3.4.2. Incertitudes sur les mesures de teneur en eau	73
3.3.4.3. Incertitudes sur l'estimation du stock hydrique	74
3.3.4.4. Incertitudes sur la détermination de la variation de stock d'eau.....	74
3.3.5. Atouts et faiblesses	75
3.4. Protocole de mesures et méthodes d'analyse de la CEa (échelle parcellaire).....	75
3.4.1. Présentation des parcelles de prospection EM38	77
3.4.2. Méthode d'acquisition des données de la conductivité électrique	78
3.4.2.1. Dispositif et principe de mesure de la conductivité électrique	78
3.4.2.1.1. Principe de mesure.....	78
3.4.2.1.2. Caractéristiques du conductivimètre EM38.....	80
3.4.2.1.3. Positions et réponse relative de l'EM38	80
3.4.2.2. Procédure de calibration de l'EM38	83
3.4.2.3. Principe de mesure appliqué sur le terrain	84
3.4.2.4. Procédure des mesures sur le terrain (échelle de la parcelle)	87
3.4.2.5. Suivi spatio-temporel de la conductivité électrique apparente	89
3.4.3. Méthodes de traitement et d'analyse des données de CEa.....	89
3.4.3.1. Correction des données brutes de la CEa.....	89
3.4.3.2. Outils de traitement des données de la conductivité électrique	90
3.4.3.3. Traitement géostatistique des données.....	91
3.4.3.4. Interpolation par krigeage des données électromagnétiques	91
3.4.3.5. Procédure d'étalonnage de l'EM38	92

3.4.3.5.1. Approche métrologique appliquée à l'échelle locale.....	92
3.4.3.5.2. Méthode des plus proches voisins possibles.....	94
3.4.3.5.3. Relations entre les grandeurs mesurées	95
3.4.3.6. Méthode de cartographie de stock hydrique (échelle parcellaire)	97
3.4.3.6.1. Méthode de spatialisation du stock sur les surfaces de sous-solage	97
3.4.3.6.2. Spatialisation du stock à l'échelle des banquettes	100
3.4.3.6.3. Spatialisation de stock à l'échelle de la parcelle témoin	102
3.5. Mesure de l'écoulement et méthodes d'évaluation de l'impact des aménagements à l'échelle des bassins versants	103
3.5.1. Définitions utiles : ruissellement, écoulement	103
3.5.2. Observations et mesure de l'écoulement.....	103
3.5.3. Dispositif de mesure de l'écoulement : stations hydrométriques.....	104
3.5.3.1. Mesures avant et après réalisation des banquettes (TK amont Nord).....	105
3.5.3.2. Mesures avant et après réalisation du sous-solage (TK amont Sud)	106
3.5.4. Campagnes de jaugeage de la station TK amont Sud.....	106
3.5.4.1. Principe de jaugeage au moulinet	107
3.5.4.2. Dépouillement des mesures de jaugeage	107
3.5.4.3. Etablissement de la courbe de tarage et estimation des débits.....	108
3.5.5. Analyse des mesures de l'écoulement.....	109
3.5.5.1. Détermination de la lame écoulée.....	109
3.5.5.2. Méthode de calcul du coefficient d'écoulement	109
3.5.6. Cartographie des indicateurs de l'augmentation du ruissellement.....	110
3.5.7. Analyse des effets d'aménagement à l'échelle des bassins versants.....	110
3.5.7.1. Comment peut-on analyser le comportement hydrologique d'un bassin ?	110
3.5.7.2. Etude d'impact des aménagements à l'échelle des bassins versants	111
Conclusion partielle.....	111
Chapitre 4. Analyse de l'impact des aménagements à l'échelle locale	113
4.1. Caractérisation de la pluviométrie des saisons 2016 et 2017	113
4.2. Caractérisation des sols étudiés	113
4.2.1. Analyse granulométrique des sols des parcelles expérimentales	113
4.2.2. Analyse des données de la densité apparente des sols étudiés	116
4.3. Résultats de l'étalonnage de la sonde à neutrons	116
4.3.1. Analyse des droites d'étalonnage	116
4.3.2. Analyse des erreurs d'étalonnage.....	118
4.4. Résultats acquis sur le témoin	119
4.4.1. Analyse de l'infiltration sur le sol nu	119
4.4.2. Dynamique hydrique sur le témoin	120
4.4.3. Relation pluie-variations du stock dans le sol nu	121
4.5. Impact des banquettes sur le comportement hydrologique des sols encroûtés	122
4.5.1. Fonctionnement et effets des banquettes sur la rétention d'eau en surface.....	122
4.5.2. Evolution de la teneur en eau volumique (profils hydriques)	123
4.5.2.1. Analyse comparative des profils hydriques de 2016 et de 2017.....	123
4.5.2.2. Variation de l'infiltration des deux côtés (amont, aval) de la banquette ...	125
4.5.2.3. Effet des banquettes sur l'évolution de la teneur en eau volumique.....	127
4.5.2.3.1. Analyse des résultats à l'échelle mensuelle.....	127
4.5.2.3.2. Comparaison des banquettes et du témoin (échelle événementielle)..	130
4.5.2.4. Impact des banquettes sur le stock hydrique (échelle ponctuelle).....	131

4.5.2.5. Effet des banquettes sur la variation de stock hydrique.....	136
4.6. Effet des banquettes sur la régénération de la végétation.....	137
4.7. Effet du sous-solage sur le comportement hydrologique des sols.....	140
4.7.1. Caractérisation du fonctionnement des surfaces de sous-solage.....	140
4.7.2. Evolution du comportement hydrique des sols traités par sous-solage.....	140
4.7.3. Impact du sous-solage sur la teneur en eau volumique (échelle ponctuelle)	143
4.7.3.1. Inter-comparaison des profils hydriques.....	143
4.7.3.2. Analyse des résultats de l'infiltration	145
4.7.3.2.1. Impact du sous-solage l'infiltration ponctuelle (2016 et 2017).....	145
4.7.3.2.2. Infiltration sur les sols en amont et en aval du sous-solage.....	148
4.8. Evolution du stock hydrique des surfaces aménagées en sous-solage	149
4.9. Analyse comparative de l'évolution de stock d'eau moyen	151
4.10. Analyse de la variation du stock en fonction de la pluie.....	154
4.11. Influence du sous-solage sur la régénération des sols nus dégradés	155
Conclusion partielle.....	156
Chapitre 5. Détermination du stock hydrique à partir des mesures EM38.....	159
5.1. Résultats de la méthode géophysique (conductivité électrique apparente)	159
5.1.1. Evolution de la conductivité électrique apparente.....	159
5.1.2. Interpolation par krigeage spatial des mesures EM38.....	160
5.1.3. Evolution spatio-temporelle de la conductivité électrique apparente.....	161
5.2. Résultats de l'étalonnage des mesures EM38	164
5.2.1. Première possibilité : étalonnage basé sur les variations de stock	164
5.2.1.1. Corrélation entre variation du stock-rapports de CEav (tube par tube)	165
5.2.1.2. Corrélation entre ΔS et rapport moyen de la CEav de la parcelle entière..	169
5.2.2. Deuxième principe : étalonnage de l'EM38 avec le stock hydrique	170
5.2.2.1. Analyse des relations conductivité électrique apparente-stock	170
5.2.2.1.1. Analyse des relations d'étalonnage de la parcelle témoin	170
5.2.2.1.2. Relations d'étalonnage sur les surfaces en banquettes	172
5.2.2.1.3. Résultats des relations d'étalonnage sur le sous-solage.....	176
5.3. Cartographie du stock hydrique à partir des mesures EM38.....	181
5.3.1. Cartographie du stock hydrique (échelle de la parcelle)	181
5.3.1.1. Analyse spatio-temporelle du stock hydrique des banquettes	181
5.3.1.2. Spatialisation du stock hydrique sur les parcelles de sous-solage	187
5.3.1.3. Spatialisation du stock estimé à l'échelle du témoin	192
5.3.2. Bénéfice hydrique à l'échelle de la parcelle.....	194
5.3.2.1. Analyse des relations entre variations du stock (ΔS) et pluie.....	194
5.3.2.2. Calcul du facteur de gain par type d'aménagement.....	196
5.3.2.3. Ajustements des relations pluie-variations du stock.....	197
5.3.2.4. Influence de l'intensité des pluies sur la rétention d'eau	201
Conclusion partielle.....	202
Chapitre 6. Analyse de la réponse hydrologique des bassins versants aménagés	205
6.1. Analyse de la pluviométrie et fonctionnement hydrologique des bassins.....	205
6.2. Cartographie de l'occupation du sol des bassins versants étudiés	206
6.3. Effet des banquettes sur le fonctionnement hydrologique du TK amont Nord	208
6.3.1. Impact des banquettes sur la relation pluie-lame écoulée	209
6.3.2. Analyse des hydrogrammes avant et après traitement du bassin	211

6.4. Evolution de la superficie aménagée et du coefficient d'écoulement	212
6.5. Evolution du CE en fonction du cumul annuel des pluies.....	214
6.6. Relation coefficient d'écoulement-proportion aménagée en banquettes.....	214
6.7. Détermination d'une aire optimale de l'efficacité des banquettes	217
6.8. Impact hydrologique du sous-solage à l'échelle du bassin versant	218
6.8.1. Impact du sous-solage sur la relation pluie-lame écoulée	218
6.8.2. Comparaison des hydrogrammes avant et après sous-solage.....	220
6.8.3. Evolution de la surface aménagée et du coefficient d'écoulement	222
6.8.4. Analyse des corrélations entre les grandeurs mesurées.....	223
6.8.4.1. Relation entre proportion aménagée-coefficient d'écoulement.....	223
6.8.4.2. Relation entre pluie annuelle et coefficient d'écoulement.....	224
6.8.5. Existe-t-il une surface optimale de l'efficacité du sous-solage ?	226
6.9. Comparaison du fonctionnement hydrologique des bassins versants aménagés.....	226
Conclusion partielle.....	229
Chapitre 7. Synthèse et discussion des principaux résultats de l'étude	231
7.1. Discussion des résultats obtenus à l'échelle ponctuelle	231
7.1.1. Sur la parcelle témoin.....	231
7.1.2. Sur les surfaces aménagées en banquettes.....	232
7.1.3. Sur les parcelles de sous-solage	234
7.2. Discussion des principaux résultats obtenus à l'échelle de la parcelle	236
7.2.1. Apport de la CEa pour l'étude d'impact hydrologique des aménagements	236
7.2.2. Cartographie du stock hydrique à partir des mesures EM38.....	238
7.2.3. Quantification du bénéfice hydrique à l'échelle de la parcelle	240
7.3. Synthèse et discussion des résultats à l'échelle du bassin versant	241
7.4. Apport scientifique de l'étude	243
Conclusion partielle.....	244
Conclusion générale et perspectives	245
Références bibliographiques	251
Liste des Tableaux.....	275
Liste des Figures	277
Annexes	I

Table des variables utilisées

W	Teneur en eau pondérale [MM^{-1}]
ε	Permittivité diélectrique [$C V^{-1} L^{-1}$]
θ	Teneur en eau volumique [$L^3 L^{-3}$]
Φ	Diamètre du cylindre
θ_s	Teneur en eau à saturation [$L^3 L^{-3}$]
ρ	Résistivité électrique [$V A^{-1} L$]
ρ_b	Densité apparente du sol [$M L^{-3}$]
ρ_w	Masse volumique de l'eau [$M L^{-3}$]
σ_a	Conductivité électrique apparente [$V^{-1} A L^{-1}$]
CE	Coefficient d'écoulement annuel
CR	Comptage réduit
He	Cote de la surface d'eau libre [L]
Kr	Coefficient de ruissellement événementiel
K	Conductivité hydraulique [LT^{-1}]
Le	Lame écoulée sur un bassin versant [L]
Ls	Largeur de ravine [L]
Nt	Nombre de tours (moulinet) [T^{-1}]
P	Pluie [L]
Q	Débit d'écoulement [LT^{-1}]
s	Surface / section [L]
S	Stock hydrique [L]
ΔS	Variation du stock hydrique [L]
Z	Profondeur [L]
v	Vitesse ponctuelle d'écoulement [LT^{-1}]
Ve	Volume écoulé [L]
Vp	Vitesse ponctuelle d'écoulement [LT^{-1}]

Sigles et abréviations

ABN	Autorité du Bassin du Niger
AMMA-CATCH	Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine ; couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
BIOL	Croûte biologique
B	Banquette
BV	Bassin versant
CT	Continental Terminal
DEC	Croûte de décantation
CEa	Conductivité électrique apparente
CEah	Conductivité électrique apparente en mode horizontal
CEav	Conductivité électrique apparente en mode vertical
CE _{ps}	Conductivité électrique de pâte saturée
CES/DRS	Conservation des Eaux et des Sols/Défense et Restauration des Sols
DMN	Direction de la Météorologie Nationale
DST	Dépression Thermique Saharienne
EdS	Etat de surface
ERO	Croûte d'érosion
ETP	Evapotranspiration potentielle
FAO	Food and Agriculture Organisation
FIT	Front Inter Tropical
G	Croûte gravillonnaire
GPS	Global Positioning System
HAPEX-Sahel	Hydrological and atmospheric pilot experiment-SAHEL
INS	Institut National de la Statistique
IPS	Indice Standardisé de Pluie
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRI	Institut des radios isotopes
JEAI-SAPALOTE	Jeune Equipe Associée à l'IRD, SAVane PArc à LOng Terme
LUCOP	Programme de Lutte Contre la Pauvreté en milieu rural
MOA	Mousson Ouest Africaine
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index

ONG	Organisation Non Gouvernementale
ORSTOM	Office de recherche scientifique des territoires d’Outre-Mer
PASP	Projet Agro-Sylvo-Pastoral
PDAAT	Projet de Développement Agroforestier et d’Aménagement,
PDRT	Projet Développement Rural de Tahoua (PDRT),
PIK	Projet Intégré de Keita
PLCE	Programme de Lutte Contre l’Ensablement du fleuve Niger
PUSF	Planification et Utilisation des Sols et Forêts.
RCEa	Rapport de conductivité électrique apparente
RCEav	Rapport de conductivité électrique apparente en mode vertical
RUI	Croûte de ruissellement
S. AM	Surface Aménagée
SCM	Systèmes Convectifs de Mésos-échelle
SED	Stratégie Energie Domestique
SL	Sous-solage
ST	Croûte structurale
TK	Tondi Kiboro
ZCIT	Zone de Convergence Inter-Tropicale
2iS	Initiative pour l’Irrigation au Sahel

Remerciements

Ce travail de thèse a bénéficié de plusieurs soutiens de **AMMA-CATCH**, de l'**Ambassade de France au Niger (service SCAC)**, du **Programme JEAI Sapalote**. Elle a été préparée au sein de l'**Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Grenoble** et du **Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-Sahariens (LERTESS), Université Abdou Moumouni de Niamey**.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à ces structures qui ont bien voulu contribuer à la réalisation de cette thèse.

La partie « remerciements » constitue les dernières lignes que l'on apporte à ce manuscrit de thèse. Après tant d'efforts, tant des phrases écrites, relues, corrigées, voilà nous sommes arrivés à la fin.

Quoi de plus évident que de commencer cette partie par un remerciement infini à mes deux directeurs de thèse. Sans vous ces années n'auraient définitivement pas été les mêmes, je suis sûr.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à mon directeur de thèse, Mr **BOUZOU MOUSSA Ibrahim**. La motivation dont il a fait preuve dès le début de ce projet de thèse, son encadrement avec rigueur, ses conseils ont largement contribué à son aboutissement. Malgré ses occupations, il a toujours trouvé le temps pour se rendre sur le site de Tondi Kiboro (zone d'étude) pendant qu'on y restait en permanence pour les campagnes des mesures. Professeur, votre proximité nous a permis de tant apprendre. Mes plus sincères remerciements pour l'encadrement et les appuis sans conditions.

Mr Jean-Pierre **VANDERVAERE**, un grand encadreur sympa, je garderai un excellent souvenir de vous pour avoir grandement assuré sans conditions le bon déroulement de cette thèse à Grenoble. Ces quelques lignes écrites ici ne résument que faiblement mon ressenti mais je suis persuadé que vous savez pertinemment à quel point ça a été un réel plaisir de travailler avec vous et bien plus encore. Votre rigueur scientifique, votre patience, vos encouragements m'ont permis d'apprendre beaucoup des choses. Mr Jean-Pierre, je vous présente mes plus profonds remerciements de m'avoir formé et partagé votre expérience de chercheur durant cette thèse.

Un grand merci à vous deux en définitive en espérant avoir l'occasion de vous voir encore bien longtemps.

Un grand merci également à Mr **MALAM ABDOU Moussa** qui a participé à toute l'évolution de mon travail sans compter son temps, et qui est surtout toujours disponible pour m'aider en cas de besoin. Moussa, vous êtes inoubliable pour moi. Merci encore infiniment pour tout.

Je remercie Mr Marc **DESCLOITRES**, directeur adjoint de l'IGE/Université Grenoble Alpes, qui s'est intéressé à ce travail et a accepté de nous aider dans l'utilisation et le traitement des

données de l'EM38. Malgré vos multiples tâches administratives, vous m'avez toujours accepté dans votre bureau pendant des heures et des heures en parlant de la conductivité électrique. J'ai tellement appris auprès de vous, merci infiniment pour tout Mr Marc.

Mes remerciements vont à présent à l'endroit de Mr FARAN MAIGA Oumarou pour les appuis sans faille et les conseils tout au long du déroulement de cette thèse. Je vous suis reconnaissant. Je profite également pour adresser mes sincères remerciements à Mr Luc DESCROIX pour ses appuis pendant la réalisation de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse et en particulier Mr MAHAMAN MOUSTAPHA Adamou et Mr DA DAPOLA Evariste Constant pour avoir bien voulu être les rapporteurs de cette thèse et Mr AMADOU Boureïma qui nous a fait honneur de présider le jury de la soutenance.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les enseignants-chercheurs et le personnel administratif du département de géographie. Je remercie également au personnel de l'IRI (UAM) pour nous avoir fourni la sonde à neutrons.

Mes remerciements sincères à l'Ambassade de France au Niger plus particulièrement le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) qui a permis le financement de la mobilité entre Niamey (Niger) et Grenoble (France).

Je tiens à remercier d'une part, l'ensemble des membres administratifs de l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, Université Grenoble Alpes) qui ont facilité mes séjours et m'ont aidé dans les diverses démarches administratives durant ma mobilité entre Niamey et Grenoble. Je pense à Sylvie Galle, Sandrine Anquetin, Odette Nave, Carméline, Véronique. D'autre part, un grand merci à l'ensemble de l'équipe PhyREV : Jean Martial, Thierry Pellerain, Jean-Paul Laurent, Théo Vischel, Guillaume Quantin (merci pour les données), Gérémy Panthou (merci pour l'aide au traitement des données hydro), Alban et bien d'autres qui m'ont chaleureusement accueilli et intégré dans leur groupe et qui n'ont pas hésité à me donner un coup de main en cas de besoin.

Un très grand merci à tous les membres de « l'équipe de Banizoumbou » qui m'ont aidé dans la collecte des données sur le terrain. Je pense particulièrement à Abdoulaye Boubacar Na'allah (le collaborateur de toujours) et à Bouda Ibrahim (le vieux très dynamique et technicien de l'EM38). Bouda, merci de m'avoir aidé à effectuer pour les mesures de l'EM38 à 6 h du matin pendant deux saisons. Je profite aussi pour adresser mes remerciements sincères à tous les habitants du village de Banizoumbou pour leur enthousiasme et leur accueil. Je pense particulièrement à Hama pour les causeries nocturnes.

Je tiens à remercier le personnel de l'IRD Niamey. Je pense à Aliko (pour les mesures topo), Abassa (pour le suivi des pluviographes), feu Abdoulaye Oumarou (pour l'installation des tubes de mesure neutronique). Que l'âme de celui-ci repose en paix, amin ! Je pense à Issoufou,

Taweye, Koné, Mainassara (merci pour l'aide sur hydras 3). Je pense spécialement et amicalement à Bachirou Bodo pour les bons moments passés ensemble.

Je remercie aussi très sincèrement Feu Ibrahim Illiasso (Que ton âme repose en paix, amin !) et son épouse Fatimata. Il m'a, de son vivant, toujours accordé son soutien, ses encouragements et ses conseils précieux tout au long de mes études universitaires ; je n'oublierai jamais ça.

Mes sincères remerciements à mes frères et amis de Grenoble, je pense à Rhoumour Tchilouta, Arafat, Omar, Elhadj, Alghafiet (pour les soirées mémorables passées ensemble), et les familles de Hassane et de Mme Sophie Le Garroy (pour l'accueil durant mon 1^{er} séjour à Grenoble) sans oublier Jean-Yves Brizot de m'avoir accordé son soutien.

De manière plus personnelle, je pense aussi amicalement aux thésards avec qui j'ai partagé de bons moments de détente et de discussions enrichissantes sur une multitude de questions. Merci à tous mes amis d'ici « gens du labo » et d'ailleurs sans qui toutes ces années auraient été bien vides pour moi. Je commencerai bien évidemment par Souley Saley, Gado Idrissa, Dr Abdou Alou Adam, Dr Moustapha Hiya Maidawa, Aghali Emagalé (cher cousin merci pour tout). Mers chers collègues doctorants du département de géographie, un grand merci à vous tous.

Je terminerai cette partie par les personnes qui m'ont le plus aidé durant ces années d'étude mais également durant chaque étape de ma vie, à savoir ma famille. Je venais d'obtenir mon BEPC, mon intention était de partir en exode en Libye. Mais mon grand frère (le plus instruit de la famille) a pris la décision de me réorienter sur le chemin de l'école. Il m'a ainsi inscrit au lycée privé « Soni Ali Ber d'Agadez ». Et, il a su garder un œil protecteur sur moi jusqu'à l'obtention de mon baccalauréat. Il a fallu dix-sept ans après pour que je me rende compte de l'importance de ce service digne qui m'a été rendu. C'est l'occasion pour moi aujourd'hui de lui rendre hommage. Un énorme merci à Attoubil N'gatan, un grand frère spécial pas comme les autres ! les mots ne seraient pas assez riches pour te dire à quel point je te remercie d'être toujours là quand il le fallait. Vous êtes quelqu'un avec qui j'ai tant appris sur la vie sociale et en communauté. Merci de m'avoir fait confiance et, quant à moi, je suis à la fois touché et reconnaissant pour l'aide que vous m'aviez apporté et je ne pourrai jamais vous remercier assez. Je vous dédie donc cette thèse qui n'aurait jamais pu être sans votre soutien.

Enfin, mes plus sincères et vifs remerciements vont à mes parents et mon épouse qui m'ont toujours encouragé dans la poursuite de mes études, ainsi que pour leur aide, leur compréhension et leur soutien.

Je vous souhaite à tous une agréable lecture !

Résumé

Pour atténuer les effets de la dégradation des écosystèmes de l'Ouest du Niger, de nombreuses techniques de conservation des eaux et des sols ont été mises en œuvre sur des sols dégradés afin de réduire leur aptitude au ruissellement. Cependant, rares sont les études qui ont véritablement **quantifié les effets hydrologiques des aménagements de l'échelle locale à celle du bassin versant**. Notre thèse s'oriente sur cet objectif. Elle vise à étudier deux types d'aménagement pour évaluer (i) leur efficacité en termes d'économie de l'eau et (ii) leur impact sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants du Sud-Ouest du Niger.

L'étude est effectuée sur le site de Tondi Kiboro constitué de deux petits bassins versants représentatifs de l'Ouest du Niger. Chacun d'eux est composé d'un sous bassin amont et d'un sous bassin aval. Les sous-bassins amont sont dénommés TK amont Nord (17,7 ha) et TK amont Sud (4,5 ha). Entre 2004 et 2008, le comportement hydrologique initial du bassin TK amont Nord a été caractérisé à l'aide d'une station hydrométrique. Entre 2009 et 2016, des **banquettes** ont été progressivement réalisées sur la zone contributive de ce bassin. Le même protocole d'aménagement a été appliqué en 2014 sur le bassin TK amont Sud, mais avec la réalisation d'une autre technique, le **sous-solage**. On dispose d'une seule année de mesure (2013) sans aménagement pour caractériser le comportement initial dudit bassin.

En 2016 et 2017, un protocole expérimental mis en place aux échelles locale et parcellaire permet de quantifier l'effet des aménagements sur le stockage hydrique des sols. Pour cela, un suivi quotidien de l'humidité du sol par sondage neutronique a été effectué simultanément à celui réalisé par conductivité électromagnétique (EM38) dans plusieurs parcelles en banquettes, sous-solage et témoin. Les stations hydrométriques installées à l'exutoire de chacun des sous-bassins sont destinées à mesurer les débits et en déduire les lames événementielles écoulées et, *in fine*, le coefficient d'écoulement.

Les résultats issus des mesures ponctuelles mettent en évidence les différents impacts des aménagements sur l'amélioration du comportement hydrologique des sols. La mise en œuvre de ces techniques se traduit par une nette augmentation de la teneur en eau et une profondeur d'infiltration qui triple par rapport au témoin, les stocks hydriques s'en trouvant nettement augmentés. Les mesures de conductivité électrique apparente, étalonnées grâce aux mesures neutroniques, permettent, d'une part, de cartographier la distribution spatiale et la dynamique temporelle du stock hydrique à l'échelle parcellaire et, d'autre part, de quantifier avec une très bonne précision le gain en stock hydrique par type d'aménagement et par rapport au témoin. Les résultats montrent que l'impact du sous-solage est plus fort que celui des banquettes.

A l'échelle du petit bassin versant, les deux techniques d'aménagement ont aussi démontré leur efficacité en réduisant les lames écoulées événementielles et, par conséquent, le coefficient d'écoulement annuel. Avec moins de 10 % et 25 % de la surface aménagée sur TK amont Nord et TK amont Sud, respectivement, les CE ont diminué d'environ 8 points de pourcentage. Ce qui met en évidence la différence d'impact hydrologique entre ces deux techniques. Bien que la surface aménagée en banquettes soit assez réduite, l'impact sur la limitation des ruissellements est plus important que celui observé sur le bassin traité par sous-solage. Grâce à cette étude, il est ainsi possible de déterminer une aire optimale par type d'aménagement pouvant permettre de réduire les ruissellements à un niveau choisi.

Mots clés : Infiltration, ruissellement, conductivité électrique apparente, Techniques de CES, bassins versants à brousse tigrée.

Abstract

To mitigate the effects of the degradation of ecosystems in Western Niger, many soil and water conservation techniques have been implemented on degraded soils to reduce their ability to produce runoff. However, rare are the studies with a real quantification of the hydrological effects of local scale developments in the watershed. Our thesis is part of this logic. It aims to study two types of landscaping techniques to assess (i) their efficiency in terms of water saved and impact (ii) on the hydrological functioning of the watershed.

The study was carried out at the Tondi Kiboro site, made up of two small watersheds representative of the hydro-environmental conditions of Western Niger. Each of them is made up of an upstream and a downstream sub-basin. The upstream sub-basins are called TK upstream North (17.7 ha) and TK upstream South (4.5 ha). Between 2004 and 2008, the initial hydrological behavior (no landscaping) of TK upstream North was characterized using a hydrometric station. Between 2009 and 2016, the benches were gradually implemented in the contributory zone of the TK upstream North basin. The same development protocol was applied in 2014 on the TK upstream South basin, but using another technique referred as "subsoiling". There is only one year of measurements (2013) without landscaping to characterize the initial behavior of this catchment.

In 2016 and 2017, the experimental protocol implemented at the local and parcel scales makes it possible to quantify the effect of the landscaped area on the hydric behavior of the soils. For this, daily monitoring (after each rain) of soil moisture by neutron scattering were carried out simultaneously with this of electromagnetic conductivity (EM38) in several plots in benches, subsoiling and control.

The hydrometric stations installed at the outlet of each of the watersheds are intended to measure the flow rates and thus, calculate the exported water per event and the outflow coefficient.

Local scale results show the different impacts of landscaped benches and subsoiling on improving the hydrological behavior of soils. The implementation of these techniques results in a clear increase in the soil water content, the infiltration front depth which can represent more than three times that of the control plot. This has resulted in a significant improvement in the soil water retention capacity.

The calibrated electrical conductivity measurements show that this method makes it possible, on the one hand, to map the spatial distribution and the temporal dynamics of water storage on a parcel scale and, on the other hand, to quantify with a high accuracy the gain in water storage by landscaping type and compared to the control plot. The results show that the impact of subsoiling was larger than that of the benches in comparison with the control.

At the small watersheds scale, the two management techniques have also demonstrated their efficiency in reducing runoff and, consequently, the annual outflow coefficient. With less than 10 % and 25 % of the area developed in TK upstream North and TK upstream South, respectively, the flow coefficients have decreased by around 8 percentage points. Which highlight the difference in hydrological impact between these two techniques. Although the area converted into benches is small, the runoff limitation is larger than that observed in the basin treated by subsoiling. Thanks to this work, it becomes possible to choose an optimal portion of a landscaped area that can reduce runoff to a desired level.

Keywords : Infiltration, runoff, apparent electrical conductivity, water and soil conservation techniques, tiger bush catchments.

Introduction générale

Les écosystèmes des régions semi-arides sahéniennes sont, depuis plusieurs décennies, exposés à la variabilité climatique mais aussi à la pression anthropique à laquelle ils sont sensibles. Dans ces milieux, où les ressources en eau sont rares, les populations dont l'économie est basée sur le secteur rural deviennent de plus en plus vulnérables à ces changements climatiques et environnementaux. A cela s'ajoutent le contexte sécuritaire et la complexité liée à des enjeux sociétaux. De nombreuses études (Jouve, 2004 ; May et Guengant, 2014 ; Garenne et Ferdi, 2016) rapportent que ces problématiques sont particulièrement plus graves pour les pays au sud du Sahara dépendant des écosystèmes pour satisfaire leurs besoins alimentaires et en énergie. De ce fait, les actions humaines combinées à l'agressivité du climat ont façonné la structure de l'espace rural sahélien et nigérien en particulier (Toure, 2011). De plus, l'espace sahélien a connu plusieurs sécheresses, associées à des pénuries graves et des famines (May et Guengant, 2014). Depuis la fin des années 1960, ces phénomènes sont devenus plus fréquents du fait de la forte fluctuation des précipitations avec, actuellement, davantage d'événements hydro-climatiques extrêmes (Sarr et Camara, 2017 ; Taylor et al., 2017 ; Panthou et al., 2018).

Le Sud-Ouest du Niger, à l'instar du Sahel, a donc subi les effets combinés du changement climatique et des actions humaines. La baisse prononcée des pluies, enregistrée au cours des années 1970 à 1990, a provoqué la dégradation des écosystèmes forestiers et agricoles conduisant souvent à des crises socio-économiques. En outre, la zone est soumise à la forte pression liée à l'augmentation rapide de la population, souvent rurale et précaire. L'économie est orientée en grande partie vers l'agriculture pluviale et l'élevage. Ce phénomène en intensifiant la pression sur les ressources naturelles accroît la vulnérabilité de ce milieu déjà fragile et accentue la dégradation du couvert végétal amorcée par les insuffisances pluviométriques des années 70 et 80 (Ozer et al. 2017). Il faut aussi notifier les changements de mode d'occupation de l'espace, d'exploitation et de gestion des ressources. Le tout induit une dégradation conséquente tant en sol qu'en matière organique et par conséquent l'augmentation des écoulements (Descroix et al., 2015 ; Amogu et al., 2015 ; Malam Abdou et al., 2016 ; Descroix, 2018). Par ailleurs, le Sud-Ouest du Niger se caractérise par des plateaux occupés par un écosystème particulier, celui de la « brousse tigrée », dont le fonctionnement hydrique (les bandes nues jouent le rôle d'un impluvium naturel pour alimenter en eau les bandes boisées) et écologique a été notamment décrit (Seghieri et al., 1994 ; Ambouta, 1997 ; D'Herbès, 1997). Cet écosystème a subi diverses perturbations ; la diminution de la pluviométrie a réduit son extension spatiale (Ambouta, 1997 ; Ichaou, 2004) au profit des espaces encroûtés qui limitent

l'infiltration et le développement de la végétation. En effet, l'augmentation des besoins en énergie domestique conduit au déboisement engendrant à son tour la dégradation de cet écosystème.

Face à cette situation, les populations avec l'appui de l'Etat et des différents acteurs (ONGs, projets, programmes nationaux ou régionaux) ont, depuis plus d'une trentaine d'années, adopté et vulgarisé des techniques innovantes d'aménagement visant à enrayer la dégradation des terres en limitant le ruissellement. Plusieurs buts sont visés à travers ces techniques d'aménagements :

- i) une meilleure gestion de l'eau, ii) l'augmentation et la diversification de la productivité des espaces agricoles et pastoraux, et enfin iii) une gestion environnementale efficace et durable.

Ainsi, au fur et à mesure de la mise en place des techniques de CES/DRS (Conservation des Eaux et des Sols/Défense et Restauration des Sols) effectuée de façon progressivement concomitante aux rythmes de l'évolution démographique (Ichaou, 2004), des interrogations sur leur efficacité et leur durabilité ont émergé. Un important effort a été ainsi déployé dans ce sens afin d'évaluer leurs impacts sur la restauration des écosystèmes sahéliens. Au regard des résultats obtenus par plusieurs travaux (Bouzou Moussa et Dan Lamso, 2004 ; Ganaba, 2005 ; Da, 2008 ; Roose et al., 2008 ; Roose et al., 2012 ; Albergel et Diop, 2012 ; Avakoudjo et al., 2013 ; Roose et al., 2015 ; Zouré, 2019), ces techniques de conservation des eaux et des sols ont eu des effets positifs et/ou négatifs sur le rendement agricole et la réhabilitation des sols dégradés. Parmi les différents types d'aménagements d'économie de l'eau celui des banquettes est l'un des plus largement répandus sur les plateaux latéritiques de l'Ouest du Niger avec pour but de collecter et stocker les eaux de ruissellement. D'autres techniques comme les demi-lunes, les Zaï, les cordons pierreux, le sous-solage sont appliquées. Le sous-solage, technique pratiquée traditionnellement pour casser la couche superficielle du sol, vise à améliorer la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Cependant, rares sont les études qui **ont quantifié l'impact hydrologique** de ces différentes techniques d'aménagement de l'échelle locale à celle du bassin versant. Notre travail de thèse s'inscrit dans cette démarche. Il consiste à **étudier différents types d'aménagement pour évaluer leur efficacité en termes de rétention d'eau et leur impact sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants endoréiques du Sud-Ouest du Niger.**

Le manuscrit de thèse est organisé en 7 chapitres. Après **l'introduction générale**, les deux premiers chapitres présentent la problématique de l'étude et les éléments de contexte biophysique utile à sa compréhension. Dans le premier chapitre, nous avons tout d'abord posé la problématique des fonctionnements hydrodynamiques actuels des sols et des écosystèmes du

Sahel et de l'Ouest du Niger en particulier. Après avoir présenté l'état des connaissances en la matière et sur la gestion des eaux et des sols, le chapitre définit les **questions de recherche**, les **hypothèses et les objectifs de l'étude**. Dans le second chapitre, nous présentons les **caractéristiques physiques de la zone d'étude**, la **dynamique démographique** et leurs influences sur les processus hydro-environnementaux. Ce chapitre présente ensuite directement le **site expérimental de l'étude** et les **techniques d'aménagement étudiées**. Le troisième chapitre s'intéresse, dans un premier temps, **aux méthodes de mesure de l'humidité du sol** visant à déterminer les variables telles que la teneur en eau volumique et l'évolution et les variations du stock hydrique à **l'échelle ponctuelle** et dans les surfaces aménagées et présente, dans un second temps, le **protocole de mesure de la conductivité électrique apparente (EM38)** et **la méthode d'analyse des données**. Dans ce chapitre, nous exposerons les **mesures de l'écoulement** et les **méthodes d'évaluation de l'impact des aménagements** des bassins versants. Enfin, les trois chapitres (4, 5 et 6) présentent les **résultats de l'étude** dans son ensemble avec en particulier **une comparaison des résultats expérimentaux obtenus in situ, aux échelles locale et du bassin versant**. Le chapitre 7 présente **une discussion générale des principaux résultats de l'étude**.

La **conclusion générale** reprend les principaux résultats obtenus et propose des **perspectives** pour la poursuite et la valorisation de ce travail de recherche.

Enfin, les **annexes** présentées à la fin de ce manuscrit comportent des informations et données utilement supplémentaires et nécessaires à la compréhension des démarches mises en œuvre et des résultats obtenus dans le cadre de ce travail.

Chapitre 1. Cadre théorique de l'étude

Le présent chapitre pose la problématique des fonctionnements hydrodynamiques actuels des sols et des écosystèmes au Sahel et dans l'Ouest du Niger en particulier. Après avoir situé l'état des connaissances en la matière et sur la gestion des eaux et des sols, le chapitre définit les questions de recherche, les hypothèses et les objectifs de l'étude.

1.1. Contexte scientifique et problématique de l'étude

Les bassins sahéliens subissent depuis des décennies les effets conjoints des changements climatiques et de la pression anthropique. En effet, la baisse prononcée des pluies, enregistrée au cours des années 1970 à 1990, se caractérise par un déficit pluviométrique de l'ordre de 20 % par rapport aux cumuls des années 1960. Ce déficit a engendré de sérieux problèmes de dégradation des écosystèmes forestiers et agricoles conduisant souvent à des crises socio-économiques successives au Sahel. Cette dégradation, qui touche actuellement plus de 20 % des terres dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne, affecte plus de 65 % de la population (FAO, 2015).

Cette situation est symptomatique au Niger où les cultures essentiellement pluviales sont de plus en plus exposées aux aléas climatiques, à l'intermittence des pluies notamment. Ceci rend le stock d'eau des sols (indispensable pour les cultures pluviales) très fluctuant d'une année sur l'autre. Albergel et al. (1992) ont souligné, en l'occurrence, le rôle déterminant des états de surface (encroûtement) dans les processus de redistribution des eaux de pluies entre ruissellement et infiltration. Du fait de l'encroûtement progressif des sols, on assiste à une baisse de la disponibilité en eau pour les cultures (stress hydrique) engendrant, par conséquent, une irrégularité des productions et des rendements agricoles (Nazoumou et al., 2016). D'où des crises alimentaires parfois très sévères débouchant sur des famines comme c'était le cas en 1973 et en 1984 ; et rendant les populations économiquement très vulnérables.

Outre la rigueur du climat, des causes d'ordre anthropique sont concomitamment notifiées comme facteurs de dégradation de l'environnement. Les pressions anthropiques se traduisent par des changements d'occupation et d'usage des sols (Descroix et al., 2012) caractérisés par l'extension spatiale des surfaces cultivées au détriment de la végétation naturelle. Le défrichement incontrôlé, le déboisement intense ainsi que le raccourcissement de la durée des

jachères sont autant de facteurs explicatifs aggravants de ce phénomène. Ainsi, l'exploitation démesurée du bois comme source d'énergie pour environ 90 % des populations a provoqué la dénudation des plateaux de l'Ouest et du Centre du pays. De ce fait, on a assisté à la transformation du paysage naturel en passant, en seulement un demi-siècle, d'un paysage peu artificialisé à un paysage presque saturé en cultures, complètement fragmenté et mosaïqué (Loireau, 1998). Il en résulte l'encroûtement des sols et l'augmentation des écoulements au Sahel (Seguis et al., 2003 ; Descroix et al., 2013 ; 2015 ; Amogu et al., 2015 ; Malam Abdou et al., 2016 ; Malam Abdou, 2016 ; Descroix, 2018) ayant eu pour effet le rehaussement du niveau des nappes phréatiques du Continental Terminal du bassin sédimentaire des Iullemenden (Massuel, 2005 ; Favreau, 2000 ; Massuel et al., 2011 ; Favreau et al., 2011). L'encroûtement des sols est également à l'origine de l'augmentation des coefficients de ruissellement à l'échelle locale (Descroix et al., 2013). A certaines échelles, l'augmentation de ruissellement conduit même aux ruptures d'endoréisme (Mamadou et al., 2015 ; Malam Abdou et al., 2018) et provoque des dégâts sur les infrastructures agricoles et routières. Mounirou et al. (2012) ayant étudié par ailleurs les sources de variation du ruissellement d'un petit bassin sahélien, sur plusieurs types d'états de surface dans la zone de socle cristallin, ont montré que les coefficients de ruissellement par évènement varient entre 16 et 96 % sur les sols dégradés non cultivés. L'impact des pratiques agricoles intenses (cultures pluviales notamment) sur la production de ruissellement (Malam Abdou et al., 2015 ; Malam Abdou, 2016 ; Maman et al., 2019) constitue de nos jours une préoccupation majeure. En effet, l'action de l'homme, a, de plus en plus, un impact négatif sur le milieu naturel dans de nombreux cas, entraînant ainsi la fragilité des écosystèmes forestiers et agricoles comme l'ont montré Yaméogo et al. (2011) au Burkina Faso. Les travaux de Sighomnou et al. (2013) et de Descroix et al. (2012 ; 2015) montrent que les changements d'usage des sols sont responsables de l'augmentation de l'intensité des crues du fleuve Niger (notamment les inondations de 2012 et de 2020 à Niamey) et de ses affluents (Gorouol, Dargol et Sirba) dont le débit a été multiplié par trois ou quatre entre 1960 et 2010 (Descroix et al., 2015). Néanmoins, la transformation du milieu par l'homme influence fortement le partage entre ruissellement-infiltration et modifie par conséquent le temps de réponse des cours d'eau.

Le Sud-Ouest du Niger est par ailleurs caractérisé dans son ensemble par des plateaux latéritiques couverts par des formations végétales dites « brousse tigrée ». Le fonctionnement hydrologique et biologique de cet écosystème est fondé sur l'alternance des zones de sol nu sur lesquelles l'eau de pluie ruisselle vers les zones boisées (Peugeot, 1995 ; Seghieri et al., 1996 ;

Ambouta, 1997 ; D'Herbès, 1997 ; Galle et al., 1997). Le lien dynamique qui existe entre les bandes boisées et nues réduit de façon significative l'écoulement produit sur ces plateaux. Selon ces auteurs, tout le ruissellement produit sur les zones nues encroûtées se ré-infiltre, en effet, dans les bandes boisées adjacentes situées en aval. La pérennité de ces dernières est fonction des ruissellements générés sur les bandes nues comme l'ont montré Seghieri et al. (1996), D'Herbès et al. (1997) et Galle et al. (1997). L'importance de connaître la performance de système naturellement structuré avant de rajouter les aménagements qui pourraient perturber son mode de fonctionnement hydrologique a été aussi notifiée (Ichaou et D'herbès, 1997). Cet écosystème, auparavant en équilibre naturel, a subi diverses perturbations (d'ordre naturel et anthropique) ; la diminution de la pluviométrie a réduit son extension spatiale (Ambouta, 1997 ; Ichaou, 2004) au profit des espaces encroûtés qui limitent l'infiltration et gênent la fixation des racines. En conséquence, les bandes nues se sont développées au fil du temps et ce processus se poursuit. S'il s'amplifie, ce phénomène compromet toute possibilité de régénération. Ces espaces nus ont aujourd'hui atteint un tel degré d'interconnexion que les bandes boisées ne sont alimentées en eau de ruissellement que par des chenaux préférentiels. Torrekens et al. (1997) ont rapporté la présence des placages sableux d'origine éolienne autour des bandes boisées qui, en fonction de la pente générale, peuvent soit aider, soit gêner la collecte des eaux de ruissellement par les fourrés. Ce dysfonctionnement hydrologique a été aussi constaté par Peugeot (1995). Il se crée, sur les plateaux latéritiques, un ruissellement généralisé vers l'aval qui prend de l'ampleur sur les versants dès que la pente devient forte pour se concentrer dans des ravines d'où le déclenchement des processus hydro-érosifs, ce qui, d'ailleurs, est déjà observé de par la multiplication des ravines sur toutes les autres unités géodynamiques sises en aval. Cette augmentation des écoulements sur les versants est attribuée à la diminution simultanée de la couverture végétale et de l'infiltrabilité des sols (Vandervaere et al., 1997 ; Malam Abdou, 2014 ; Descroix et al., 2015). De cette évolution hydrodynamique des sols (Malam Abdou et al., 2015), il résulte aussi la baisse de leur teneur en eau (cf. § 3.2.1) qui se manifeste par la réduction de l'alimentation tant en eau qu'en éléments nutritifs pour la végétation naturelle et/ou les cultures. Aussi, la dégradation des versants provoque un déséquilibre dans la redistribution des eaux de pluie qui se fait, à l'échelle locale, par ruissellement hortonien (Desconnets et al., 1996). L'accentuation de ruissellement sur les plateaux implique des risques d'inondation des zones situées en aval, des cultures pluviales mais aussi des villages. Ces inondations par ruissellement pluvial affectent ces dernières années plusieurs localités de l'Ouest du pays, ce qui rend les populations encore plus vulnérables. Ainsi, Lawan et al. (2014) ont recensé par exemple, entre 1998 et 2013, environ 765 localités

et 1148 km² de champs touchés par des inondations pluviales et fluviales dans la région de Tillabéri. Ces inondations sont matérialisées ces dernières années par un impact considéré comme catastrophique sur le plan humain (Scarwell et Laganier, 2004).

De fait, la baisse de la capacité d'infiltration des sols combinée à la variabilité extrême des pluies provoque la fluctuation interannuelle de stock d'eau, ce qui a pour effet, d'une part, la diminution de la productivité agricole et, d'autre part, le changement de comportement hydrologique des bassins versants de la zone à brousse tigrée. L'essentiel des études menées dans notre zone d'étude met en évidence la dégradation du couvert végétal et ses éventuels effets sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Malgré la progression rapide de la dégradation et de l'encroûtement des sols (extension des bandes nues), rares sont cependant, les travaux qui ont expérimenté des approches permettant de réhabiliter les écosystèmes dégradés. Selon Ichaou et D'Herbès (1997), les aménagements en demi-lune ou avec des cordons pierreux, couramment pratiqués, font appel à cette technique de récolte des eaux de ruissellement ; or dans le contexte actuel, l'eau de pluie est devenue à la fois une potentialité (facteur de production et de consommation) mais aussi une contrainte majeure (cause de dégradation et d'inondations). Ainsi, son insuffisance et/ou son abondance en milieu rural se traduit soit par des épisodes de sécheresse, soit par des inondations localisées.

Face à cette situation, des techniques de collecte des eaux du ruissellement et de récupération des sols dégradés ont été développées au Niger à partir des années 1980 avec la naissance des projets de développement rural axés sur la CES/DRS (Conservation des Eaux et des Sols/Défense et Restauration des Sols). Elles visent principalement à limiter le ruissellement, à réhabiliter les terres dégradées et à augmenter les rendements agricoles.

L'étude comparée de l'efficacité des techniques de CES sur le ruissellement n'a cependant pas fait l'objet d'un suivi approfondi au sahel nigérien, surtout sur le plan quantitatif.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte et se propose de contribuer à la connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants aménagés et à rechercher, s'il existe, une surface optimale (ou seuil) de l'efficacité des aménagements.

Nous tenterons de présenter, dans la suite de ce chapitre, l'état de l'art en lien avec cette problématique.

1.2. Etat de l'art sur les facteurs de genèse et d'augmentation du ruissellement

1.2.1. Influence des facteurs climatiques

Le fonctionnement hydrologique des bassins versants endoréiques situés dans l'Ouest du Niger a subi depuis quelques décennies des perturbations liées à la dégradation croissante du milieu naturel. En effet, au cours du siècle dernier, des sécheresses sévères ont secoué tout le Sahel. Celles-ci ont aggravé et accéléré un processus de dégradation des sols déjà perceptible, localement, avant la sécheresse (Descroix et al., 2012). En plus, elles ont eu des conséquences extrêmement graves pour les populations et leurs ressources (décimation et vente des troupeaux, réduction très importante du couvert végétal, baisse de production des cultures pluviales), ce qui a alimenté un débat déjà existant portant sur la désertification de la bande sahélienne (Velluet, 2014).

On note cependant une tendance à l'amélioration de la pluviométrie depuis la fin des années 1990. Malgré la baisse plus prononcée des pluies au Sahel, des travaux récents révèlent paradoxalement l'augmentation des écoulements des petits et moyens bassins Sahéliens (Mahe et al., 2010 ; Amani et Nguetora, 2002 ; Descroix et al., 2012 ; 2015) et simultanément le rehaussement du niveau de la nappe phréatique estimé à 4 m depuis 1960 (Favreau, 2002 ; Massuel et al., 2003 ; 2011). Alimentée par drainage sous les zones de forte concentration du ruissellement, la nappe constitue la ressource en eau la plus importante de la zone de par son volume, son renouvellement et son accessibilité (Nazoumou et al., 2016).

Par ailleurs, le Sahel est soumis à une augmentation des événements pluvieux intenses entraînant un accroissement du ruissellement de surface. Dans ce contexte, Panthou (2013) a constaté une intensification du régime des précipitations observées aux échelles annuelles et journalières qui pourrait influencer ces évolutions hydrologiques notamment les dernières crues du fleuve Niger à Niamey. En zone soudano-sahélienne, cette baisse des pluies se traduit par une diminution des écoulements des moyens et grands bassins (Descroix et al., 2015). D'après les travaux de Descroix et al. (2012), l'évolution de la pluie ne semble pas suffire à expliquer cette tendance à l'augmentation des écoulements. Le Sud-Ouest nigérien n'est donc pas épargné par l'influence de l'intensification pluviométrique et subit à l'heure actuelle les effets négatifs des extrêmes hydro-climatiques. Du fait de la fréquence élevée des pluies extrêmes (Panthou et al., 2018), on assiste à l'augmentation des ruissellements forts, à l'accélération de l'érosion hydrique, aux inondations, aux dégâts sur les cultures et sur les infrastructures hydro-agricoles et routières. A cela s'ajoutent les pertes en vies humaines.

1.2.2. Influence des facteurs anthropiques et leurs conséquences

Au phénomène climatique s'ajoute l'action de l'homme qui est présentement et conjointement à l'origine des perturbations des bassins versants à brousse tigrée. Elle se traduit par des changements notables d'usage des sols ayant pour effet l'origine de l'augmentation de l'encroûtement des sols (Ambouta et al., 1996) et par conséquent l'accroissement des écoulements (Albergel, 1988 ; Malam Abdou et al., 2016). On note à plusieurs échelles l'extension des superficies cultivées au détriment de la végétation naturelle. Ce phénomène combiné à l'irrégularité des pluies a eu pour conséquence la baisse des rendements agricoles (céréales). Plusieurs études de l'occupation des sols utilisant la photo-interprétation des images aériennes et la télédétection ont mis en évidence la dégradation du couvert végétal et des sols de plateaux (Loireau, 1998) en lien avec le changement du cycle hydrologique (Amogu, 2009 ; Souley Yero, 2012). Cette disparition de la végétation est tellement importante sur les versants que plus rien ne freine l'eau afin de favoriser son infiltration dans le sol. Les pluies s'écoulent directement et rapidement dans les bas-fonds, entraînant d'énormes volumes de terre (Bouzou Moussa et al. 2011). Et l'on assiste à des impacts négatifs se répercutant sur la réduction des plans d'eaux superficiels, le ravinement des champs, le transfert des sédiments et l'ensablement du fleuve (Amogu, 2009 ; Mamadou, 2012). Ceci provoque de façon générale un dysfonctionnement des écosystèmes naturels en particulier la brousse tigrée. La configuration particulière de cet écosystème lui confère, auparavant, un fonctionnement hydrodynamique équilibré : l'eau de pluie ruisselle sur le sol nu encroûté et s'infiltré massivement dans le fourré situé en aval (Galle et al., 1997). La lame qui s'y infiltre, au-delà de 5,60 m, au cours d'une pluie est significativement supérieure à l'apport de la pluie seule (Peugeot, 1995). Par contre, ces fourrés subissent (il faut le noter !) du jour au lendemain une dégradation irréversible. Le stock d'eau (voir § 3.3.3.5), mesuré dans le sol nu est très faible, alors qu'il dépasse 2,5 fois la lame précipitée sous la végétation (Desconnets et al., 1996). Cependant, les écosystèmes de l'Ouest du Niger connaissent de tels phénomènes perceptibles aux échelles variables dans le temps et dans l'espace. De la parcelle au bassin versant, on note par ailleurs une forte dégradation du couvert végétal et de plus en plus des espaces dénudés et encroûtés comme l'ont signalé plusieurs études menées dans le degré carré de Niamey. Ainsi, sur le bassin versant de Sama Dey (Niger), Bouzou Moussa et al. (2011) ont démontré une diminution de la brousse tigrée (- 4 %) et des jachères (- 3 %) entre 1990 et 1999. Assoumane (2014) a aussi constaté une diminution quasi-totale de la brousse qui passe de 56 % à 5 % de la surface totale, alors que les zones agricoles passent de 22 % à 83 % sur la période 2001-2014.

En 15 ans, l'essentiel de la zone de brousse a été défriché. En effet, la surexploitation du bois, le défrichement intense et le surpâturage (Achard, 1997) entraînent la dénudation accélérée des plateaux dont la régénération naturelle apparaît très lente à cause de l'encroûtement permanent qui limite l'infiltration à 50 % de la pluie annuelle (Desconnets et al., 1996). Le fonctionnement hydrodynamique de cette organisation naturelle de la végétation, zones à brousse tigrée particulièrement, est caractérisé et décrit dans plusieurs études (Galle, 1991 ; Ambouta, 1994 ; Seghieri et al., 1996 ; D'Herbès et al., 1997) et ses paramètres hydrodynamiques ont fait l'objet de mesures (Vandervaere, 1995 ; Galle et al., 1997). De plus, il faut noter que la modification des états de surface résulte de cette évolution de l'occupation des sols. En effet, le travail du sol accentué par les facteurs érosifs (eau, vent) joue un rôle primordial dans le processus de dégradation des horizons superficiels du sol et la formation des croûtes dont l'influence sur les conditions d'infiltration et de ruissellement a été démontrée (Casenave et Valentin, 1989 ; Casenave et Valentin, 1991). La partition entre infiltration et ruissellement est en outre étudiée à différentes échelles spatiales : locale, parcelle et micro bassin versant par Esteves (2003). Et les mesures faites à l'échelle ponctuelle montrent en effet leur pertinence pour prédire sans biais les volumes ruisselés à l'échelle de la grande parcelle (120 m²) dès que les croûtes sont prises en compte (Vandervaere et al., 1997). Ainsi, quelle que soit l'échelle d'observation, la variabilité spatio-temporelle des eaux de surface est forte en lien avec les états de surface et les précipitations (Desconnets et al., 1996). Aussi, d'autres travaux antérieurs (Peugeot et al., 1997 ; Peugeot et al., 2003) avaient mis en évidence l'influence de la variabilité spatiale des caractéristiques morpho-pédologiques et géologiques sur le fonctionnement hydrologique des sous-bassins d'un même bassin. Celui-ci diffère en zone de socle exoréique et en zone sédimentaire dominée par l'endoréisme (Malam Abdou, 2014). L'étude des processus physiques menée à plusieurs échelles spatiales sert de base à la compréhension des fonctions de production et de transfert et à la proposition des stratégies d'aménagement de l'espace. Les facteurs expliquant la production de ruissellement sont ceux qui caractérisent l'évènement pluvieux (intensité, hauteur d'eau) et l'aptitude du bassin versant à ruisseler (Esteves et Rajot, 1999 ; Malam Abdou et al., 2016).

D'autres études, en se basant sur l'analyse des indices de végétation (NDVI), ont, par ailleurs, démontré une tendance au « reverdissement du Sahel » (Dardel, 2014) grâce à la régénération naturelle assistée (Botoni et Reij, 2009 ; Botoni et Larwanou, 2010 ; Bahari Ibrahim et al., 2019).

Néanmoins, pour améliorer la teneur en eau de ces sols dénudés et encroûtés, il faut améliorer l'infiltration de l'eau de pluie de l'échelle ponctuelle à celle de la parcelle voire du bassin

versant. De ce fait, des initiatives d'aménagement ou de « traitement » des bassins versants et des champs ont été réalisées. Plusieurs projets de reforestation destinés à réhabiliter la couverture végétale des espaces dénudés des plateaux ont vu le jour. Ces aménagements reposent sur la réalisation d'ouvrages de lutte contre l'érosion (banquettes, tranchées, diguettes, gabions, demi-lunes, tassa, sous-solage...) et la plantation d'arbres pour reboiser et/ou de plantes pour enherber les sols. Après avoir présenté un résumé de l'historique des techniques d'aménagement développées au Niger, nous exposerons de façon succincte un état de l'art sur le rôle hydrologique de ces techniques de CES.

1.2.3. Etat de connaissances sur les technologies de limitation de ruissellement

Par définition, **la conservation des eaux et des sols (CES)** est l'ensemble des activités menées localement pour maintenir ou augmenter la capacité de production de la terre dans les zones sujettes à la dégradation ou déjà dégradées (Glättli, 2005). Cette notion de conservation des eaux et des sols inclut la prévention ou la réduction de l'érosion, de l'encroûtement des sols, du ruissellement, la conservation ou le drainage de l'humidité, le maintien ou l'amélioration de la fertilité du sol. Ces aménagements bien décrits selon les unités morpho-pédologiques sont raisonnés à l'échelle du bassin versant, ce qui conduit à un traitement sur des grandes surfaces (Lilin, 1986). Les secteurs les plus dégradés sont donc traités en priorité.

1.2.3.1. Rappel sur l'évolution des techniques d'aménagement au Niger

Les aménagements de Conservation des Eaux et des Sols/Défense et Restauration des Sols (CES/DRS) ne sont pas nouveaux au Niger. Ils ont progressivement et concomitamment évolué aux rythmes de la croissance démographique et de la dégradation des ressources naturelles renouvelables (Ichaou, 2004). Les premières actions de CES/DRS ont été menées depuis 1960 avec les interventions CTFT/ORSTOM dans la région de Tahoua (Mietton, 1986 ; Mahamane et Ada, 1999) et avec le plan de développement de l'ADM (Ader-Doutchi-Maggia). Suite aux sécheresses des années 70 et 80, le gouvernement du Niger, en collaboration avec les partenaires bilatéraux et multilatéraux, a déployé d'importants efforts pour atténuer la dégradation accélérée des ressources naturelles particulièrement les eaux et les sols. Des projets forestiers axés sur le reboisement ont également vu le jour au cours des années 80. Ces derniers privilégiaient le développement des bois des villages, la mise en place des ceintures vertes et l'enrichissement des terres de culture. Mais les résultats atteints n'étaient pas forcément à la hauteur des espoirs et des investissements réalisés. Aussi, pour améliorer la production agricole, l'Etat, avec l'appui financier des plusieurs bailleurs de fonds, a initié des programmes de

développement diffusant des techniques d'aménagement des terres fortement dégradées. Les premières expériences de gestion ont commencé en 1981 avec le projet Planification et Utilisation des Sols et Forêts (PUSF) qui était à la base de l'expérience de la coopérative forestière de Guesselbodi (Ichaou, 2004). Les actions de restauration des terres dégradées et de réhabilitation de la couverture végétale ont été réalisées (Larwanou et Mahamane, 2012) en se basant sur l'approche participative et en mettant l'accent sur des aménagements physiques, sous forme de canaux, de terrasses (Lilin, 1986). Cette approche met en effet les paysans au centre de la gestion de leurs terroirs. En 1988, suite à l'exploitation des ressources qui s'accroissait encore plus fort, le gouvernement du Niger décida de réorienter sa politique vers une nouvelle approche appelée Stratégie Energie Domestique (SED). De 1995 à 1999, le projet PASP/PMAE a servi à la réalisation à grande échelle des mesures CES/DRS (GIZ, 2015). Outre l'action des projets portant sur le développement rural, l'Etat s'oriente aussi ces dernières années vers la politique d'aménagement pour la restauration des bassins versants et la revalorisation des terres dégradées à travers le programme d'aménagement dit programme spécial du président de la république en 2001. En 2012, a été mise au point une stratégie spécifique pour le développement rural appelée Stratégie pour la sécurité alimentaire et le développement agricole durable ou l'initiative « Les Nigériens Nourrissent les Nigériens » (I3N¹).

1.2.3.2. Interventions réalisées dans le domaine de CES/DRS

La dégradation des terres au Niger a atteint son paroxysme autour des années 70 et 80. Celle-ci se manifeste par l'appauvrissement des sols et la baisse de leur productivité. Face à cette situation, le gouvernement nigérien a organisé, en 1984 à Maradi, un débat national visant deux objectifs prioritaires : i) garantir la sécurité alimentaire et ii) restaurer et protéger l'environnement. Plusieurs acteurs ont été associés pour atteindre ces objectifs stratégiques poursuivis. Ceux-ci sont impliqués dans la planification, la mise en œuvre et le contrôle des technologies de CES/DRS conformément aux orientations nationales et aux normes nationales et internationales (Moustapha, 2010). Il s'agit principalement des services techniques de l'Etat (Services des Eaux et Forêts, de l'agriculture, du génie rural...), des organisations non gouvernementales (ONGs), des institutions de recherche, des projets et programmes de développement, des organisations communautaires de base (structures villageoises sur lesquelles les interventions extérieures s'appuient pour la mise en œuvre de leurs activités) et les paysans. Ces acteurs intervenaient aussi dans la formation, le renforcement des capacités et

¹ L'initiative 3 N « Les Nigériens Nourrissent les Nigériens : un engagement politique pour mettre les Nigériens à l'abri de la famine et de la soif.

les activités de sensibilisation des populations bénéficiaires ainsi que la vulgarisation des techniques.

Historiquement, le Niger, appuyé par des partenaires techniques et financiers, a initié des grands projets dits de gestion des ressources naturelles ou de récupération des terres (Yadji et Nomaou, 2006). L'un des axes principaux de ceux-ci est la lutte contre la désertification et pour le développement rural (Dezetter, 1996). Ainsi, plusieurs projets - Projet Intégré de Keita (PIK), Projet Agro-Sylvo-Pastoral (PASP) à Tillabéri, Projet Développement Rural de Tahoua (PDRT), Projet de Développement Agroforestier et d'Aménagement des Terroirs (PDAAT), Programme LUCOP - ont été financés et exécutés. A cette liste, s'ajoute récemment le Programme de Lutte Contre l'Enablement du fleuve Niger (PLCE/ABN) démarré en 2005 et qui couvre le Burkina, le Mali et le Niger. Ceux-ci ont permis de réhabiliter entre 1985 et 2005 au moins 250 000 ha des terres dégradées en utilisant une gamme variée de techniques de collecte des eaux de ruissellement : banquettes, tranchées, tessa, demi-lunes, cordons pierreux (Botoni et Reij, 2009 ; Moustapha, 2010). Les mesures de réhabilitation consistent à réduire l'impact des gouttes sur la surface du sol, augmenter le taux d'infiltration de l'eau dans le sol, réduire la vitesse des écoulements de surface et lutter contre l'érosion hydrique. Ces techniques ont été expérimentées en partenariat avec plusieurs projets et l'aide des populations locales. Les premières expérimentations ont eu lieu au Niger dès 1988 (Malagnoux, 2004) et leurs impacts sur l'environnement sont importants (2IS, 2016)².

1.2.3.3. Rôle des techniques de réhabilitation des sols au niveau de la parcelle

De nombreuses expériences d'aménagement ont été menées, depuis plus de 30 ans, par les acteurs (initiative privée, ONG, programmes nationaux et régionaux) en milieu agricole et pastoral sahélien dans le but d'assurer la restauration des ressources en eau et en sols en vue de leur gestion conservatoire (Lamachère et Serpantié, 1991 ; Albergel et Diop, 2012).

A l'heure actuelle, le ralentissement et le stockage de l'eau à l'échelle locale deviennent petit à petit l'un des objectifs fondamentaux de l'aménagement. Des techniques traditionnelles de conservation de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols comme le labour, la culture sur brulis, la jachère, le paillage, la fumure organique et minérale ont été développées pour réduire l'érosion et restaurer la fertilité des sols. Les travaux de Roose et al. (2008) et Roose et al. (2012) constituent de précieuses références concernant l'efficacité de ces techniques. Par ailleurs, dans les systèmes agraires traditionnels, la jachère joue un rôle considérable dans la

² Initiative pour l'irrigation au Sahel (rapport de 2016) : Cadre stratégique pour l'eau agricole au Sahel, 2016.

reconstitution de la fertilité des sols ; sa durée et son impact sur la fertilité ont aujourd'hui drastiquement diminué notamment dans les régions de Maradi et Zinder (Ambouta et al., 1996). En outre, l'efficacité du paillage a été aussi prouvée sur des sols dégradés et encroûtés dans l'Ouest du Niger (Delabre, 1998). Selon cet auteur, des faibles quantités de paille suffisent, en effet, pour réactiver le rôle des termites, ce qui améliore l'infiltration (Léonard, 2000). Le travail du sol (labour, sarclage) permet aussi de réduire le ruissellement à la parcelle. Les travaux de Leprun et al. (1995) ont ainsi démontré une augmentation de la pluie d'imbibition de 13,3 mm due au sarclage contre 4,2 mm sur sol non travaillé. Mais, cet effet bénéfique du sarclage sur l'infiltration s'estompe dès que la surface enregistre un cumul de pluie de l'ordre de 80 mm après le sarclage (Malam Abdou, 2014 ; Malam Abdou et al., 2016). Et au-delà de 150 à 200 mm de pluie, la perméabilité des zones sarclées devient même plus faible (10 mm/h) que celle des jachères (20 mm/h) (Malam Abdou et al., 2015).

La technique complexe de Zaï pratiquée au Sahel consiste à creuser des micro-cuvettes pendant la saison sèche permettant de stocker l'eau et de réactiver le rôle des termites (Roose et al., 1995 ; Bouzou Moussa et Dan Lamso, 2004 ; Sawadogo et al., 2008 ; Da, 2008 ; Zouré et al., 2017 ; Zouré, 2019). Entre autres techniques, on peut aussi citer les cordons pierreux qui visent à freiner la vitesse des eaux de ruissellement, augmenter l'infiltration et réduire la compétence érosive et, enfin, améliorer le potentiel de minéralisation du carbone dans les champs (Doamba et al., 2011). Albergel et Diop (2012) ont en effet évalué leur impact sur l'écêtement du pic de crue de 39% sur une parcelle dans le Yatenga au Burkina Faso. Certains travaux (Kagambega et al., 2011) ont, par ailleurs, comparé les impacts des techniques des demi-lunes et de sous-solage de 40 à 60 cm de profondeur. Ils concluent que les demi-lunes sont plus efficaces que le sous-solage sur l'amélioration des conditions hydriques, sur le taux de croissance et la survie des espèces végétales. D'autres études ont testé l'efficacité des techniques d'aménagement combinées. C'est le cas de Samandougou et al. (2010) qui notent que la technique du sous-solage associée aux cordons pierreux a eu un impact positif sur la disponibilité du fourrage par une amélioration des variables de richesse floristique, de recouvrement (plus de 3,2 fois), de production fourragère (de 4 fois) et de valeur pastorale des parcours du Sahel. Boubacar Na-Allah et al. (2017) ont aussi constaté que le sous-solage avec des outils manuels améliore significativement la fonction du sol dégradé du haut glacis du site de Tondi Kiboro (Sud-Ouest du Niger).

En somme, on retient qu'à l'échelle de la parcelle, les aménagements jouent un rôle important sur l'amélioration des bilans hydriques des sols, sur les rendements agricoles et la récupération

du couvert végétal des espaces pastoraux. Cependant, malgré les échecs persistants constatés sur le plan technique, beaucoup d'études ont évalué les impacts des aménagements en se basant le plus souvent sur la méthode qualitative. Par ailleurs, au Mexique, Barrios et Descroix, (2012) ont obtenu, suite aux mesures de conservation des sols et de l'eau, des résultats qualitatifs satisfaisants.

1.2.3.4. Bassin versant comme unité spatiale de gestion des ressources naturelles

La gestion durable des ressources est pour l'heure actuelle une problématique qui intéresse tous les pays du Sahel. En effet, l'homme, après avoir dégradé les écosystèmes, souhaite aujourd'hui réparer ses erreurs en adoptant des approches de gestion visant à rétablir les conditions nécessaires à un bon fonctionnement hydrique du sol (infiltration, bilan) au niveau de la rhizosphère des écosystèmes (Aronson et al., 1995 ; Cristofoli et Mahy, 2010). Nombreuses sont les études ayant mis l'accent sur la conservation des écosystèmes climatiques³ existants et les nouvelles stratégies pour accélérer l'autoréparation de ceux qui sont dégradés (Frédéric et al., 2012). Cependant, la notion de conservation de l'eau et des sols a été développée par Bennet aux USA depuis les années 1930 pour réduire les effets de l'érosion hydrique des sols cultivés. L'évolution de ces stratégies de gestion a été décrite dans plusieurs régions du monde du point de vue de leur adaptabilité aux conditions physiques et climatiques et de leurs impacts sur les rendements agricoles, sur l'érosion et les crues. Leur évolution historique est donc bien connue (Lilin, 1986) et décrite dans de nombreux guides scientifiques et/ou techniques. Les coûts et les contraintes liés à leur application ont été aussi évalués (Hudson et al., 1990 ; Roose, 2004 ; Boutaleb, 2007 ; Roose et al., 2012).

Par ailleurs, depuis plus de 40 ans, la bande sahélienne est confrontée à un sérieux problème des crises alimentaires répétitives. Celles-ci sont dues à la récurrence des sécheresses et aux conditions de mise en culture des terres se traduisant par la dégradation croissante du milieu rural. Ce phénomène provoque la fluctuation interannuelle du stock hydrique des sols d'où la baisse de la fertilité et de la productivité agricole (Valet et Sarr, 2004). Face à cette situation, des approches simples de gestion de l'eau et des sols ont été élaborées dès les années 80 et 90 (Karimata, 2001 ; Lasserre et Brun, 2007), en privilégiant l'échelle du bassin versant (dont la définition est donnée en Annexe 5) comme unité spatiale de gestion indispensable (Mermet et Treyer, 2001 ; Papy et Torre, 2002). Cette approche s'est développée depuis plus d'un siècle

³ Ecosystème dont le fonctionnement naturellement équilibré n'a pas subi des perturbations d'ordre anthropique.

aux Etats-Unis (Lasserre et Brun, 2007), au Canada (Milot et al., 2015) et dans certains pays de l'Europe (Givone, 2005).

L'aménagement à cette échelle consiste en effet à repartir à différents niveaux d'une unité hydrographique des aménagements adéquats pour ralentir le ruissellement, alimenter la nappe phréatique, diminuer et réguler les débits, et éviter les transports solides (Roose, 1992). Mais la variabilité des aménagements et des pratiques agricoles à la parcelle rend la question plus complexe (Givone, 2005). Selon cet auteur, l'aménagement de l'espace, dans ses interactions avec la dynamique du fonctionnement des systèmes naturels, se résume à une notion fondamentale : « *Lutter contre les crues, c'est échanger du temps contre de l'espace, et réciproquement* ». Ainsi, pour que l'aménagement soit efficace, il est préférable de commencer le traitement des flux en amont du bassin versant avant qu'ils ne constituent des volumes d'eau considérables dans les réseaux hydrographiques, d'où l'intérêt de comprendre le lien entre les processus de production et de transfert du ruissellement et les méthodes d'aménagement. C'est en ce sens que le bassin versant constitue une limite géographique naturelle pour la gestion des ressources en eau de surface (Gresillon, 1996 ; Vieillard-Coffre, 2001) plus particulièrement dans le cas des sols sensibles à l'encroûtement du Sahel.

1.2.3.5. Impacts des aménagements à l'échelle du bassin versant

La dégradation des versants sahéliens, s'exprimant par l'importance des érosions hydrique et éolienne, a un impact sur le niveau de vie des populations et les potentialités de développement économique. La recherche de la lutte contre ce fléau et de la protection des activités agricoles contre les crues a conduit à mettre en œuvre des techniques simples de collecte et de stockage des eaux pluviales depuis fort longtemps dans les régions arides et semi-arides. Leur rôle sur la rétention d'eau est *a priori* socialement et économiquement pertinent (Michel-Guillou, 2011). Elles permettent d'économiser plus d'eau localement en favorisant l'infiltration et en limitant les risques des crues. Albergel et al. (2000) et Albergel et Diop (2012) ont étudié toute une panoplie d'aménagements (reboisements, mises en défens, cordons pierreux, haies vives, terrasses, aménagement en bocage d'un bassin versant) en se limitant aux paramètres hydrologiques mesurés à l'exutoire comme critères d'évaluation de leur efficacité. Ailleurs, en zones méditerranéennes, des travaux ont également expérimenté la technique des banquettes à rétention totale d'eau dont Heusch (1986) a dressé un bilan sur cinquante ans en Afrique du Nord. Il conclut que l'introduction de techniques (qui supprime totalement le ruissellement pour les unités en aval) étrangères sans expérimentation préalable est une erreur qui ne devrait pas être renouvelée. Les études menées par Nasri et al. (2004) et Roose et al. (2008) ont notamment

évalué l'efficacité et les limites de la technique d'aménagement en banquettes à rétention d'eau totale sur des bassins versants des régions arides et semi-arides du Maroc, de la Tunisie et de l'Algérie (Keddar et al., 2011). Le rôle primordial de ce type de banquettes selon le contexte géologique et la pente est étudié par Rebai et al. (2013). En Tunisie, Nasri (2007) a estimé la capacité d'une cascade de banquettes à retenir l'eau de 2535 m³ sur un bassin versant de 14,48 ha. Après avoir démontré une réduction significative de ruissellement de 65 à 20 %, il conclut que celles-ci ont eu des effets négatifs sur le fonctionnement des unités hydrologiques situées en aval.

En résumé, l'état des connaissances met en évidence la généralisation de ruissellement (cf. chapitre 3, § 3.5.1 pour la définition) liée au changement d'usage des sols, l'accélération des processus érosifs ainsi que la fréquence de plus en plus élevée des inondations au Sahel nigérien. Au Niger, les eaux pluviales constituent l'essentiel des ressources pour la survie des populations en milieu rural. De nombreuses techniques de conservation des eaux et des sols ont été développées. Elles visaient principalement à limiter le ruissellement afin de l'empêcher d'éroder, à réhabiliter les terres dégradées et à augmenter les rendements agricoles (Ousseini, 2002 ; Bouzou Moussa et Dan Lamso, 2004 ; Malagnoux, 2004 ; Yadjji et Nomaou, 2006) . Ces techniques d'aménagement ainsi décrites constituent des formes d'adaptation innovantes dans un milieu sahélien fragile et vulnérable (Albergel et Diop, 2012). En effet, pour un développement socio-économique, des aménagements permettant d'économiser l'eau localement (en améliorant la capacité d'infiltrabilité des sols) au profit des cultures et de rétablir le couvert végétal s'imposent. Plusieurs travaux ont évalué les effets des techniques de captage et de ralentissement systématique des eaux de ruissellement. Les impacts supposés positifs à l'échelle de la parcelle et du bassin versant n'ont cependant pas été réellement quantifiés. Concernant l'aménagement des sols nus de la brousse tigrée, des études ont exclu toute intervention anthropique pour les réhabiliter. Cependant, les techniques de réhabilitation appropriées de cet écosystème, pourtant en perpétuelle dégradation, sont encore peu nombreuses et leur efficacité est très peu connue. Or les processus hydro-érosifs s'accroissent et constituent même une menace pour le potentiel des ressources en eau et en terres cultivables. Ceci constitue un frein pour toute perspective de développement durable de la zone. On trouve souvent sur les plateaux aux environs de Niamey les différentes techniques (cordons pierreux, banquettes en terre, tranchées, demi-lunes avec semis et plantations d'arbres) utilisées dans le cadre du programme de lutte contre l'ensablement du fleuve Niger (PLCE). Les résultats de celles-ci peuvent s'évaluer en termes de limitation de ruissellement et les causes de leurs échecs sur la lutte contre l'ensablement n'ont pas été clairement précisées.

Cependant, peu de travaux ont expérimenté et évalué quantitativement les impacts directs d'un ou des deux types d'aménagement sur l'économie de l'eau de pluie à la parcelle et sur l'écoulement à l'échelle du bassin versant. Par notre étude, on se propose de contribuer à étendre la connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants aménagés et à rechercher, si elle existe, une surface optimale de l'efficacité des aménagements.

1.3. Questions scientifiques de l'étude

Dans l'écosystème de la brousse tigrée, le fonctionnement hydrologique des paysages contractés est naturellement régulé par l'interaction des zones nues et boisées. Les sécheresses répétitives et l'action de l'homme (déforestation des versants et plateaux) ont fortement contribué au dysfonctionnement de ces paysages qui se caractérise par la disparition ou la contraction des zones boisées. De ce fait, le ruissellement produit sur les zones nues n'est plus totalement absorbé par les bandes boisées, d'où l'accentuation du ruissellement et de l'érosion hydrique sur les unités géodynamiques en aval. L'augmentation des ruissellements née de la dégradation des états de surface constitue donc un problème majeur qu'il faut résoudre dans le cadre de la gestion durable des ressources en eau. Les aménagements destinés à maîtriser les ruissellements constituent une solution intéressante. Les questions abordées au cours de cette étude sont donc les suivantes :

Question principale : comment aménager le plateau à brousse tigrée pour réduire efficacement les écoulements à l'échelle du bassin versant ?

Questions spécifiques :

- Quelles sont les effets des banquettes et du sous-solage ?
- Ces techniques de conservation des eaux et des sols (CES) sont-elles une solution pour réhabiliter le fonctionnement hydrologique initial « naturel » des écosystèmes contractés ou, au contraire, vont-elles davantage le perturber ?
- Si des aménagements (banquettes et sous-solage) sont envisagés, quels types faut-il privilégier, et avec quelle extension ?
- Ces aménagements peuvent-ils être efficaces et efficients pour restaurer les propriétés physiques (enjeu hydrologique) et biologiques (enjeu agronomique) des sols des plateaux de l'Ouest du Niger ?

1.4. Hypothèses de la thèse

L'hypothèse principale : les effets hydrologiques des différents types d'aménagement réalisés sur le plateau latéritique sont différents de l'échelle locale (ponctuelle) à celle du bassin versant.

Les hypothèses spécifiques :

- ✓ La réduction des écoulements dépend de la dimension de la superficie aménagée à l'échelle du bassin versant ;
- ✓ La mise en application de la méthode géophysique (conductivité électrique) couplée au sondage neutronique permet de spatialiser le stock d'eau à l'échelle des surfaces aménagées ;
- ✓ Il est possible de quantifier le fonctionnement d'un aménagement en suivant très finement un nombre limité d'unités aménagées ;
- ✓ A proportion aménagée égale en banquettes et en sous-solage, les comportements hydrologiques des bassins sont différents.

1.5. Objectifs de la thèse

Ce travail vise à expérimenter deux types d'aménagement (banquettes et sous-solage) pour évaluer leur efficacité en termes d'économie de l'eau et leur impact sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants endoréiques du Sud-Ouest du Niger.

L'étude inscrit dans le cadre de l'observatoire AMMA-CATCH et du programme JEAI SAPALOTE (Jeune équipe associée à l'IRD, SAVane PARc à LOng TERme) dont l'un des objectifs est l'étude des relations entre la végétation et le cycle de l'eau au Sahel.

Ce travail vise **spécifiquement** à :

- Evaluer l'efficacité des différents types d'aménagement sur la gestion des eaux et des sols et sur l'amélioration des comportements hydrologiques des sols.

Cet objectif vise à quantifier et comparer l'impact des différents types d'aménagement sur l'évolution de stock hydrique (quantité d'eau stockée) à l'échelle des zones aménagées.

- Spatialiser le stock d'eau des surfaces aménagées en couplant des approches géophysiques (conductivité électrique apparente et sondage neutronique).
- Déterminer, si possible, un seuil d'aménagement optimal (proportion de surface aménagée à l'échelle d'une unité hydrologique) qui réduit suffisamment le ruissellement à l'échelle des petits bassins versant sahéliens du Sud-Ouest du Niger.

L'objectif consiste à déterminer une proportion optimale de surface aménagée (par type d'aménagement) à l'échelle d'un bassin pouvant réduire l'écoulement à l'exutoire à un niveau

jugé acceptable et par suite de dégager une relation liant cette proportion aménagée au coefficient d'écoulement et aux autres caractéristiques hydrologiques des bassins.

- Comparer le fonctionnement hydrologique des bassins versants aménagés, à proportion égale en banquettes et en sous solage.

Il s'agit d'étudier les effets des aménagements (banquettes et sous-solage) en termes de réduction et d'atténuation des crues à l'échelle des petits bassins versants du Sud-Ouest du Niger.

1.6. Difficultés rencontrées

Les difficultés auxquelles nous nous sommes confrontés sont d'abord d'ordre économique notamment liées aux coûts élevés de la réalisation des aménagements. La réalisation manuelle des banquettes nécessite en effet une main d'œuvre importante et des moyens financiers. En effet, le prix d'une seule banquette s'élève (dans notre cas) à environ 3000 FCFA. Ce prix est considéré comme insuffisant par certains paysans, ce qui explique parfois leur réticence dans l'exécution des travaux d'aménagement. Pour le sous-solage, il faut au moins 60 000 FCFA pour sous-soler un hectare de terre dégradée avec un tracteur.

Les difficultés d'ordre technique sont dues aux défaillances techniques relevées lors de l'utilisation de la sonde à neutrons qui s'est bloquée à plusieurs reprises pendant qu'on effectuait des mesures sur le terrain. A chaque fois que cela se produit, l'appareil est obligatoirement ramené à l'IRI (Institut des radios Isotopes, Université de Niamey) pour la maintenance. Ceci a constitué une contrainte qui retarde durant plus d'une journée les mesures. A ces difficultés, on ajoute des actions de vandalisme sur les tubes d'accès neutronique.

Conclusion partielle

Les changements dans l'occupation et l'usage des sols conjugués à la baisse remarquable des pluies enregistrée au Sahel au cours des années 1970 à 1990 ont provoqué la dégradation des écosystèmes. De ce fait, les comportements hydrodynamiques des sols ont été perturbés à plusieurs niveaux d'échelle spatiale. Ainsi, on assiste, de l'échelle locale à celle du bassin versant, à l'accentuation de la dynamique hydro-érosive constituant une véritable menace sur la durabilité des ressources en eau de surface et sur les aménagements humains (champs, villages, routes, infrastructures hydro-agricoles...) à l'Ouest du Niger. Les techniques d'aménagement sont, dans ce contexte, un outil qui semble pertinent pour réduire l'aptitude des sols dégradés à produire du ruissellement à l'échelle de la parcelle et des écoulements à celle des bassins versants.

Chapitre 2. Présentation de la zone d'étude et des aménagements étudiés

Ce chapitre présente les caractéristiques physiques de la zone d'étude et leurs influences sur les processus hydro-environnementaux. Sont successivement décrits les contextes géologique, hydro-géomorphologique et climatique. Il présente également les dynamiques démographiques et d'occupation des sols et leurs conséquences sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Après la présentation du site expérimental de l'étude, nous décrivons aussi dans ce chapitre les aménagements en banquettes et en sous-solage réalisés dans le cadre de ce travail.

2.1. Contexte géologique de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans l'Ouest du Niger et est composée des deux petits bassins versants contigus. Elle correspond, en l'occurrence, au super site d'AMMA-CATCH de Tondi Kiboro situé dans la zone sédimentaire à environ 70 km à l'est de Niamey (Figure 2.1).

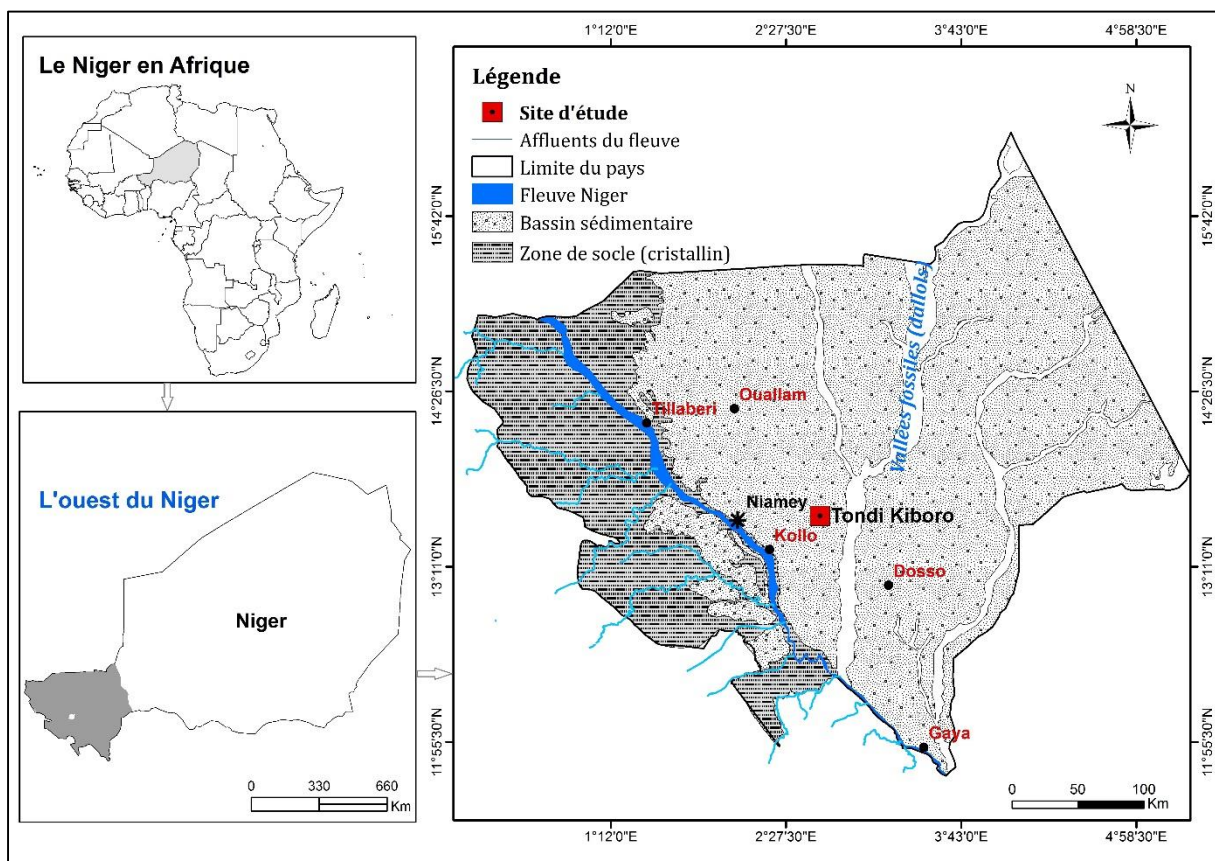


Figure 2.1. Contexte géologique (d'après Greigert, 1961, modifié) et localisation du site d'étude de Tondi Kiboro.

Du point de vue géologique, le Sud-Ouest du Niger se caractérise par deux grands ensembles : le socle cristallin du Liptako-Gourma, situé principalement sur la rive droite du fleuve Niger et le bassin sédimentaire des Iullemeden, situé sur sa rive gauche.

La zone d'étude se trouve donc sur les marges occidentales du bassin sédimentaire des Iullemeden. Ce dernier est limité au nord par le massif de l'Aïr et les reliefs antécambriens de l'Adrar des Iforas et du Hoggar ; au sud par le socle cristallin nigérian ; à l'ouest par le socle du Liptako Gourma au Burkina-Faso et à l'est par le socle du Damagaram-Mounio. Il est constitué d'une alternance des dépôts marins et continentaux mis en place par les épisodes transgressifs et régressifs ayant jalonné son histoire (Monfort, 1997). Ces processus ont déposé des sédiments à dominante carbonatée, calcaires blancs et marnes, typiques des mers chaudes épicontinentales. Trois principales formations sédimentaires d'origine continentale ont été distinguées dans ce bassin depuis le Tertiaire. Il s'agit du Continental Intercalaire, du Continental Hamadien et du Continental Terminal (dépôts les plus récents). Ce dernier affleure sur la partie occidentale du bassin et est constitué de formations détritiques fluvio-lacustres du Cénozoïque (Willems, 2000). Trois séries sont distinguées (Greigert, J., 1966) :

- ✓ la série sidérolithique de l'Ader Douchi caractérisée par plusieurs niveaux de formations oolithiques ferrugineuses (CT1) ;
- ✓ la série argilo-sableuse à lignites (CT2) qui se caractérise par une alternance d'argiles et de sables dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Cette dernière affleure dans la partie septentrionale du bassin ;
- ✓ et enfin, les grès argileux du moyen-Niger (CT3). Il s'agit de grès silteux à argileux ocre de couleur jaunâtre à rougeâtre et à granulométrie fine (Massuel, 2005). Cette dernière affleure au sud-ouest du bassin des Iullemeden (Monfort, 1997) et repose en discordance majeure sur le socle cristallin du Liptako-Gourma aux environs de Niamey. Elle se termine par une surface d'aplanissement cuirassée, à l'origine des plateaux latéritiques caractéristiques de la zone sédimentaire.

En outre, vers la fin du Tertiaire et au début du Quaternaire, le Continental Terminal a été affecté par des mouvements tectoniques suivis des processus de lessivage, d'altération ferralitique (formation des cuirasses ferrugineuses) et d'érosions liés à des changements de climats. L'épisode de l'érosion intense a provoqué à son tour le creusement et le comblement des cuvettes (modèles hérités du quaternaire) donnant naissance au paysage actuel caractérisé par des plateaux gréseux séparés par des vastes vallées fossiles auxquelles s'ajoutent les accumulations sableuses d'origine éolienne présentant des faciès variables (Poncet, 1986).

2.2. Unités morfo-pédologiques et leurs occupations

Sur le plan géomorphologique, la zone d'étude est caractérisée par des plateaux gréseux peu prononcés (250 à 300 m d'altitude) correspondants aux plus bas plateaux du Niger. Ils se présentent sous la forme d'un relief dissymétrique avec un front raide et un revers à pente faible s'enfonçant doucement sous les couvertures du bassin sédimentaire périphérique (Dubois et al., 1984). Leurs surfaces, horizontales ou légèrement déprimées, sont coiffées et protégées contre l'érosion par la cuirasse latéritique indurée. Celle-ci s'est formée dans l'horizon d'accumulation d'un sol ferrugineux profond qui s'est développé à la fin du Pliocène sous un climat tropical subhumide (Mélania, 2005). Le paysage se marque par la succession de quatre unités géomorphologiques que sont les sommets de plateaux, les talus d'éboulis, les glacis et les bas-fonds (Figure 2.2). Chacune de ces unités est occupée par un type de formation végétale spécifique.

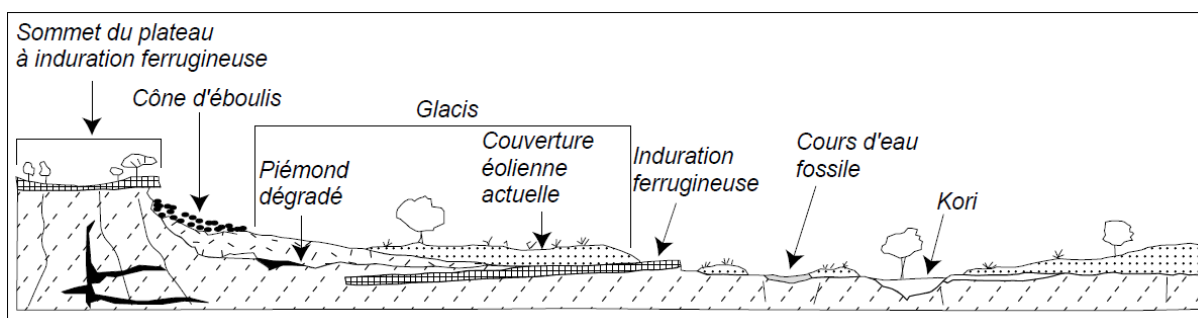


Figure 2.2. Unités géomorphologiques du bassin sédimentaire, secteur de Banizoumbou (in Malam Abdou, 2014).

Nous présentons dans ce qui suit les caractéristiques géomorphologiques et les principales couvertures pédologiques et végétales de ces unités (Gavaud, 1975).

▪ Les sols des plateaux

Ce sont des sols peu évolués de type lithosol à faciès ferrugineux (reg ou sol latéritique) présentant souvent une forte charge caillouteuse (Courault et al., 1990). Ces sols, peu profonds et très susceptibles à la dégradation par accumulation relative ou par encroûtement (Ambouta, 1994), s'observent sur les plateaux latéritiques. Les sols ne sont cultivés que lorsqu'ils sont recouverts par des dépôts éoliens superficiels.

▪ Formation végétale des plateaux (brousse tigrée)

Du point de vue de la couverture végétale, les sommets de plateaux sont le domaine de la brousse tigrée observable entre les isohyètes 300 et 700 mm (D'Herbès, 1997). C'est particulièrement une structure de végétation organisée en une succession des bandes de végétation séparées par des bandes nues (Figure 2.3). L'origine de sa genèse et de son évolution est liée à la combinaison des contraintes locales imposées par les facteurs climatiques, géologiques, géomorphologiques et humains (Seghieri et al., 1996 ; Ichaou, 2000 ; D'Herbès, 1997 ; Ambouta, 1997). Selon ces auteurs, les interactions des processus physiques, hydrologiques et écologiques ont conduit à la discontinuité de la végétation jusqu'à atteindre un certain équilibre entre la géomorphologie, les ressources hydriques et la végétation. En effet, pour compenser le déficit hydrique, la végétation tend à se concentrer dans les zones où les conditions d'humidité sont meilleures. Ce qui met en évidence le rôle du substratum et de la topographie dans la distribution de la végétation (Poncet, 1986). En fait, le système fonctionne de façon naturelle en collectant et acheminant les eaux de ruissellement des bandes nues vers les bandes couvertes de végétation. Les espaces nus, en jouant ce rôle d'impluvium, assurent de ce fait l'alimentation en eau et le développement des zones de production végétalisée. Galle et al. (1997) ont évalué à 50 % de la pluie annuelle la quantité d'eau ruisselée depuis la bande nue vers la bande de végétation. Cet apport d'eau apparaît indispensable pour le bon fonctionnement ainsi que la durabilité du système. En d'autres termes, c'est cette dynamique de l'eau et sa distribution spatiale qui détermine l'organisation de la végétation de type arbustive-arborée constituée en majorité d'une strate ligneuse composée des arbustes de la famille des combrétaceae (*Combretum micranthum*, *Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis*) et d'une strate herbacée dont les espèces les plus dominantes sont *Microchloa indica* et *Cyanotis lanata*. Celle-ci constitue actuellement la principale zone d'approvisionnement en bois d'énergie et de service pour les populations et de pâturage pour les animaux pendant la saison pluvieuse. Elle subit par conséquent, depuis la fin des années 80 (Atta et al., 2010), une exploitation intense qui engendre la désorganisation de sa structure et de sa composition (Maazou et al. 2017). Une autre étude récente (Trichon et al. 2018) a d'ailleurs notifié la dégradation de la brousse tigrée dans la région de Gourma au Mali.

Notons pour finir que les plateaux à brousse tigrée jouent un rôle important dans la régulation des écoulements. Le changement du couvert végétal, dû aux aléas climatiques et anthropiques, est d'une importance primordiale sur la régulation des écoulements. En effet, les bandes de végétation, en ralentissant le ruissellement, augmentent la rugosité du sol, ce qui favorise l'infiltration. Donc si les plateaux ne jouent plus ce rôle, c'est tout le système qui se perturbe

sur le plan hydrologique. A cet effet, plusieurs actions de restauration ont été tentées afin d'atténuer les effets des processus de la dégradation avancée de cet écosystème. Mais des études ont toutefois démontré la non pertinence de reboiser ou de traiter systématiquement en CES la totalité des espaces nus des plateaux à brousse tigrée.

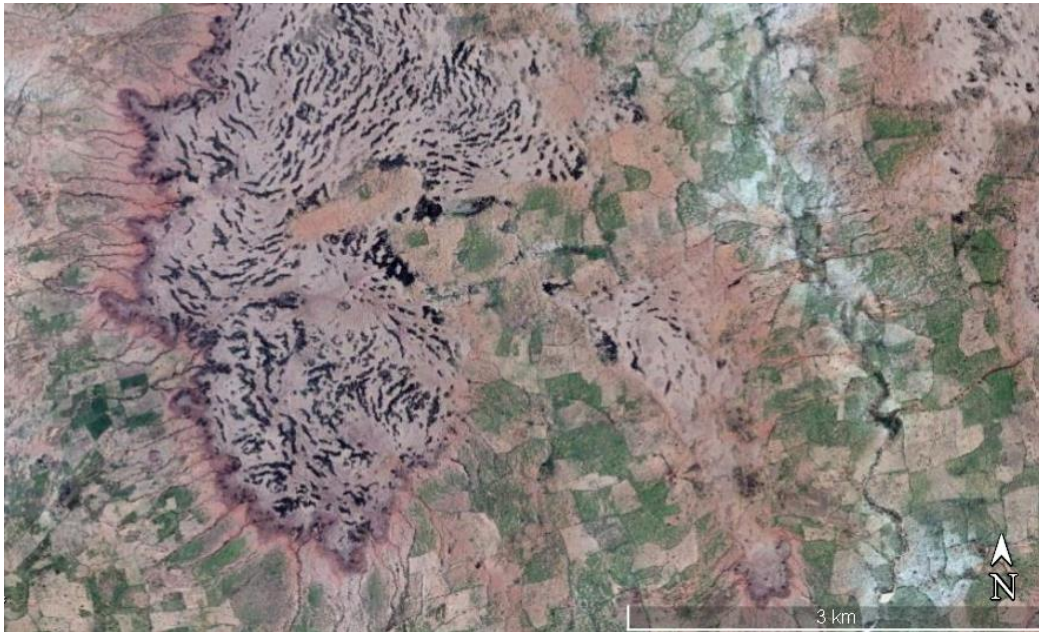


Figure 2.3. Vue d'un plateau à brousse tigrée dégradée dans le secteur de Tondi kiboro (Image Google Earth de 2009).

▪ Les talus du plateau

Ils constituent la zone de transition située entre le plateau et le glacis. Unité de pente forte, les talus sont en général couverts par des gravillons sombres, parfois d'éboulis en blocs hétérométriques ou en graviers de cuirasses démantelées. Ils sont le domaine de la broussaille.

▪ Les glacis et leurs occupations

Ce sont des modelés sableux développés sur des longues pentes de raccordement entre les plateaux et les bas-fonds. Ils présentent deux faciès distincts :

- un faciès induré en amont (jupes sableuses), qui est une surface peu étendue de pente moyenne (environ 5 %). Il forme un placage de sables rouges homogènes en auréoles de 600 et 800 m de large à la base des plateaux (Ambouta, 1994) ;
- une zone d'épandage en aval spatialement plus étendue que le faciès induré. La pente y est douce et régulière (moins de 2 %).

La couverture pédologique est constituée des sols ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés. Ces sols qui couvrent les glacis se présentent généralement sous le faciès induré constitué des

sables rouges sur les piémonts dégradés et un faciès sableux meuble et relativement clair sur les zones d'épandage (Bouzou Moussa et al., 2011). Ces sols sont squelettiques et possèdent un profil homogène et coloré de façon vive. La texture de leurs horizons de surface est très sableuse avec une nette prédominance de sables fins d'où leur susceptibilité à l'encroûtement sous l'action des pluies intenses. Cette unité géodynamique (glacis) est colonisée par une végétation naturelle clairsemée, fortement dégradée (savane arborée ou arbustive, steppe) et souvent dominée par *Guiera senegalensis*, *Commiphora africana*, *Piliostigma reticulatum*. Dans les champs cultivés, on rencontre des arbres tels que *Acacia albida*, *Prosopis africana*, *Ziziphus mauritiana* et d'autres. Le tapis herbacé est plus dominant en saison des pluies.

▪ **Les bas-fonds et leurs occupations**

Ils constituent le niveau le plus bas de la toposéquence constituée des vallées vestiges de larges cours d'eau du Quaternaire. Il s'agit d'un ensemble des dépressions plus ou moins marquées dans le paysage soumis à une intense dégradation de son réseau hydrographique. Autrement, ce sont des collecteurs des eaux de ruissellement en provenance des plateaux et des versants pendant les pluies.

Les bas-fonds sont caractéristiques des sols hydromorphes qui se développent sur des alluvions récentes et présentent une texture hétérogène. Ils ont souvent les mêmes caractéristiques que les sols sableux ferrugineux peu lessivés. On les retrouve dans les dépressions (bas-fonds) et/ou dans les zones d'accumulation des eaux de surface où ils se distinguent par la plus forte proportion argileuse pouvant atteindre 30 % (Favreau, 2000). En plus, ils sont caractérisés par une forte capacité de rétention de l'eau qui fait d'eux, un lieu privilégié du développement de la végétation ligneuse qui s'organise en fourrés denses.

En résumé, les sols de la zone d'étude sont sujets à l'encroûtement (Ambouta et al., 1996) et très sensibles aux érosions hydrique et éolienne du fait de leur texture sableuse.

Le paysage apparaît structuré en une mosaïque de champs de mil et de jachères dégradées (Bouzou Moussa et al., 2019). Nous terminons par déduire que dans un contexte où les ressources naturelles constituent la base des moyens de subsistance et de la sécurité alimentaire (Gemenne et al., 2017), l'étude de l'efficacité des actions d'aménagement permettant de lutter contre la dégradation de l'environnement exacerbée de façon complexe par le facteur démographique doit être menée de façon plus approfondie. La prochaine partie traitera du contexte hydrologique de la zone d'étude.

2.3. Fonctionnement et dynamique hydrologiques de la zone d'étude

Le fonctionnement hydrologique des bassins de la zone d'étude se caractérise par la discontinuité des écoulements. Il n'y existe pas de cours d'eau à écoulement permanent. Le réseau hydrographique est en effet constitué d'une multitude de cuvettes endoréiques ou vallées fossiles (Desconnets et al., 1996) dans lesquelles les écoulements conditionnés par les précipitations disparaissent par infiltration et évaporation dans des bassins fermés sans atteindre le cours d'eau principal (fleuve). Ces écoulements sporadiques, intermittents et concentrés sont insuffisants pour s'interconnecter entre eux durablement lors de la saison des pluies (Sylvain Massuel et al. 2003). Cette discontinuité du réseau de drainage implique que les unités hydrologiques sont alimentées par la pluie mais aussi de plus en plus par la nappe de façon locale, notamment dans le lit des cours d'eau fossiles (communication personnelle avec Salif Bachir, IRD-Niger). De ce fait, le système hydrologique appartient au système de kori Dantiandou (ancien affluent de la vallée fossile de Dallol Bosso) dont le réseau complètement dégradé implique la présence de zones de concentration et de stockage temporaire des eaux du ruissellement pendant la saison pluvieuse. Desconnets (1994) distingue trois types : les zones endoréiques structurales (plateau du Continental Terminal), les bassins versants de vallée sèche en forme de cuvettes "verrouillées" par des dépôts sableux et les cours d'eau actuellement non fonctionnels.

L'état actuel de la structure hydrologique traduit l'endoréisme des vallées dû à la mise en place des dunes et Ergs du Pléistocène ayant fortement oblitéré le réseau hydrographique régional (Kori Dantiandou par exemple). Ces processus très actifs ont eu pour conséquence la généralisation de l'endoréisme en zone sédimentaire comme l'ont démontré Desconnets (1994) et Massuel (2005) qui ont décrit la distribution des différents systèmes endoréiques dans le paysage et leur impact sur les processus d'infiltration et de recharge de la nappe du Continental Terminal (CT). Dans le secteur d'observation (Banizoumbou), le drainage du réseau hydrographique se fait par ailleurs par le système de kori (cours d'eau à écoulement sporadique) délimité par des plateaux à brousse tigrée. La Figure 2.4 présente la synthèse du fonctionnement hydrologique des bassins versants à brousse tigrée du secteur d'étude.

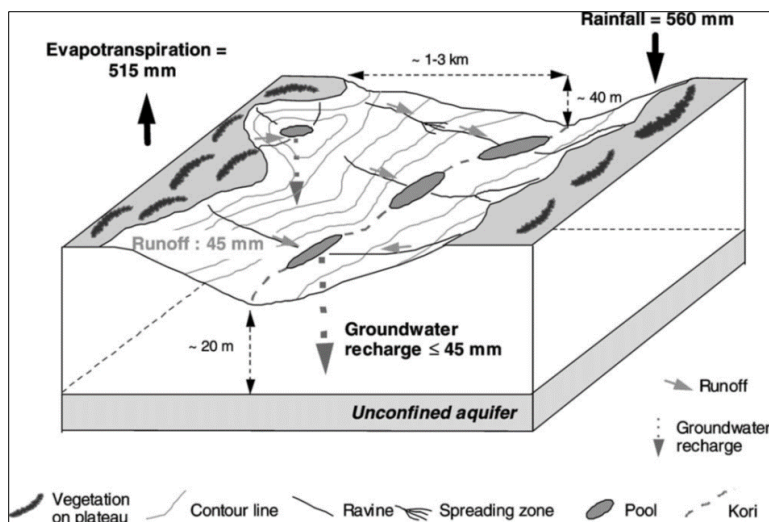


Figure 2.4. Processus hydrologiques majeurs à l'échelle d'une toposéquence typique de la brousse tigrée (d'après Peugeot et al., 2003).

D'après celle-ci, les bassins endoréiques situés sur les plateaux latéritiques constituent un ensemble hydrologiquement déconnecté du reste du paysage (Desconnets, 1994). La majorité des ruissellements est absorbée par les bandes boisées. Mais ce fonctionnement est de nos jours fortement perturbé. Un apport important des eaux du ruissellement descend des plateaux pour se concentrer dans les bas-fonds via les ravines. Si ces écoulements n'ont pas disparu par évaporation et par infiltration dans les bandes boisées, ils achèvent leurs trajets dans des exutoires (zones d'épandages, micro-dépressions, mares, cônes de déjections). Compte tenu de la faiblesse de l'énergie érosive qui dépend de la vitesse d'écoulement et croit avec la pente, les drains secondaires déposent des matériaux transportés pour former des « zones d'épandages sableuses » bordées de végétation dense et dans lesquelles s'infilte une bonne partie de la lame ruisselée. Les dépôts successifs des sédiments dans les bas-fonds conduisent à la discontinuité spatiale des écoulements, ce qui provoque le morcellement des lits de koris en une succession de cuvettes allongées contenant des mares endoréiques (Figure 2.5) dont la connexion est parfois possible, sous réserve de conditions pluviométriques relativement meilleures et capables de faire rompre les verrous par déversement (Malam Abdou et al., 2018).

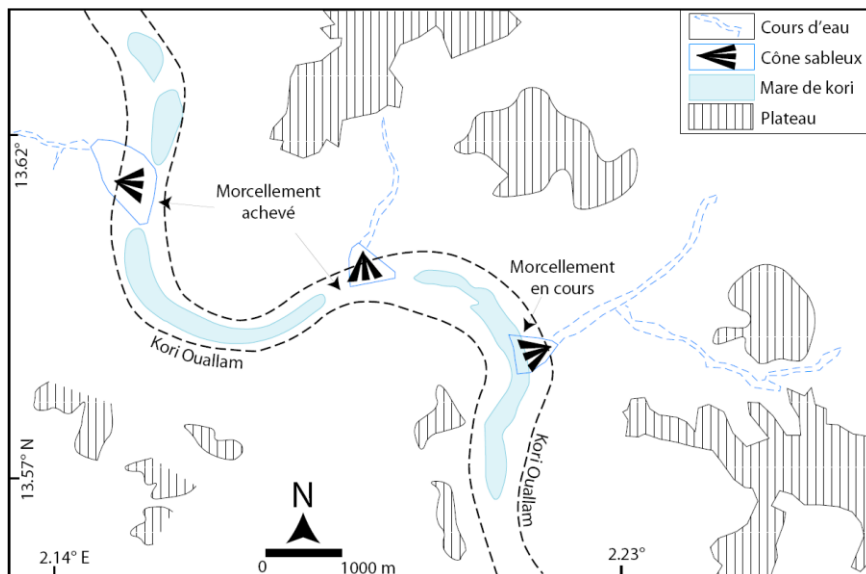


Figure 2.5. Illustration du processus de morcellement de mares par des cônes d'épandage sableux dans le lit du kori Ouallam en zone sédimentaire (d'après Malam Abdou et al., 2018).

Le développement du réseau de drainage dû au changement d'usage des sols (Descroix et al., 2013 ; Amogu et al., 2015 ; Mamadou et al., 2015) et à l'intensification pluviométrique (Panthou et al., 2018) accompagne le passage d'un ruissellement en nappe à un ruissellement concentré entraînant un changement de connectivité au sein des bassins hydrologiques (Gal, 2016). Ce qui peut parfois conduire à la connexion entre plusieurs bassins, voire même avec le fleuve comme l'illustre la Figure 2.6. Le passage d'un système endoréique à un système exoréique, généralement connu sous le terme de "rupture d'endoréisme" (Descroix et al., 2013 ; Mamadou et al., 2015 ; Malam Abdou et al., 2018), pourrait contribuer de manière significative à l'augmentation du ruissellement. Ces études ont démontré des témoignages de plusieurs ruptures récentes d'endoréisme liées à cette augmentation du ruissellement (Mamadou et al., 2015).

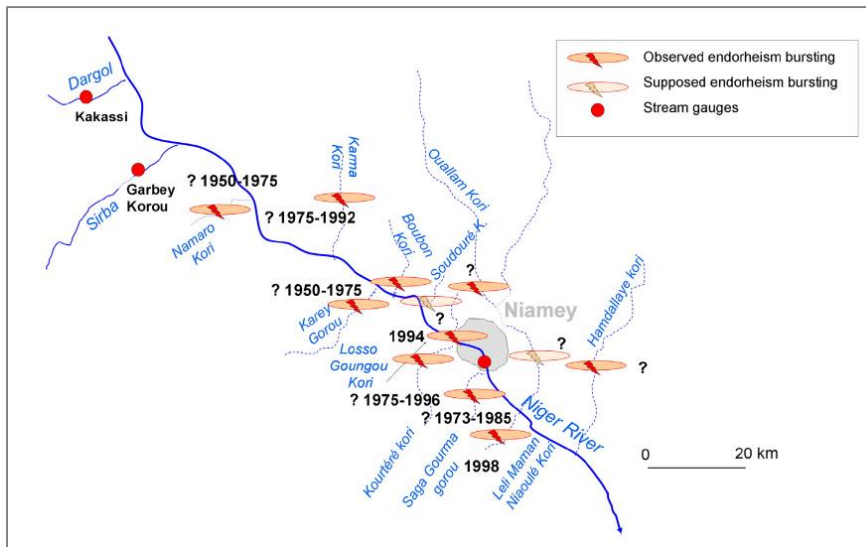


Figure 2.6. Localisation des zones de rupture d'endoréique observée et supposée se produire au cours des dernières décennies dans la région de Niamey (d'après Mamadou et al., 2015).

2.4. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Le climat sahélien est directement régulé par le régime de la Mousson Ouest Africaine (MOA). Celle-ci est le résultat d'un système complexe de couplage océan-atmosphère-terre qui détermine la saison pluvieuse et apporte l'essentiel des précipitations aux régions sahéliennes (Lebel et Vischel, 2005 ; Casse, 2015 ; Sarr et Camara, 2017). L'une des caractéristiques de la MOA est la dépression thermique du Sahara (DTS) qui génère une circulation cyclonique aux basses couches et qui a tendance à renforcer le flux de la MOA au sud de l'équateur. Les études réalisées dans le cadre d'AMMA ont apporté de précieuses contributions dans la compréhension de la dynamique atmosphérique de la MOA. Le principe de base de la MOA réside en effet dans le déplacement saisonnier de vents dû à des contrastes thermodynamiques importants entre le continent (en particulier le Sahara) et l'océan Atlantique (spécialement dans le golfe de Guinée). Cette migration saisonnière débute en mai sur la côte guinéenne pour regagner le Sahel en août et redescendre ensuite vers le golfe de Guinée en novembre (Caniaux et al. 2012). Par ailleurs, la MOA représente un archétype idéal pour étudier les interactions dans un système de mousson (Redelsperger et al. 2006). De plus, un rôle majeur est aussi accordé à la température dans le golfe de Guinée dont le refroidissement au printemps favorise la pénétration de la mousson (Lafore et al. 2012). Pendant cette saison, le continent se réchauffe alors que les eaux du golfe de Guinée se refroidissent, formant une langue d'eau froide (Caniaux et al. 2012). Sous l'effet de ce contraste, les alizés de sud-est traversent l'équateur, pivotent en un vent de sud-ouest et pénètrent sur le continent où ils forment le flux de mousson dans les basses couches de

l'atmosphère. Le réchauffement continental est maximal sur le Sahara où s'installe un immense dôme d'air chaud, pouvant atteindre une épaisseur de 4-5 km, et appelé dépression thermique saharienne (DTS) permettant la convergence, au niveau du front intertropical (FIT), entre le flux de mousson frais et humide et les alizés du nord, chauds et secs (harmattan), en provenance de la Méditerranée et de l'Atlantique Nord.

En zone tropicale, la dynamique des moussons dépend des oscillations saisonnières de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), ou plus généralement l'équateur météorologique (Sultan et Janicot 2004). Le principe de base de la mousson ouest africaine repose aussi sur la migration saisonnière de masses d'air chaudes (harmattan venant du Sahara) et de masses d'air plus humides venues du sud. Ce phénomène est en effet dû aux contrastes thermodynamiques importants entre le continent et l'océan atlantique provoquant des fortes précipitations convectives (Sultan et al., 2005 ; Flaounas, 2012). Le changement des saisons est régulé par la position et l'importance relative des anticyclones des Açores, de Sainte-Hélène et de la Libye mais aussi de la dépression thermique du Sahara permettant la convergence entre le flux de mousson et les alizés du Nord. Ainsi, l'installation de l'unique saison pluvieuse dépend des aléas liés au balancement du Front Inter Tropical (FIT).

Le Sud-Ouest nigérien, comme l'ensemble du Sahel, est soumis à ce type de climat tropical semi-aride régi par le phénomène de la MOA. La mise en place de la mousson durant la période de mai-juin annonce le début de la saison pluvieuse tandis que son retrait en octobre indique sa fin et le début de la prochaine saison sèche. Ce climat typiquement sahélien est caractérisé par une courte saison pluvieuse entre mai et septembre, suivie d'une intense et longue saison sèche tout le reste de l'année. L'installation de la saison pluvieuse est fortement liée au déplacement de la zone de contact entre les masses d'air. Lorsque la mise en place de la mousson devient importante, l'essentiel des précipitations annuelles est engendré par les Systèmes Convectifs de Méso-échelle (SCM ou MCS) dont les caractéristiques sont bien décrites dans le cadre de l'observatoire AMMA-CATCH. Ces systèmes peuvent en effet prendre des formes diverses en fonction de leur taille et de leur niveau d'organisation. Ils peuvent toutefois produire des violents et intenses orages généralement bien organisés sous forme de lignes de grains pouvant représenter 3 à 4 % des événements pluvieux totaux et 90 % du cumul des précipitations (Nesbitt et Zipser, 2003). De 1982 à 2016, Taylor et al. (2017) ont par ailleurs constaté une augmentation de trois à quatre fois du nombre de ces Systèmes Convectifs Méso-échelles (MCS) intenses au Sahel. Cependant, les perturbations climatiques en cours se répercutent sur

la variabilité pluviométrique (sécheresses, extrêmes météorologiques). Ce qui peut impacter le fonctionnement hydrologique de la région et affecte la population locale.

➤ **Evolution pluviométrique interannuelle**

Le déclenchement de la mousson africaine est l'un des exemples les plus visibles de la variabilité interannuelle de la pluie (Leduc-Leballeur 2012). La Figure 2.7 montre l'évolution des précipitations dans la zone d'étude de 1905 à 2017. L'examen de celle-ci met en évidence des différences notables sur l'évolution des précipitations. Il est à souligner par ailleurs que la série des données pluviométriques utilisées pour la caractérisation du climat provient de la station de Niamey. Ceci étant dit, avec une moyenne interannuelle de l'ordre de 554 mm/an (1905-2017), la pluviométrie connaît une très forte variation interannuelle comme le montre l'indice standardisé des précipitations. La courbe des moyennes mobiles (pas de temps de 5 ans) fait apparaître des séquences d'années sèches et humides sur la série. Les années 1950 et 1960 ont connu une série de saisons particulièrement humides suivie d'une longue période sèche (1970-1980). La succession quasi ininterrompue d'années anormalement sèches depuis la fin des années 1960 a marqué les mémoires au Sahel plus particulièrement dans l'Ouest du Niger. Cet épisode long dû à la variabilité de la mousson africaine a causé un déficit cumulé moyen allant de 15 à 50 % et une diminution du nombre des événements pluvieux les plus intenses (Fontaine et al. 2012). Ce déficit, qui a touché presque l'ensemble des régions sahéliennes, a eu des conséquences catastrophiques sur les écosystèmes et le capital-bétail. De plus, les grandes sécheresses des années 70 ont provoqué une famine dramatique (Sultan, 2011) et les migrations selon les types de milieu d'origine et de destination rural/urbain (Gemene et al., 2017).

Depuis la fin des années 1990, on note cependant une reprise partielle des précipitations sans que les cumuls annuels moyens retrouvent les valeurs de la période humide des années 1950 et 1960. Plusieurs études (Mahé et Paturel, 2009 ; Sighomnou et al., 2013 ; Panthou et al., 2014) ont mis en évidence cette reprise hétérogène des pluies. Celle-ci est marquée par l'alternance des années humides et sèches au cours des dernières décennies. Mais, ce redressement pluviométrique observé aussi sur la zone d'étude s'est accompagné d'inondations. Outre cette variabilité temporelle, on note aussi la variabilité spatiale très forte des pluies d'une région à l'autre suivant les gradients latitudinal et longitudinal (Gal, 2016) . En effet, le cumul pluviométrique peut varier selon le gradient climatologique nord-sud de l'ordre de 1 mm par km environ (Taupin et al., 1998). Cela n'est pas sans conséquence sur la réponse hydrologique

aux échelle locale et régionale. Enfin, la variabilité spatio-temporelle de la pluie ne provoque qu'occasionnellement la régénération des écosystèmes fortement dégradés en raison d'effets difficilement réversibles.

Par ailleurs, la dégradation des précipitations annuelles serait néanmoins accompagnée d'une augmentation considérable des phénomènes météorologiques violents au cours des dernières décennies au Sahel (Taylor et al., 2017). Nous aborderons dans la section suivante l'intensification pluviométrique et ses conséquences.

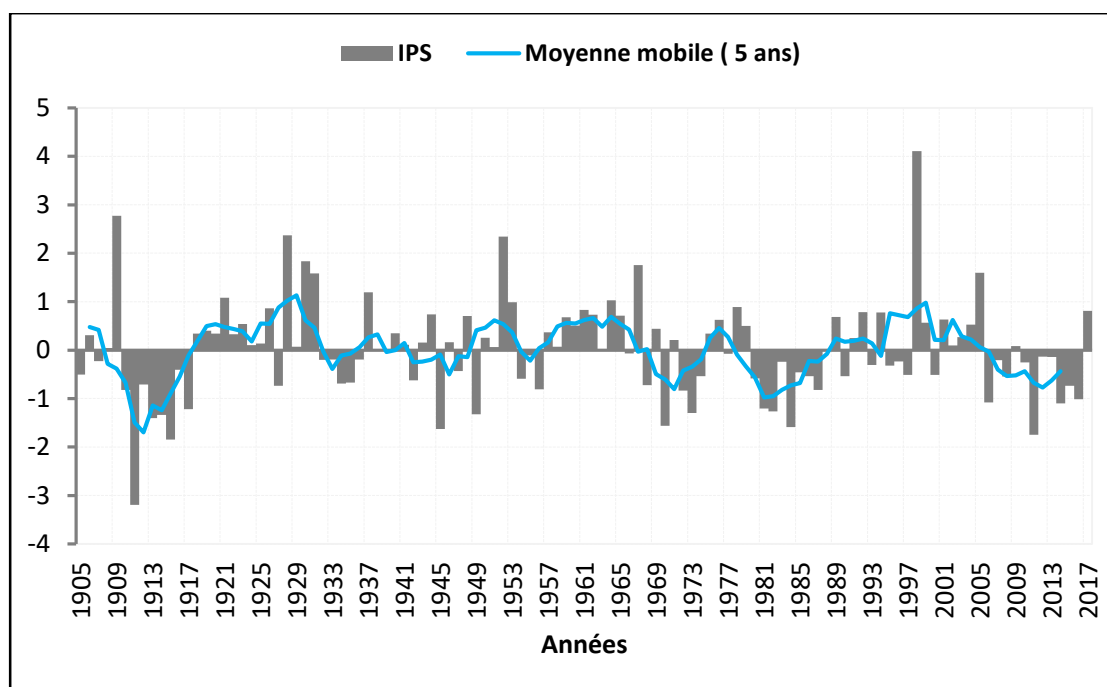


Figure 2.7. Evolution de l'indice standardisé de la pluie (IPS) et de la moyenne mobile de la station de Niamey aéroport. $IPS = (P_i - P_{moy}) / \sigma$ avec $i =$ indice de l'année, $P_{moy} =$ pluie moyenne (1905-2017) = 554 mm et $\sigma = 148$ mm.

➤ Intensification pluviométrique et ses conséquences

Sur le plan de l'évolution des précipitations extrêmes, nombreux sont les auteurs qui ont récemment analysé les pluies journalières concomitamment à l'accroissement des températures et des vagues de chaleur à l'échelle régionale (Panthou 2013 ; Panthou et al., 2014 ; Jasechko et Taylor, 2015 ; Ozer et al., 2017 ; Sarr et Camara, 2017 ; Taylor et al., 2017 ; Panthou et al., 2018). Ils ont tous constaté un accroissement des événements pluvieux forts (> 30 mm). La Figure 2.8 illustre ce phénomène en montrant l'évolution des événements pluvieux extrêmes dépassant les pourcentages observés durant les années 1970. Dans le même contexte, Taylor et al. (2017) ont constaté un triplement de la fréquence des pluies extrêmes au cours des 35

dernières années. Cependant, ceci n'est que partiellement expliqué par l'augmentation des cumuls de pluie depuis les sécheresses des années 80. En termes de conséquences, ce phénomène de la variabilité extrême des pluies peut avoir de graves répercussions sur le cycle de l'eau ainsi que sur l'agriculture essentiellement pluviale. Le Sud-Ouest nigérien n'est pas épargné et subit actuellement l'impact des extrêmes hydro-climatiques. Du fait de la fréquence élevée des pluies extrêmes, on assiste à l'augmentation des ruissellements forts, à l'accélération de l'érosion hydrique, des inondations et des dégâts énormes sur les cultures et les infrastructures hydro-agricoles et routières. A cela s'ajoutent les pertes en vies humaines.

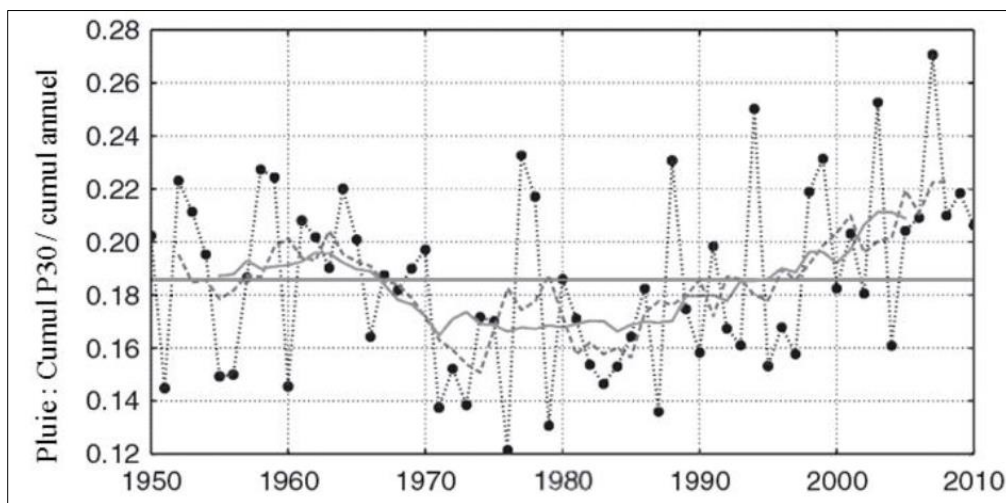


Figure 2.8. Evolution des pluies extrêmes et contribution de la part des pluies supérieures à 30 mm (P30) dans le cumul total annuel (d'après Panthou et al., 2014).

Cette région a en effet connu plusieurs cas des pluies diluviennes ayant causé de graves inondations. On peut citer les inondations qui ont affecté la ville de Niamey entre 2012 et 2016 voire 2020. Celle de 2012, par exemple, est une crue locale exceptionnelle qui n'a jamais été observée à la station hydrométrique de Niamey, depuis le début des observations en 1929. Des auteurs l'ont attribué aux précipitations journalières exceptionnelles combinées au changement d'usage des sols (Sighomnou et al., 2013 ; Descroix et al., 2013 ; 2015) et aux ruptures d'endoréismes en amont de Niamey (Bouzou Moussa et al., 2017).

Autres facteurs climatiques, la Figure 2.9 montre l'évolution des températures moyennes maximales et minimales sur la période 1990-2016. La moyenne annuelle est d'environ 30°C ; à l'échelle mensuelle, la température minimale (16°C) s'observe en décembre-janvier tandis que les valeurs les plus élevées (de plus de 40°C) sont enregistrées en avril et en mai. Cette

forte variation des températures couplée à celle des précipitations peut avoir de l'influence sur le bilan hydrique et par conséquent sur le stock hydrique de sols.

Quant à la Figure 2.10, elle montre l'évapotranspiration potentielle très importante (~2500 mm/an) à la station de Niamey. Combinée aux fortes températures, l'évapotranspiration élevée peut avoir un impact sur le déficit hydrique chronique (Nazoumou et al., 2016) notamment le contenu en eau du sol, paramètre que l'on abordera plus loin dans ce travail. D'après l'examen de la Figure 2.10, la valeur la plus élevée de l'évapotranspiration (275 mm) s'observe pendant le mois de mai et la plus faible en août. Globalement, la période à partir de mois de mars jusqu'en juin se caractérise par des valeurs nettement plus élevées par rapport au reste de l'année avec des valeurs qui descendent en dessous de la moyenne (233 mm).

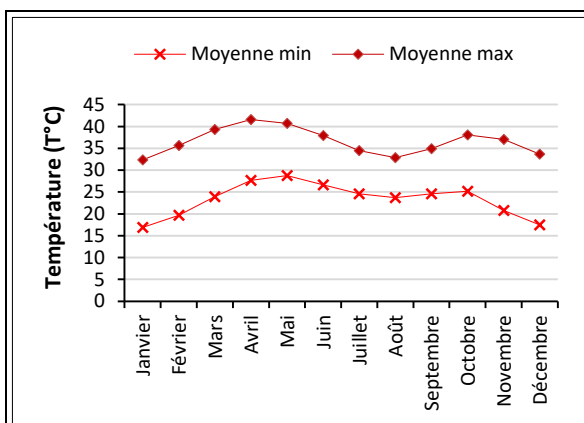


Figure 2.9. Températures moyennes minima et maxima pour la période 1990-2016 (Source : DMN)

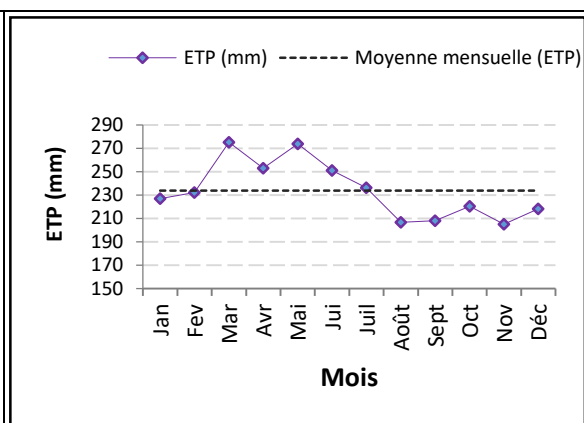


Figure 2.10. Evapotranspiration potentielle (ETP) à Niamey pour la période 1977-2005 (Source : DMN)

Les caractéristiques de la dynamique démographique sont par ailleurs présentées dans les sections qui suivent.

2.5. Dynamique démographique et ses conséquences sur l'environnement

Notre site d'étude, le terroir villageois de Tondi Kiboro est situé au Sud-Ouest du Niger dans le département de Kollo (région de Tillabéri représentant environ 16 % de la population nationale en 2015). Il appartient administrativement à la commune rurale de Dantiandou, appelée aussi souvent Fakara pour désigner la région des plateaux situés sur la rive droite du Dallol Bosso, qui couvre une superficie d'environ 500 km². Cette commune rurale connaît presque la même évolution démographique que d'autres communes rurales de la zone des cultures pluviales. Les données de la population utilisées dans le cadre de ce travail sont issues des différents recensements effectués au Niger. Selon les résultats de ceux-ci, la population de

la commune de Dantiandou a plus que quadruplé en l'espace de trois décennies. En se référant au taux d'accroissement de 3,1 % du département de Kollo (RGP/H 2001-2012), la Figure 2.11 illustre la dynamique démographique nette entre 1977 et 2016. En une décennie (entre 2001 et 2012), l'effectif de la population a enregistré une croissance remarquable de plus de 32 %, soit une augmentation de 11 824 habitants. En 2016, elle est estimée à 42 956 habitants soit une augmentation de plus de 6 100 habitants en seulement quatre ans.

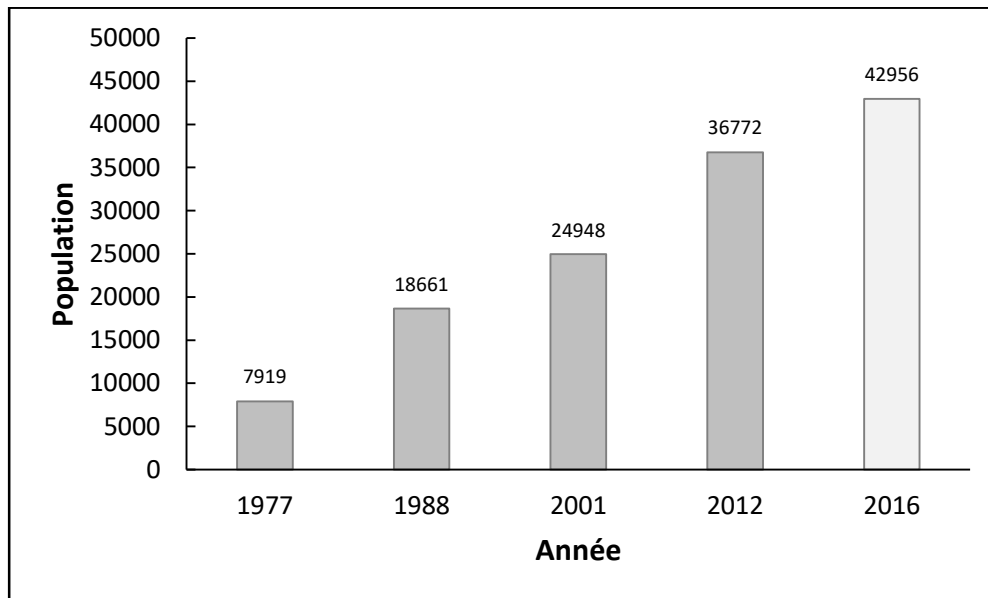


Figure 2.11. Evolution de la population de la commune rurale de Dantiandou de 1977 à 2016. La population de 2016 est obtenue sur la base de projection (source : INS).

En utilisant les résultats de 2012, nous avons estimé par projection la population en 2018 des dix-sept villages environnants le site d'étude. Une spatialisation a été ensuite réalisée par village. La Figure 2.12 présente la distribution spatiale de la population estimée (cercles proportionnels à l'effectif total) par village en 2018. L'analyse de la répartition spatiale permet de relever l'importance de l'accroissement démographique et la densité de l'occupation de l'espace plus importante dans le secteur sud de la carte. Comme l'indique la Figure, on remarque que les villages les plus peuplés (Banizoumbou, Maourey Tokobinkane, Koma koukou, Korto et Yerima Dey) ont une population comprise entre 750 et > 1000 habitants contre 200-500 habitants pour les moins peuplés. Il est toutefois important de noter que Banizoumbou compte à lui seul 1936 habitants en 2018.

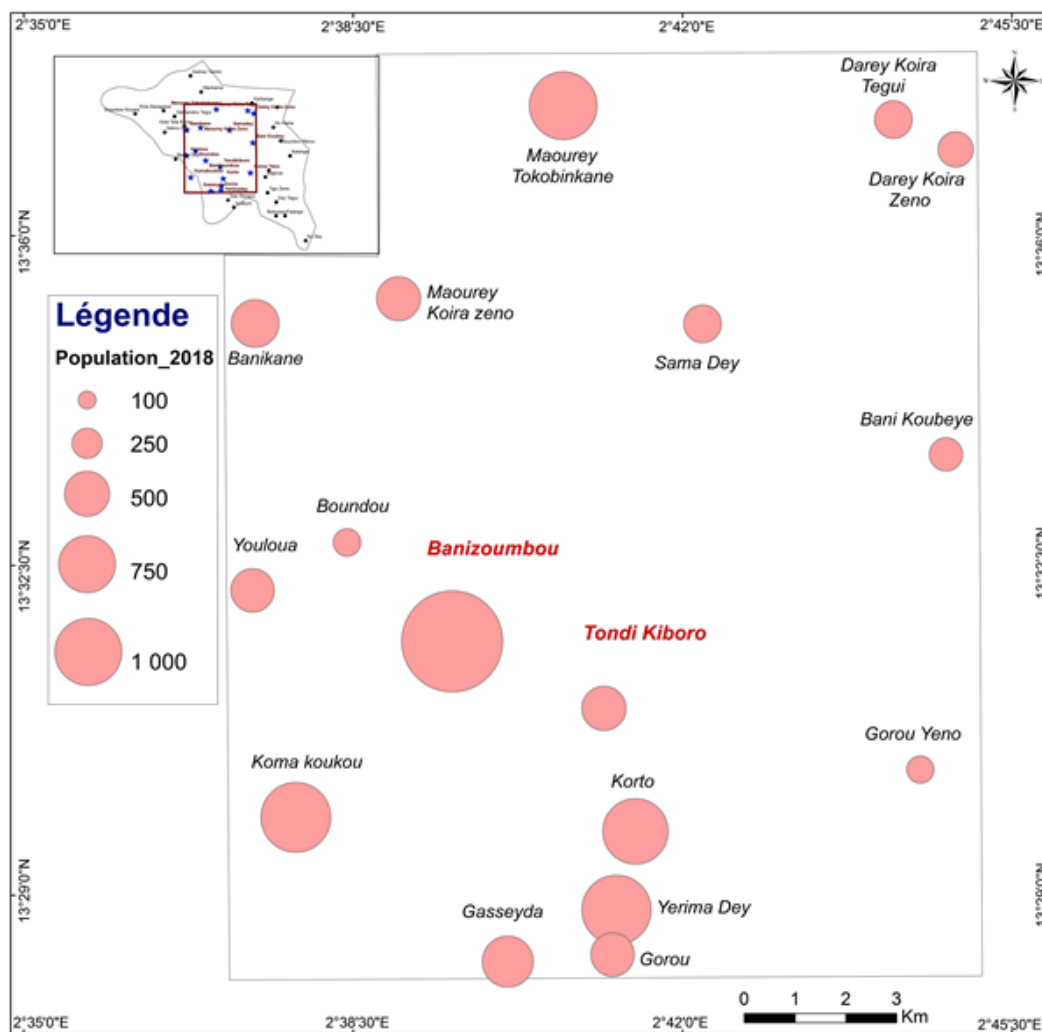


Figure 2.12. Distribution spatiale de la population dans l'espace (villages environnant le site d'étude) en 2018. Les villages écrits en rouge indiquent le secteur d'étude.

Toute cette population relativement jeune a pour principale activité l'agriculture (qui occupe 40 % du produit intérieur brut national) très dépendante de la pluviométrie. Une telle croissance démographique implique une forte pression sur les ressources en sol, en eau et en végétation conduisant forcément à l'extension concomitante des cultures. En effet, l'agriculture essentiellement pluviale constitue la base des besoins en nourriture. Les principales cultures vivrières céréalières (mil, sorgho cultivés en monoculture ou en association avec le niébé, le sésame et l'oseille) constituent la base de la production agricole (Abdoul Habou et al., 2016). La pratique de l'irrigation pouvant être une des solutions pour améliorer la sécurité alimentaire (Nazoumou et al., 2016) se limite le plus souvent au long du réseau fonctionnel du fleuve Niger et aux bas-fonds notamment dans les dépressions plus humides et parfois autour des points d'eau (mares). Pour ces pratiques, le travail du sol se fait à l'aide des outils traditionnels et manuels. Les systèmes agricoles sont généralement peu intensifiés et consistent en une rotation

entre mise en culture et en jachère (système traditionnel de restauration de la fertilité des sols), souvent conjuguée au pastoralisme (Dardel, 2014). On note, en outre, la pratique de l'élevage de type extensif.

Du fait des contraintes climatiques et humaines, la pratique de la jachère (technique destinée à maintenir durablement la fertilité des sols) ainsi que sa durée ont drastiquement diminué. Ceci contribue à l'extension des surfaces cultivées pouvant également être influencée par la baisse de fertilité des sols et des rendements. Par ailleurs, les populations locales, pour pouvoir répondre à leurs besoins, doivent s'adapter à tous ces changements d'où le défrichement de plus en plus intense entraînant la dénudation des vastes surfaces. A cela, s'ajoute l'exploitation abusive du bois (déboisement) qui constitue une autre activité dont la rentabilité est de plus en plus évidente du fait de l'accroissement des besoins en bois-énergie des centres urbains, notamment la ville de Niamey. Le développement de cette activité combinée au surpâturage constitue une véritable menace pour la ressource végétale surtout pour les zones des plateaux occupés par la brousse tigrée.

Toutes ces contraintes ont eu pour conséquences des bouleversements environnementaux (Ozer et Ozer, 2005). En effet, le milieu actuel est caractérisé par un environnement physique qui se dégrade continuellement d'où la baisse de la productivité agricole très dépendante d'un régime capricieux des pluies. On assiste plutôt à la récurrence des crises alimentaires ayant suscité une intensification agricole (USAID, 2006) afin de répondre aux besoins vitaux d'une population fortement croissante. D'après Loireau (1998), cela a engendré des profonds changements dans la structuration fondamentale du paysage (morcellement en parcelles) et le mode d'utilisation de l'espace rural. May et Guengant (2014) ont rapporté, dans le même contexte, que les systèmes agraires traditionnels ont pu jusqu'à récemment répondre à l'augmentation de la population par l'extension des surfaces cultivées. Mais en mettant en culture de plus en plus de terres marginales et en réduisant voire en supprimant la durée de la jachère régénératrice des sols, on aboutit à l'accélération de la déforestation, des érosions hydrique et éolienne, de la désertification et à l'exacerbation des conflits récurrents entre cultivateurs, d'une part, et entre cultivateurs et éleveurs, d'autre part. De plus, la nécessité de conquérir des nouvelles terres cultivables constitue une des conséquences du facteur démographique. La Figure 2.13 illustre la progression de l'espace agricole à travers le défrichement intense des terres, phénomène qui a provoqué une augmentation des surfaces cultivées de l'ordre de 50 % dans la région de Fakara entre 1950 et 2014 (Dardel, 2014).



Figure 2.13. Progression des espaces agricoles (source : Gesforcom, Niger).

La problématique fondamentale à l'Ouest nigérien particulièrement est celle de la dégradation accélérée de son énorme potentiel des ressources naturelles de base, sous l'action de la mise en œuvre des techniques d'exploitation sans une gestion durable et conservatrice. Les facteurs climatique et anthropique semblent rentrer en jeu pour expliquer cette tendance à la dégradation du couvert végétal observée dans cette région. C'est le cas de la région agro-pastorale du Fakara soumise à cette forte pression anthropique depuis 1950 (Massuel, 2005) conduisant à une dégradation intense du couvert végétal (Souley Yero, 2012 ; Assoumane, 2014) suivie de celle des sols, soumis à toutes formes d'érosions hydrique et éolienne de forte intensité (Bouzou Moussa et al., 2019). Mais cette situation ne paraît pas être reliée aux précipitations annuelles (Dardel, 2014). En effet, au fur et à mesure que les besoins en terres cultivables et en bois d'énergie augmentent, le défrichage et le déboisement se sont accélérés jusqu'à aboutir à l'apparition de zones de culture sur les plateaux à brousse tigrée auparavant réservés au pâturage. La Figure 2.15 met en évidence ce phénomène de mise en culture sur le plateau à brousse tigrée de Tondi kiboro (site d'étude). Il résulte de ces changements d'occupations des sols une forte diminution de la végétation suivie d'un accroissement de 75 % des surfaces de sol encroûté (Amogu et al., 2015) dans la commune de Dantiandou.

Pour bien illustrer ces changements opérés dans l'occupation des sols dans la zone d'étude, nous avons réalisé des cartes par interprétation (classification supervisée) des images Google Earth de 2009 et de 2016. La Figure 2.14 montre la dynamique d'occupation des sols du bassin versant de Sama Dey entre ces deux dates. L'interprétation du tableau 2.1 nous inspire un changement visible en termes de proportion des différents thèmes d'occupation des sols.

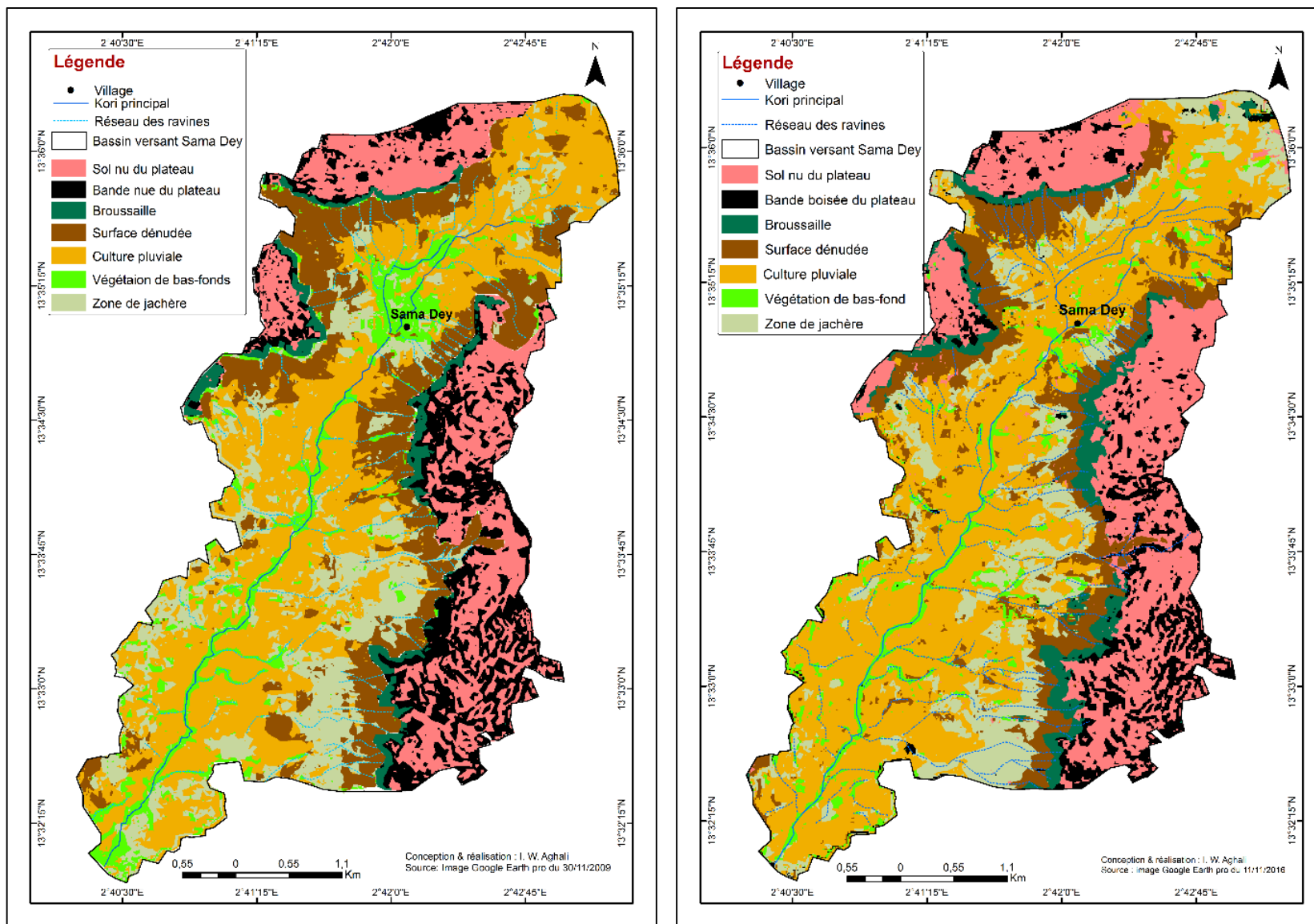


Figure 2.14. Cartes de la dynamique d'occupation des sols dans le bassin versant de Sama Dey entre 2009 et 2016 (secteur d'étude).

Tableau 2.1. Evolution de l'occupation des sols (en %) entre 2009 et 2016 sur le bassin versant de Sama Dey

Année \ Types d'occupation des sols	Proportion en 2009	Proportion en 2016
Sol nu du plateau	14,8	18,7
Broussaille	3,1	3,8
Bande boisée du plateau	11,0	8,1
Surface dénudée	12,8	12,4
Culture pluviale	36,3	38,9
Végétation de bas-fond	7,0	4,4
Zone de jachère	14,9	13,7
Total	100	100

L'analyse de ce tableau montre clairement la disparition des bandes boisées au profit des sols nus fortement encroûtés. Celles-ci passent de 11 % à 8 % entre 2009 et 2016 alors que les bandes de sol nu ont augmenté d'environ 4 %. Un autre constat frappant est le changement d'état des zones de culture pluviale, de la végétation des bas-fonds et des jachères se manifestant entre 2009 et 2016 par la diminution de leurs surfaces respectives.



Figure 2.15. Défrichement et mise en culture des zones de plateau de Tondi Kiboro. Situations en septembre (à gauche) et en Novembre (à droite) 2019. Noter bien que ces photos ont été prises sur un même plateau mais à des secteurs différents.

Enfin, de la disparition progressive du couvert végétal résulte l'extension spatiale des bandes nues (cf. Figure 2.14). Cette dynamique, si elle se poursuit, provoque une dérégulation hydrologique du système dans son ensemble. Les écoulements de plus en plus importants sur les plateaux latéritiques caractéristiques du bassin sédimentaire acquièrent ainsi des caractères plus torrentiels sur les versants, ce qui déclenche l'accélération de la dynamique hydro-érosive ayant pour conséquence la disparition ou la tendance à la disparition des mares situées dans les lits des cours d'eau (Malam Abdou et al., 2018). En outre, la dégradation importante de la

végétation peut être à l'origine de l'encroûtement et de la diminution de la capacité d'infiltrabilité des sols entraînant l'augmentation locale du ruissellement de surface.

2.6. Quelques indicateurs de l'augmentation du ruissellement et leurs effets

Des facteurs aussi bien humains que physiques sont à l'origine des changements d'occupation des sols observés actuellement. Dans ce contexte, l'augmentation du ruissellement observée sur les plateaux trouve son origine à travers la dynamique hydro-érosive, éolienne et humaine. En cela, des études (Bouzou Moussa et al. 2011 ; Mamadou, 2012 ; Mamadou et al., 2015) ont démontré que la combinaison de ces facteurs modifie constamment la dynamique hydro-géomorphologique des koris conduisant à un changement radical de leur comportement hydrologique. En effet, la dynamique très forte des surfaces élémentaires des plateaux à brousse tigrée a entravé leur fonctionnement hydrologique. Face à la disparition des bandes boisées du plateau (Tableau 2.1 et Figure 2.16 "a"), le vent et l'eau de ruissellement par leur capacité d'action mécanique emportent quelques placages de sables fins recouvrant la cuirasse et la mince couche superficielle du sol. L'imperméabilité des sols nus renforce le ruissellement et réduit l'infiltration et par conséquent les réserves hydriques des sols.

Comme le ruissellement prend naissance sur le sol nu, la diminution des bandes boisées ainsi démontrée provoque la création et l'élargissement des impluviums et, par suite, le ruissellement se renforce (Figure 2.16 "b"). Autrement dit, cette disparition de la végétation influe beaucoup sur l'encroûtement du sol qui constitue un obstacle majeur à l'infiltration des eaux. Du fait que les bandes boisées se trouvant sur les plateaux et leurs bordures se dégradent, on peut dire que cela contribue beaucoup à la genèse et à l'augmentation du ruissellement à ce niveau.

A la sortie des plateaux, le ruissellement concentré modifie sensiblement la dynamique hydrique des autres unités géodynamiques. Il prend de l'ampleur face à l'amincissement des fourrés et se déverse sur le talus avec une certaine vitesse compte tenu de l'inclinaison de la pente (Figure 2.16 "c"). Ce ruissellement fort et concentré déclenche alors le phénomène de creusement accéléré se poursuivant jusqu'au bas-fonds (Figure 2.16 "d").

En résumé, le changement structural de la brousse tigrée a des impacts sur les ressources en eau et en sols. Le défrichage plus ou moins abusif et le pâturage accentue la dégradation du couvert végétal amorcée avec les sécheresses des années 1970 et 80. Les conséquences peuvent être une remontée du niveau de la nappe, bien sûr, mais aussi des inondations pluviales dans les villages, une densification du réseau de ravines de plus en plus creusées, enfin un ensablement des fonds des vallées (Figure 2.16 "e") comme le constatent déjà les habitants de la zone. A cela

s'ajoute la menace sur les infrastructures routières. La Figure 2.16 "f" montre un cas illustratif de ce type de dégât.

La Figure 2.17 montre les conséquences de la dégradation de la brousse tigrée sur les unités géodynamiques en aval.



Figure 2. 16. Processus de dégradation de la végétation de plateau et ses conséquences. Extension des sols nus encroûtés et développement des ravines sur la jupe sableuse (a), production du ruissellement sur le plateau à brousse tigrée (b), accentuation de ce ruissellement sur pente forte et transfert des lames ruisselées via les ravines (c), déclenchement de la dynamique des pertes en terre (d), réduction des superficies des plans d'eau par ensablement (e), dégâts sur les infrastructures routières, cas d'un kori (affluent de kori Ouallam) rompu suite à une forte pluie tombée en mai 2017 (f).



Figure 2.17. Conséquences de l'augmentation de ruissellement sur le fonctionnement hydro-géomorphologique des unités en aval (secteur de Tondi Kiboro).

Le ruissellement en provenance du plateau entraine la création des ravines sur les zones de glacis et dans les champs de cultures pluviales. Prise des vues effectuée le 1^{er} septembre 2019 à l'aide d'un drone PANTHOM4.

2.7. Site expérimental de l'étude et ses caractéristiques

Après la présentation du site expérimental de l'étude, nous décrirons dans cette partie du chapitre les techniques de CES (banquettes et sous-solage) choisies et réalisées sur chacun des bassins versants étudiés dans ce travail.

2.7.1. Bassins versants expérimentaux de Tondi Kiboro

2.7.1.1. Présentation

Le site expérimental de l'étude est situé dans l'Ouest du Niger sur des dépôts sédimentaires du Continental Terminal du bassin des Iullemeden (rive gauche du fleuve Niger) (cf. Figure 2.1). Ce site se localise dans la commune de Dantiandou, région de Tillabéry. Il s'agit de deux petits bassins versants expérimentaux, dénommés TK Nord et TK Sud (TK = Tondi Kiboro, nom du terroir villageois dans lequel se trouve le site). Ils ont respectivement 23 ha et 35 ha de superficie. Chacun de ces bassins versants est composé des deux sous-bassins emboîtés, un sous bassin amont, nommé TK amont Nord et un sous bassin aval, appelé TK aval pour le bassin TK Nord tandis que les sous bassins amont et aval du bassin TK Sud, sont dits TK amont Sud et TK Bodo respectivement. Nous précisons **que les observations et mesures menées dans le**

cadre de cette étude se limitent aux sous bassins TK amont (cf. Figure 2.18). Ce site est représentatif des caractéristiques climatiques et morpho-pédologiques des paysages sédimentaires de l'Ouest du Niger. Le cumul pluviométrique annuel varie, en moyenne, entre 400 et 600 mm selon l'année. Du point de vue morpho-pédologique, elle est marquée par trois unités géodynamiques, les plateaux latéritiques, les glacis et les bas-fonds, décrites plus haut (cf. Figure 2.2).

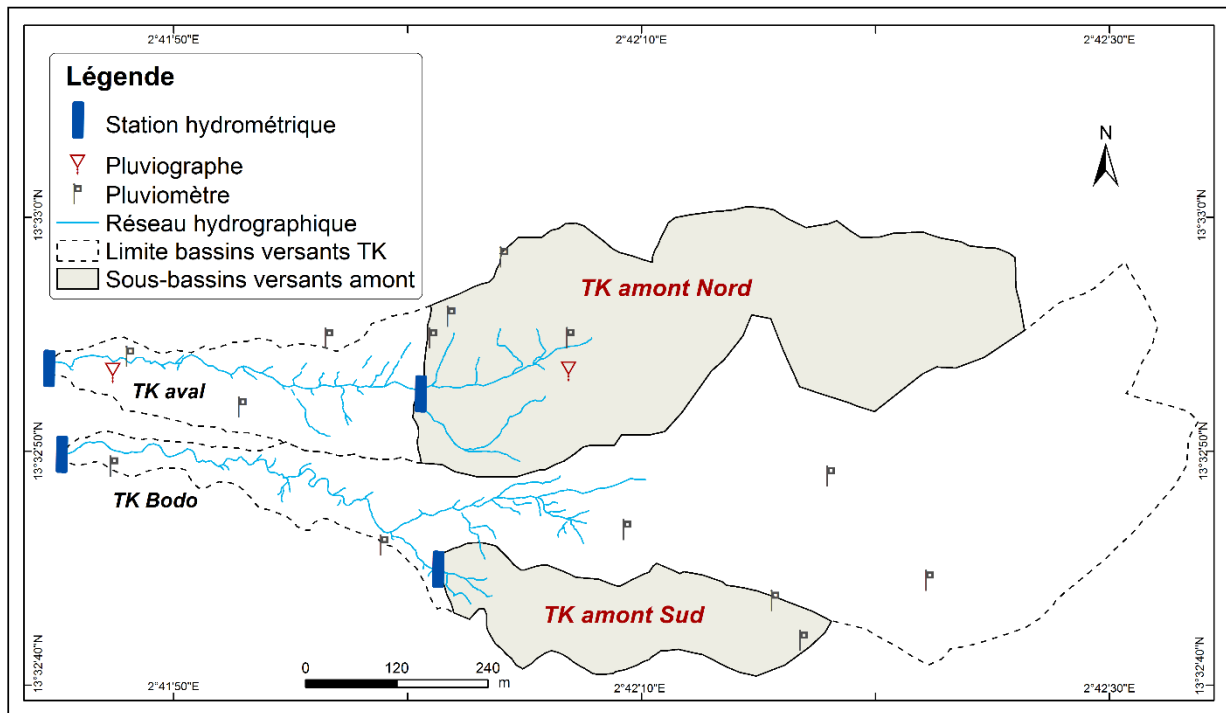


Figure 2.18. Les bassins versants étudiés et les instruments de mesure disponibles.

Par ailleurs, des études antérieures ont démontré que le fonctionnement hydrologique des sous-bassins d'un même bassin est très contrasté du fait de la différence très nette de leurs caractéristiques morpho-pédologiques (Peugeot et al., 1997 ; Esteves et Lapetite, 2003). Ainsi, les sous-bassins aval sont caractérisés par des unités à faciès sableux tandis que dans les sous-bassins amont, les faciès latéritiques sont plutôt dominants. Les aménagements réalisés concernent exclusivement les parties amont constituées essentiellement des sols latéritiques. En conséquence, les observations et mesures menées dans le cadre de cette étude se limitent aux sous-bassins versants amont. Ce site instrumenté depuis 2004 dans le cadre du programme AMMA-CATCH est peu éloigné de Niamey (distant d'environ 70 km à l'est), ce qui constitue aussi un avantage évident en termes de coût et de temps de transport.

2.7.1.2. Caractéristiques morpho-pédologiques spécifiques des BV étudiés

Le paysage du site d'étude se caractérise par les plateaux latéritiques du Continental Terminal qui, couverts en surface par des dépôts sédimentaires datant du Quaternaire, culminent à environ 260 m d'altitude. Ils sont constitués de matériaux grés-argileux du Continental Terminal (CT3) du bassin sédimentaire des Iullemeden. La faiblesse de leur pente (de l'ordre de 0,6 %) contribue à l'épandage des eaux du ruissellement. Les sols généralement peu évolués, peu profonds et à faciès ferrugineux ont une faible capacité d'infiltration, surtout dans le cas des surfaces encroûtées qui sont dominantes (Casenave et Valentin, 1990 ; Casenave et Valentin, 1991 ; Vandervaere et al., 1997 ; Vandervaere et al., 1998). La végétation de type « brousse tigrée » se caractérise par des bandes alternativement nues et boisées. Les zones boisées, si elles ne sont pas dégradées, assurent un fonctionnement hydrique naturellement équilibré du système. Les plateaux constituent principalement un lieu de pâturage pour les animaux (Figure 2.19 b) et de prélèvement de bois de cuisine (Figure 2.19 c, d). La dégradation de ceux-ci est actuellement accentuée par ces activités (Souley Yero, 2012 ; Maazou et al., 2017). Ils sont limités par des talus d'éboulis qui assurent la transition entre les plateaux et le glacis. Ce dernier, a texture essentiellement sableuse, correspond aux aires de cultures et de jachère. La toposéquence (cf. Figure 2.2) s'achève dans les bas-fonds qui sont des dépressions plus ou moins marquées du paysage. Ils constituent des zones à basse altitude où se concentrent la presque quasi-totalité des eaux de ruissellement en provenance du haut des versants. En grande partie cultivés (cultures sous pluie notamment), ils reçoivent des quantités massives de ruissellement, sous forme plus ou moins concentrée, participant aussi à l'érosion hydrique en assurant le transport et le dépôt des particules détachées par les pluies. De plus, on y observe des cultures maraîchères qui se développent autour des mares de bas-fonds (Figure 2.19 a). L'accentuation de la dégradation de la végétation des plateaux a été à l'origine de la réalisation et de l'amélioration progressive des techniques en matière d'aménagement et de lutte contre l'érosion hydrique.



Figure 2.19. Types d'activités pratiquées sur les unités géomorphologiques.

2.7.1.3. Etats de surface et leur répartition sur la toposéquence du site d'étude

L'observation in situ du terrain nous permet de distinguer quelques types des croûtes présentes (Figure 2.20). Il s'agit, entre autres, des croûtes grossières (G) constituées de fragments de cuirasse et des graviers ou des fractions granulométriques de taille supérieure à 2 mm (Casenave, 1991). Les croûtes d'érosion (ERO), qui se caractérisent par une pellicule superficielle très fine, lisse et compacte, se rencontrent dans les zones où le ruissellement de surface est plus important (impluvium du plateau) et constituent un obstacle majeur pour l'infiltration. Les croûtes de ruissellement (RUI) forment des nappes planes alternant des lits de sable et d'argile très compacts (Valentin, 1994) et se localisent dans les zones au ruissellement très peu marqué. Elles sont constituées des particules pouvant dépasser quelques 2 mm et témoignent d'une faible infiltration. Les croûtes de décantation (DEC) se caractérisent par un tri granulométrique vertical (sables à la base et argile au sommet) et sont parfois recouvertes par des algues. Elles se localisent dans des micro-dépressions surtout au centre des fourrés et dans quelques emplacements en aval des bandes nues. On y observe souvent des fentes de retrait à l'état sec. Cette croûte est très peu perméable. Enfin, les croûtes algales (BIOL) qui peuvent être, selon Casenave et Valentin (1992), assimilées morphologiquement aux croûtes structurales à un micro-horizon sont fortement marquées par l'activité de la flore et de la faune. Elles sont plus ou moins soumises à l'activité de récolte de termites lorsqu'elles sont recouvertes de la litière ; elles présentent une très forte macroporosité d'origine biologique mais peuvent aussi présenter un caractère hydrophobe peu propice à l'infiltration.

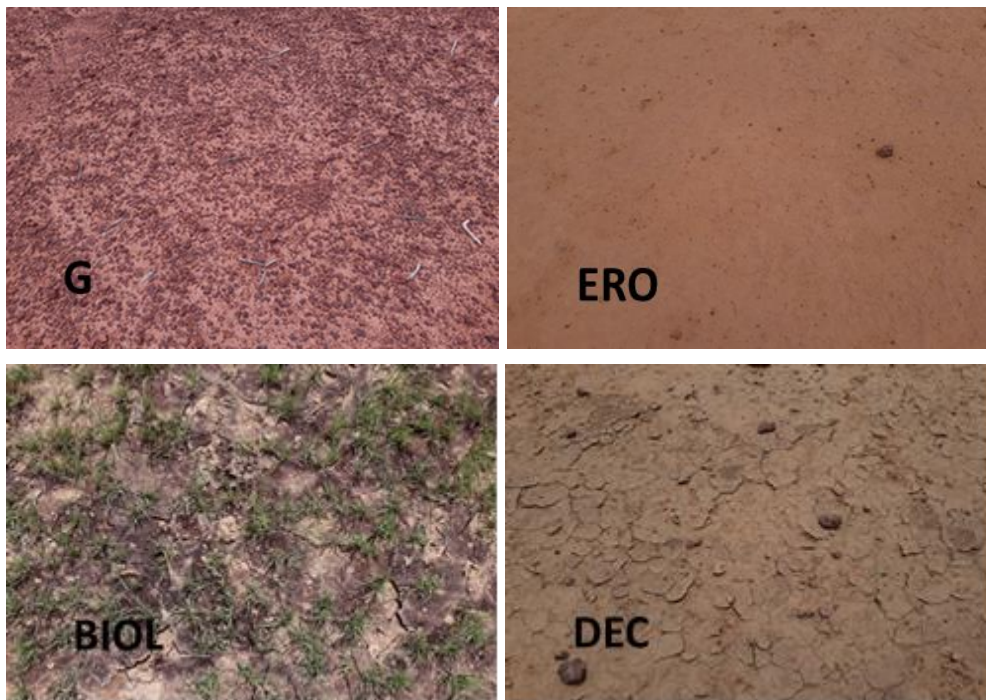


Figure 2.20. Quelques états de surface dominants rencontrés sur le plateau à brousse tigrée.

A ces grands groupes de croûtes ont dû être ajoutées quelques termitières observables sur la surface des plateaux et qui sont assimilées aux croûtes ERO. Ces différentes croûtes se répartissent sur la surface des plateaux suivant la structure des bandes. Les bandes nues encroûtées sont caractérisées par des états de surface limitant l'infiltration (croûtes ERO, G, DEC) tout en sachant que les croûtes d'érosion et gravillonnaire sont les types qui prédominent dans cet écosystème. Lors de la saison pluvieuse, il se crée, sur ces états de surface, un ruissellement en nappe généralisé vers l'aval, ce qui déclenche la dynamique hydro érosive. Au vu de la progression rapide de la dégradation et de l'encroûtement des sols en lien avec l'augmentation du ruissellement, des techniques parfois locales de collecte des eaux de ruissellement et de récupération des sols dégradés ont été introduites depuis fort longtemps au Niger. Elles ont été développées à partir des années 1980 avec la naissance des projets de développement rural axés sur la CES/DRS. Des études (Dapola Da, 2008 notamment) ont mesuré l'impact de ces techniques sur des rendements agricoles au Burkina Faso.

Nous avons, dans le cadre de ce travail, choisi et réalisé deux types d'aménagement avec pour objectif d'évaluer leur impact sur la réduction de l'aptitude des bassins à ruisseler.

2.7.1.4. Caractéristiques morphométriques des bassins versants étudiés

Dans le Tableau 2.2, sont données les caractéristiques morphométriques spécifiques des deux bassins versants (TK Nord et TK Sud) suivis. Soulignons que les caractéristiques

physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, notamment via le comportement des écoulements très dépendant de la morphologie des bassins et de leurs conditions de surface. Dans notre contexte, les écoulements sont assez fréquemment interrompus dans les koris par la présence des dépôts sableux. Le temps de concentration qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques dont la surface du bassin, sa forme, son élévation, sa pente. A ces facteurs d'ordre géométrique, s'ajoutent le type de sol, le couvert végétal, les aménagements anthropiques tels que les champs de culture de mil, les jachères, et enfin, les caractéristiques du réseau hydrographique.

Tableau 2.2. Caractéristiques morphométriques des bassins versants de Tondi Kiboro.

Variable/Bassin versant	BV TK Sud	BV TK Nord
Longueur max. (m)	1480	1260
Largeur max. (m)	525	300
Périmètre (m)	3860	3080
Surface (hectares)	34.7	23.4
Pente moyenne (%)	1.5	2.6
Indice de compacité de Gravelius	1.8	1.8
Densité de drainage	5.1	7.8

Source : Malam Abdou, (2014)

2.7.2. Techniques d'aménagement des bassins versants et leur réalisation

Au Sahel nigérien, l'accentuation de la dégradation des terres des versants continue de peser lourdement sur le niveau de la productivité agricole et les revenus des agriculteurs. Face à ce problème, la protection et la restauration des ressources naturelles constituent aujourd'hui une des grandes priorités des pays sahéliens et du Niger en particulier. Pour cela, des techniques innovantes d'aménagement en CES/DRS ont été élaborées et développées depuis les années 80 en collaboration avec plusieurs acteurs du développement rural. Parmi ces techniques, deux types ont été choisis pour cette étude. Il s'agit, d'une part, de l'aménagement en **banquettes** qui a pour but de collecter et de stocker les eaux de ruissellement et, d'autre part, du **sous-solage** consistant à remanier en profondeur le sol pour augmenter sa porosité et sa perméabilité afin de relancer la vie biologique. Les banquettes ont été réalisées sur le sous bassin TK amont Nord du bassin TK Nord tandis que le sous-solage concerne exclusivement la partie amont du bassin versant TK Sud.

2.7.2.1. Motifs du choix des types d'aménagement

La banquette a été choisie parce qu'elle constitue une technique fréquemment utilisée par la plupart des acteurs gouvernementaux ou non (ONG) qui interviennent pour la restauration de l'environnement. C'est une technique très répandue à l'Ouest du Niger notamment sur les plateaux latéritiques à vocation agro-pastorale. Appliqué en amont des zones de cultures pluviales, l'aménagement en banquettes protège les champs contre le phénomène de ravinement. Le motif principal du choix de ce type d'aménagement se base sur les critères de réalisation, de l'application et de la maîtrise de la technique par les paysans ruraux.

Aussi, pour améliorer le fonctionnement hydrique des sols dégradés et pallier les insuffisances chroniques de la productivité agricole, les paysans font recours à d'autres techniques telles que le sous-solage, le tassa, le scarifiage, le paillage etc. Le **sous-solage** est une pratique connue depuis des siècles par ses multiples fonctions supposées positives pour restaurer les terres dégradées. Il est souvent réalisé soit avec des outils traditionnels (traction animale), soit avec un tracteur motorisé en fonction des moyens financiers dont disposent les paysans. Notons, par ailleurs, que les agriculteurs disposent depuis fort longtemps d'un riche répertoire de technologies en matière de conservation des eaux et des sols en milieu rural sahélien (Mazzucato et Niemeijer, 2001).

2.7.2.2. Technique de banquettes : description et réalisation sur TK amont Nord

L'aménagement en banquettes consiste à creuser un fossé de forme trapézoïdale, d'une largeur de 50 cm et d'une profondeur d'environ 30 cm, ouvert en amont sous forme d'impluvium (sens de la pente). Le déblai (terre latéritique excavée du fossé) est rejeté en aval pour former un bourrelet. Avec une longueur de la digue principale (bourrelet) pouvant aller jusqu'à 80 m, la banquette est limitée aux deux extrémités par des ailes dirigées vers l'amont. La banquette peut être soit perméable (travail du sol de l'impluvium), soit laissée à l'état naturel. Disposées en quinconce sur un versant, les banquettes ont pour but d'intercepter et stocker les eaux de ruissellement. Lors des événements pluvieux, ces eaux s'y concentrent grâce aux bourrelets qui limitent leur passage. La Figure 2.21 montre les principes d'exécution des banquettes sur le plateau ainsi que les outils utilisés. Elles sont construites le long de courbes de niveau sur des unités à faible pente.

Le choix de cette technique se justifie par son efficacité supposée, la facilité de sa réalisation (par des paysans avec des pelles et des pioches) et son appropriation par la plupart des acteurs

(gouvernementaux ou non) qui interviennent pour la restauration de l'environnement. Les banquettes installées à l'amont du versant protègent les unités en bas de pente contre le ruissellement et leurs effets hydro-érosifs.



Figure 2.21. Principes de réalisation de la banquette et les outils utilisés.

Afin de quantifier et d'analyser l'impact des surfaces aménagées en banquettes sur la réduction du ruissellement, le protocole a consisté à réaliser progressivement les banquettes en augmentant chaque année une proportion de surface aménagée sur celle de l'année précédente. Ce protocole est mis en œuvre de 2009 à 2016 sur le bassin versant TK amont Nord. En 2009, la superficie aménagée représente moins de 1 % du sous bassin pour atteindre 9 % en 2016. Le calcul de la surface aménagée se fait en délimitant la totalité de la surface traitée en intégrant les espaces inter-banquettes considérés également comme étant aménagés. Chaque année (plus fréquemment après chaque pluie), on réhabilite les banquettes endommagées par les eaux de ruissellement en colmatant les brèches provoquées par les fortes pluies. Le choix de l'emplacement des banquettes se base en premier lieu sur l'état de dégradation des sols. Elles ont ainsi été réalisées sur des zones dénudées et encroûtées (situées en aval ou en amont des bandes boisées) afin de leur apporter un supplément d'eau pour leur développement. Notons par ailleurs qu'une bonne partie de la pluie qui tombe sur ces espaces encroûtés se perd par ruissellement d'où le choix de l'emplacement de l'aménagement en banquettes visant à conserver durablement l'eau de la pluie là où elle tombe.

La proportion de la surface aménagée, pour une année donnée, se calcule par rapport à la superficie totale du bassin versant, soit :

$$S. AM (\%) = \frac{\text{Surface aménagée de l'année } n}{\text{Superficie du bassin versant}} \times 100 \quad (2.1)$$

Où S. AM = surface aménagée.

2.7.2.3. Technique d'aménagement par sous-solage du sol

2.7.2.3.1. Définition et description du sous-solage

Le sous-solage est une opération de travail du sol qui consiste à effectuer un remaniement plus ou moins profond de la couche superficielle du sol colmatée par la croûte d'érosion (ERO) afin d'accroître la capacité d'infiltration, de réduire d'autant le ruissellement et d'améliorer l'état structural naturel du sol. L'épaisseur de la couche remaniée est fonction de la profondeur d'action de l'outil utilisé.

Contrairement au labour, le sous-solage vise à briser ou ameublir sans retournement une couche compacte (encroûtée) du sol à une profondeur supérieure à celle des labours, soit plus de 30 à 40 cm (Labreuche et al., 2007). Le sous-solage, en améliorant la capacité d'infiltration des sols, n'est généralement pas considéré comme une technique de travail cultural de sols mais entre plutôt dans la gamme des techniques destinées à accroître la perméabilité du sol des ouvrages antiérosifs. Au cas où le sous-solage est pratiqué en association avec d'autres techniques mécaniques comme les banquettes, les cordons pierreux et/ou biologiques telles que le reboisement, il permet de lutter efficacement contre l'érosion hydrique en freinant le ruissellement (CTFT, 1979 ; Trouche, 2017). Pratiqué avec la charrue ou le tracteur motorisé en milieu sahélien, le sous-solage doit être réalisé sur des sols sablo-argileux compacts et/ou gravillonnaires. La stratégie de diffusion de cette technique par les acteurs (ONG) se base sur une approche souvent participative. Mais du fait de son coût trop élevé (60 000 FCFA pour sous-soler un hectare) et des tracteurs non disponibles, les paysans font recours au sous-solage traditionnel pratiqué soit avec la herse soit par l'utilisation de la traction animale. La perméabilité du sol pour l'eau de pluie engendrée par cette technique, qui dépend beaucoup des propriétés physiques, agit sur le régime hydrologique des bassins versants (Brabant, 2008).

2.7.2.3.2. Réalisation du sous-solage sur le sous bassin TK amont Sud

Pour ce travail, le sous-solage a été réalisé à l'aide d'un tracteur par le passage de la sous-soleuse rectiligne (perpendiculairement à la pente) travaillant sur une profondeur typiquement entre 30 et 40 cm (Figure 2.22). La largeur des sillons est d'environ 30 cm. La technique peut aussi être associée à des techniques mécaniques (cordons pierreux) ou biologiques

(reboisement). Le sous-solage est réalisé sur des sols dégradés et pratiqué de plus en plus en zone sahélienne (Vlaar, 1992 ; Kagambega et al., 2011 ; Sawadogo et Janvier, 2011).



Figure 2.22. Pratique du sous-solage avec un tracteur ordinaire sur le sol nu du plateau.

2.7.2.4. Différence entre les techniques d'aménagement utilisées

L'étude a pour but de comparer l'efficacité de ces techniques d'aménagement présentant des différences en termes de structure et forme. La banquette est une technique d'aménagement de surface destinée à capter et stocker les eaux de ruissellement alors que le sous-solage consiste à un remaniement plus profond (30 à 40 cm) de la couche encroûtée afin d'augmenter la porosité et la perméabilité. Ces deux types d'aménagement sont supposés efficaces en termes de lutte contre la dégradation progressive des facteurs d'infiltration conduisant à l'accentuation de ruissellement dans les champs et à l'augmentation des écoulements à l'exutoire des bassins.

Conclusion partielle

Ce chapitre décrit les caractéristiques biophysiques, démographiques et socio-économiques nécessaires à la compréhension des processus abordés. Ainsi, sur le plan géologique, la zone d'étude se situe dans le bassin sédimentaire des Iullemeden dominé en grande partie par des dépôts épais de sables détritiques. Le paysage s'organise autour des trois grands ensembles géomorphologiques à savoir les plateaux latéritiques, les glacis et les bas-fonds. La combinaison des facteurs climatique et anthropique a depuis longtemps accéléré le phénomène de dégradation des terres sur ces différentes unités géodynamiques du paysage. On assiste à une

dégradation du réseau hydrographique menaçant le fonctionnement normal de l'écosystème caractéristique de cette région. Cela a eu des répercussions sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants endoréiques du Sud-ouest nigérien. Ensuite, le chapitre nous offre la possibilité de présenter les caractéristiques biophysiques spécifiques du site d'étude et de décrire les aménagements : **banquettes** et **sous-solage** choisis pour cette étude.

Ce site représentatif du paysage de l'Ouest nigérien est constitué des deux petits bassins versants expérimentaux et aménagés. L'approche d'aménagement progressif utilisée sur ces bassins permet de suivre les évolutions concomitantes des surfaces aménagées et du coefficient d'écoulement.

Le chapitre suivant est consacré à la description du protocole de mesures mis en œuvre aux différentes échelles spatiales : ponctuelle, parcellaire (zones aménagées et témoin) et bassin versant.

Chapitre 3. Matériels et méthodes des mesures de l'humidité du sol et de l'écoulement à l'échelle du bassin versant

Parmi les méthodes directes et indirectes de mesure de teneur en eau du sol, la méthode gravimétrique, dite directe, est la plus fiable et non biaisée mais qui fait place aux méthodes indirectes non destructives du milieu dès que l'on doit procéder à des mesures sur de longues périodes. Dans ce chapitre, les méthodes de mesure de l'humidité du sol, visant à déterminer les variables telles que la teneur en eau volumique et l'évolution et les variations du stock hydrique à l'échelle ponctuelle et dans les surfaces aménagées, seront détaillées. La sonde à neutrons, étalonnée par la méthode gravimétrique, est utilisée pour déterminer ces variables suivant un protocole de mesures spatio-temporelles appliqué en fonction du type d'aménagement et de la surface témoin (non aménagée). On présente à la fin de cette partie les méthodes d'analyse des données d'humidité et les incertitudes liées aux grandeurs calculées. A l'instar de la sonde à neutrons, ce chapitre décrit aussi le protocole d'utilisation de la méthode de mesure de la conductivité électrique par induction électromagnétique (EM38) mise en œuvre dans ce travail pour évaluer l'efficacité des aménagements en termes de rétention d'eau à l'échelle parcellaire. Nous terminons ce chapitre méthodologique par la présentation du protocole de mesure de l'écoulement permettant d'évaluer l'efficacité desdits aménagements à l'échelle du bassin versant.

3.1. Dispositif de mesure de la pluie sur le site d'étude

Pour le suivi pluviométrique, les bassins versants étudiés sont équipés d'un réseau d'appareils classiques constitué de 12 pluviomètres à lecture directe (Figure 2.18) et des deux pluviographes à augets répartis sur les deux bassins versants afin de déterminer les caractéristiques (hauteur et intensité) des pluies. Les pluviomètres à lecture directe sont relevés après chaque événement pluvieux par l'équipe disponible en permanence sur le site depuis plusieurs saisons. Les pluviographes au nombre de deux (cf. Figure 2.18), eux, sont gérés par l'équipe technique de l'IRD au Niger. Ces matériels de mesure de pluie permettent de collecter les données pluviométriques.

3.2. Méthode gravimétrique : mesure par pesés

Cette partie propose, dans un premier temps, un rappel théorique sur les notions de base de l'eau et sa dynamique dans le sol. Dans un second temps, la notion de bilan hydrique (cf. annexe A1). Néanmoins, il nous paraît nécessaire, avant de décrire le principe de la méthode gravimétrique, de rappeler quelques définitions permettant de faciliter la compréhension du protocole de mesure.

3.2.1. Définitions : teneur en eau

La quantité d'eau contenue dans le sol, définie par la teneur en eau volumique (θ) ou la teneur en eau pondérale (W), est variable dans le temps et dans l'espace. C'est une grandeur physique qui peut être mesurée soit directement par le prélèvement, le pesage et le séchage à l'étuve des échantillons, soit par la mesure indirecte des caractéristiques liées à la présence de l'eau dans le sol telles que la réflexion des neutrons ou la résistivité électrique (Musy et Soutter, 1991 ; Delalande et al., 2017).

3.2.2. Principe de mesure : teneur en eau et densité apparente

La méthode gravimétrique est l'unique méthode directe mais destructive du milieu et ne permet pas des mesures en continu (Giot et Cousin, 2012). Elle consiste à prélever minutieusement des échantillons de sol non remanié à l'aide de cylindres de dimensions connues (le volume de ceux utilisés dans cette étude est de 100 cm^3) ou de sol remanié par l'aide de la tarière mais dans ce cas le volume échantillonné n'est pas connu et seule la teneur en eau pondérale sera mesurée. L'échantillon est pesé une première fois juste après son prélèvement (pendant qu'il est encore humide) et c'est dans un délai aussi bref que possible après son échantillonnage. Il est ensuite transporté au laboratoire où il doit être séché dans une étuve réglée à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 24 heures.

La comparaison de la masse humide et sèche permet d'estimer la teneur en eau pondérale W (ou gravimétrique). De plus, si le volume occupé par la masse du sol est connu (sol non remanié), on peut alors estimer la teneur en eau volumique θ . La teneur en eau pondérale W est définie comme le rapport entre la masse d'eau M_w contenue dans le sol et la masse du sol sec M_s exprimée en g.g^{-1} :

$$W \text{ (g/g)} = \frac{M_w}{M_s} = \frac{\text{Masse humide} - \text{Masse sèche}}{\text{Masse sèche}} \quad (3.1)$$

La teneur en eau volumique est définie comme le rapport du volume d'eau sur le volume de sol, et s'exprime en cm^3/cm^3 :

$$\theta \text{ (cm}^3/\text{cm}^3) = \frac{V_w}{V} \quad (3.2)$$

Il faut noter qu'il est aussi possible de passer de l'humidité pondérale à la teneur en eau volumique (θ) connaissant la masse volumique sèche du sol (ρ_b) par la formule suivante :

$$\theta = W * \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (3.3)$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau (approximativement 1 Mg. m⁻³ ou 1 x 10⁻⁶ kg.m⁻³) et ρ_b , la masse volumique apparente sèche du sol définie par :

$$\rho_b = M_s / V \quad (3.4)$$

La teneur en eau volumique varie entre une valeur minimale, appelée teneur en eau résiduelle θ_r et une valeur maximale, dite teneur en eau à saturation θ_s qui est, en principe, égale à la porosité efficace. Elle représente généralement 93 à 95 % de la porosité (Bruand et Coquet, 2005).

3.2.3. Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique

C'est une méthode directe, fiable, précise et non biaisée de mesure de l'humidité du sol mais destructive puisqu'elle nécessite un prélèvement d'échantillon de sol sur le terrain en creusant un trou. Ce qui fait qu'elle ne permet pas d'obtenir un jeu de données en temps réel. Pour cette raison, les méthodes indirectes, plus souples et permettant une analyse fréquente voire continue des mêmes sites, sont largement utilisées. Ces méthodes reposent sur la détermination d'un paramètre lié d'une manière spécifique à la teneur en eau du sol (Musy et Soutter, 1991). Pour finir, notons que la méthode gravimétrique est très ponctuelle et longue à mettre en place mais reste incontournable pour étalonner les méthodes indirectes, notamment le sondage neutronique.

3.3. Matériels et méthodes des mesures indirectes de l'humidité du sol

3.3.1. Mesure de l'humidité du sol par la sonde à neutrons (échelle ponctuelle)

La méthode de mesure neutronique repose sur l'utilisation d'un humidimètre neutronique (ou sonde à neutrons). Cet outil utilise la propriété qu'ont les neutrons rapides à être ralentis préférentiellement par les atomes d'hydrogène et donc les molécules d'eau du sol. Les mesures se font à l'aide des tubes en aluminium (à défaut des tubes en PVC) enfoncés dans le sol. Le bon contact entre le sol et le tube améliore la précision de la mesure (Cosandey, 1975).

3.3.1.1. Description et fonctionnement de la sonde à neutrons utilisée

Pour suivre l'évolution de l'humidité des parcelles, nous avons utilisé l'humidimètre à neutrons CPN 503 DR hydroprobe ® fourni par l'IRI (Institut des Radio Isotopes, Université de Niamey). C'est un outil précis et assez simple à utiliser. Les caractéristiques spécifiques de cet appareil sont disponibles sur le site web (<http://www.sols-mesures.com>). Il est constitué de deux parties : a) la sonde avec son blindage et b) le système électronique de comptage. Les mesures se font par l'intermédiaire d'une source de neutrons à haute énergie et d'un capteur de neutrons à basse énergie (Operating Manual, 1995). En effet, lors de la mesure, des neutrons (de forte énergie cinétique) sont émis dans le sol par la source radioactive constituée d'un mélange intime de poudres d'Américium 241 et de Béryllium. Le principe de fonctionnement et de mesure (Figure 3.1) est simple et consiste à introduire dans le tube l'ensemble sonde-détecteur. Les neutrons rapides se propagent et interagissent avec les particules et l'eau du sol autour de la sonde. Les neutrons ralentis suite à leur interaction avec l'eau du sol sont détectés et comptés par un détecteur à hélium 3. La mesure de l'humidité volumique revient donc à un comptage de neutrons « lents » (Bertuzzi et al., 1987). La dispersion des neutrons par des collisions est ainsi un processus très important sur lequel est fondé le principe de fonctionnement de la sonde à neutrons. Le comptage des neutrons ralentis peut être physiquement considéré comme lié linéairement à l'humidité du sol donc à la teneur en eau du sol (Vandervaere et al., 1994 ; AIEA, 2003).

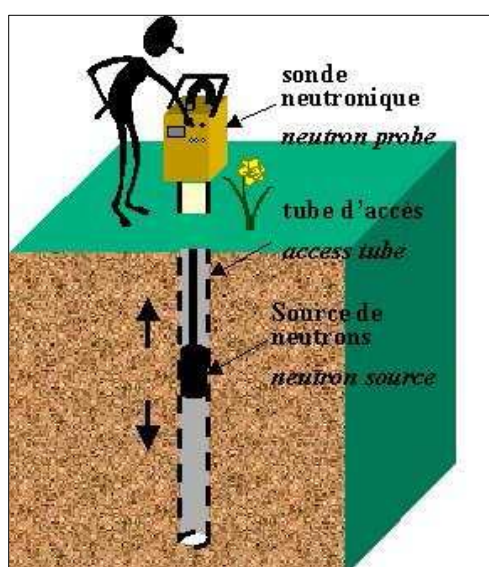


Figure 3.1. Mesure de l'humidité du sol avec la sonde à neutrons.

Source : Lesaignoux, (2010).

3.3.1.2. Sphère d'influence et principe de mesure

En introduisant la sonde dans le sol à une profondeur donnée, il se forme immédiatement un nuage d'interactions de neutrons qui définit une sphère appelée « sphère d'influence ». En principe, le volume de sol vu par la sonde à neutrons lors de la prospection correspond à sa zone d'influence. Le rayon de cette sphère d'influence varie en fonction de l'humidité du sol, de l'activité de la source, de la variabilité spatiale (stratification & homogénéité du sol) et du mode d'installation des tubes d'accès (AIEA, 2003). Ceci constitue le principal problème tant pour l'étalonnage de la sonde que pour les mesures d'humidité (Camus, 1974 ; Bertuzzi et al., 1987). En effet, pour chaque mesure d'humidité obtenue, la sonde échantillonne des volumes différents de sol d'où l'importance de connaître le diamètre de la sphère d'influence en fonction de la teneur en eau afin, notamment, de choisir une profondeur suffisamment importante pour éviter la fuite de neutrons vers l'atmosphère (AIEA, 2003). La taille de la sphère d'influence conditionne aussi l'espacement entre les mesures le long du tube. Ainsi, Mermoud (2006) rapporte que la sphère d'influence de la sonde à neutrons est estimée à environ 15 cm si le sol est humide et à plus de 50 cm pour le sol sec. Cependant, selon Delalande et al. (2017), le rayon d'influence de la sonde à neutrons est de ~20 cm. Ce volume de mesure est grand par rapport à d'autres mesures indirectes (TDR, sondes capacitives), ce qui constitue un avantage en situation de mesure in situ.

Le protocole de mesure consiste à descendre l'ensemble source-détecteur dans le tube à diverses profondeurs. Dans la pratique, un espacement de 10 à 30 cm est fréquemment choisi.

3.3.1.3. Contraintes liées à l'utilisation de la sonde à neutrons

La méthode neutronique présente des contraintes. Outre le coût élevé de l'appareil et le besoin d'étalonnage pour chaque type de sol, la réglementation draconienne sur les substances radioactives limite son utilisation en raison de certaines précautions et mesures de sécurité. On trouve à ce sujet des informations plus détaillées dans des ouvrages spécialisés, notamment AIEA (2003).

3.3.2. Protocole de mesures d'humidité dans les surfaces aménagées

Les mesures d'humidité sont faites suivant un pas de temps journalier sur les surfaces aménagées et sur le témoin. Ceci permet toujours de connaître l'état initial d'une pluie. A cette échelle, les mesures visent principalement à évaluer et comparer l'efficacité des banquettes et du sous-solage sur la gestion des eaux et des sols ; déterminer leur pertinence sur l'amélioration

des conditions hydriques des sols encroûtés. Le protocole mis en place se structure à l'échelle des parcelles traitées et du témoin. Plusieurs tubes d'accès neutronique assurant le suivi de l'évolution des profils hydriques y sont installés.

3.3.2.1. Présentations des sites aménagés et du témoin

L'étude a été réalisée sur les deux types de surfaces aménagées, **banquettes et sous-solage**. On dispose de deux parcelles de sous-solage (notées SL1 et SL2) qui sont situées sur la zone contributive (plateau) du sous bassin TK amont Sud (cf. Figure 2.19 plus haut).

Sur le sous bassin TK amont Nord, trois banquettes ont été choisies pour l'expérimentation. Le Tableau 3.1 présente les dimensions des banquettes étudiées. Elles sont également situées sur la partie amont dudit bassin constituée essentiellement du plateau latéritique. Le choix des banquettes à suivre expérimentalement s'est basé sur leur capacité de rétention d'eau moyenne, intermédiaire et élevée. Ce critère de choix des banquettes est très dépendant de leur position topographique par rapport aux banquettes situées en amont et en aval mais aussi au sens de la pente générale de la bande nue. L'amont de chaque banquette est constitué de sol nu encroûté non remanié jouant le rôle de l'impluvium sur plus d'une dizaine de mètre. Ces banquettes, au nombre de trois, comportent chacune trois tubes d'humidité. Le même dispositif est, par ailleurs, utilisé sur une surface témoin (non aménagée) afin de faire ressortir la plus-value qu'apporte l'aménagement (banquette ou sous-solage) par rapport à l'état d'origine.

Tableau 3.1. Caractéristiques des trois banquettes expérimentales suivies

Dimensions	L (m)	$\ell.a$ (m)	ℓf (cm)	ρf (cm)	hb (cm)
Banquette 1	23	6	50	30	40
Banquette 2	28	7	50	30	50
Banquette 3	25	8	50	30	50

L : longueur, $\ell.a$ = longueur des ailles, ℓf : largeur du fossé,

ρf : profondeur du fossé, hb : hauteur du bourrelet

3.3.2.2. Campagnes de mesures

Les mesures d'humidité du sol ont été réalisées pendant deux campagnes sur le site de Tondi Kiboro. Il s'agit des saisons 2016 et 2017. Pour chaque campagne, les données d'humidité ont été collectées du 15 Juin au 15 Septembre par une équipe basée en permanence sur le site d'étude. Ceci constitue une forte contrainte mais c'est un élément essentiel afin de disposer de données sans lacunes.

3.3.2.3. Tubes d'humidité et leur installation

Faute de tubes en aluminium disponibles, nous avons utilisé des tubes d'humidité en PVC ayant un diamètre (Φ) de 50 mm. Au début de la première campagne (Mai 2016), 22 tubes au total ont été implantés sur les surfaces aménagées et le témoin. Ils descendent jusqu'à une profondeur de travail de 200 cm permettant des mesures jusqu'à 190 cm. Une tarière motorisée de diamètre égal ou légèrement supérieur à celui des tubes a été utilisée comme l'illustre la Figure 3.2. L'installation a nécessité un temps de travail assez long de 1 à 2 heures par tube. Les perturbations du sol en surface ont été évitées autant que possible lors de l'installation des tubes. Chaque tube est étanche à sa base afin d'éviter toute entrée d'eau. Un bon contact entre la terre et le tube, permet d'améliorer la précision de la mesure et éviter la formation de poches d'eau ou d'air. La hauteur de la partie aérienne au-dessus de la surface du sol est de 30 cm, identique pour tous les tubes sauf les tubes installés dans les fossés des banquettes ayant une hauteur d'environ 50 cm afin d'éviter l'entrée d'eau retenue par les banquettes pendant la pluie. Celle-ci permet de positionner la sonde sur le tube lors des mesures. L'extrémité supérieure de chaque tube est hermétiquement fermée avec un bouchon amovible afin d'éviter l'entrée d'eau. La mise en place des tubes est très délicate dans un milieu constitué de plateau latéritique à cuirasse indurée et caillouteuse.



Figure 3.2. Installation des tubes d'humidité à l'aide d'une tarière motorisée.

3.3.2.4. Répartition des tubes d'humidité selon les sites aménagés

Le dispositif à partir duquel nous collectons les données de l'humidité est composé de plusieurs tubes neutroniques répartis entre les parcelles de sous-solage, des banquettes et la parcelle témoin. La Figure 3.3 illustre le protocole de mesure de l'humidité du sol appliqué sur les

surfaces aménagées en sous-solage et sur un témoin. Avant la réalisation des ouvrages antiérosifs, toutes les parcelles sont constituées de sol nu ayant un fonctionnement hydrique limité à cause de l'encroûtement (Peugeot, 1995 ; Vandervaere, 1995). Le Tableau 3.2 présente les parcelles de suivi, les tubes d'accès neutronique et l'année de leur mise en service.

Tableau 3.2. Récapitulatif du dispositif de mesure de l'humidité et caractéristiques des sites.

Sites	Unité morphologique	Nombre de tubes	Noms des tubes	Mise en service
Sous-solage 1 (SL1)	Sol nu de plateau	5	T1, T2, T3, T4 et T5	2016
Sous-solage 2 (SL2)	Sol nu de plateau	5	T1, T2, T3, T4 et T5	2016
Banquette 1 (B1)	Sol nu de plateau	3	T1, T2 et T3	2016
Banquette 2 (B2)	Sol nu de plateau	3	T1, T2 et T3	2016
Banquette 3 (B3)	Sol nu de plateau	3	T1, T2 et T3	2016
Sol nu (témoin)	Sol nu de plateau	3	T1, T2 et T3	2016

Le dispositif de suivi d'humidité est composé de 22 tubes répartis entre les parcelles citées plus haut, de manière à suivre l'évolution spatialisée des profils hydriques à l'échelle saisonnière. Il permet de quantifier l'apport de chaque événement pluvieux en termes de stock d'eau dans le sol.

Au niveau des surfaces de sous-solage, le suivi de l'humidité s'est effectué dans deux parcelles, SL1 et SL2, chacune équipée de 5 tubes d'accès neutronique dont trois numérotés T2, T3 et T4 sont installés dans la partie sous-solée alors que les tubes T1 et T5 sont à l'extérieur de la zone remaniée à une distance d'environ 1m en amont et en aval respectivement.

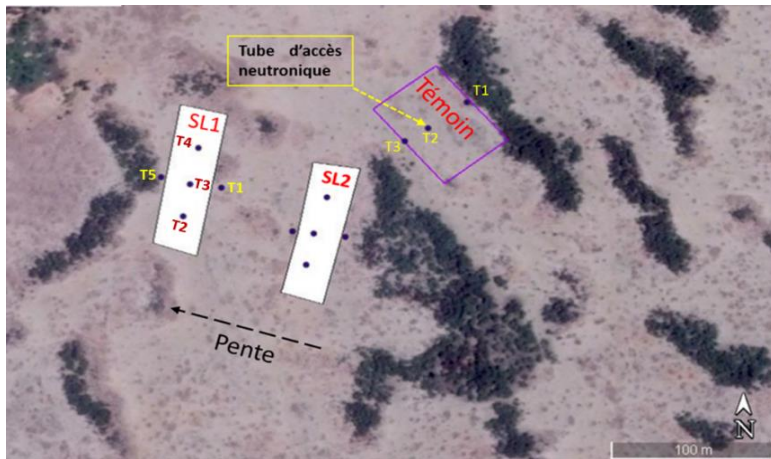


Figure 3.3. Emplacement des tubes de suivi de l'humidité du sol pour les parcelles de sous-solage et le témoin (en violet). La même numérotation des tubes a été respectée pour la SL2.



Figure 3.4. Emplacement des tubes de suivi de l'humidité du sol pour une banquette. La numérotation des tubes d'humidité est identique pour les trois banquettes suivies.

Pour les banquettes, les tubes se répartissent suivant un transect de l'amont vers l'aval. La nomenclature se structure comme suit : le tube T1 est installé en amont (dans l'impluvium), le tube T2 dans le fossé et le tube T3 est placé à environ un mètre en aval du bourrelet de la banquette (Figure 3.4). Au total, trois banquettes représentatives ont fait l'objet de suivi de l'humidité.

La parcelle témoin, pour sa part, est équipée de trois tubes dont le tube T1 en amont, le tube T2 au centre et le tube T3 sur la partie aval de celle-ci suivant le sens de ruissellement.

3.3.2.5. Suivi temporel de l'humidité du sol

La méthode utilisée pour le suivi temporel du comportement hydrique des parcelles a consisté à effectuer des mesures quotidiennes de l'humidité par sondage neutronique (Figure 3.5). Le

temps de comptage choisi, $t_c \approx 16$ secondes, a permis de réaliser l'ensemble des mesures en un temps acceptable. Dans les banquettes, les mesures se font après la disparition des flaques d'eau retenues par celles-ci. Un réflecteur⁴ a été utilisé lors de chaque mesure. Celui-ci permet d'améliorer l'efficacité des mesures effectuées près de la surface (à 10 cm de profondeur plus précisément) en limitant la perte des neutrons vers l'atmosphère. Les mesures sont faites selon un espacement de 10 cm jusqu'à la profondeur 130 cm puis 20 cm jusqu'à la profondeur 190 cm.



Figure 3.5. Sonde à neutrons et réflecteur en cours d'utilisation sur une parcelle de sous-solage (à gauche) et dans une banquette (à droite).

Lors des mesures d'humidité, les tubes sont essuyés à l'aide d'un chiffon attaché au bout d'un bâton que l'on fait descendre dans le tube afin de le sécher avant d'effectuer la mesure. En outre, pour chaque journée, on vérifie la stabilité instrumentale de la sonde en effectuant un comptage standard dans un tube fermé à la base et plongé à l'intérieur d'un fût plein d'eau. Ce comptage standard reste pratiquement constant dans le temps pour une très large majorité des mesures.

3.3.2.6. Prélèvement des échantillons de sol (non remanié)

La méthode gravimétrique a été utilisée afin d'étalonner la sonde utilisée *in situ*. Elle a consisté aux prélèvements nombreux d'un volume de sol avec un cylindre métallique (de 100 cm³ de volume) dans les parcelles de sous-solage, les banquettes et la parcelle témoin en fonction de l'évolution et de l'état d'humidité du sol. L'échantillonnage s'est déroulé en même temps que les comptages neutroniques à chaque 10 cm de profondeur. Cette méthode, pour être valable, nécessite de disposer des échantillons couvrant une gamme de teneur en eau θ bien contrastée.

⁴ C'est un bloc de paraffine (ou de polyéthylène) en forme de disque épais percé d'un orifice central. Il est placé sur le sol en introduisant le tube d'accès dans l'orifice central.

De ce fait, on a réalisé des mesures en situations très contrastées, lorsque le sol est très sec puis pendant que le sol est très humide et également des mesures intermédiaires. Pour cette raison, les mois de mai à août 2017 ont été choisis comme période idéale d'échantillonnage. En effet, les échantillons prélevés entre mai et juin correspondent aux valeurs de l'humidité à l'état sec du sol et ceux d'août permettent d'obtenir la situation où le sol est beaucoup plus humide. Enfin, les mesures effectuées en juillet correspondent à des valeurs intermédiaires de l'humidité. Ces mesures de cylindre du sol sont à chaque fois centrées verticalement sur la tranche de sol à laquelle on effectue le comptage neutronique. Le trou de prélèvement des cylindres du sol change d'un point d'étalonnage à un autre. La distance séparant les points d'étalonnage du tube d'accès est d'environ un mètre pour éviter de perturber la zone d'influence de la sonde.

Les échantillons sont directement pesés sur le terrain à l'aide d'une balance de précision scout-pro (précision = 0,1g) alimentée par batterie avant d'être transportés au laboratoire où ils devront être séchés à l'étuve réglée à 105° pendant 48 heures puis repesés à sec. Le pesage aussitôt que possible des échantillons permet d'éviter des possibles pertes d'eau par évaporation sur le terrain. Ils sont ensuite mis dans des boîtes hermétiques pour faciliter le transport. Le dépouillement des données gravimétriques permet d'obtenir pour chaque profondeur, par régression linéaire, un étalonnage permettant de transformer les comptages relatifs en teneur en eau volumique (θ) du sol.

3.3.3. Méthodes d'analyse des données de l'humidité du sol

Nous présenterons dans cette partie les méthodes d'analyse des données d'humidité du sol obtenues par sondage neutronique qui seront ensuite utilisées et interprétées dans la partie présentation des résultats. Elles concernent la teneur en eau et l'évolution temporelle du front d'infiltration et du stock hydrique dans les zones aménagées et non aménagées ainsi que l'estimation des incertitudes liées aux grandeurs mesurées.

3.3.3.1. Analyse des données gravimétriques

Des prélèvements sur chaque site et à chaque profondeur ont permis de déterminer l'humidité pondérale et volumique du sol (§ 3.2.2). La densité apparente nécessaire au calcul de teneur en eau volumique θ a été aussi mesurée par cette méthode gravimétrique. Par ailleurs, pour minimiser les artefacts de mesure liés au prélèvement des cylindres, les mesures ont été effectuées pendant la saison de pluie lorsque les sols sont humides. En effet, après une pluie donnée, les conditions d'échantillonnage gravimétrique sont plus favorables car le cylindre peut

être enfoncé facilement dans le sol malgré quelques obstacles dus à la présence des graviers dans le sol. La teneur en eau a été mesurée de façon continue durant deux saisons (2016 et 2017) et la fréquence des mesures est quotidienne. Les profils de teneur en eau sont ainsi obtenus avant et après chaque pluie durant toute la saison.

3.3.3.2. Analyse granulométrique laser

Une analyse granulométrique a été effectuée sur des échantillons prélevés lors de l'installation des tubes. L'outil utilisé est un granulomètre à diffraction laser MALVERN (MASTERZIZER 2000). Lors du traitement, les résultats sont enregistrés sur support informatique, ce qui diminue le temps de traitement en saisissant les données manuellement. Les échantillons prélevés à l'aide de cylindres lors de l'étalonnage de la sonde à neutrons ont été aussi utilisés afin de compléter cette analyse du sol. La granulométrie permet de déterminer la texture du sol en séparant les fractions des différentes particules.

3.3.3.3. Etalonnage de la sonde à neutrons

Précédemment évoqué, la méthode neutronique a consisté à mesurer, pendant une durée t_c donnée appelée temps de comptage, le nombre des neutrons émis par la source de neutrons et qui sont ralentis par l'eau présente dans le sol. Sans trop rentrer dans le détail théorique, on rappelle simplement que le comptage enregistré est, en première approximation, proportionnel à la teneur en eau du sol sur lequel sont installés les tubes (Royer et Vachaud, 1974).

Le comptage N est rapporté à un comptage standard N_s effectué dans un tonneau d'eau, de manière à définir un ratio de comptage dit aussi comptage réduit (CR). L'étalonnage consiste à établir une relation linéaire entre le comptage réduit (CR) et la teneur eau volumique (θ) obtenue par la méthode gravimétrique décrite au § 3.2. Ces deux variables sont mises en relation. On obtient ainsi une relation linéaire de type :

$$\theta = a \times CR + b \quad (3.5)$$

avec $CR = \frac{N}{N_s}$; N = comptage réduit et N_s = comptage dans un milieu absorbant.

Cette relation entre θ et CR résulte d'un étalonnage à partir des échantillons de sol prélevés au plus près du tube de mesure (zone prospectée par la sonde). Ces échantillons sont ainsi prélevés aux mêmes profondeurs que celles auxquelles les comptages sont réalisés, tous les 10 cm, simultanément avec les comptages neutroniques dans différentes conditions d'humidité du sol atteintes naturellement. Ces mesures ont été répétées sur plusieurs tubes en même temps. Ceci permet d'obtenir des échantillons couvrant une gamme de teneur en eau bien contrastée.

Cependant, certains auteurs rapportent qu'en matière d'étalonnage de la sonde, l'échantillonnage est le principal problème (Camus, 1974). Théoriquement, le même volume de sol devrait être exposé à la sonde et servir de mesure gravimétrique, ce qui n'est pas le cas dans la mesure où ce volume vu par la sonde n'est pas bien défini (sphère variable en fonction de l'état d'humidité du sol) et du fait qu'il est largement supérieur à celui des échantillons de sol prélevés (AIEA, 2003). Il est donc préférable de prélever autour du tube suffisamment d'échantillons pour chaque profondeur afin d'obtenir une valeur moyenne plus représentative de la zone explorée. On peut néanmoins remarquer que le fait de procéder par ajustement linéaire permet d'obtenir une estimation de teneur en eau sans biais (Vandervaere et al., 1994) puisque les échantillons ne donnent ni une sous-estimation ni une sur-estimation systématique.

3.3.3.4. Analyse des profils d'humidité

On appelle *profil hydrique*, la courbe donnant la répartition de la teneur en eau sur une verticale en fonction de la profondeur (Royer et Vachaud, 1974).

Si le profil d'humidité présente la teneur en eau volumique, la surface comprise entre deux profils représente la différence de volume d'eau par unité de surface (ou lame d'eau) contenu dans le sol. Et si cette différence est due à une pluie, ce volume correspond au volume infiltré (Lagacé, 2016).

3.3.3.5. Calculs de stock et de la variation de stock hydrique

Définitions :

Le **stock hydrique** se définit comme étant l'épaisseur de la lame d'eau stockée entre deux profondeurs données. Il représente donc la quantité d'eau par unité de surface contenue dans un horizon de sol entre deux profondeurs à un instant t donné. Autrement dit, le stock en eau du sol constitue la partie d'eau infiltrée et/ou retenue dans le sol durant et après le processus de redistribution. La variation du stock d'eau, quant à elle, représente un inventaire du stock durant une période donnée et le long d'un profil de sol donné (Alaoui, 2007).

Le **stock hydrique** peut être facilement et directement comparé aux pluies si on l'exprime en mm. Il fluctue dans le temps à cause des apports d'eau de pluie, des pertes par évapotranspiration et de drainage par infiltration profonde. Le stock S est calculé par l'intégrale de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur, soit :

$$S = \int_{z_1}^{z_2} \theta(z) dz \quad (3.6)$$

Où z_1 et z_2 sont des cotes qui limitent la couche de sol considérée. La fonction continue $\theta(z)$ n'est en général pas connue (Peugeot, 1995). Dans le cadre de cette étude, le stock a été calculé par la relation suivante :

$$S = \sum_{i=1}^n \theta \Delta z \quad (3.7)$$

Où n est le nombre de mesures entre z_1 et z_2 .

La **variation de stock** ΔS dans la couche de sol z_1-z_2 entre deux dates de mesures t_1 et t_2 est définie par la différence :

$$\Delta S = S_{z_1-z_2}(t_2) - S_{z_1-z_2}(t_1) \quad (3.8)$$

3.3.3.6. Détermination du front d'infiltration

Le **front d'infiltration** correspond à la profondeur maximale à laquelle on observe une variation de teneur en eau volumique entre deux dates de mesure d'humidité successives sur un même tube donné (Peugeot, 1995). Sa détermination dépend néanmoins de la tolérance qu'on donne à la notion de variation, celle-ci diminuant en général avec la profondeur.

3.3.4. Analyse des incertitudes liées aux mesures

Toute mesure expérimentale est affectée d'une incertitude, surtout en sciences du sol où l'on utilise beaucoup les méthodes indirectes. Les comptages relatifs sont transformés en teneurs en eau θ par l'intermédiaire des droites d'étalonnage obtenues par la méthode présentée au paragraphe 3.3.3.3. Néanmoins, durant cette procédure d'étalonnage, on introduit des erreurs liées principalement à la régression linéaire voire même au temps de comptage. Ce dernier type d'erreurs peut être minimisé en utilisant un intervalle de temps de comptage important. Les erreurs introduites par la relation d'étalonnage sont dites **erreur d'étalonnage**. Ainsi, les valeurs mesurées de la teneur en eau (c'est-à-dire les valeurs prédites à partir de l'étalonnage) et du stock et de ses variations sont de ce fait entachées d'erreurs qu'il faut nécessairement calculer.

3.3.4.1. Erreur sur l'étalonnage

Etant donné que les variables θ et CR sont liées, la teneur en eau volumique du sol θ mesurée par la sonde à neutrons peut être exprimée par la relation linéaire de la forme (Vandervaere et al., 1994) :

$$\theta = a \cdot n + b + e \quad (3.9)$$

où a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire, n est le comptage réduit ($n = \frac{N}{Ns}$) et e est une variable aléatoire ayant une distribution normale centrée (i.e. d'espérance nulle) de variance estimée $s^2(e)$ représentant l'erreur inconnue ou résidu.

Bertuzzi et al. (1987) et Vandervaere et al. (1994) ont proposé une méthode permettant de déterminer de façon rigoureuse les estimateurs non biaisés des différents paramètres d'étalonnage de la sonde obtenus par régression linéaire en présence d'erreurs de mesure. Nous utilisons ici celle proposée par les derniers auteurs afin d'estimer les différents types d'incertitudes liées aux mesures. Pour cela, on a utilisé des équations statistiques résumées dans Tableau 3.3 pour déterminer les estimateurs des paramètres de la régression linéaire utilisés dans le calcul des erreurs d'étalonnage.

Tableau 3.3. Expressions des estimateurs « non biaisés » de la régression linéaire.

Estimateurs non biaisés	(cas : $\hat{\theta}_i = \theta_i + u_i$ et $\hat{n}_i = n_i + v_i$ (3.10) avec $v(u)$ et $v(v)$ supposés connus)
Pente	$\hat{a} = s(\hat{n}, \hat{\theta}) / s^2(\hat{n})$ (3.11)
Intercept	$\hat{b} = \bar{\hat{\theta}} - \hat{a} \cdot \bar{\hat{n}}$ (3.12)
Variance résiduelle	$s^2(e) = \frac{m-1}{m-2} \times [s^2(\hat{\theta}) - \hat{a} \times s(\hat{n}, \hat{\theta})]$ (3.13)
Variance de la pente	$s^2(\hat{a}) = \frac{s^2(e)}{(m-1)/s^2(\hat{n})}$ (3.14)
Variance de l'intercept	$s^2(\hat{b}) = s^2(\hat{a}) \cdot \bar{\hat{n}}^2$ (3.15)
Covariance pente-intercept	$s(\hat{a}, \hat{b}) = -s^2(\hat{a}) \cdot \bar{\hat{n}}$ (3.16)

Où $\hat{\theta}$ et \hat{n} dénotent respectivement les valeurs estimées de θ et n, m est le nombre des couples $(\hat{n}, \hat{\theta})$ utilisés pour la corrélation, $\bar{\hat{n}}$ et $\bar{\hat{\theta}}$ sont les moyennes arithmétiques des valeurs de \hat{n} et $\hat{\theta}$. $s(\hat{n})$, $s(\hat{\theta})$, $s(\hat{n}, \hat{\theta})$ sont des estimateurs des variances et de covariance de \hat{n} et $\hat{\theta}$.

3.3.4.2. Incertitudes sur les mesures de teneur en eau

Le calcul de l'erreur associée aux mesures de teneur en eau du sol obtenues par la méthode neutronique a été décrit par Vandervaere et al. (1994). On se limite ici à présenter quelques principes généraux de la méthode utilisée et les résultats obtenus avec l'humidimètre neutronique utilisé sur notre site. L'erreur sur la valeur de teneur en eau s'exprime comme la somme de l'erreur liée à l'appareil et de l'erreur liée à l'étalonnage de la sonde à neutrons.

L'incertitude sur la teneur en eau volumique s'exprime en variance par la formule suivante (Vandervaere et al., 1994) :

$$s_c^2(\hat{\theta}) = s^2(\hat{\theta}) + \hat{n}^2 \cdot s^2(\hat{b}) + 2\hat{n} \cdot s(\hat{a}, \hat{b}) + s^2(e) \quad (3.17)$$

L'incertitude en $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ sur la teneur en eau volumique $s(\theta)$ est ensuite simplement exprimée par l'écart-type :

$$s(\theta) = \sqrt{s_c^2(\hat{\theta})} \quad (3.18)$$

3.3.4.3. Incertitudes sur l'estimation du stock hydrique

Si $\theta(z)$ est la fonction représentative de l'évolution de la teneur en eau du sol, le stock S est calculé par l'intégrale du profil de teneur en eau $\theta(z)$ sur la profondeur considérée. Généralement, le stock est obtenu par l'équation 3.6 (§3.3.3.5). L'incertitude sur la valeur du stock $\sigma^2(\hat{S})$ est composée d'une erreur $\sigma_1^2(\hat{S})$ liée aux mesures de teneur en eau et d'une erreur d'intégration $\sigma_2^2(\hat{S})$ liée à la procédure d'intégration utilisée. La variance totale sur le stock est estimée par (Vandervaere et al., 1994) :

$$S_2^1 s^2(\hat{S}) = s_{\theta}^2(\hat{S}) + s_{int}^2(\hat{S}) \quad (3.19)$$

Les valeurs de teneur en eau issues d'une même courbe d'étalonnage ne sont pas indépendantes, et il est nécessaire de tenir compte de cette dépendance dans le calcul d'erreur d'étalonnage (Amogu et al., 2015). Le second terme est obtenu par des considérations analytiques, dans l'hypothèse d'une approximation de l'intégrale par la méthode des trapèzes. En effet, pour évaluer le stock d'eau dans une tranche de sol (z_i, z_{i+1}) d'épaisseur Δz , on est ensuite amené à calculer la surface d'un trapèze.

Dans notre cas, quatre droites d'étalonnage ont été utilisées et les équations établies par Vandervaere et al. (1994) ont été utilisées pour estimer l'incertitude sur le stock.

En considérant l'intervalle de confiance IC à 80 % (loi normale de Gauss), les valeurs limites droite et gauche ont donc été obtenues pour la valeur de stock déterminée entre 0-200 cm de profondeur. Mais le stock estimé entre 0-135 cm sera utilisé.

3.3.4.4. Incertitudes sur la détermination de la variation de stock d'eau

La variation de stock en eau du sol (Δs) a été définie au paragraphe 3.3.3.5. L'erreur sur la variation de stock est la somme de trois termes : une erreur instrumentale, une erreur sur

l'étalonnage de l'humidimètre, et une erreur sur l'intégration. Les relations permettant de déterminer ces trois termes sont décrites par Vandervaere et al. (1994) et sont analogues à celles utilisées dans le calcul de l'erreur sur θ et S (Peugeot, 1995). Finalement, l'incertitude sur la variation de stock peut s'exprimer comme suit :

$$s^2(\widehat{\Delta\theta}) = s_1^2(\widehat{\Delta\theta}) + s_c^2(\widehat{\Delta\theta}) \quad (3.20)$$

Il est important de noter que l'incertitude sur les ordonnées à l'origine (intercepts) des droites d'étalonnage disparaît lorsque l'on estime les variations de stock.

3.3.5. Atouts et faiblesses

La sonde à neutrons est une méthode particulièrement adaptée aux études à l'échelle locale. La technique a l'avantage de permettre des mesures rapides et répétées sur un site avec une bonne précision mais sont ponctuelles et coûteuses à mettre en place. C'est une méthode de mesure indirecte, non destructive, de la teneur en eau volumique. Elle présente, en outre, les avantages d'être assez facile à étalonner et que cet étalonnage soit linéaire mais qui nécessite sur un terrain hétérogène un grand nombre d'échantillon, ce qui peut la rendre coûteuse en temps au démarrage.

Enfin, le caractère local de la sonde à neutrons permet la prise en compte et l'évaluation de la variabilité spatiale de la teneur en eau mais, le nombre de valeurs étant limité, il est intéressant de compléter les mesures par des méthodes géophysiques plus exhaustives en termes de couverture spatiale, permettant de généraliser et spatialiser les mesures sur des grandes surfaces et à temps réel.

3.4. Protocole de mesures et méthodes d'analyse de la CEa (échelle parcellaire)

Sans reprendre les théories dont une synthèse succincte est donnée en annexe B, cette partie du chapitre décrit le protocole d'utilisation de l'EM38 sur le terrain. Après avoir rappelé les définitions utiles et la description des parcelles expérimentales, les mesures par EM38 utilisé sont introduites en rappelant les principes de mesure, les caractéristiques de l'appareil, les différentes étapes de calibration et les avantages et limites de la méthode. Sont décrits ensuite dans cette partie le protocole des mesures, les différentes observations réalisées, l'approche adoptée afin d'étalonner l'EM38. En effet, l'étude de la dynamique spatio-temporelle du contenu en eau du sol reste primordiale pour se prononcer de manière quantitative sur l'efficacité des types d'aménagement étudiés. Dans ce contexte, l'utilisation de la conductivité électrique apparente permettra, pour ce cas précis, d'estimer la capacité de stockage d'eau des

sols aménagés sur une échelle relativement peu large (celle de la parcelle), mais intégrant déjà un certain niveau de variabilité spatiale.

Il existe par ailleurs de nombreuses méthodes indirectes pour déterminer l'humidité du sol (cf. annexe A2 pour les généralités et le domaine d'application).

- La conductivité électrique, mesure indirecte de la teneur en eau

La **résistivité électrique** ρ (exprimée en ohm.m), paramètre familier des géophysiciens, est la propriété physique qui détermine la capacité d'un milieu, par exemple un sol ou une roche, à s'opposer au passage du courant électrique. C'est donc une grandeur physique étroitement liée aux caractéristiques intrinsèques du milieu. Expérimentalement, si on considère un échantillon cylindrique de sol ou de roche de longueur L (m) et de section S (m²), disposé entre deux plaques conductrices reliées à un générateur délivrant un courant électrique d'intensité I (A) et de différence de potentiel ΔV (V), la résistivité électrique ρ de l'échantillon ($\Omega.m$) vaut :

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \quad (3.21)$$

$$\text{Avec } R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.22)$$

La **résistivité électrique apparente** est considérée comme étant la moyenne des résistivités vraies des différents terrains constituant l'intérieur d'un volume de sol affecté par la distribution du courant électrique (Chouteau et Giroux, 2006).

- Définition : conductivité électrique

L'inverse de la résistivité électrique est la **conductivité électrique** σ qui s'exprime en Siemens/mètre.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.23)$$

Cette dernière décrit l'aptitude d'une roche ou d'un sol à conduire un courant électrique.

La **conductivité électrique apparente** σ_a d'un échantillon de sol peut être définie, pour un milieu hétérogène et multiphasique, comme la conductivité d'un échantillon homogène et à une seule phase d'un matériau qui lui est équivalent (Schneider, 2010). Théoriquement le courant peut être conduit par chacune des trois phases (solide, liquide et gazeuse) du sol. Cependant, la phase gazeuse (air dans les pores du sol) étant un très bon isolant, la conductivité électrique dans le sol est donc due aux trois phénomènes suivants (Telford et al., 1990) :

- ✓ la conduction électrolytique générée par le déplacement des ions contenus dans les liquides de la matrice rocheuse ;
- ✓ la conduction électronique ou métallique induite par le déplacement des électrons au sein des corps métalliques contenus dans le sous-sol ;
- ✓ la conduction surfacique due à l'existence d'une double couche électrique à la surface de séparation entre les grains et l'électrolyte contenu dans la substance.

La conductivité électrique dépend de nombreux facteurs pouvant être classés entre : i) les variables intrinsèques pérennes (texture, structure, porosité, teneur en argile, pierrosité, carbonatation du sol, profondeur et type du substrat géologique) et ii) les variables pédologiques dynamiques comme la teneur en eau, la température et la concentration de la solution du sol (McNeil, 1980 ; Michot et al., 2003). Ces dernières sont considérées comme étant les seules variables susceptibles d'évoluer dans le temps et dans l'espace, et donc d'influencer la mesure de la conductivité électrique (Besson et al., 2007). Un résumé de ces paramètres et leur influence sur la conduction électrique est présenté en Annexe A3. Les méthodes de mesure de la conductivité électrique sont aussi rappelées en Annexe A4.

3.4.1. Présentation des parcelles de prospection EM38

Le site expérimental soumis à nos observations et mesures est constitué des deux types de surfaces aménagées (sous-solage et banquettes) et d'une surface témoin. Ces techniques d'aménagement se distinguent en effet par leur structure différente l'une de l'autre. Pour rappel, le sous-solage est une technique consistant à remanier en profondeur le sol alors que la banquette est un ouvrage antiérosif destiné à intercepter et stocker les eaux du ruissellement.

Chaque type d'aménagement est composé d'un certain nombre des parcelles dans lesquelles s'effectue le suivi de la conductivité électrique. Le Tableau 3.4 présente les différentes parcelles de mesure et leurs dimensions respectives. Les parcelles de sous-solage, SL1 et SL2, de taille différente, ont respectivement 4000 et 3600 m² de superficie alors que pour les banquettes (B1, B2 et B3), la superficie varie de 260 à 448 m². Le témoin a une superficie de 3500 m². Le suivi s'est déroulé, dans ces parcelles respectives, le long de chaque saison pluvieuse pour déterminer l'évolution intra-saisonnière de la conductivité électrique apparente (CEa). Pendant la première saison (2016), on suivait plus des banquettes, ce qui nous a conduit à sélectionner trois seulement afin d'effectuer un suivi quotidien sur échantillon représentatif. Notons particulièrement que les parcelles du sous-solage prospectées par EM38 sont constituées des deux types des sols : les sols remaniés (c'est-à-dire sous-solés à proprement parler) et les sols

alentour (non remaniés) des parcelles. Ce dernier type a également fait l'objet de prospection EM38 afin d'analyser l'impact du sous-solage sur l'infiltration en amont et en aval de l'aire travaillée.

Tableau 3.4. Caractéristiques (dimensions et superficies) des parcelles des mesures de la conductivité électrique apparente.

Parcelles expérimentales	Largeur (m)	Longueur (m)	Superficie (m²)
Sous-solage 1 (SL1)	40	100	4000
Sous-solage 2 (SL2)	40	90	3600
Banquette 1 (B1)	10	26	260
Banquette 2 (B2)	12	32	384
Banquette 3 (B3)	16	28	448
Témoin (T)	50	70	3500

3.4.2. Méthode d'acquisition des données de la conductivité électrique

Une description de l'instrument de mesure (EM38) et de la méthode d'acquisition et de traitement des données de la conductivité électrique est donnée dans ce sous point du chapitre.

3.4.2.1. Dispositif et principe de mesure de la conductivité électrique

3.4.2.1.1. Principe de mesure

La mesure de la conductivité électromagnétique, principale méthode géophysique utilisée dans cette thèse, s'effectue à l'aide d'un conductivimètre EM38 équipé des deux bobines (émettrice et réceptrice). Le principe de mesure est décrit dans plusieurs travaux (Job et al., 1995 ; Rey, 2005 ; Chouteau et Giroux, 2008 ; Guerrero, 2014). Les prospections EM utilisent généralement un transmetteur (bobine réceptrice) pour générer un champ électromagnétique dit champ primaire (HP) qui se propage à la fois dans le sol et dans l'air. Dans le sol, les ondes électromagnétiques sont légèrement modifiées vis-à-vis de celles parcourant l'air (Guerrero, 2014). S'il y a présence dans le sol d'un corps conducteur, la composante magnétique du champ primaire induit des courants de Foucault (ou alternatifs) dans celui-ci. L'interaction entre les courants alternatifs induits et les matériaux conducteurs crée à son tour un champ magnétique

dit secondaire (HS) (dont l'intensité dépend de la conductivité du sol) détecté par une boucle réceptrice. Cette dernière détecte également le champ primaire dans l'air, la réponse globale de la boucle réceptrice est donc la somme de l'effet du champ primaire et du champ secondaire (Figure 3.6). L'amplitude et la phase du champ secondaire sont différentes de celles du champ primaire en raison de la variation des propriétés du sol, et ce degré de différence permet de déduire des informations sur la taille, la géométrie et les propriétés (teneur en eau, salinité,...) de tout élément conducteur du sous-sol (Reynolds, 2011). La fréquence du courant, la distance séparant les bobines et leurs orientations définissent la profondeur atteinte et la sensibilité de l'appareil (Bisone et al., 2017).

Le rapport entre le champ magnétique secondaire mesuré et le champ primaire émis est proportionnel à la conductivité électrique apparente du sol et donne accès à son inverse la résistivité électrique (McNeil, 1980).

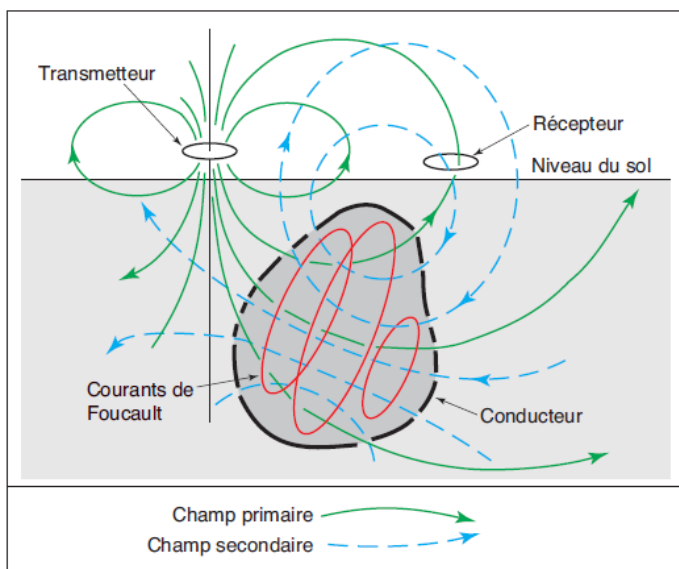


Figure 3.6. Principe de prospection électromagnétique (Chouteau et Giroux, 2008).

Cette méthode présente l'avantage d'être utilisable sur place sans perturbation du milieu ni prélèvement d'échantillon. Les mesures de conductivité électrique apparente peuvent être effectuées, avec l'instrument posé directement à la surface ou maintenu à une certaine hauteur au-dessus du sol. Les outils électromagnétiques (tels que l'EM38) permettent ainsi l'acquisition, sans contact physique avec le sol, des données de conductivité électrique dont les variations traduisent les hétérogénéités et les variations de sols (Michot et al., 2001 ; Michot et al., 2003).

3.4.2.1.2. Caractéristiques du conductivimètre EM38

Il existe toute une série de conductivimètres (EM31, EM34, EM38, ...) dont le fonctionnement est basé sur le principe exposé ci-dessus, avec des profondeurs d'investigations variables selon les caractéristiques de l'appareil (elles vont de 1 mètre pour l'EM38 jusqu'à 40 mètres pour l'EM34).

Les mesures de conductivité électrique ont été réalisées, dans le cadre de ce travail, avec l'appareil EM38 de Géonics Ltd, Canada. Il comporte deux bobines à axes parallèles et coplanaires espacées de 1 m et reliées à un boîtier de mesure. Il s'agit d'un conductimètre qui fonctionne avec une fréquence d'excitation de 14,6 KHz et à faible nombre d'induction. Le Tableau 3.5 présente le récapitulatif des caractéristiques de l'appareil EM38.

La précision des mesures de conductivité électrique est de 0.1 mS/m^{-1} (Michot et al., 2007). Ce qui permet de remarquer les plus faibles changements de conductivité électrique dans le sol. C'est un appareil léger, facile à utiliser et simplement alimenté par une batterie de 9 volts. Cet outil offre une profondeur d'investigation effective qui contribue à environ 75 % au signal mesuré (Beck, 2008). Rappelons enfin que cette méthode permet de réaliser la cartographie en 2D rapide de la conductivité électrique apparente du sol.

Ce conductivimètre EM38 a été utilisé pour effectuer le suivi expérimental de la conductivité des zones aménagées. C'est un outil de mesure couramment utilisé en agriculture de précision (Busselen, 2018 ; Sanches et al., 2018). Les caractéristiques essentielles de celui-ci sont rappelées ici dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5. Les caractéristiques du matériel de mesure (EM38).

Instrument	Distance entre bobines	Fréquence	Profondeur de pénétration typique		Résolution
			Dipôles verticaux	Dipôles horizontaux	
EM38	1 m	14.6 KHz	1.5 m	0.75 m	0.2 m

Source : Brossier (2014)

3.4.2.1.3. Positions et réponse relative de l'EM38

Le conductimètre EM38 peut être utilisé selon deux configurations résumées dans la Figure 3.7 (McNeil, 1980 ; Michot et al., 2007) :

- 1) En mode vertical : les bobines d'induction sont horizontales et les dipôles magnétiques verticaux. La profondeur d'investigation peut atteindre 1,5 m voire 2 m. Elle est à peu près 2 fois plus grande qu'en mode horizontal.
- 2) En mode horizontal : les bobines verticales et les dipôles magnétiques sont horizontaux. La profondeur d'investigation est de 0,75 m.

La réponse de l'instrument à la conductivité électrique du sol varie non linéairement avec la profondeur (Michot et al., 2007) et plus la valeur de la fonction de sensibilité est élevée, plus son influence est grande (Guerin, 2007). En mode vertical, la sensibilité de l'EM38 est la plus élevée à environ 0,4 m mais diminue avec la profondeur. En mode horizontal, la réponse est plus forte en surface et diminue vers la profondeur. L'EM38 fournit des mesures de conductivité apparente du sol (quadrature) et de susceptibilité magnétique (inphase) sur ces deux modes. Ainsi, selon Job et al. (1992) la différence de sensibilité observée entre les modes vertical et horizontal permet de déterminer rapidement l'importance ou non de la conductivité entre les couches superficielles et celles situées plus en profondeur.

Enfin, c'est un outil bien adapté aux études pédologiques notamment de la variabilité spatiale des sols à moyenne profondeur (Michot et al., 2007). Mais la mesure est très sensible aux hétérogénéités du sol (surtout dans des endroits humides) et à tous les objets métalliques qui seraient présents. Il faut donc éviter d'effectuer des mesures à côté de tout objet sensible.

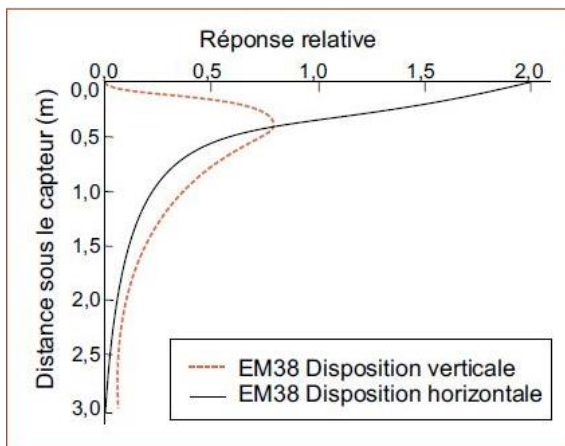


Figure 3.7. Profondeur d'investigation en fonction de la disposition des bobines (verticale ou horizontale) d'un système de mesure de résistivité électrique apparente du sol par induction électromagnétique. D'après Sudduth et al. (1999).

L'EM38 mesure l'effet de la concentration des ions par rapport à un volume de sol rencontré. La profondeur du signal dans le sol dépend de la hauteur de l'instrument au-dessus du sol et de

l'espacement entre les bobines (Labrecque, 2011). Dans le cas d'une prospection électromagnétique, la propriété mesurée est la conductivité électrique apparente (σ_a). Elle peut être décrite comme une fonction des résistivités ($\rho = 1/\sigma$) et épaisseurs (z) des différentes structures présentes sous chaque point de mesure (Guerrero et al., 2012). Malgré tous ses atouts, la méthode électromagnétique présente toutefois quelques **désavantages** qui sont :

- ✓ pour des conductivités électriques élevées, la composante en quadrature n'a plus une relation linéaire avec la conductivité du sol ;
- ✓ le zéro de l'instrument doit être souvent refait dans un environnement très résistant ;
- ✓ il y a toujours une dérive de l'instrument dans le temps due aux variations de température (avec une erreur possible de ± 2 mS/m) ;
- ✓ et enfin la capacité de sondage vertical est limitée.

La Figure 3.8 illustre les différents matériels utilisés pour mesurer la conductivité électrique apparente dans nos parcelles expérimentales. L'utilisation de cet appareil a permis de collecter un jeu important de données. Leur analyse et leur interprétation devront permettre de quantifier l'impact des aménagements en termes de rétention d'eau. A travers ce dispositif mis en place, on vise précisément à détecter et cartographier les variations temporelle et spatiale de l'état hydrique des sols aménagés.



Figure 3.8. EM38, fiches de terrain et fil utilisés pour les mesures de la conductivité électrique par induction électromagnétique.

3.4.2.2. Procédure de calibration de l'EM38

Au début de chaque journée de prospection, il est nécessaire de tester la batterie en plaçant l'interrupteur de l'instrument en mode « BAT ». Il est toutefois conseillé d'allumer et de laisser l'EM38 se réchauffer pendant 15 minutes avant de le calibrer. En effet, une batterie en bon état (bien chargée) affichera une valeur comprise entre 720 et 1500.

Cependant, EM38 est un appareil très sensible aux objets métalliques surtout s'ils sont placés tout près des bobines. Pour cela, on a pris le soin d'enlever et de dégager tout objet métallique (personnel ou non) susceptible de fausser la réponse de l'instrument pendant les mesures. Il est en outre important de notifier que EM38, ayant le défaut d'être aussi très sensible aux variations diurnes de la température de l'air et du sol, nécessite préalablement une calibration dans l'air fréquente pour limiter la dérive instrumentale des lectures (Montoroi et al., 1997). Ainsi, pour la calibration, on soulève l'appareil jusqu'à une hauteur donnée au-dessus de la surface du sol en mode horizontal et on suit les différentes étapes de calibrage mentionnées et explicitées dans le manuel d'utilisation (Operating manual, 2003 disponible sur le site : <http://www.geonics.com>). Nous présenterons succinctement ces étapes de calibrage de l'EM38.

Premièrement, on doit s'assurer que l'appareil affiche bien zéro en mode Q/P (mesure de la conductivité apparente) et I/P (mesure de la susceptibilité magnétique). Sinon, on utilise les molettes de l'appareil pour fixer les valeurs à zéro.

On commence le calibrage en choisissant le mode Q/P pour effectuer des mesures de conductivité. Ensuite, on place l'appareil en position horizontale (à 1,5 m du sol) et l'on règle la conductivité sur une valeur arbitraire (e.g. $H = 10$ mS/m, où H est la lecture en mode horizontal). Après, on pivote l'EM38 en mode vertical tout en le maintenant à la même hauteur et l'on note la valeur qui s'affiche (admettons $V = 16$ mS/m). On soustrait la valeur obtenue en mode horizontal de la valeur verticale (soit, $V - H = 16 - 10 = 6$ mS/m).

Enfin, on ramène encore l'instrument en mode horizontal, puis on tourne le bouton de commande Q/P jusqu'à lire la valeur calculée à l'étape précédente (6 mS/m dans cet exemple). En retournant l'appareil en mode vertical, on s'aperçoit que la valeur observée est le double de celle obtenue en position horizontale, soit 12 mS/m. Dans ce cas, l'instrument est bien calibré. Mais à la fin de ces étapes de calibration, la lecture Q/P doit impérativement correspondre à l'équation suivante :

$$V = 2 H \tag{3.24}$$

Dans le cas contraire, la reprise des différentes étapes de calibration s'impose obligatoirement. Par ailleurs, du fait de la faible profondeur d'investigation, le réglage de zéro de la réponse en phase est relativement simple : il suffit donc d'élever l'appareil à une hauteur où la susceptibilité du terrain n'a plus d'effet sur la mesure. Le calibrage doit être répété régulièrement (surtout si le sol est résistant) au cours de la prospection car l'appareil subit au cours du temps une dérive d'origine essentiellement thermique entraînant des biais sur les mesures (Benech, 2000).

Lors des mesures, le calibrage de l'appareil est répété au moins trois ou quatre fois sur chaque site (ou parcelle) de mesure afin d'en contrôler la dérive. Aussi, pour minimiser l'influence de la température sur les données, les mesures sont réalisées très tôt le matin. En effet, nos mesures commencent toujours avant le lever du soleil, soit dans l'intervalle de temps entre 6 h et 8 h du matin. Si la pluie ne perturbe pas le déroulement des mesures, celles-ci s'achèvent au plus tard à 11 h. C'est cet intervalle de temps qui a été conseillé pour les mesures EM38 en zone sahélienne. De plus, cela nous permet d'effectuer les mesures de conductivité sans trop de dérive instrumentale due à l'excès de chaleur. Pour atténuer cet effet de la chaleur, nous avons pris l'initiative de protéger l'EM38 par un chèche blanc humide (mais pas trop mouillé bien évidemment !) comme on le constate sur la Figure 3.12.

3.4.2.3. Principe de mesure appliqué sur le terrain

Un protocole est établi depuis 2016 pour cartographier l'évolution des zones humectées par les aménagements. Le même protocole de mesures a été strictement respecté en saison 2017 mais avec un nombre restreint de parcelles.

La méthode électromagnétique avec EM38 (opérant à une fréquence de 14,6 kHz) permet d'acquérir deux valeurs de conductivité (CEa) simultanément, soit en modes horizontal et vertical correspondant respectivement aux profondeurs de prospection de 0,75 et 1,5 m. C'est une méthode relativement simple et facile à mettre en œuvre. Elle consiste à parcourir à pied les zones à cartographier avec EM38. Le protocole d'acquisition des données se base sur une grille régulière couvrant toute la parcelle considérée. La distance séparant deux points de mesures dépend de la taille des parcelles. Dans ce contexte, un maillage avec pas de mesures de 5 m / 5 m a été choisi pour les parcelles de sous-solage et le témoin. La Figure 3.9 montre le protocole de suivi temporel mis en place sur le sous-solage. La prise des mesures se fait, après calibration de l'instrument, en réalisant des transects parallèles (ou profils en long) sur des

zones à étudier. Autrement dit, les transects s'effectuent parallèlement à la direction du parcours du tracteur ayant réalisé le sous-solage perpendiculairement à la pente.

Le principe consiste à déplacer le dispositif (EM38) le long d'une ligne prédéfinie suivant un pas d'échantillonnage bien défini. Chaque profil est identifié par ses deux points extrêmes (point de départ et point d'arrivée). Ils sont matérialisés par des piquets (repères) en bois. Pour s'assurer de mesurer toujours la conductivité aux mêmes endroits, ces repères en bois ont été fixés en permanence dans le sol. Donc, le suivi temporel a été effectué en respectant les mêmes points de mesures durant deux saisons. Pendant chaque prospection, on tend et attache un fil gradué entre ces piquets (repères) fixes. Le fil utilisé sur les parcelles du sous-solage et le témoin est gradué de façon continue tous les 5 m. Par contre, la graduation de celui utilisé sur les banquettes est de 2 m. Pendant les mesures, on enregistre sur chaque 5 m (ou 2 m pour les banquettes) en même temps les valeurs de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique en fonction des positions de l'appareil.

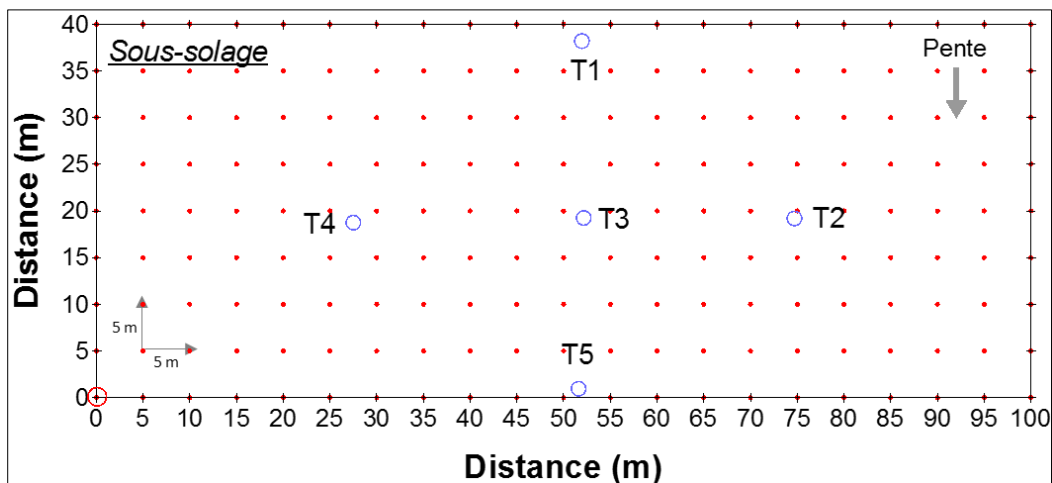


Figure 3.9. Protocole de suivi temporel de la conductivité électrique couplé à l'humidité du sol (sur les parcelles de sous-solage).

Les points rouges représentent les points de mesure de CEA, le cercle en rouge indique la base fixe de mesure et les cercles bleus correspondent aux tubes d'humidité par sondage neutronique.

Un protocole de mesures similaire a été mis en place sur les parcelles en banquettes. Sur celles-ci, afin de mieux représenter la variabilité spatiale de l'humidité du sol, nous avons effectué les mesures selon une maille d'un pas de 2 m / 2 m sur l'ensemble de la banquette. La Figure 3.10 donne un exemple de protocole de mesure appliqué à l'échelle des banquettes. Notons par ailleurs que les mesures d'humidité et de conductivité électrique sont aussi faites

simultanément. Sur chaque point de mesure dans une parcelle, on obtient deux valeurs de la conductivité électrique apparente. Il s'agit des lectures faites en positions verticale (CE_{av}) et horizontale (CE_{ah}) de l'instrument. Les valeurs exprimées en mS/m^{-1} sont notées manuellement sur des fiches terrain. Pour rappel, la sensibilité obtenue peut être différente selon le mode (ou position) utilisé (McNeil, 1980).

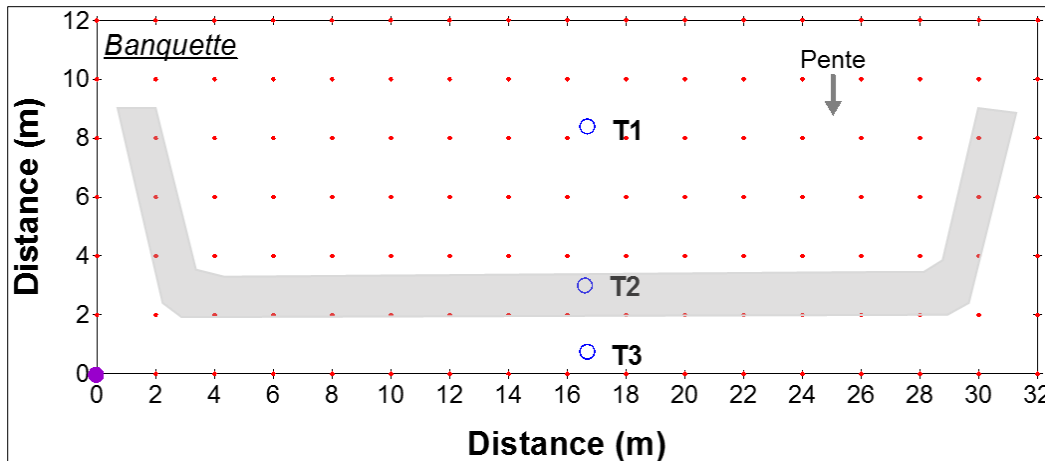


Figure 3.10. Protocole de mesure de la conductivité électrique apparente (CEa) dans une banquette (B2).

Les points rouges représentent les points de mesure de CEa , le point en violet indique la base fixe de mesure et les ronds bleus correspondent aux tubes d'humidité par sondage neutronique.

En somme, l'utilisation du conductivimètre EM38 nous a permis de suivre le stockage et le déstockage hydrique des surfaces aménagées. Ces mêmes mesures sont, par ailleurs, effectuées sur une surface témoin (non aménagée) afin de quantifier le gain apporté par les aménagements, en rétention d'eau à l'échelle de la parcelle.

Pour le témoin, les lectures de la conductivité électrique apparente sont faites dans le sens de la pente. Mais les profils en travers sont, quant à eux, perpendiculaires à la pente (Figure 3.11). Le pas de mesure choisi est de 5 m / 5 m.

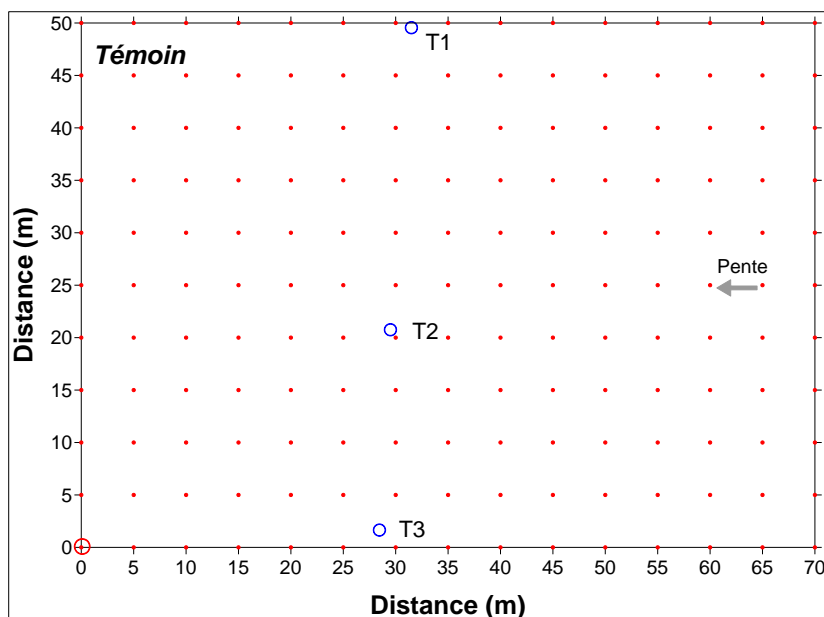


Figure 3.11. Protocole de mesure de la conductivité électrique apparente sur la parcelle témoin.

Les points en rouge représentent les points de mesure de CEa et les ronds en rouge et en bleu indiquent respectivement la base fixe de mesure et les tubes d'humidité par sondage neutronique.

3.4.2.4. Procédure des mesures sur le terrain (échelle de la parcelle)

Les mesures de la conductivité électrique apparente (CEa), avec l'instrument posé directement à la surface du sol, ont été réalisées durant deux saisons pluvieuses avec une fréquence quotidienne. La Figure 3.12 montre l'appareil EM38 en cours d'utilisation sur une parcelle de sous-solage. Grâce à cette fréquence quotidienne des mesures, on dispose d'une carte de conductivité du sol avant (état initial) et après (état final) chaque évènement pluvieux. Le Tableau 3.6 donne le nombre des points de mesure de la conductivité électrique par parcelle.

Tableau 3.6. Nombre des points de mesure de la conductivité apparente par parcelle.

Parcelles expérimentales	SL1	SL2	B1	B2	B3	Témoin
Nombre de points de mesure de la CEa	189	171	84	119	135	165

A chaque point de mesure, l'appareil est posé directement au sol en mode vertical (Figure 3.12 "a") et puis en mode horizontal (Figure 3.12 "b"). Ensuite, on lit directement la conductivité

apparente du sol (quadrature) et la susceptibilité magnétique (inphase) selon ces configurations distinctes. La composante de susceptibilité magnétique est par ailleurs utile dans la détection des objets métalliques enterrés (Job et al., 1992).

Chaque mesure ponctuelle effectuée est en effet reliée à une adresse de localisation (x, y et z) donnée. De ce fait, tous les points sont localisés afin d'assurer la qualité de suivi de la conductivité électrique. Ce suivi temporel de la conductivité électrique par prospection EM38 repose en effet sur la réalisation des transects tout en respectant les distances qui séparent les points de mesures.

Pendant les mesures, on a remarqué que les valeurs mesurées en mode vertical sont assez souvent supérieures à celles obtenues en mode horizontal. Ceci peut s'expliquer par la sensibilité de l'appareil pouvant varier avec l'augmentation de l'humidité du sol liée aux aménagements et va dans le sens d'une pénétration de l'eau bien au-delà de 0.5 m (Figure 3.14).



Figure 3.12. EM38 en cours d'utilisation en mode vertical (a) et en mode horizontal (b) dans une parcelle de sous-solage.

La technique EM38 est rapide et permet d'avoir une forte densité de points de mesure. Elle donne la possibilité de faire des mesures répétées sur une même surface et de travailler à grande

échelle (Busselen, 2018). Son application dans la caractérisation de la variabilité spatiale de la salinité est par ailleurs largement développée sur plusieurs types des sols (Job et al., 1997 ; Yao et Yang, 2010 ; Saoud, 2014 ; Berkal, 2016).

3.4.2.5. Suivi spatio-temporel de la conductivité électrique apparente

Le suivi de la dynamique saisonnière de la conductivité électrique apparente (CEa) a été effectué à l'échelle des surfaces aménagées. Il s'est étendu de mai à octobre durant deux campagnes (2016 et 2017). Cependant, pour la campagne 2016, les premières mesures ont lieu en juin. Cette période (de mai à octobre) est idéale puisqu'elle caractérise la répartition temporelle des pluies sur le site d'étude. Ce suivi couvre en effet chaque saison pluvieuse correspondant *a priori* à des conditions contrastées de l'humidité des sols. Les mesures effectuées sont cependant événementielles (CEa avant et après chaque pluie) afin de quantifier l'apport des précipitations en termes de stock hydrique à l'échelle de la parcelle (surfaces aménagées). On poursuit les mêmes mesures durant les intervalles de temps séparant deux événements pluvieux consécutifs. Cette approche permet de suivre en continu l'évolution de la conductivité électrique apparente pendant même les jours secs (sans pluie).

De plus, les données de la conductivité électrique collectées ont permis de caractériser l'hétérogénéité des sols sur des parcelles à l'échelle métrique. Eu égard aux mesures de conductivité, des mesures de l'humidité ont été menées parallèlement. Ces deux grandeurs mesurées (CEa et θ) ont servi pour l'étalonnage de l'EM38.

3.4.3. Méthodes de traitement et d'analyse des données de CEa

La section suivante présente les méthodes de correction et d'analyse des données mesurées de la conductivité électrique. Les campagnes de prospection menées nous ont permis d'obtenir un jeu des données considérable.

3.4.3.1. Correction des données brutes de la CEa

Il existe dans la littérature des lois de correction de l'effet de la température sur la conductivité électrique apparente mesurée (Dabas et al. 1995 ; Dakak et al. 2011 ; Berkal, 2016). En effet, avant toute analyse statistique, les données brutes collectées devront être corrigées en vérifiant et éliminant les valeurs erronées. Ce traitement a été préalablement réalisé sur tableur Excel.

La dérive instrumentale de l'EM38, liée notamment aux variations de température, est une source d'erreurs lors des prospections sur le terrain. Ces erreurs peuvent être corrigées par des

retours réguliers à une base fixe définit par parcelle. Nous avons pour cela utilisé un piquet en bois fixé dans le sol à l'aide du ciment (base en béton). Il correspond au point de coordonnées $x = 0$ et $y = 0$ identifiable sur les Figures 3.9, 3.10 et 3.11 présentées plus haut. On a préféré utiliser ce repère en bois puisque le métal pourrait influencer le fonctionnement de l'instrument EM38. Les retours à la base fixe se font régulièrement après chaque aller-retour dans une parcelle donnée. Cela veut dire donc qu'à la fin de chaque aller-retour, soit exactement à la fin du 2^e profil, on revient pour mesurer la conductivité de la base fixe (repère initial). En effet, le contrôle de la dérive de l'instrument s'effectue à des intervalles réguliers sur cette base fixe. Lors du dépouillement, les mesures prises pendant chaque retour à la base sont comparées à la valeur initiale de conductivité électrique mesurée au début de chaque jour de prospection.

En supposant que la dérive instrumentale (EM38) est linéaire entre deux (2) mesures obtenues sur la base fixe d'une parcelle donnée, on peut calculer un taux de dérive (TD) entre ces deux mesures. Une donnée acquise (DA) au temps T entre les deux (2) mesures de base fixe peut être corrigée (DC = donnée corrigée) à l'aide de l'expression suivante :

$$DC = DA - TD \quad (3.25)$$

Si la valeur de la mesure acquise (DA) au temps T est inférieure à la valeur initiale mesurée à la base fixe, la donnée peut être corrigée par :

$$DC = DA + TD \quad (3.26)$$

Ces données de la conductivité électrique apparente corrigées (CEa) doivent être interpolées par la méthode de krigeage afin d'obtenir des cartes d'iso-valeurs. Il faut noter que toutes les données de CEa seront corrigées avant d'être utilisées dans ce travail.

3.4.3.2. Outils de traitement des données de la conductivité électrique

Le logiciel utilisé pour le traitement géostatistiques des données de la conductivité est Surfer 8 (Golden Software). Il nous a permis d'effectuer une analyse des données de conductivité électrique récoltées sur le terrain. Le principe de base de son fonctionnement repose sur la création des grilles (create Grid) pouvant interpoler les données des coordonnées x , y et z afin de les ordonner. Il génère de façon automatique un fichier décrivant des calculs statistiques des variables concernées. Il permet ensuite de manière assez simple d'analyser et de visualiser les données de la conductivité apparente sous forme des cartes en deux dimensions (cartes en 2D). C'est un outil puissant permettant en outre la création des contours (create Map) et de surfaces. Il dispose de plusieurs options cartographiques permettant de réaliser des cartes représentant

les données utilisées (Wubda, 2017). Pour transformer les données mesurées par EM38 en cartes, nous avons fait recours à certaines de ses extensions (outils) notamment :

- ✓ l'outil de calcul d'interpolation qui propose plusieurs types de calculs dont le krigeage qui se fonde sur un variogramme prédéfini dans les calculs ;
- ✓ l'outil d'affichage permettant de présenter et de visualiser les données interpolées sous forme de cartes d'iso-valeurs avec des échelles de couleurs modulables.

Les mesures réalisées sont exploitées, de manière classique, avec le logiciel surfer 8. Au final, les cartes pouvant être produites à l'aide de ce logiciel sont exploitables en fichiers images éditables ou directement utilisables.

3.4.3.3. Traitement géostatistique des données

Les données de la conductivité (σ_a) acquises sur le terrain sont traitées de façon numérique par la méthode géostatistique afin d'étudier les paysages hydriques des sols aménagés à l'échelle saisonnière.

3.4.3.4. Interpolation par krigeage des données électromagnétiques

Le krigeage est la méthode optimale, au sens statistique du terme, d'estimation de variables spatialement corrélées en restituant leur continuité spatiale dans l'expression cartographique (Koussa, 2018). On l'utilise autant pour l'interpolation que l'extrapolation (Gratton, 2002). En effet, le krigeage est une des méthodes de la géostatistique fondée sur la théorie des variables régionalisées (Rogjiang Yao et Yang 2010) permettant d'effectuer l'interpolation spatiale entre les endroits échantillonnées (Dakak et al., 2011). En d'autres termes, elle vise à prévoir ou estimer la valeur d'une variable régionalisée étudiée en un point (ou site) non échantillonné par la combinaison linéaire des données (Labrecque, 2011). Comme toute méthode d'interpolation, le krigeage permet donc de répondre à un problème de la reconnaissance permettant d'estimer une valeur en un point de l'espace non prospecté (Guerrero et al., 2012). Il est préféré à d'autres méthodes d'interpolation spatiale du fait qu'il permet d'exploiter la corrélation spatiale entre des observations voisines dans l'espace.

La méthode d'interpolation par krigeage simple est utilisée dans cette thèse afin de caractériser la variabilité temporelle et spatiale de la conductivité apparente mesurée dans des types d'aménagement bien distincts. Avant de terminer, il est important de notifier par ailleurs que, selon Koussa (2018), le krigeage, la règle de pondération et donc la carte qui en résulte sont déterminés par le comportement spatial des données de l'élément à analyser.

3.4.3.5. Procédure d'étalonnage de l'EM38

Pour l'étalonnage de l'EM38, nous avons couplé deux types de données : les données d'humidité collectées par sondage neutronique et de la conductivité électrique apparente mesurée en mode vertical à l'aide de l'EM38. Plusieurs auteurs (El Oumri et Vieillefon, 1983 ; Charbonneau et al., 1988 ; Job et al., 1995 ; Michot et al., 2001 ; Bezis, 2003 ; Saoud, 2014) ont, par ailleurs, décrit des méthodes d'étalonnage au laboratoire en s'appuyant sur des mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée pour établir des droites de régression linéaire simple et multiple. Cette méthode d'étalonnage a été aussi l'objectif de nombreux chercheurs de plusieurs pays : Canada, USA, Australie et plus récemment en Afrique (Vlotman, 2000). Afin de convertir les valeurs lues par EM38, Rhoades et Corwin (1981) ont proposé et développé des modèles d'étalonnage basés sur la régression linéaire multiple permettant de corrélérer les mesures de la conductivité électrique de pâte saturée (CE_{ps}) avec la conductivité électrique apparente (CEa) mesurée sur différentes profondeurs du sol. Nous décrirons par la suite notre approche conduisant à l'étalonnage de l'EM38.

3.4.3.5.1. Approche métrologique appliquée à l'échelle locale

Pour étalonner l'EM38, nous avons utilisé une approche métrologique à l'échelle locale (des surfaces aménagées). L'objectif est d'aboutir aux mesures spatialisées de l'humidité du sol à l'échelle de la parcelle. Pour l'atteindre, l'approche adoptée repose sur un étalonnage en cascade réalisé en trois étapes différentes (Figure 3.13) :

- les mesures gravimétriques : elles consistent au prélèvement d'une série d'échantillons des sols non remaniés à l'aide de cylindre afin de déterminer la teneur en eau volumique.
- l'étalonnage de la sonde à neutrons : Il cherche à établir une relation linéaire entre les grandeurs θ et CR mesurées conjointement dans les banquettes, le sous-solage et le témoin. Rappelons que les comptages neutroniques sont effectués chaque 10 cm jusqu'à 190 cm de profondeur. Un étalonnage par parcelle est en effet obtenu à partir de ces couples (CR, θ). Les équations des droites d'étalonnage déterminées sont utilisées pour convertir les comptages réduits (CR) en teneur en eau volumique (θ) puis calculer le stock hydrique, mais à l'échelle ponctuelle. La méthode reste pour l'instant une référence pour étalonner d'autres capteurs de mesure.
- l'étalonnage de l'EM38 qui consiste à tester une corrélation statistique entre les mesures de conductivité électrique apparente (CEa) et de l'humidité du sol obtenue par intégration sur tout le profil de mesure. Concrètement, on utilise la conductivité apparente mesurée

selon le principe des quatre plus proches voisins : les quatre points de CEa les plus proches du tube neutronique sont pris en compte. Seules les mesures en mode vertical (dont la profondeur de prospection $z = 1,50$ m) sont utilisées dans l'établissement des corrélations statistiques avec le stock puis avec la variation du stock (ΔS) déterminés indirectement par le biais de l'étalonnage de la sonde.

Comme tenu de la sensibilité de l'EM38 en mode vertical, nous avons décidé de travailler avec le stock hydrique estimé entre 0 et 135 cm de profondeur. L'essentiel des variations du stock hydrique s'observe dans cet intervalle.

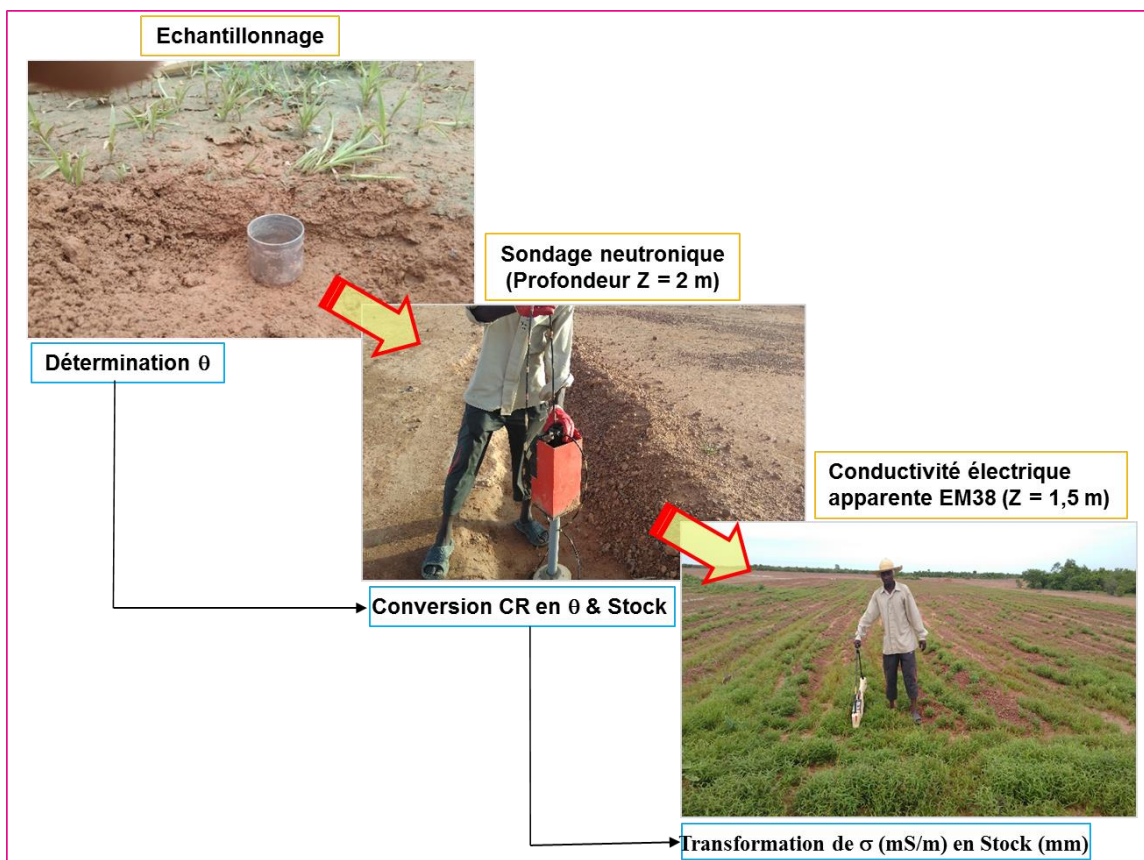


Figure 3.13. Approche métrologique d'étalonnage en cascade mise en œuvre à l'échelle locale pour étalonner EM38.

Cette approche s'inscrit dans le cadre d'un suivi cartographique de stockage d'eau dans les sols des surfaces aménagées. Il existe cependant une dépendance de la conductivité apparente avec des paramètres comme la teneur en argile et en sels notamment. Il devient alors difficile de dissocier l'influence de chacun de ces facteurs sur les mesures de la CEa. Pour cette raison, la détermination des variations de teneur en eau dans une parcelle à l'aide de cette méthode peut constituer une tâche délicate à réaliser. Cependant, les coefficients de corrélation permettront

de connaître précisément la part du signal EM38 expliquée uniquement par les variations de stock hydrique.

3.4.3.5.2. Méthode des plus proches voisins possibles

Le principe des plus proches voisins possibles est utilisé dans la procédure d'étalonnage (Figure 3.15). Il consiste à prendre en compte la conductivité électrique de quatre points environnant au plus près les tubes d'accès neutronique. La Figure 3.14 montre les quatre positions de l'EM38 autour du tube de mesure d'humidité neutronique. Il s'agit de points supplémentaires par rapport à ceux de la grille régulière. On cherche, à travers cette approche, à établir une loi statistique reliant la conductivité électrique moyenne au stock hydrique déterminé de façon indirecte (par le biais de l'étalonnage de la sonde) par tube et par date de mesure.

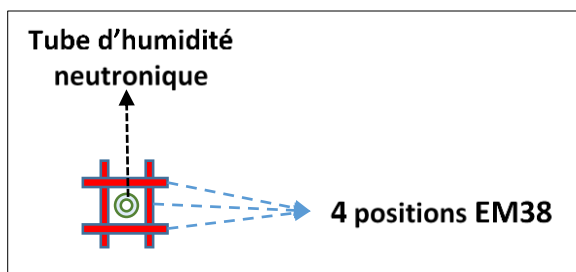


Figure 3.14. Positions de l'EM38 autour du tube d'humidité neutronique.

Il est par ailleurs intéressant de notifier l'effet de la distance séparant les tubes des quatre points voisins sur lesquels on mesure la conductivité électrique. Le choix de cette distance est primordial pour le bon fonctionnement de la méthode. Ainsi, plus la distance entre deux mesures est importante moins les mesures sont corrélées comme cela a été rapporté par Koussa (2018). Pour cette raison, l'appareil (EM38) est posé directement tout près des tubes pendant la mesure des plus proches voisins possibles. On suppose donc qu'approximativement le même volume du sol vu par la sonde à neutrons est prospecté par EM38 afin d'établir la relation entre les variables à analyser, ou du moins, la différence est-elle minimale.

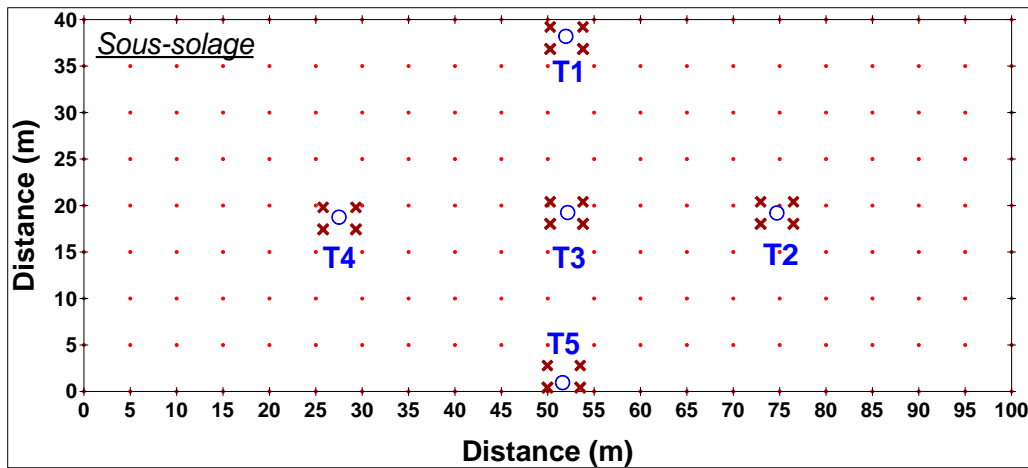


Figure 3.15. Principe des quatre points plus proches voisins possibles des tubes mis en application sur une parcelle de sous-solage (exemple de la parcelle SL1).

Les points rouges indiquent les points de mesure de la CEA, les cercles (en bleu) correspondent aux tubes d'accès neutronique et les croix en marron représentent les quatre points plus proches voisins possibles des tubes d'humidité.

3.4.3.5.3. Relations entre les grandeurs mesurées

Pour notre part, l'étalonnage de l'EM38 repose sur la recherche d'une relation liant la conductivité électrique apparente (exprimée en mS/m) au stock hydrique ($S_{0-135\text{ cm}}$) déterminé d'après l'équation 3.32. Plusieurs couples conductivité apparente / stock mesurés sur le terrain ont été ainsi utilisés. Les différentes corrélations testées sont :

- la corrélation entre le stock hydrique ($S_{0-135\text{ cm}}$) et la conductivité électrique apparente moyenne des quatre points plus proches voisins possibles des tubes ;
- la corrélation entre le stock hydrique ($S_{0-135\text{ cm}}$) et la conductivité électrique apparente moyenne de la parcelle entière.

La conductivité électrique apparente moyenne des quatre points plus proches voisins possibles ($\overline{CEa}_{4\text{ p. voisins}}$) s'obtient par :

$$\overline{CEa}_{4\text{ p. voisins}} = \frac{\sum CEa_{\text{p. voisin}}}{4} \quad (3.27)$$

où $CEa_{\text{p. voisin}}$ = conductivité électrique apparente d'un point p voisin du tube à une date donnée.

La conductivité électrique apparente moyenne de la parcelle entière ($\overline{CEa}_{\text{parcelle}}$) est, quant à elle, déterminée par la formulation suivante :

$$\overline{CEa}_{\text{parcelle}} = \frac{\sum CEa_i}{N_p} \quad (3.28)$$

CEa_i correspond à la conductivité électrique apparente (mode vertical) d'un point i dans la parcelle prospectée à une date donnée et N_p est le nombre total des points de mesure à l'échelle de la parcelle considérée.

Les équations issues des droites des régressions linéaires obtenues à partir des variables stock-conductivité moyenne des quatre points plus proches voisins possibles ont été utilisées pour le suivi cartographique et le calcul du stock hydrique global des parcelles entières.

Puis, pour information, nous avons établi des corrélations en utilisant la **variation de stock ΔS** calculée sur des mesures effectuées avant et après chaque épisode pluvieux. Il s'agit essentiellement de la corrélation entre :

- la variation de stock ΔS (mm) et le rapport moyen de conductivité électrique apparente des quatre points plus proches voisins possibles ;
- la variation de stock hydrique ΔS (mm) et le rapport moyen de conductivité apparente de la parcelle entière.

Notons ainsi que la variation de stock ΔS a été calculée par application de l'équation 3.8. Le rapport de conductivité s'obtient en revanche par :

$$\text{Rapport } CEa = CEa \text{ après}/CEa \text{ avant} \quad (3.29)$$

CEa avant et CEa après sont respectivement les conductivités des quatre points voisins mesurées avant et après chaque pluie. Le rapport moyen de la conductivité électrique apparente se détermine par la moyenne arithmétique des rapports (établis par date de mesure) de conductivité des quatre points voisins. Ces rapports sont calculés par date de pluie.

A l'échelle de la parcelle, on calcule, par date de mesure avant et après pluie, la moyenne des valeurs de conductivité électrique (\overline{CEa}) obtenues sur tous les points de mesure d'une parcelle. Le rapport moyen de la conductivité est ensuite déterminé à l'échelle de la parcelle par l'équation suivante :

$$\text{Rapport moyen } CEa = \overline{CEa} \text{ après}/\overline{CEa} \text{ avant} \quad (3.30)$$

Quant au delta stock moyen, il a été obtenu en moyennant les variations de stock hydrique mesurées sur tous les tubes de la parcelle.

Il faut bien noter que l'utilisation des rapports de conductivité revient à une perte d'information puisque les valeurs individuelles sont perdues. Deux couples de valeurs peuvent donner le même rapport sans que l'on puisse retrouver les valeurs d'origine.

La mise en évidence de toutes ces relations d'étalonnage vise à tester le degré de liaison entre les grandeurs estimées. La démarche méthodologique conduisant à l'évaluation et à la cartographie de l'efficacité des aménagements sera discutée plus en détails dans la suite de ce document.

3.4.3.6. Méthode de cartographie de stock hydrique (échelle parcellaire)

La méthode de spatialisation des mesures de conductivité apparente s'appuie sur la détermination d'un étalonnage pouvant être validé sur chaque parcelle de mesures. Ainsi, l'étalonnage des lectures données par EM38 repose sur la réalisation des régressions linéaires simples par tube et par parcelle. Les variables utilisées sont la conductivité électrique apparente (variable explicative) et le stock hydrique (variable expliquée). En corrélant ces variables, on peut alors déterminer une équation d'étalonnage en vue de transformer les valeurs de la conductivité apparente en valeurs de stock d'eau. Dès lors, la mise en pratique de la méthode d'interpolation spatiale permettra de prédire les valeurs de conductivité des endroits non échantillonnés.

L'approche d'étalonnage consiste à comparer les comportements hydriques des tubes d'une même parcelle vis-à-vis des conditions d'infiltration influencées par les aménagements. Cela vise à détecter des tubes plus humides des tubes secs suivant le type d'aménagement. Cette approche d'analyse permet donc de distinguer et classer les tubes selon leur degré d'humidité du sol. On établit ensuite une relation d'étalonnage représentative de chaque groupe des tubes d'une parcelle. Les équations issues des relations linéaires par tube sont par conséquent utilisées pour calculer deux paramètres souhaités : la pente et l'intercept. Ces coefficients permettront à leur tour de convertir les réponses (ou signal exprimé en mS/m) données par EM38 en stock d'eau (exprimé en mm).

Sur les parcelles du sous-solage, chaque droite d'étalonnage moyen n'est valable que sur une zone bien précise de la parcelle concernée. D'où la nécessité de choisir un étalonnage séparé pour les surfaces sous-solées et les secteurs non remaniés délimitant les parcelles de prospection.

Pour les banquettes et le témoin, une seule droite d'étalonnage est déterminée par parcelle.

3.4.3.6.1. Méthode de spatialisation du stock sur les surfaces de sous-solage

❖ Relations d'étalonnage établies par tube

L'étalonnage de l'EM38 a été mené sur un échantillon des dix (10) tubes répartis entre deux parcelles du sous-solage dites SL1 et SL2. Le suivi de l'humidité et de la conductivité a permis d'établir plusieurs corrélations. Le modèle de régression linéaire peut être établi, dans l'équation ci-dessous :

$$S_{(0-135 \text{ cm})} = a \text{ CEa}_{(v)} + b \quad (3.31)$$

avec :

- $\text{CEa}_{(v)}$: la conductivité électrique apparente mesurée en mode vertical (mS/m) ;
- $S_{(0-135 \text{ cm})}$: le stock hydrique estimé entre 0 et 135 cm de profondeur (mm) ;
- a : la pente de la relation ;
- b : l'ordonnée à l'origine.

Au total, cinq droites d'étalonnage de ce type ont été obtenues par parcelle (soit une droite par tube) ; contrairement aux banquettes et au témoin où trois droites sont obtenues par parcelle.

❖ Détermination d'un étalonnage valable par parcelle

La Figure 3.16 met en évidence le principe adopté afin de déterminer la relation d'étalonnage valable à l'échelle de la parcelle. L'examen de cette figure permet de distinguer et classer les tubes en fonction de leurs positions dans la parcelle et de l'humidité du sol qu'ils représentent. On peut ainsi constater deux regroupements des tubes par parcelle dont :

- le premier groupe est constitué des tubes T2, T3 et T4. Ces trois tubes sont installés dans la zone de sous-solage proprement dite. Ils traduisent la dynamique des conditions hydriques des sols sous-solés (avec des stocks variant entre 230 et 400 mm) ;
- le deuxième groupe concerne les tubes T1 et T5 installés hors des zones aménagées par sous-solage. Ce dernier groupe caractérise le comportement hydrique des sols immédiatement en amont et en aval des zones remaniées de façon respective. Leur capacité de rétention d'eau est par conséquent plus faible avec des stocks compris entre 130 et 300 mm sur l'échelle de la saison. On remarque en outre que ces secteurs enregistrent souvent des valeurs de conductivité électrique plus faibles.

Sur la base de cette catégorisation des tubes, on peut déterminer une droite d'étalonnage moyenne correspondant à chaque secteur de la parcelle représentée. Pour chaque groupe des tubes, on peut ainsi tracer :

- une relation d'étalonnage construite en utilisant les paramètres des régressions linéaires obtenues à partir des tubes T2, T3 et T4 appartenant à la zone de sous-solage ;

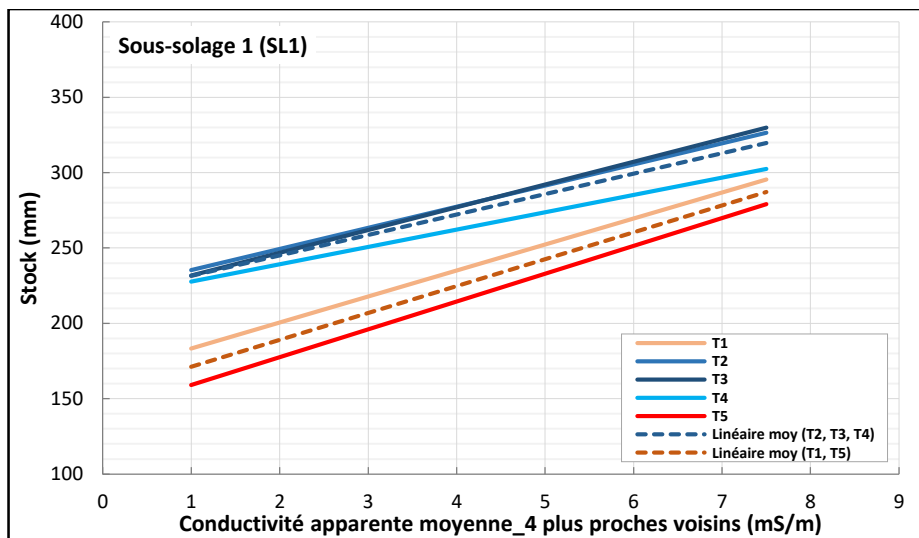
- une relation d'étalonnage construite à partir des coefficients des droites des tubes T1 et T5 situant hors de la zone remaniée.

On constate l'existence de corrélation linéaire assez bonne entre les valeurs de conductivité apparente et celles du stock hydrique. On a alors l'équation d'étalonnage de type :

$$\text{Stock (mm)} = \bar{a} \text{CEa}_{(v)} + \bar{b} \quad (3.32)$$

Où \bar{a} et \bar{b} représentent respectivement les valeurs moyennes de la pente et de l'intercept calculés.

L'utilisation de l'équation 3.32 permet de transformer les mesures de conductivité apparente en stock d'eau dans les surfaces aménagées. Par contre, la généralisation de la démarche ne peut se concevoir que dans les limites de la parcelle du sous-solage prospectée à l'aide de l'EM38. Les zones alentour ne sont donc pas concernées. Il faut pour cela un étalonnage spécifique à ces dernières. Cette démarche d'étalonnage a été appliquée et respectée dans les deux parcelles du sous-solage étudiées. La partition de la parcelle en deux secteurs au comportement hydro-pédologique différent nous montre qu'une estimation spatialisée de stock hydrique par des mesures de conductivité électrique apparente est donc raisonnement possible.



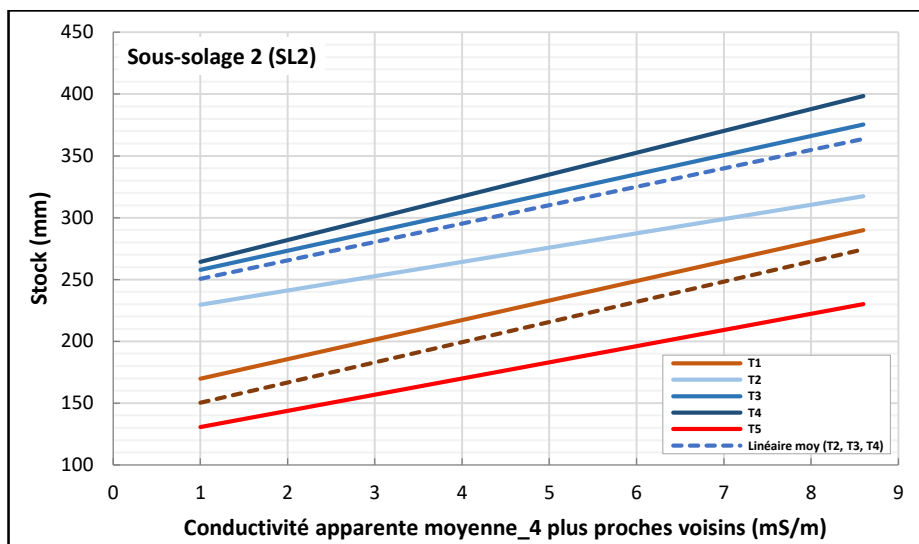


Figure 3.16. Principe de détermination par régression linéaire des droites d'étalonnage de l'EM38 sur les parcelles du sous-solage.

Les lignes des droites en rouge indiquent les comportements hydriques des tubes secs (T1 et T5 situés en amont et en aval du sous-solage respectivement) de la zone non remaniée et les droites en bleu correspondent aux tubes plus humides de la zone sous-solée. Les pointillés en bleu et en marron indiquent respectivement les droites d'étalonnage moyen de la partie remaniée par sous-solage et de la zone non remaniée.

3.4.3.6.2. Spatialisation du stock à l'échelle des banquettes

L'étalonnage de l'EM38 a été aussi testé sur les banquettes. Néanmoins, la structure de cette technique d'aménagement se distingue de celle du sous-solage. Par leur taille différente, les banquettes n'ont pas la même capacité de rétention d'eau. D'où la nécessité d'effectuer un étalonnage spécifique par banquette. Les couples de valeurs (CEa, stock) déterminés ont permis d'établir des relations d'étalonnage par tube et par banquette. Partant des équations des celles-ci, on peut ensuite déterminer un étalonnage moyen qui peut être validé sur chaque parcelle. Sa droite passe au plus près des trois droites des tubes T1, T2 et T3. En revanche, cette étape ne s'applique que dans la mesure où il n'existe pas des différences significatives entre le comportement hydrique des tubes. Autrement dit, si la tendance (allure des pentes) des droites de régression est plus ou moins similaire, on peut donc être amené à définir un étalonnage valable à l'échelle de la banquette entière. Les résultats obtenus sur deux des trois banquettes suivies (Figure 3.17) sont donnés à titre explicatif de la démarche d'étalonnage à l'échelle parcellaire. D'après cette figure, il n'y a pas une très grande différence du fonctionnement des tubes bien qu'ils soient installés sur des compartiments différents de la banquette. De plus, la

variabilité spatiale observée n'est pas trop grande, ce qui constitue un avantage pour justifier l'intérêt du choix d'un étalonnage moyen. Cependant, on constate que les tubes de l'amont des banquettes réagissent différemment de ceux situés en aval. L'analyse montre que les tubes T2 situés dans les fossés sont nettement plus humides que les tubes T3 se trouvant en aval et dans une moindre les tubes T1 de l'impluvium.

Surtout, il est important de noter que les pentes des trois droites établies par banquette sont très proches. Or, dans le but d'estimer des différences de stock hydrique de date à date, seule la pente de la relation compte, l'intercept est sans effet. Par conséquent, les différences entre les droites des trois tubes sont peu pénalisantes pour nos objectifs.

La mise en œuvre de cette démarche débouchera sur la cartographie de la dynamique hydrique des parcelles à l'échelle de l'événement pluvieux et celle de la saison.

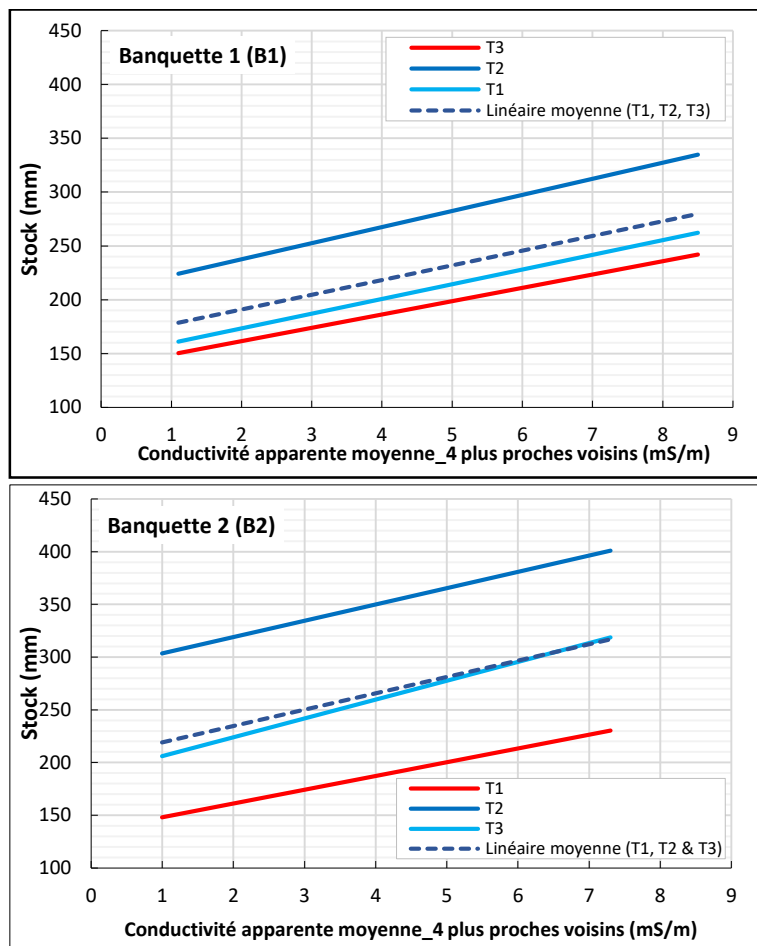


Figure 3.17. Principe de détermination des droites de régressions linéaires (étalonnage EM38) dans les banquettes (exemple de B1 & B2).

Les trois tubes par banquette sont représentés en fonction de leur état d'humidité du sol, les plus secs en rouge et les plus humides en bleu. Les pointillés bleus indiquent les droites d'étalonnage moyen établi par banquette.

3.4.3.6.3. Spatialisation de stock à l'échelle de la parcelle témoin

La Figure 3.18 indique les droites des relations statistiques linéaires obtenues sur le témoin. Elle met en évidence un état plus sec des tubes en comparaison avec ceux des surfaces aménagées (sous-solage et banquettes) discutés plus haut. L'allure similaire des pentes des droites et leur rapprochement traduisent l'homogénéité des sols des bandes nues. Le même type d'approche a été utilisé pour déterminer les relations d'étalonnage sur le témoin. Les valeurs des coefficients moyens ont été calculées en suivant le même principe que pour les autres sites. En réalisant un étalonnage sur des sites à profils hydriques différents, on peut de ce fait obtenir l'équation permettant d'exprimer tous les résultats de la conductivité apparente par rapport à l'humidité du sol.

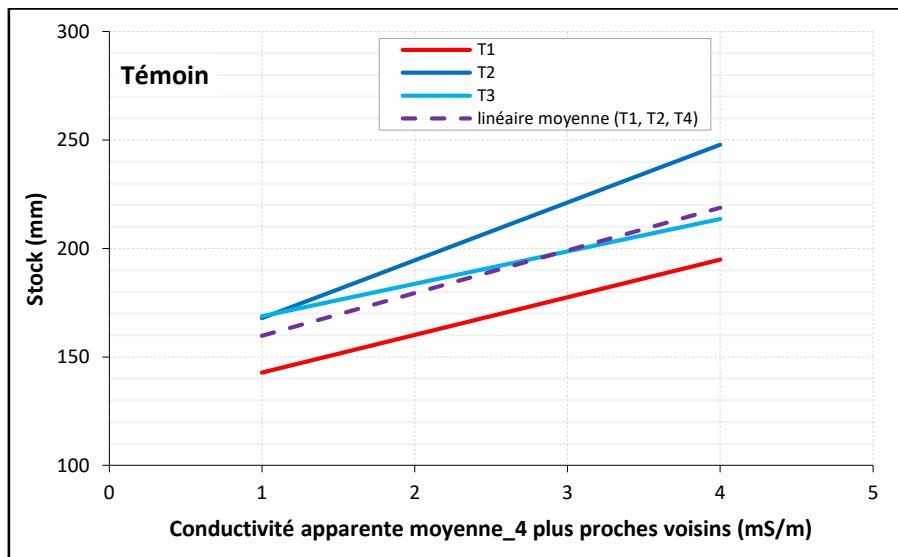


Figure 3.18. Principe de détermination par régression linéaire des droites d'étalonnage EM38 sur le témoin.

Les tubes sont représentés suivant leur degré d'humidité du sol (du plus humide en bleu au plus sec en rouge). Les pointillés en violet représentent l'étalonnage moyen.

Le suivi temporel par mesure de la conductivité apparente peut ainsi constituer un excellent indicateur d'évaluation de l'efficacité des aménagements. Pour la cartographie, nous avons opté pour la méthode d'interpolation spatiale par krigeage. Elle permet de mettre en évidence les variations de la teneur en eau à l'échelle de la parcelle en caractérisant les zones les plus actives et les zones stables en termes d'humidité du sol. Cette étape constitue en effet la phase préliminaire à toute analyse proprement dite des données.

3.5. Mesure de l'écoulement et méthodes d'évaluation de l'impact des aménagements à l'échelle des bassins versants

Après l'évaluation de l'impact des aménagements à l'échelle locale (surfaces aménagées), nous proposons dans cette partie du chapitre une méthode opérationnellement mise en œuvre afin de quantifier l'efficacité des différentes techniques d'aménagement à l'échelle du bassin versant. Cela consiste à comparer les comportements hydrologiques au sein d'un même bassin versant puis entre deux bassins versants aménagés distinctement.

3.5.1. Définitions utiles : ruissellement, écoulement

Le **ruissellement** désigne en hydrologie le phénomène d'écoulement des eaux pluviales sur la surface du sol. C'est donc le terme complémentaire de l'infiltration. Il correspond, en d'autres termes, à la mise en mouvement d'un excès d'eau se formant à la surface du sol suite aux précipitations. Selon Musy et al. (2014), cette notion de « ruissellement » traduisant assez mal les processus physiques de génération de l'écoulement (Musy et Higy, 1998), est de plus en plus souvent abandonnée au profit de la notion « d'écoulement ». Ainsi, le terme « ruissellement » désigne communément tout à la fois le ruissellement sur les versants et l'**écoulement rapide de crue** (Cosandey, 1990 ; Ambroise, 1998). La part de l'écoulement qui arrive rapidement à l'exutoire d'un bassin versant en constituant des crues se subdivise en trois principaux types d'écoulement : l'écoulement de surface (*overland flow*), l'écoulement de subsurface (*Subsurface flow*) et l'écoulement souterrain (*Groundwater flow*). Ici on n'abordera que le premier type c'est-à-dire "écoulement en surface". Il correspond dans notre cas à un refus de l'eau par le sol se saturant depuis la surface, appelé également ruissellement hortonien. Celui-ci est prépondérant dans le secteur d'étude.

La définition du **bassin versant** (qui nécessite d'être clarifiée ici dans cette partie du chapitre) et la description des processus de production d'écoulement sont données en Annexe A5.

3.5.2. Observations et mesure de l'écoulement

Rappelons que l'objectif visé à cette échelle du bassin versant est de déterminer une proportion optimale de surface aménagée (par type d'aménagement) à l'échelle d'un bassin pouvant significativement réduire l'écoulement à l'exutoire et par suite de dégager une relation liant cette proportion aménagée au coefficient d'écoulement et aux autres caractéristiques hydrologiques des bassins. Pour cela, le protocole a consisté à réaliser des banquettes

progressivement en ajoutant chaque année une surface aménagée sur celle qui existe déjà. Le même protocole d'aménagement a été mis en place et suivi pour le sous-solage.

Le site de Tondi Kiboro constitué des petits bassins versants juxtaposés (cf. Figure 2.18) est suivi par l'observatoire AMMA-CATCH (<http://www.amma-catch.org>) et bénéficie d'une longue série de mesures hydrologiques dont les premières ont été réalisées lors du programme HAPEX-SAHÉL entre 1990 et 1994 puis lors du programme AMMA-CATCH entre 2004 et 2008. Les mêmes mesures se sont poursuivies de 2009 à 2018. Ce site équipé et suivi depuis plusieurs années nous offre, de ce fait, la possibilité d'effectuer une analyse chronologique des données pluviométriques et hydrométriques.

3.5.3. Dispositif de mesure de l'écoulement : stations hydrométriques

Le dispositif expérimental, destiné à mesurer et comparer l'écoulement avant et après aménagement des bassins, est composé des stations de mesure des débits (cf. Figure 2.18, chapitre 2). Chaque sous bassin étudié est en effet équipé à l'exutoire par une station hydrométrique (Figure 3.19) destinée à déterminer les caractéristiques de l'écoulement. Une station est constituée d'une section de mesure sur seuil, d'une échelle limnimétrique et d'un limnigraphe à flotteur (Thalimèdes, de marque OTT). Ce dernier enregistre chaque minute le niveau d'eau permettant de mesurer en quasi continu la lame d'eau écoulée et déterminer les débits observés consécutivement aux événements pluvieux. La programmation des Thalimèdes et le transfert des données doivent être effectués après chaque pluie (ou à la fin de la saison pluvieuse) à l'aide du logiciel Hydras 3. Pour s'assurer du bon fonctionnement de l'appareil, il est nécessaire de curer régulièrement les stations de mesures, à la main, après l'arrêt de l'écoulement. On règle ensuite la station à une cote de référence (généralement niveau 0).

Les deux variables mesurées sur une station donnée, la cote et la vitesse de l'eau en divers points de la section, permettent de construire la relation de tarage qui permet par la suite de connaître à chaque instant le débit suivant la cote mesurée et d'en déduire le volume écoulé, le coefficient d'écoulement et les temps caractéristiques de l'écoulement événementiel.



Figure 3.19. Exemple d'une station de mesures de l'écoulement (BV TK amont Sud). La flèche montre le sens de l'écoulement.

3.5.3.1. Mesures avant et après réalisation des banquettes (TK amont Nord)

Les bassins de Tondi Kiboro (dits TK) étudiés étant hydrologiquement suivis de 2004 à 2008 sans aménagement, nous considérerons donc les comportements caractérisés durant ces périodes comme ceux correspondants à la réponse hydrologique initiale desdits bassins en état « sans aménagement ».

A l'exutoire du sous bassin TK amont Nord (17,72 ha de superficie), une station hydrométrique a été installée afin d'étudier l'évolution des débits produit par ruissellement. Celle-ci est constituée d'une section de mesure rectangulaire (de largeur = 0,85 m) matérialisée par un ouvrage et d'un limnigraphe à flotteur qui mesure la cote d'eau dans la section sur un intervalle de temps d'une minute. Les mesures ponctuelles de vitesse par jaugeages au moulinet ont permis de déterminer la courbe de tarage de la section, permettant ainsi la détermination des débits et, par intégration dans le temps, des volumes écoulés à l'exutoire et ce, de 2004 à 2018. Depuis 2009, ce bassin TK amont Nord a connu un début d'aménagement par la réalisation d'une dizaine de banquettes. En 2016, on en compte plus d'une soixantaine et la proportion aménagée représente alors environ 9 % de la superficie totale du bassin. Mais, la majorité des travaux d'aménagements en banquettes a été effectuée entre 2010 et 2015. L'analyse hydrologique porte donc sur deux périodes, 2004-2008 (période avant les travaux d'aménagement) et 2009-2018, période après l'aménagement du bassin.

Un réseau de six pluviomètres et deux pluviographes installés sur le bassin a permis de mesurer les caractéristiques de la pluie sur la période d'étude et de calculer le coefficient de ruissellement en rapportant les volumes écoulés sur les volumes précipités sur le bassin.

3.5.3.2. Mesures avant et après réalisation du sous-solage (TK amont Sud)

Des mesures ont été effectuées sur le sous bassin TK amont Sud en 1993 et en 1994 sans aménagement. Il s'en est suivi une longue période de rupture sans mesures. Les observations et mesures n'ont repris qu'en 2013 après la réhabilitation de la station et la re-délimitation de la limite du bassin versant, couvrant une superficie de 4,46 ha (TK amont Sud). En 2013, l'évolution des écoulements a été suivie à l'aide de la station hydrométrique nouvellement réhabilitée et installée à l'exutoire (au même endroit que l'ancienne). Nous considérerons donc le comportement caractérisé durant cette date comme celui correspondant à la réponse initiale dudit bassin en état « sans sous-solage ». A partir de 2014, le bassin a connu un début d'aménagement, celui-ci ne couvrant, à cette date, que 3 % de la superficie totale du bassin. Le protocole d'aménagement est sensiblement identique à celui du bassin TK amont Nord. Il se fait de façon progressive en augmentant chaque année une proportion aménagée sur celle de l'année précédente. On peut néanmoins notifier qu'avant de rajouter l'aménagement d'une nouvelle surface, on reprend d'abord le sous-solage des zones déjà aménagées précédemment. Ce protocole mis en place de 2014 à 2016 a permis de quantifier l'impact cumulé du sous-solage sur l'écoulement à l'échelle du bassin. En 2017, aucune proportion n'a été aménagée à cause du dispositif de mesure d'infiltration installé dans les parcelles. L'analyse hydrologique est effectuée sur deux périodes, 2013, sans traitement par sous-solage, et 2014-2016, avec aménagement du bassin.

3.5.4. Campagnes de jaugeage de la station TK amont Sud

Pour le bassin TK amont Nord, une courbe de tarage de la station était déjà disponible grâce aux jaugeages effectués entre 1991 et 1994. Les mesures ont été reprises entre 2004 et 2010 afin de vérifier la stabilité de cette courbe. Les résultats montrent qu'aucun changement n'a été relevé. Ainsi, nous avons donc utilisé la même équation de tarage pour l'analyse des données hydrologiques sur ce dit bassin.

En revanche, pour le bassin TK amont Sud, à cause de la réhabilitation et de la nouvelle limite du bassin versant, il nous a paru pertinent de reprendre la courbe de tarage de la station. Pour cela, nous avons effectué des campagnes de jaugeage au moulinet de 2014 à 2016.

3.5.4.1. Principe de jaugeage au moulinet

La méthode de jaugeage au moulinet est utilisée pour la mesure de débit instantané du bassin étudié. Son principe repose sur la détermination de champ de vitesse, dans la section transversale de la ravine concernée et le calcul du débit par combinaison et intégration avec la géométrie de la section de mesure. Nous rappelons que la vitesse d'écoulement n'est dans la réalité pas uniforme sur la section. De ce fait, il convient donc d'explorer le champ de vitesse en plusieurs points différents, situés le long des verticales judicieusement réparties et indiquées sur la largeur de la section de mesure. Cette technique s'effectue grâce au moulinet à hélice horizontale fixe. Ce dernier peut être monté sur une perche graduée sur laquelle on lit directement les différentes profondeurs. Pour effectuer la mesure, on dépose la perche au fond de la ravine en béton. On mesure ensuite la vitesse de l'écoulement en divers points de chaque verticale. Le principe de mesure consiste à prendre la précaution de lire systématiquement la cote à l'échelle au début et à la fin de chaque mesure sur une verticale. On note le nombre de tours de l'hélice en fonction du temps (30 secondes dans notre cas) ainsi que l'heure de début et de fin de mesure. On se place toujours sur la même transversale pour réaliser des mesures successives sans interruption pendant la durée de l'écoulement en allant de la rive gauche vers la rive droite de la ravine du bassin TK amont Sud. Les positions des verticales sont clairement indiquées et matérialisées par la peinture sur la passerelle de la section. Les mesures sont généralement effectuées en bas, au milieu et en haut de chaque verticale. On obtient, à chaque point de la verticale et à une profondeur donnée, la vitesse ponctuelle de l'écoulement, V_p , à partir du nombre de tours de l'hélice (nt) par unité de temps, soit la fonction :

$$V_p = f(nt) \quad (3.33)$$

La fonction $f(nt)$ propre du moulinet (étalonnage de l'hélice) est donnée par le constructeur.

Finalement, le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section S de largeur l_s se fait par intégration des vitesses définies en chacun des points de la section de profondeur.

3.5.4.2. Dépouillement des mesures de jaugeage

Pour établir la droite ou courbe de tarage, nous avons traité les données collectées pendant les campagnes de jaugeage de 2014 et de 2016. Les données de 2015 n'ont pas été intégrées car nous doutons de leur qualité pouvant s'expliquer par un problème lié au compteur (type OTT Z30 qui n'affichait pas bien le nombre des tours de l'hélice). Le dépouillement a été réalisé

grâce au logiciel hydraccess (disponible gratuitement en ligne). Il consiste à calculer les paramètres tels que le débit, la section mouillée, le périmètre mouillé, la vitesse moyenne de surface et le rayon hydraulique.

3.5.4.3. Etablissement de la courbe de tarage et estimation des débits

Disposant de la vitesse moyenne de l'écoulement à une hauteur d'eau donnée, on peut calculer pour chaque jaugeage les débits instantanés. Pour une station donnée, le débit Q ($m^3.s$) écoulé est égal au produit de la section mouillée S_m (m^2) par la vitesse moyenne V ($m.s^{-1}$) obtenue perpendiculairement à cette section :

$$Q \text{ (m}^3.s^{-1}\text{)} = S_m \times V \quad (3.34)$$

Quant à la section mouillée S_m , elle s'obtient par la formulation suivante :

$$S_m = l_s * h_e \quad (3.35)$$

Où l_s est la largeur de la section de mesure ($l_s = 64$ cm pour TK amont Sud) et h_e la cote maximale de la surface d'eau libre.

Les Figures 3.20 et 3.21 indiquent les courbes de tarage établies sur la station TK amont Nord et TK amont Sud respectivement. Celles-ci permettent de déduire aisément le débit à l'exutoire.

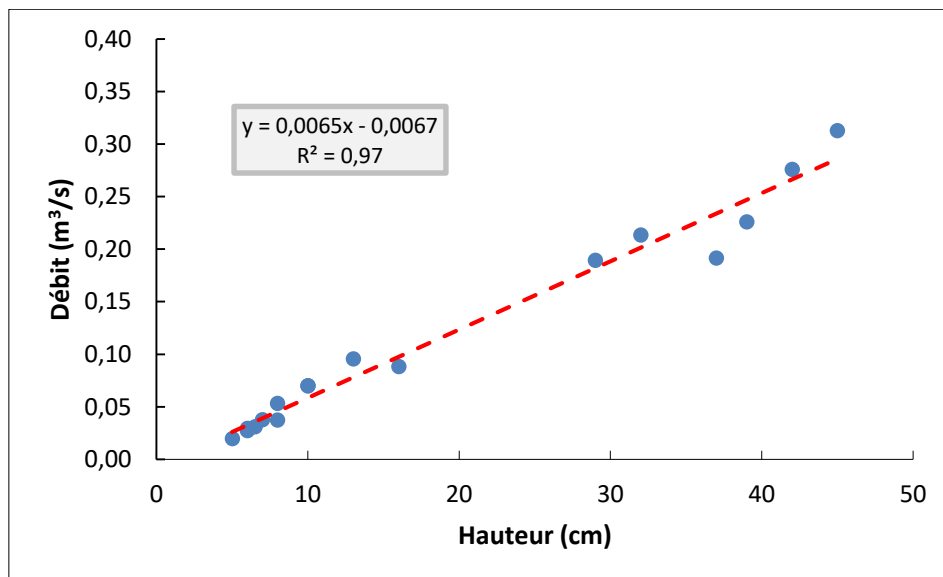


Figure 3.20. Courbe de tarage de la station hydrométrique TK amont Nord (établie sur la base des mesures de jaugeage de 2006).

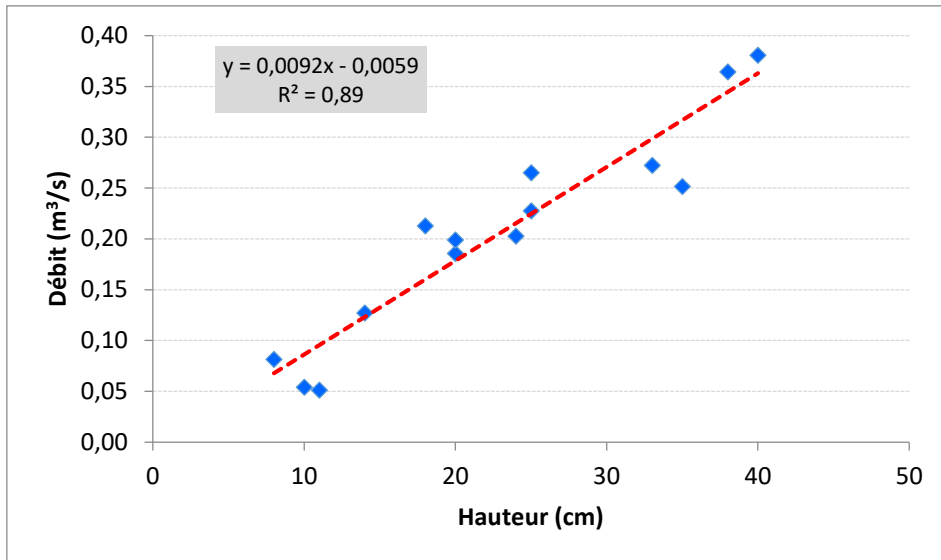


Figure 3.21. Courbe de tarage de la station hydrométrique TK amont Sud.

On tentera dans la partie résultats de mener une analyse comparative des hydrogrammes obtenus avant et après aménagement des bassins versants.

3.5.5. Analyse des mesures de l'écoulement

3.5.5.1. Détermination de la lame écoulée

Nous commençons cette partie en rappelant la signification de quelques notions couramment utilisées en hydrologie. La fonction permettant de transformer le hyétoگرامme de pluie en ruissellement s'appelle **fonction de production**. La **fonction de transfert** permet, quant à elle, de calculer la manière dont le ruissellement est transféré en aval à l'exutoire du bassin, sous forme d'hydrogramme de crue.

La lame ruisselée ou écoulée, Le , souvent exprimée en mm, peut être déterminée par le rapport du volume ruisselé Ve à l'exutoire d'un bassin versant à la surface S du bassin soit la formule :

$$Le = \frac{Ve}{S} \quad (3.36)$$

3.5.5.2. Méthode de calcul du coefficient d'écoulement

Disposant des données de débits, le volume écoulé par averse s'obtient en intégrant les débits instantanés sur la durée de l'écoulement.

Le coefficient de ruissellement⁵ événementiel (K_r) se calcule, pour une crue donnée, par le rapport de la lame ruisselée (mm) à la hauteur de la pluie (mm) observée. Le coefficient d'écoulement annuel moyen est défini par le rapport entre le total des lames d'eau écoulées et celui des quantités d'eau précipitées :

$$CE = \frac{\sum Le}{\sum P} \quad (3.37)$$

Ce coefficient d'écoulement annuel (CE) sera utilisé dans cette thèse pour évaluer l'impact des aménagements sur la réduction de l'aptitude au ruissellement de chacun des bassins versants.

3.5.6. Cartographie des indicateurs de l'augmentation du ruissellement

Les bassins versants étudiés ont une occupation des sols typiquement identique. Ils présentent de ce fait la même aptitude à ruisseler, ce qui constitue un avantage pour une étude comparative. Pour cela, nous avons réalisé la cartographie permettant de faire ressortir l'évolution des états de surface qui constituent un bon indicateur de l'augmentation du ruissellement. L'analyse cartographique a été réalisée à l'échelle des petits bassins expérimentaux de Tondi Kiboro.

3.5.7. Analyse des effets d'aménagement à l'échelle des bassins versants

La méthode adoptée pour analyser quantitativement l'efficacité des aménagements à cette échelle spatiale consiste à comparer les comportements des bassins en se basant sur les paramètres mesurés aux exutoires avant et après aménagement. Il est, de ce fait, important de rappeler succinctement les éléments fondamentaux nous permettant simplement de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

3.5.7.1. Comment peut-on analyser le comportement hydrologique d'un bassin ?

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue généralement par l'intermédiaire de l'étude de sa réaction hydrologique face à une sollicitation (la pluie). Celle-ci est mesurée par l'observation de la quantité (ou volume) d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système (Musy et al., 2014). D'où l'importance de comprendre la relation entre la sollicitation sous forme de pluie reçue par le bassin et sa réponse se traduisant à l'exutoire par la variation temporelle du débit. La manière dont réagit le bassin lorsqu'il est soumis à une sollicitation se nomme la *réponse hydrologique*. L'évolution du débit Q en fonction du temps t constitue un

⁵ Afin d'éviter toute confusion dans l'usage, on utilise le terme coefficient de ruissellement lorsqu'on raisonne à l'échelle d'une averse. Le terme de coefficient d'écoulement est employé lorsqu'on parle de l'ensemble des événements pluvieux à l'échelle annuelle et du bassin versant.

hydrogramme de crue. En effet, suite à une pluie tombant sur un bassin versant, la réponse de ce dernier, en une section de mesure (ou de contrôle) donnée, peut être nulle (absence de l'écoulement) ou positive (écoulement observé à l'exutoire). Il existe par ailleurs plusieurs facteurs liés entre eux, et qui peuvent influencer le comportement hydrologique d'un bassin versant. Il s'agit des facteurs externes au milieu tels que les précipitations (répartition, intensité et durée de la pluie) et les conditions climatiques. La morphologie (forme, dimension...), les propriétés physiques du versant (nature des sols, végétation), la structuration du réseau et les conditions initiales d'humidité constituent des facteurs internes.

3.5.7.2. Etude d'impact des aménagements à l'échelle des bassins versants

Dans cette étude, on se propose d'analyser la réponse des bassins en fonction de l'évolution des proportions aménagées. Il s'agit d'évaluer les effets des deux types d'aménagement sur l'évolution des lames écoulées et du coefficient d'écoulement annuel en fonction de la pluie et de la surface aménagée. On vise plus précisément à faire une analyse comparative à l'échelle de l'événement pluvieux puis à l'échelle saisonnière (annuelle) afin de mieux comprendre l'impact hydrologique de chaque type d'aménagement.

L'analyse du coefficient d'écoulement et des autres caractéristiques (hydrogramme, temps caractéristiques) permettra de caractériser l'effet de chaque proportion aménagée sur les comportements hydrologiques d'un même bassin versant, et de comparer ensuite les bassins versants aménagés entre eux.

Conclusion partielle

Un dispositif expérimental de mesure de l'humidité du sol et de l'écoulement a été mis en place sur diverses échelles spatiales (ponctuelle, parcelle et bassin versant).

A l'échelle ponctuelle, la méthode de sondage neutronique étalonnée grâce aux mesures gravimétriques est utilisée dans ce travail pour évaluer l'efficacité des ouvrages en termes d'infiltration et d'amélioration des conditions hydriques des sols. Les méthodes d'estimation des erreurs liées aux variables déterminées indirectement (teneur en eau volumique, stock hydrique et ses variations) à partir de cette méthode ont été également exposées dans ce chapitre.

La conductivité électrique apparente mesurée par EM38 est une méthode indirecte permettant de cartographier la rétention d'eau des sols. Elle est utilisée pour évaluer l'efficacité des ouvrages antiérosifs à l'échelle parcellaire. Un protocole expérimental a été ainsi mis en place

pour mesurer la CEa des zones aménagées à l'aide de l'EM38. Les données sont dépouillées et analysées avant leur spatialisation par la méthode d'interpolation spatiale par krigeage. Il existe, néanmoins, une complémentarité évidente entre les deux méthodes : sondage neutronique et conductivité électrique apparente. En effet, l'adoption d'une démarche rigoureuse d'étalonnage de l'EM38, par le biais de sondage neutronique, a permis l'élaboration d'une démarche de cartographie du stock hydrique quantifié à l'échelle de la parcelle. Celle-ci peut permettre de visualiser concrètement sous forme des cartes les variations d'humidité du sol engendrées par la pluie en deux dimensions. Elle peut, dans ce cas, apporter la notion de spatialisation dans les études de suivi hydrique.

Enfin, ce chapitre décrit le protocole de mesure et la méthode d'analyse de l'écoulement nous permettant d'évaluer l'impact des banquettes et du sous-solage sur l'hydrologie des bassins versants. Ainsi, l'approche d'aménagement progressif utilisée sur ces bassins permet de suivre les évolutions concomitantes des surfaces aménagées et du coefficient d'écoulement.

Chapitre 4. Analyse de l'impact des aménagements à l'échelle locale

Dans ce chapitre, sont représentés les principaux résultats découlant des mesures expérimentales et observations réalisées sur le terrain d'étude. Nous abordons ce chapitre en commençant par une brève caractérisation de la pluviométrie des saisons 2016 et 2017 durant lesquelles a été effectué l'essentiel des mesures. Nous tenterons ensuite à mettre en évidence les effets des deux types d'aménagement (banquettes et sous-solage) sur les processus d'infiltration puis sur la dynamique du stock événementiel à l'échelle ponctuelle. Nous examinerons premièrement l'impact des banquettes pour finir avec celui du sous-solage du sol en comparaison avec le témoin.

4.1. Caractérisation de la pluviométrie des saisons 2016 et 2017

On note une différence nette dans le cumul annuel des pluies enregistré sur les deux saisons des mesures. La saison 2017 est largement déficitaire (Tableau 4.1) par rapport à la moyenne interannuelle qui fait environ 560 mm. Le nombre de jours des pluies est aussi plus faible. Par ailleurs, les conséquences de la pluviométrie sur le partage entre ruissellement-infiltration peuvent se manifester non seulement en termes de quantité totale précipitée mais aussi par les intensités et la répartition spatio-temporelle des événements.

Tableau 4.1. Cumul pluviométrique et nombre d'averses enregistrées durant les saisons des mesures.

Site TK	Saison 2016	Saison 2017
Cumul saisonnier (mm)	583	365
Nombre de jour des pluies	33	28

4.2. Caractérisation des sols étudiés

4.2.1. Analyse granulométrique des sols des parcelles expérimentales

L'étude de la distribution de la taille des particules de sol constitue un aspect primordial de l'analyse du sol car elle joue un rôle important sur les propriétés hydrodynamiques. Une analyse granulométrique des échantillons prélevés a été effectuée en laboratoire à l'aide du granulomètre à diffraction laser MALVERN. Rappelons qu'au laboratoire, une fois les échantillons séchés à l'étuve, passés sur un tamis à maille carré de 2 mm, nous avons procédé

à l'analyse de la distribution des particules en volume (diamètre d'une sphère de volume équivalent). La texture du sol est ensuite déterminée, en séparant les fractions des particules selon leur texture : argiles (< 2 µm), limons fins (2-20 µm), limons grossiers (20-50 µm), sables fins (50-200 µm) et sables grossiers (200-2000 µm). Ces analyses ont mis en évidence les éventuelles différences texturales significatives entre la couche supérieure (en surface) et les horizons en profondeur. Les Tableaux 4.2 à 4.4 présentent les résultats de l'analyse granulométrique (exprimés en % volumique) effectuée en fonction de la profondeur de prélèvement dans les différentes parcelles expérimentales (témoin, banquettes et sous-solage). En effet, la texture est un paramètre important en cela qu'elle contribue à déterminer la capacité d'infiltration et de stockage d'eau, l'évaporation ou encore l'encroûtement des sols.

Tableau 4.2. Pourcentage volumique de la texture des sols prélevés du témoin.

Profondeur (cm)	Argiles < 2 µm	Limons fins 2-20 µm	Limons grossiers 20-50 µm	Sables fins 50-200 µm	Sables grossiers 200-2000 µm
10	4,89	21,92	21,03	32,53	19,67
20	5,26	22,28	22,14	33,40	16,94
30	5,16	21,17	21,00	34,77	17,92
40	5,19	22,11	22,46	34,29	15,97
50*	3,34	18,51	15,17	25,09	37,89
60*	3,40	17,87	14,05	22,48	42,20
80*	3,44	18,34	15,61	21,30	43,42

*échantillons de sol remanié (prélevés avec la tarière)

Tableau 4.3. Pourcentage volumique de la texture des sols prélevés en fonction de la profondeur dans les banquettes.

Profondeur (cm)	Argiles < 2 µm	Limons fins 2-20 µm	Limons grossiers 20-50 µm	Sables fins 50-200 µm	Sables grossiers 200-2000 µm
10	4,39	18,16	13,38	33,89	30,19
20	5,80	26,50	24,01	28,40	15,26
30	5,29	23,92	21,17	31,63	17,99
40	5,17	22,38	20,88	34,05	17,48
50	4,84	20,61	18,33	32,44	23,79
60	4,87	22,55	19,19	30,89	22,50
70	5,10	23,06	20,18	32,34	19,33
80	5,35	23,78	17,59	26,86	26,44
90*	4,01	20,25	15,55	25,69	34,50
100*	4,75	21,05	15,86	15,85	42,49

*échantillons de sol remanié (prélevés avec la tarière)

Tableau 4.4. Pourcentage volumique de la texture des sols des surfaces de sous-solage.

Profondeur (cm)	Argiles < 2 μm	Limons fins 2-20 μm	Limons grossiers 20-50 μm	Sables fins 50-200 μm	Sables grossiers 200-2000 μm
10	6,42	25,10	20,11	29,93	18,41
20	5,50	23,64	21,94	32,87	16,11
30	7,33	25,66	20,12	31,25	15,66
40	5,21	22,04	19,40	36,23	17,13
50	4,59	19,27	16,89	33,68	25,57
60	2,74	13,03	10,73	29,29	44,17
70	3,39	14,55	12,16	31,01	38,93
80*	3,39	19,37	15,28	22,68	39,28
90*	-	-	-	-	-
100*	4,74	21,50	15,85	24,93	32,99

*échantillons de sol remanié (prélevés avec la tarière)

Il ressort de ces tableaux la prédominance des éléments sableux fins et grossiers sur toutes les parcelles et ce, de 10 cm à plus de 100 cm de profondeur. Autrement dit, les parcelles présentent une texture sablo-limoneuse associant souvent des graviers plus ou moins grossiers. Les proportions (% volumique) des sables fins sont en effet les plus élevées dans toutes les parcelles. La Figure 4.1 illustre (pour le témoin, les banquettes et le sous-solage) la distribution des particules à 10 cm (a), 30 cm (b), 50 cm (c) et 80 cm (d) de profondeur. On remarque qu'à partir de 50 cm de profondeur, l'allure des courbes est devenue bimodale. En plus, sur tous les échantillons analysés, le taux des argiles est faible et compris entre 2 et 7 %. Dans le même contexte, Courault et al. (1990) ont souligné que sur le même plateau de Tondi Kiboro le profil est très sableux jusqu'à 1,4 m avec un taux d'argiles + limons inférieurs à 10 %.

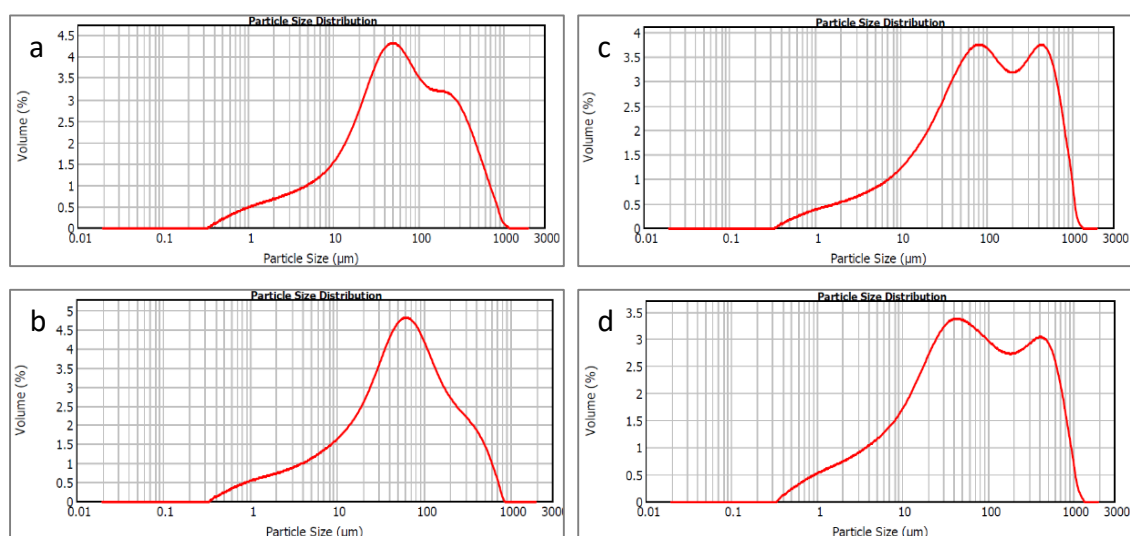


Figure 4.1. Distribution des particules en fonction des profondeurs de mesures sur le témoin (a), les banquettes (b et d) et le sous-solage (c).

4.2.2. Analyse des données de la densité apparente des sols étudiés

La méthode au cylindre utilisée dans cette étude a permis d'analyser la densité apparente des sols des sites étudiés. L'examen des résultats obtenus dans les parcelles du sous-solage, les banquettes et sur le témoin révèle que la densité apparente (D_a) varie en moyenne de 1,3 à 1,7 ; de 1,5 à 1,6 et enfin de 1,4 à 1,7 respectivement pour ces trois types des parcelles. C'est en effet un paramètre très variable en fonction de la texture, de la structure, mais aussi de la minéralogie. Sa connaissance peut être utile pour déterminer ou orienter les travaux de préparation du sol tels que le labour, le sous-solage entre autres. Ces résultats montrent que les sols de nos sites expérimentaux ne sont pas fortement hétérogènes sur le profil vertical d'un point de vue de la masse volumique (Figure 4.2).

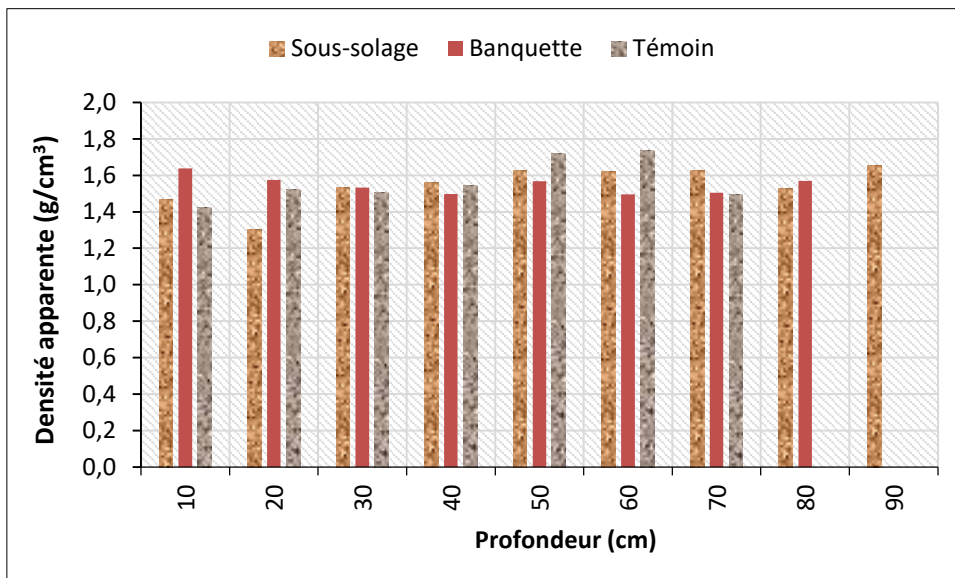


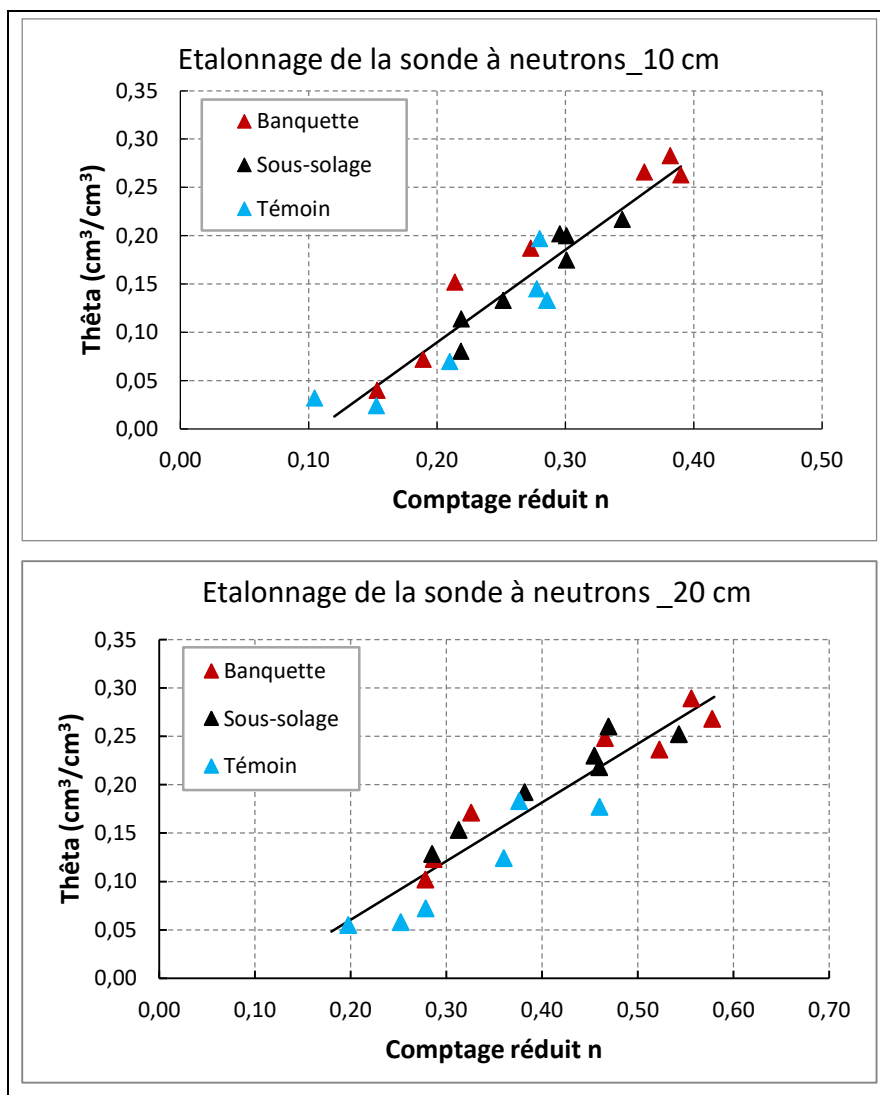
Figure 4.2. Densité apparente en fonction de la profondeur de mesure sur les sites étudiés.

4.3. Résultats de l'étalonnage de la sonde à neutrons

4.3.1. Analyse des droites d'étalonnage

L'analyse des échantillons prélevés (méthode gravimétrique) aux mêmes profondeurs que celles auxquelles sont effectuées les comptages neutroniques a permis d'établir des relations d'étalonnage de la sonde. Plusieurs couples (CR , θ) déterminés à partir de ces méthodes ont été mis en relation (Tableau 4.5). A cause de l'influence des neutrons perdus en surface, nous avons opté pour des étalonnages séparés en surface. La Figure 4.3 présente le résultat des droites d'étalonnage obtenues. Elles correspondent aux profondeurs d'étalonnage 10 cm, 20 cm, 30 cm et enfin à partir de 40 cm où nous avons réalisé une seule droite d'étalonnage valable pour les

autres profondeurs. L'analyse met en évidence des valeurs de teneur en eau volumique (θ) linéairement corrélées aux comptages réduits (CR). Les coefficients de détermination (r^2) sont élevés ($0,88 < r^2 < 0,91$). On peut donc déduire que les comptages réduits (CR) expliquent 88 à 91 % de la variance observée de la teneur en eau. On constate cependant une légère dispersion des points autour des droites d'étalonnage. Les covariances (COV) calculées sont comprises entre 0,004 et 0,008. Les pentes sont assez fortes surtout pour la droite d'étalonnage à 10 cm où elle est plus importante (0,96). La plus faible (de l'ordre de 0,61) s'observe au niveau de l'étalonnage à 20 cm de profondeur. L'allure des nuages des points assez bien alignés justifie la linéarité de la corrélation entre les variables. De plus, en comparant les sites, on constate, à partir de l'étalonnage à 30 cm de profondeur, une très nette différence de teneur en eau échantillonnée entre les parcelles aménagées (sous-solage, banquettes) et le témoin avec des valeurs de θ et de CR plus faibles. Ceci traduit la faible rétention d'eau du sol nu par rapport aux sols aménagés déjà visible avec les étalonnages.



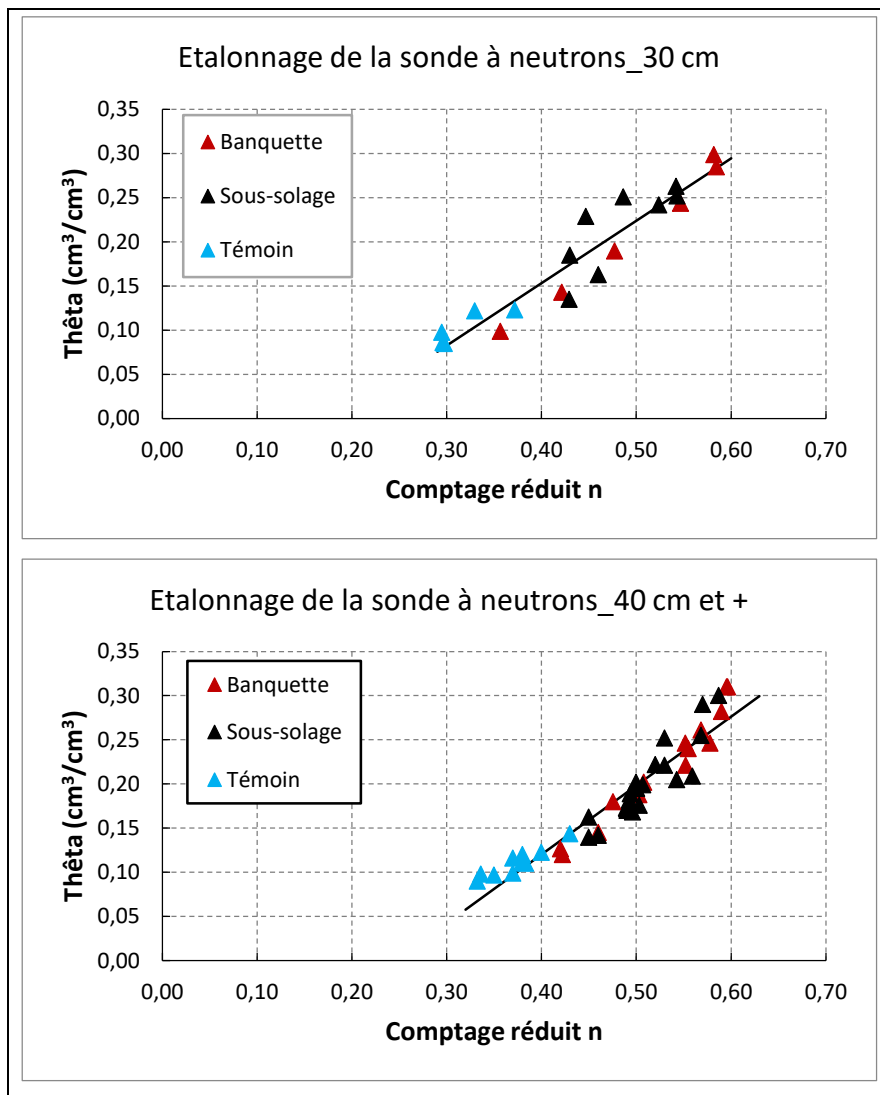


Figure 4. 3. Droites d'étalonnage de la sonde à neutrons à différentes profondeurs.

A partir de ces régressions linéaires, nous obtenons une équation des droites d'étalonnage qui s'écrit comme suit :

$$\theta = a CR + b \quad (4.1)$$

L'utilisation de cette équation permet de transformer aisément les comptages réduits n mesurés sur diverses profondeurs en teneur en eau volumique (θ). Ces relations d'étalonnage sont aussi utilisées pour estimer l'erreur commise sur la mesure de l'humidité du sol, sur le stock et sa variation.

4.3.2. Analyse des erreurs d'étalonnage

Sur le terrain, chaque mesure expérimentale, aussi bien sur les mesures gravimétriques que sur les comptages neutroniques, est entachée d'une certaine erreur. L'erreur commise lors de

l'étalonnage de la sonde sur le terrain est liée aux régressions linéaires réalisées. Un ajustement linéaire peut permettre d'estimer sans biais la teneur en eau volumique (Vandervaere et al., 1994). Ainsi, les différentes erreurs commises sur l'étalonnage de la sonde à neutrons ont été calculées et les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5. Paramètres statistiques de l'étalonnage de la sonde à neutrons.

	Profondeur (cm)			
	10	20	30	40 & +
<i>m</i>	21	20	19	47
<i>Cov</i>	0,006	0,008	0,007	0,004
Pente (a)	0,96	0,61	0,71	0,78
Intercept (b)	- 0,10	- 0,06	- 0,13	- 0,19
R²	0,89	0,88	0,91	0,91
S²(e)	0,0007	0,0007	0,0005	0,0004
S²(a)	0,0057	0,0027	0,0030	0,0014
S²(b)	0,0004	0,0004	0,0006	0,0003
S(a)	0,0754	0,0517	0,0551	0,0373
S(b)	0,0197	0,0203	0,0244	0,0181
S(a, b)	- 0,0015	- 0,0010	- 0,0013	- 0,0007

Ces paramètres statistiques permettent d'apprécier la qualité de l'étalonnage de la sonde à neutrons et de quantifier les erreurs sur la teneur en eau volumique, le stock et les variations de stock. En conditions expérimentales, les erreurs de mesure sur la variable comptage réduits sont petites. En tenant compte du nombre des couples *m*, la variance de l'erreur $V(u)$ sur le comptage réduit influence le calcul de l'estimation de la pente. La variance résiduelle $S^2(e)$ sur les droites est faible comme l'indique ce Tableau 4.5.

4.4. Résultats acquis sur le témoin

4.4.1. Analyse de l'infiltration sur le sol nu

La Figure 4.4 représente la dynamique des profils d'humidité mesurés au cours de la saison pluvieuse 2017. En surface, la teneur en eau varie de $0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Celle-ci peut atteindre $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 (\pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3)$ à 20 cm de profondeur et au milieu de la saison (juillet-août). Quant au front d'infiltration, il se limite à 50 cm comme l'ont

déjà démontré des travaux antérieurs (Seghieri et al., 1994 ; Galle et al., 1997). Au de-là de cette profondeur, la teneur en eau volumique reste quasiment constante. Cette tendance est observée sur tous les tubes d'humidité de la parcelle témoin.

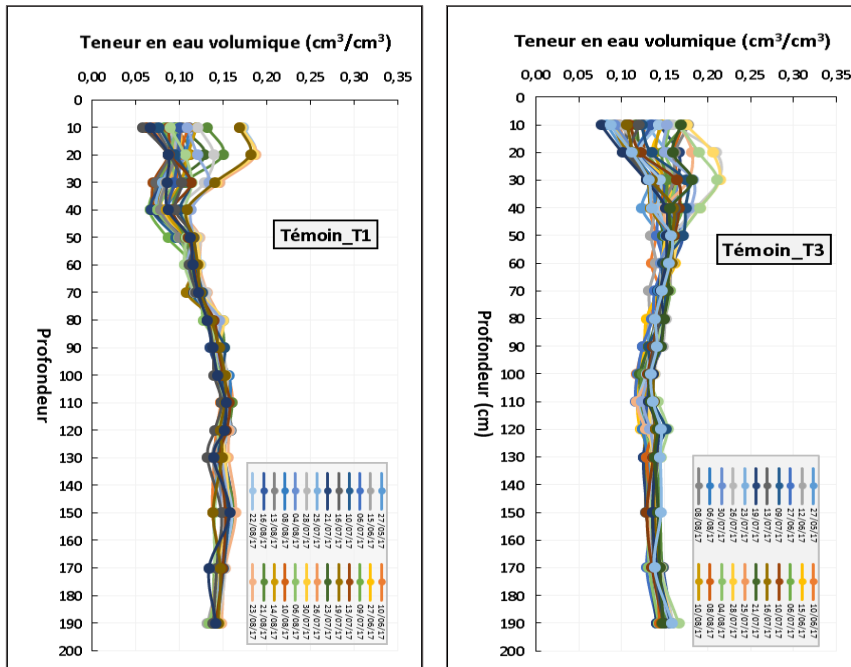


Figure 4.4. Evolution de l'infiltration sur le sol nu pendant la saison 2017.

4.4.2. Dynamique hydrique sur le témoin

La Figure 4.5 illustre la dynamique hydrique de la parcelle témoin. On remarque des variations de stock d'eau assez faibles, d'amplitude maximale limitée à 50-60 mm environ. L'analyse montre cependant que le stock augmente progressivement pour atteindre un pic de moins de 240 mm (valeur maximale) au milieu de la saison des pluies. En plus, on constate une faible fluctuation du stock avec la pluie, ce qui traduit l'effet de l'encroûtement du sol.

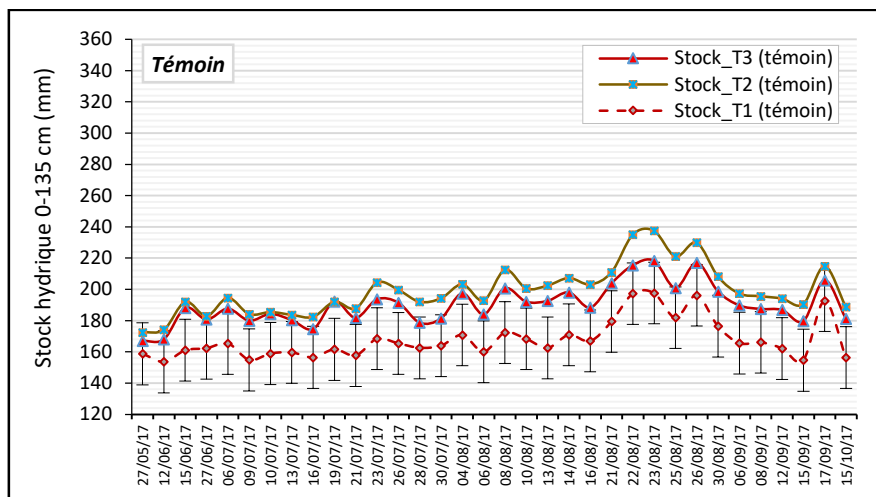


Figure 4.5. Evolution de la dynamique du stock hydrique dans la parcelle témoin.

Les barres représentent les incertitudes sur les valeurs estimées du stock, ici représentées pour un seul tube, pour des raisons de clarté.

4.4.3. Relation pluie-variations du stock dans le sol nu

La Figure 4.6 montre les variations événementielles de stock hydrique (ΔS) en fonction de la pluie sur la parcelle témoin. Ce sont des valeurs moyennes des variations de stock calculées à partir des profils de teneur en eau mesurés avant et après chaque pluie (saison 2017). D'après l'analyse de cette figure, on remarque que le gain en mm d'eau retenue sur ce type de sol encroûté apparaît nettement faible par rapport aux quantités des pluies tombées. Cette faible capacité de rétention d'eau du sol favorise le ruissellement. La lame d'eau stockée pendant l'événement pluvieux est faible et reste limitée dans les 60 premiers cm du sol, ce qui peut favoriser sa reprise évaporatoire rapide durant les jours secs sans pluie.

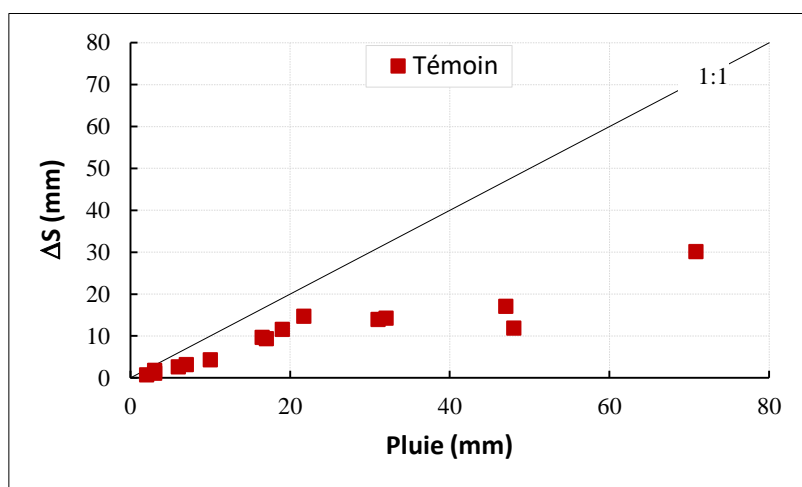


Figure 4.6. Valeurs moyennes (des trois tubes) des variations de stock hydrique à l'échelle locale de la parcelle témoin.

4.5. Impact des banquettes sur le comportement hydrologique des sols encroûtés

4.5.1. Fonctionnement et effets des banquettes sur la rétention d'eau en surface

L'observation du terrain révèle quelques dommages des banquettes liés aux fortes pluies et au piétinement des animaux. Cependant, après une durée d'observation de huit ans (de 2009 à 2017), les banquettes sont encore dans un état de fonctionnement satisfaisant. Dans ce contexte, Descroix et al. (2012) notent par ailleurs la nécessité d'un entretien annuel des aménagements, indispensable surtout pour les premières années, pour se prononcer sur leur efficacité. Ceci permet d'affirmer que la banquette est une technique durable si elle est régulièrement entretenue. Toutefois, au bout d'un certain temps, on constate que les sédiments déposés par le ruissellement et, dans une moindre mesure, par le vent s'accumulent dans les fossés et provoquent leur comblement par des particules grossières. Ce phénomène diminue la capacité et la durée de stockage d'eau du fossé des banquettes. En revanche, il accroît l'infiltration ainsi que l'accumulation des éléments fertilisants du sol (matière organique) dans les fossés. Pendant les fortes pluies, les banquettes peuvent aussi être endommagées, ce qui accélère leur vidange et leur dégradation.

Nonobstant ces dysfonctionnements, les banquettes jouent un rôle important dans la collecte et la rétention d'eau du ruissellement. La Figure 4.7 illustre la capacité de stockage superficielle en eau des banquettes. Elles permettent de doubler, voire de tripler la quantité d'eau en rétention superficielle (Figures 4.7 et 4.8).



Figure 4.7. Stockage d'eau de ruissellement par des banquettes situées en aval d'une bande boisée dégradée (a), d'une bande en dégradation (b) et au milieu d'une surface de sol nu du plateau (c).

Les volumes d'eau en rétention superficielle peuvent se maintenir pendant un à trois jours après l'évènement pluvieux selon les dimensions, la position topographique des banquettes (c'est-à-dire par rapport à la pente de la bande nue) et le volume précipité. Aussi, par leur capacité de retenir l'eau, les banquettes en diminuant les pertes par ruissellement peuvent compenser le

déficit hydrique des sols encroûtés à faible capacité d'infiltration. De ce fait, elles permettent de réactiver le fonctionnement hydrodynamique des sols dégradés et éventuellement le processus de leur régénération. La Figure 4.8 illustre en outre l'effet de la banquette sur la rétention d'eau superficielle sur le sol dégradé en aval d'une bande boisée régulière.



Figure 4.8. Rétention d'eau d'une banquette sur la zone dégradée en aval d'une bande boisée régulière.

4.5.2. Evolution de la teneur en eau volumique (profils hydriques)

La détermination de la lame d'eau infiltrée est basée sur le relevé des profils hydriques avant et après les séquences pluvieuses des saisons 2016 et 2017.

4.5.2.1. Analyse comparative des profils hydriques de 2016 et de 2017

Du fait du retard accusé durant l'installation des tubes en 2016, les mesures en début de la saison (alors que le sol est encore sec) n'ont pas eu lieu au moment souhaité. Par conséquent, seuls les profils hydriques mesurés à partir du mois de juin de cette saison sont présentés. En 2017, en revanche, les mesures de l'humidité ont commencé en mai, au démarrage de la saison des pluies. Cette période est caractérisée par des situations d'humidité du sol très contrastées en milieu non saturé.

La Figure 4.9 présente une étude comparative de l'ensemble des profils obtenus en 2016 et 2017 sur les tubes de la banquette B1. Sont donc représentés sur cette figure les profils hydriques caractérisant les comportements hydriques des sols des banquettes. Ce sont des profils mesurés avant et après les pluies durant la saison pluvieuse. L'analyse comparative montre qu'à l'échelle d'une même banquette les ordres de grandeurs de teneur en eau en surface

diffèrent d'une saison à l'autre. En comparant les tubes T1 et T2 de l'amont de banquette (Figure 4.9 a), on constate que les **valeurs de teneur en eau volumique (θ) varient globalement de 0,12 à 0,35 cm³/cm³**, alors qu'elles sont relativement plus faibles en 2017. Durant cette dernière saison, la teneur en eau varie de 0,05 à 0,20 cm³/cm³ (avec une incertitude de $\pm 0,03$ cm³/cm³) dans les dix premiers cm du sol (Figure 4.9 b).

En aval (tube T3), la teneur en eau maximale mesurée en surface (10 cm de profondeur) ne dépasse pas 0,26 cm³/cm³ en 2016 contre 0,17 cm³/cm³ en 2017. En juin 2016, les teneurs en eau mesurées en amont comme en aval sont du même ordre de grandeurs ($\approx 0,12$ cm³/cm³) dans les 10-20 premiers cm du sol restant quasiment sous l'emprise de l'évaporation. Globalement, les profils mesurés en 2016 apparaissent nettement plus humides que ceux observés en 2017. Cette différence d'humidité peut facilement s'expliquer par la pluviométrie plus humide en 2016 qu'en 2017. Dans les surfaces aménagées, l'humidité varie donc significativement en fonction de la pluviométrie annuelle, du type d'aménagement mais aussi de la profondeur de mesures comme l'ont remarqué Kagambega et al. (2011) au Burkina Faso.

Outre l'augmentation de la teneur en eau en surface, on note aussi celle de la profondeur d'infiltration. L'analyse des profils des tubes T1 et T3 montre que l'infiltration ne dépasse pas 60 cm de profondeur en amont (impluvium) et sur le sol en aval. Au-delà de 70 cm, l'humidité devient plus ou moins stable. Ces résultats mettent en évidence un comportement hydrique presque identique des sols en amont (impluvium) et en aval de la banquette. Cependant, dans le fossé (tube T2) des banquettes, le front d'infiltration descend plus profondément pour atteindre 150 cm sur certains tubes voire même aller jusqu'à la profondeur maximale des mesures (190 cm). En règle générale, on peut donc voir que la technique des banquettes améliore la rétention d'eau du sol suite aux pluies à l'échelle ponctuelle. Ces mesures ont permis d'étudier l'évolution de l'humidité du sol dans les compartiments amont et aval des banquettes. Pour le cas des banquettes B2 et B3, les résultats sont donnés dans l'annexe B1 à l'annexe B3.

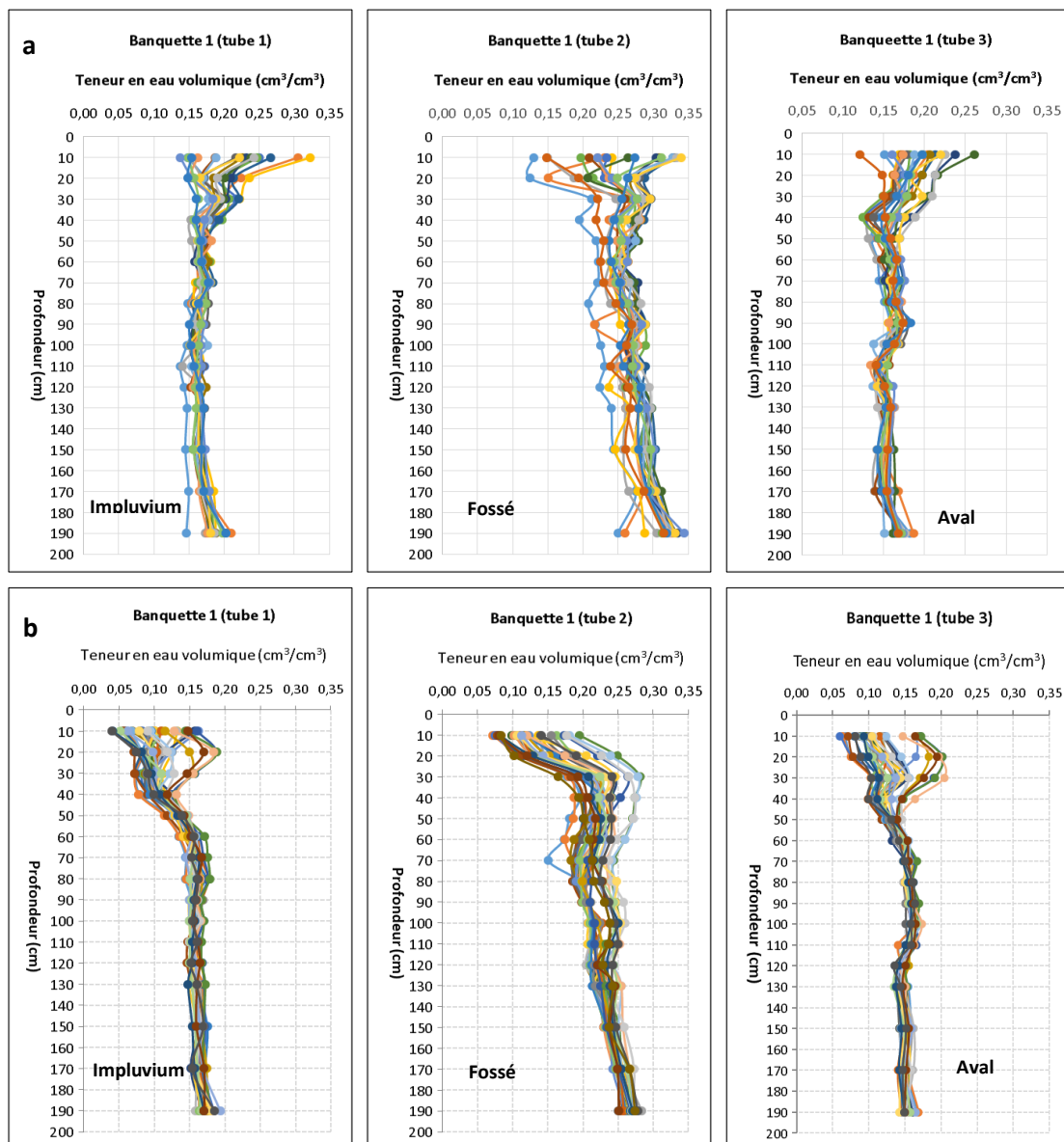


Figure 4.9. Comparaison des profils de teneur en eau et du front d'infiltration mesurés dans trois zones distinctes de la banquette B1 en 2016 (a) et en 2017 (b).

4.5.2.2. Variation de l'infiltration des deux côtés (amont, aval) de la banquette

Afin de mieux comprendre l'effet de l'aménagement en banquettes sur la rétention d'eau du sol, il convient d'examiner les processus d'infiltration spatialisés. Nous considérons donc la banquette comme étant un système composé de trois compartiments fonctionnels et distincts vis-à-vis des processus d'infiltration. Il s'agit de l'amont (tube T1) constitué de l'impluvium, du fossé (tube T2) et du côté aval (tube T3). La Figure 4.10 représente l'évolution des profils de teneur en eau suivant les compartiments amont et aval de la banquette (en 2017). Quant à l'évolution des profils d'humidité en 2016, elle est donnée dans l'Annexe B1.

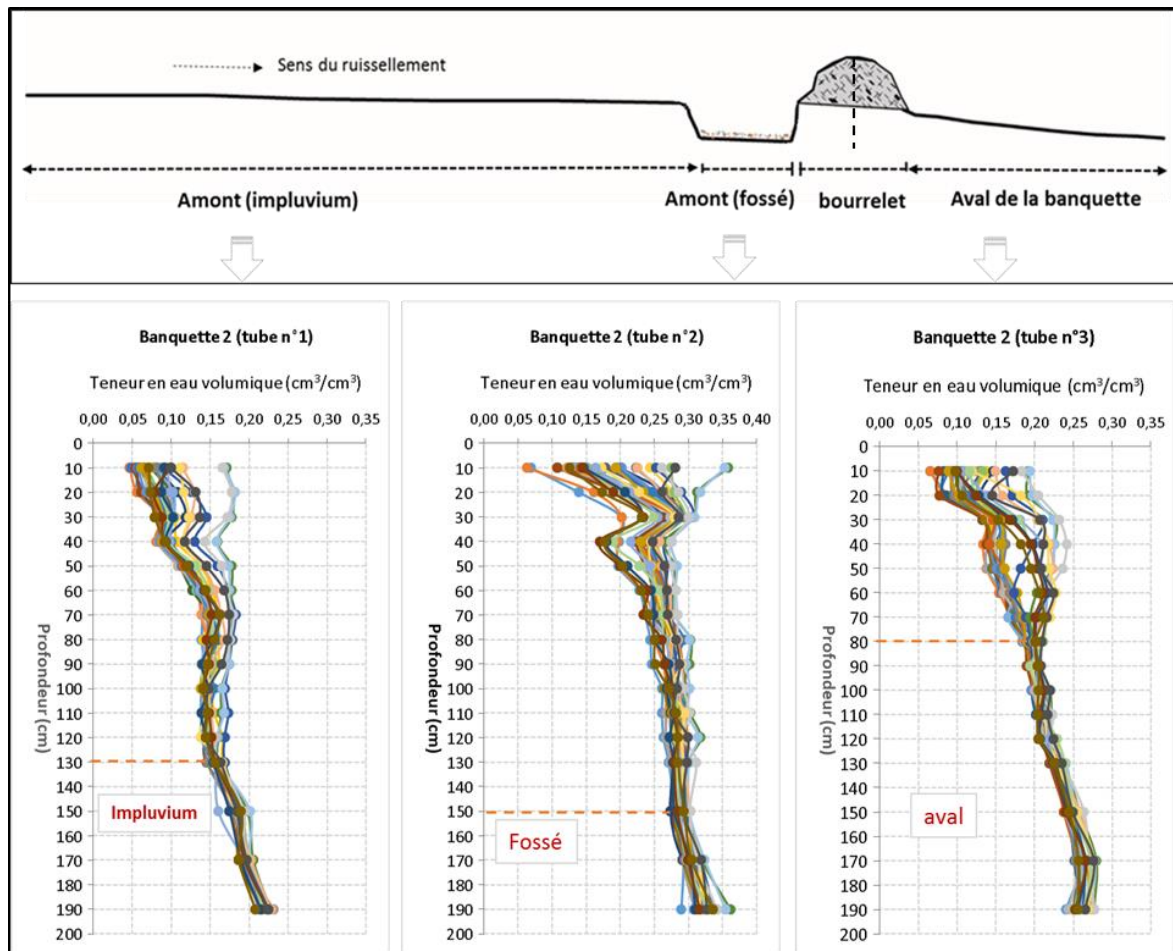


Figure 4.10. Représentation schématique et profils de teneur en eau volumique mesurés en 2017 selon les compartiments (faciès) d'une banquette (ici banquette B2).

La partie amont des banquettes est constituée des fossés (ou cuvettes plus l'impluvium) creusés dans le but de collecter le ruissellement. Ils sont alimentés en eau du ruissellement par des collecteurs d'eau dits "impluvium" des banquettes. Mais ce ruissellement alimentant la banquette ne se répartit pas de façon homogène. Une forte concentration d'eau s'observe ainsi dans le fossé pouvant avoir de l'influence sur son drainage en profondeur. Le retrait de la quantité d'eau retenue en surface se fait de façon progressive après chaque pluie d'où l'intérêt de comparer cette technique avec le sous-solage ayant un comportement hydrique différent (cf. § 4.7.2).

L'analyse des profils présentés sur cette figure montre une dynamique saisonnière de la teneur en eau volumique, du front d'infiltration et la répartition des flux hydriques dans la parcelle. En effet, lors d'une pluie, l'eau en s'accumulant en amont s'infiltrer efficacement comme en témoigne le front d'infiltration pouvant descendre jusqu'à 130 cm dans l'impluvium (tube T1) et plus de 150 cm dans le fossé (tube T2). Les études de Galle (1991) ; Seghieri et al. (1996) ;

Peugeot (1995) ont rapporté que l'infiltration se limite à 50 cm de profondeur sur ce type de sol encroûté non aménagé. Mais grâce aux banquettes le front d'infiltration fait plus que tripler, ce qui est remarquable en termes de gain apporté par l'aménagement.

Par contre, en aval, l'infiltration ne dépasse pas 80 cm (T3), soit une augmentation de 30 cm par rapport aux profils mesurés antérieurement (Seghieri et al., 1996) sans banquettes. Ceci peut s'expliquer par l'effet latéral du fossé et probablement aussi par l'influence des banquettes situées en aval de celles qui ont été suivies. Comparativement, les teneurs en eau observées en aval sont deux fois plus faibles que celles de l'amont, ce qui témoigne du rôle fondamental joué par le bourrelet du fossé dans le fonctionnement hydrologique des banquettes. Cet impact positif mais ponctuel apparaît visiblement identique pour toutes les banquettes étudiées en 2017.

De façon résumée, l'examen de cette figure met en évidence les constats ci-après :

- les variations de teneur en eau volumique (aussi bien en amont qu'en aval de la banquette) sont plus importantes en surface qu'en profondeur ;
- le fossé a enregistré des valeurs de teneur en eau plus élevées (plus de $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) en comparaison avec l'impluvium (où $\theta \text{ maxi} = 0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) ;
- le front d'infiltration est remarquablement plus profond en amont qu'en aval des banquettes.

Pour finir, nous retenons donc que la réponse hydrique du sol diffère au sein d'une même banquette et d'une banquette à l'autre (cf. Annexe B). L'amélioration de la capacité de rétention d'eau diffère aussi suivant les entités des banquettes. Dans ce contexte, certaines banquettes reçoivent plus d'apports en eau de ruissellement que d'autres. La taille différente des banquettes intervient également dans la durée et la capacité de stockage d'eau en surface. Ce qui peut jouer un rôle non négligeable sur l'infiltration. On peut finalement dire que la technique des banquettes permet de réduire efficacement le ruissellement. Mais les banquettes sont par conséquent exposées aux risques de comblement, de débordement et des ruptures sous l'action des eaux de ruissellement lors des fortes pluies.

4.5.2.3. Effet des banquettes sur l'évolution de la teneur en eau volumique

4.5.2.3.1. Analyse des résultats à l'échelle mensuelle

Les Figures 4.11 et 4.12 montrent les variations mensuelles du profil de la teneur en eau et du front d'infiltration des banquettes et d'une surface témoin non aménagée, pour les mois caractéristiques de la répartition des pluies au Sahel. Ainsi, le mois de juin marque le début de

l'installation de la saison pluvieuse tandis que les mois de juillet et août sont les mois où se concentre le maximum des précipitations. Enfin, le mois d'octobre marque la fin de la saison.

On constate qu'en début (juin) comme en fin (octobre) de la saison des pluies 2017, les valeurs de teneur en eau volumique sont du même ordre de grandeur (environ $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) dans les premiers dix (10) cm du sol (avec une incertitude $S(\theta) = \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). On note cependant, une valeur de teneur en eau d'environ $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \pm 0,03$ pour la banquette 3 (B3) représentée dans l'Annexe B4. Mais une nette différence s'observe à partir de 30 cm de profondeur où la teneur en eau volumique (θ) a atteint la valeur de $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dans les banquettes alors qu'elle reste autour de $0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 (\pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3)$ sur la surface témoin. Cette différence de teneur en eau se maintient durant les deux mois (juillet et août) les plus pluvieux de l'année. En surface (10 cm de profondeur), la teneur en eau croît de $0,07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à une valeur maximale comprise entre $0,20$ et $0,36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur les banquettes alors qu'elle varie de $0,08$ à $0,18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur la parcelle témoin. La teneur en eau maximale sur cette dernière est de $0,26 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (tube 3 de la Figure 4.12). Elle s'observe de 20 à 30 cm de profondeur. Ces résultats montrent que les banquettes améliorent sensiblement les conditions hydriques des sols encroûtés en stockant un volume d'eau bien plus important entre les événements pluvieux.

A la fin de la saison (durant le mois d'octobre), l'humidité volumique diminue rapidement sur les banquettes. Un autre constat plus frappant de l'impact des banquettes est l'accroissement de la profondeur du front d'infiltration. Entre juin et juillet, la profondeur du front d'infiltration ne dépasse pas 80 cm (tube 2 de la banquette 1) alors qu'il se situe à plus de 110 cm sur le tube 2 de la banquette 2 (B2). Le maximum d'infiltration s'observe pendant le mois d'août, très pluvieux. Ainsi, les banquettes favorisent l'infiltration lors des pluies et ce, jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 1,90 m soit plus du double de ce qui s'observe sur le sol nu. Par ailleurs, les barres d'erreur horizontales représentées sur les graphes correspondent aux incertitudes des mesures de l'humidité volumique. En effet, pour gagner en clarté, nous avons seulement représenté les incertitudes sur les valeurs des profils extrêmes (profils min et max) de la saison. En moyenne, ces incertitudes $S(\theta)$ varient de $\pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en surface (10-20 cm de profondeur) à $\pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en profondeur, à partir de 30 à 190 cm.

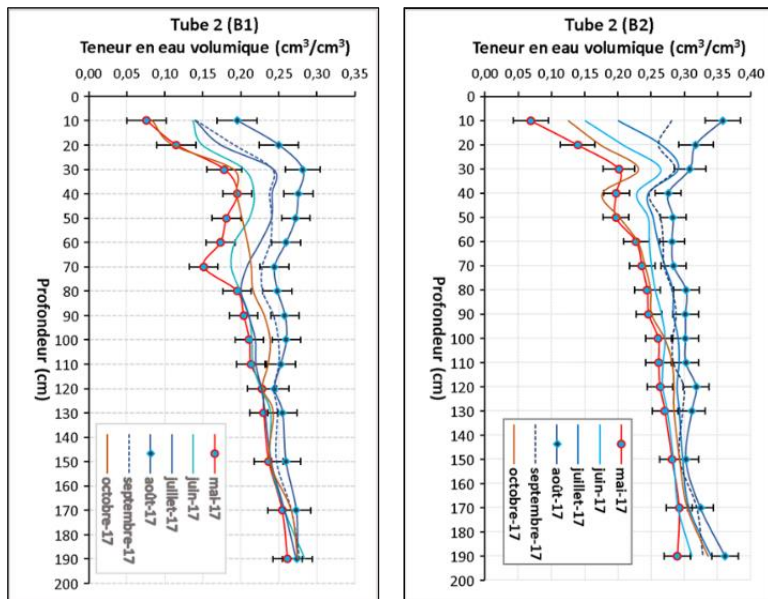


Figure 4.11. Evolution de la teneur en eau volumique et du front l'infiltration sur les banquettes (B1 et B2).

Sont représentées sur la figure les valeurs minimales et maximales (échelle mensuelle) des teneurs en eau mesurées dans le cas des banquettes B1 et B2. Les barres d'erreur horizontales correspondent aux incertitudes sur θ calculées par profil et par profondeur. Elles font environ la même largeur pour tous les autres profils.

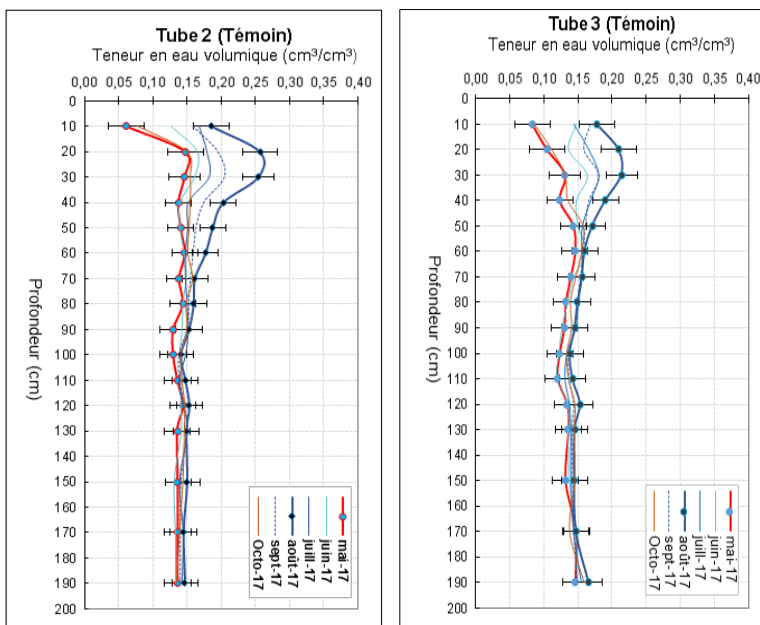


Figure 4.12. Evolution de la teneur en eau et du front l'infiltration sur la parcelle témoin.

Les barres d'erreur horizontales correspondent aux incertitudes sur θ calculées par profil et par profondeur. Elles font environ la même largeur pour tous les profils hydriques mesurés sur les tubes du témoin.

4.5.2.3.2. Comparaison des banquettes et du témoin (échelle événementielle)

A l'échelle de l'averse, l'effet de l'aménagement en banquettes est encore plus visible. La Figure 4.13 présente en détail, pour deux pluies de quantités différentes, les variations du profil de teneur en eau et de la profondeur d'infiltration dans une banquette (B3) et une surface témoin. Ce sont des profils mesurés avant et après les averses de 15 mm et 27 mm survenues respectivement le 19 juillet et le 26 août 2017. Entre le 17 juillet et le 26 août, la teneur en eau mesurée en surface croît de 0,14 à 0,29, soit une augmentation de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dans la banquette. Par contre, elle ne varie que de 0,09 à 0,17, soit une différence de $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur le témoin. Par ailleurs, avec la pluie de 19 juillet (15 mm), le front d'infiltration dans la banquette est de 70 cm tandis qu'il ne dépasse pas 40 cm de profondeur sur le témoin. Au milieu de la saison, plus précisément le 25 et le 26 août (dates des mesures avant et après pluie de 27 mm respectivement), le front d'infiltration a atteint la cote du fond du tube alors que sur le sol nu, il reste autour de 55 cm (Figure 4.13 b). Ces résultats illustrent de façon claire l'effet de l'aménagement en banquettes à l'échelle de l'événement pluvieux (Figure 4.13 a). Cette technique a eu donc pour impact positif l'augmentation de l'infiltration des sols encroûtés à forte aptitude au ruissellement. En plus, il est constaté que sous le fossé de la banquette, l'infiltration peut représenter plus de quatre fois l'infiltration sur le sol nu.

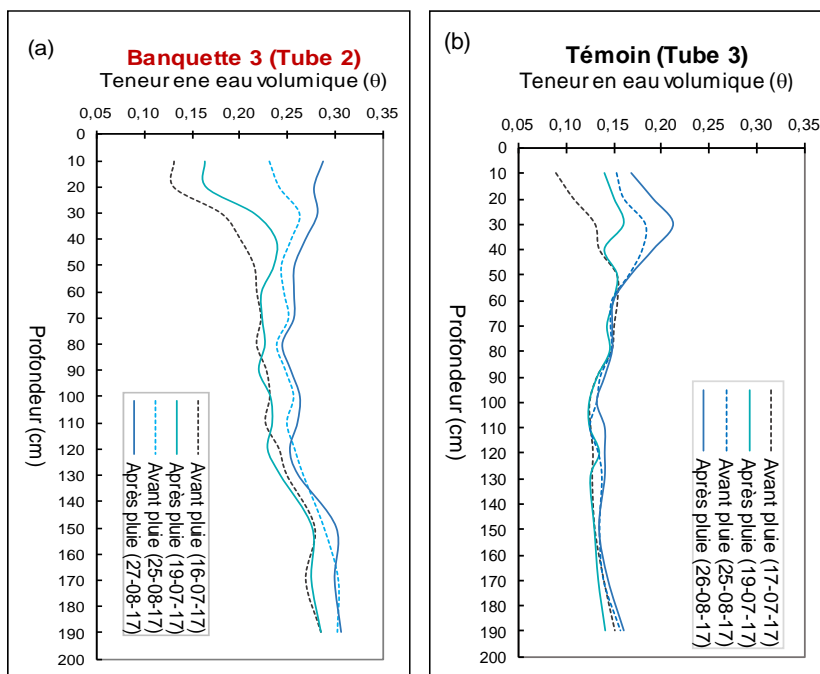


Figure 4.13. Dynamique événementielle du profil hydrique dans une surface en banquette (B3) et sur le témoin.

Sont représentés sur cette figure des profils avant et après deux pluie enregistrées en 2017.

4.5.2.4. Impact des banquettes sur le stock hydrique (échelle ponctuelle)

La tranche de sol 0-135 cm de profondeur a été retenue pour les calculs du stock hydrique. Par ailleurs, l'entrée dans le système des banquettes est constituée des pluies directes auxquelles s'ajoute le ruissellement. Le suivi du stock est donc mené en lien avec la pluviométrie.

❖ Evolution du stock en amont du bourrelet

La Figure 4.14 présente l'évolution du stock hydrique déterminé en amont du bourrelet des banquettes au cours de la saison 2017. D'après cette Figure, **la disponibilité d'eau dans le sol a significativement augmenté par rapport au témoin**. On remarque, en revanche, une forte fluctuation du stock hydrique suivant les quantités précipitées. La comparaison des tubes T1 et T2 des différentes banquettes montre des valeurs de stock nettement plus élevées dans les fossés (Figure 4.14 "b") que dans l'impluvium (Figure 4.14 "a"). Cette différence peut être due à l'influence de la modification des états de surface. En effet, la capacité d'infiltration du sol peut devenir plus faible sur l'impluvium à cause de l'encroûtement du sol en surface, contrairement au fossé où les croûtes superficielles ont été complètement décapées pendant la construction des cuvettes des banquettes et ne se reconstituent que très lentement. La concentration des eaux du ruissellement et des résidus végétaux dans cette partie de l'ouvrage peut aussi largement contribuer à l'amélioration des conditions d'infiltration. A cela s'ajoute également, dans les années qui suivent, le développement de la végétation pouvant encore favoriser l'infiltration. Un autre élément d'explication concerne le temps de rétention superficielle de l'eau des fossés pouvant durer plusieurs heures (ou même quelques journées) avant de disparaître progressivement par infiltration et/ou évaporation. Ce temps de rétention d'eau superficielle varie selon la taille de la banquette, sa position dans le bassin et en fonction du volume précipité. La banquette 3 (B3) ayant une durée de rétention d'eau dépassant 2 à 3 jours après les fortes pluies illustre parfaitement ce phénomène qui améliore de façon remarquable l'infiltration de telle manière que la quantité d'eau stockée par les banquettes est deux fois plus grande que celle stockée dans un sol nu non aménagé. Il en résulte une modification positive des propriétés hydrodynamiques des sols pouvant donc conduire à la restauration progressive de leur fonctionnement hydrique.

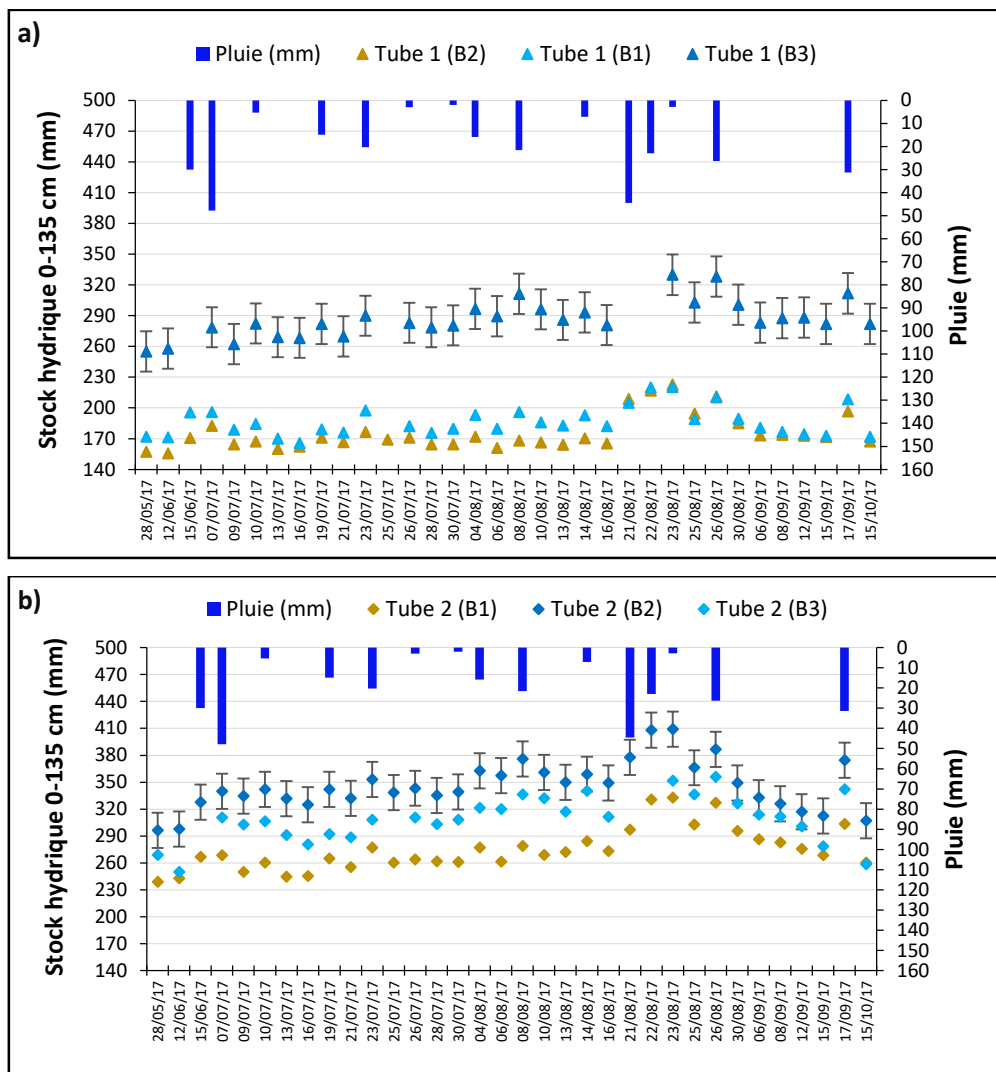


Figure 4.14. Pluies et évolution du stock d'eau (mm) dans la tranche 0-135 cm au cours du temps en amont des banquettes (B1, B2 & B3). Tube T1 (a) et Tube T2 (b).

Les barres d'erreurs verticales représentent les incertitudes liées à l'estimation du stock $s(\hat{s})$. Pour des raisons de lisibilité, nous avons représenté les incertitudes sur le stock d'un seul tube d'humidité.

❖ Evolution du stock ponctuel en aval du bourrelet

En aval du bourrelet, les valeurs du stock sont plus faibles (Figure 4.14). Le stock est de l'ordre de $170 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ (incertitude moyenne des trois tubes T3) au début (juin) à $335 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ au milieu de la saison (août) alors qu'en amont, le stock dépasse $410 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ en août. Cependant, on remarque que la banquette B3 (dont la capacité de stockage d'eau est plus grande) enregistre toujours des valeurs de stock fortement plus élevées en comparaison avec les banquettes B1 et B2.

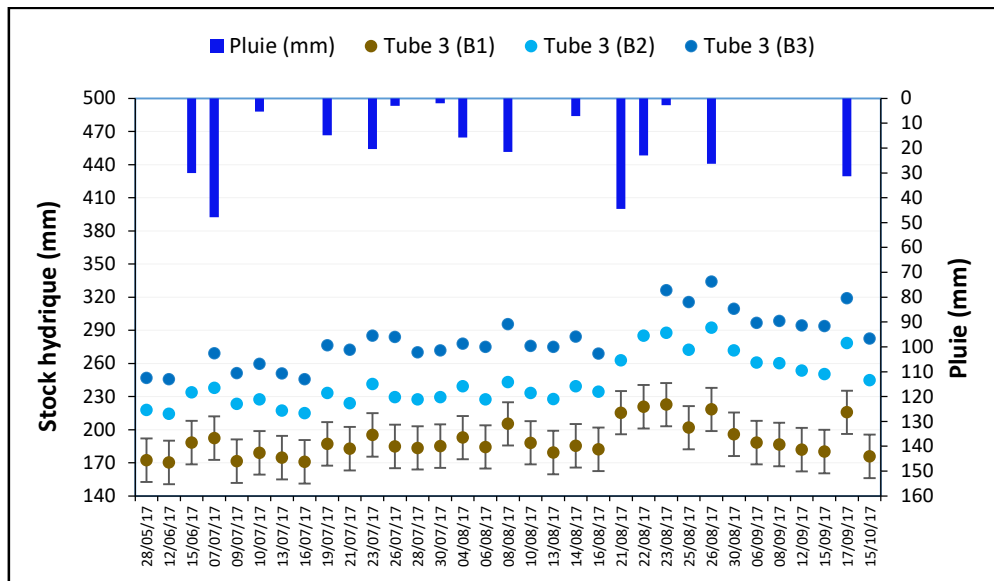


Figure 4.15. Pluies et évolution du stock d'eau (mm) dans la tranche de sol 0-135 cm au cours du temps en aval (tube T3) des banquettes.

Les barres d'erreurs verticales, qui font environ la même taille pour tous les tubes T3 des banquettes, correspondent aux incertitudes sur l'estimation du stock $s(\hat{s})$.

En résumé, ces figures mettent en évidence un comportement hydrologique différent des sols à l'échelle des compartiments des banquettes se traduisant par un stock hydrique systématiquement plus élevé en amont qu'en aval de celles-ci. Ainsi, à pluie égale, le comportement des tubes d'une même banquette n'est pas identique. Cependant, le stock hydrique répond par un pic marqué à chaque événement pluvieux. Il croît progressivement au cours de la saison en fonction de la quantité de pluie cumulée reçue par le sol. La correspondance entre lames d'eau dans le sol et les pluies est illustrée par les Figures 4.14 et 4.15 ci-dessus. Enfin, ces résultats montrent qu'en fin de saison, la rétention d'eau des sols diminue rapidement pour retrouver son état initial observé en mai-juin.

❖ Analyse des incertitudes sur l'estimation du stock hydrique

L'utilisation de l'équation 3.19 nous a permis de déterminer l'erreur commise sur l'estimation du stock hydrique. Le résultat donne des incertitudes comprises entre 19,5 et 20,4 mm quelle que soit l'importance du stock (cf. § 3.3.4.3). Pour chaque tube, elles sont représentées par des barres d'erreurs verticales traduisant en quelque sorte la fluctuation de l'infiltration au cours du temps. La Figure 4.16 compare, pour la banquette B1, le stock hydrique avec erreur spatiale $s(\hat{s})$ et écart-types débiaisés de l'échantillon des trois valeurs déterminées par date de mesure. La comparaison des résultats du B1 montre que les écart-types débiaisés (Figure 4.16 "b") sont

beaucoup plus grands que les incertitudes locales sur l'estimation du stock (Figure 4.16 "a"). Ce résultat traduit une plus grande variance du stock entre les tubes d'une même banquette (pour le cas du B1). La même tendance est observée sur la parcelle B2 (cf. Annexe B5).

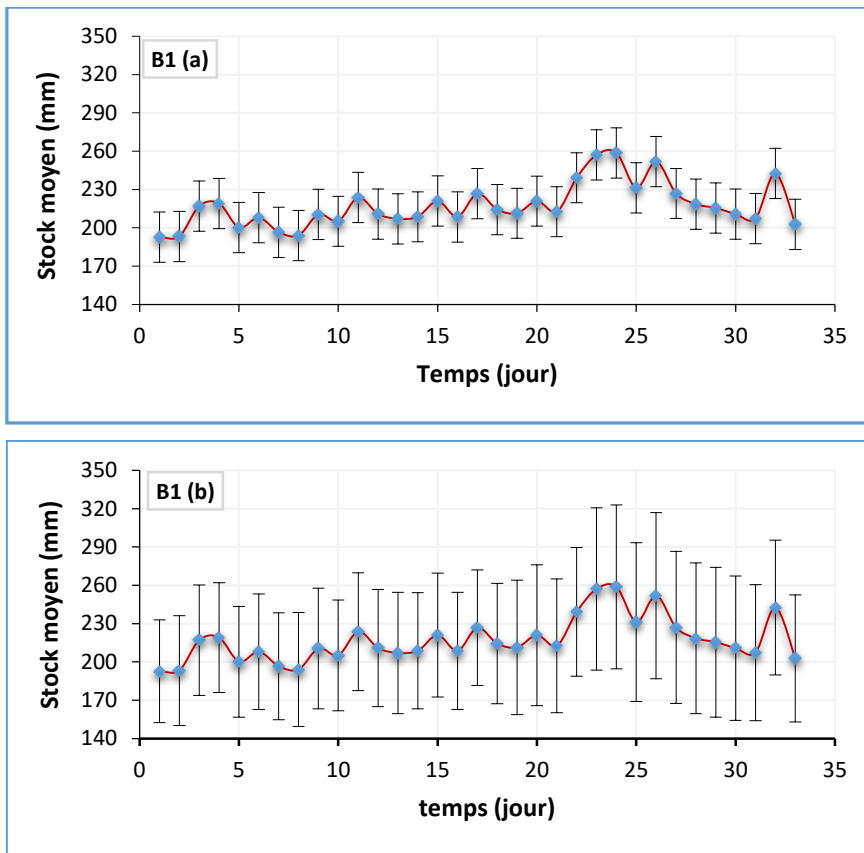


Figure 4.16. Comparaison entre stock moyen \pm incertitude moyenne (a) et stock \pm écart-type débiaisé (b) des trois stocks moyennés des trois tubes de la banquette (B1) en fonction de temps (jour de mesure).

L'incertitude moyenne est calculée en faisant la moyenne arithmétique des incertitudes obtenues sur les stocks des trois tubes.

Pour le cas de la banquette B3 (Figure 4.17), on remarque le cas contraire de ce qu'on a observé sur les précédentes banquettes. L'écart-type débiaisé des trois stocks représenté dans la Fig. 4.17 "b" est nettement plus faible que l'incertitude moyenne ($\bar{\sigma}(\hat{s})$) sur le stock (Fig. 4.17 "a").

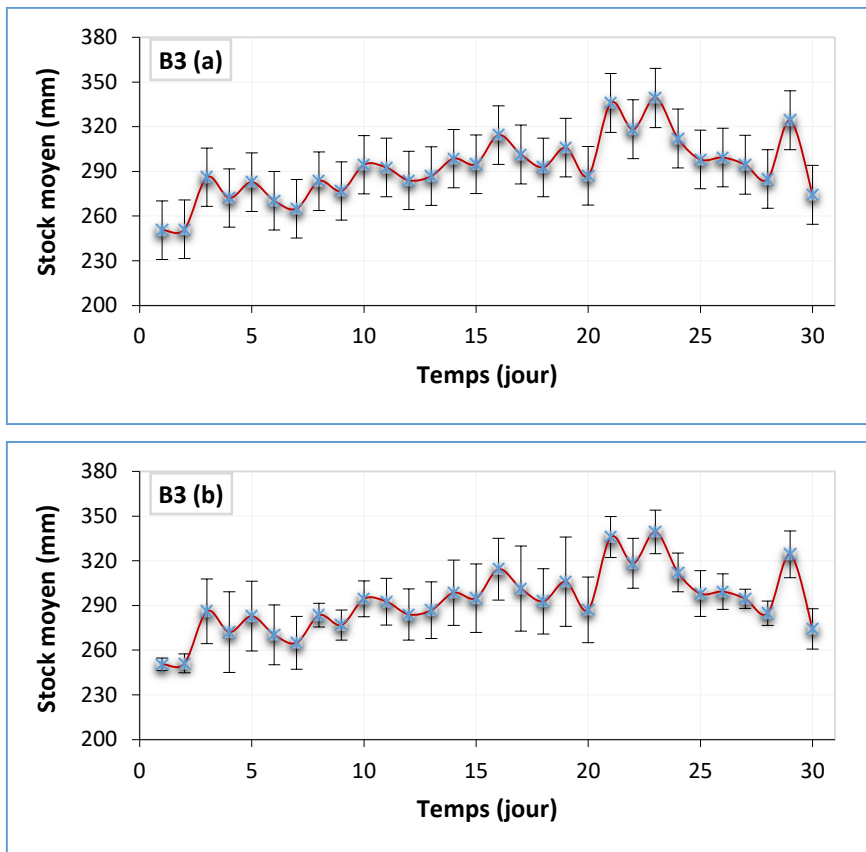


Figure 4.17. Comparaison entre stock moyen \pm incertitude moyenne (a) et stock \pm écart-type débiaisé (b) des trois stocks moyennés des trois tubes de la banquette (B3) en fonction de temps (jour de mesure).

L'incertitude moyenne est calculée en faisant la moyenne arithmétique des incertitudes obtenues sur les stocks des trois tubes de la banquette.

Le Tableau 4.6 récapitule, pour la saison 2017, les termes expliquant la variabilité spatiale entre les tubes d'une même banquette puis entre les banquettes.

Tableau 4.6. Valeurs moyennes de stock hydrique, variance, incertitude moyenne et écart-type (débiaisé) obtenus par parcelle.

Parcelles	Stock moyen (mm)	Variance (mm)	$\bar{\sigma}(\hat{s})$ (mm)	Écart-type débiaisé (mm)
B 1	217,1	385,9	19,6	50,4
B 2	255,0	390,2	19,7	85,4
B 3	292,4	387,4	19,7	16,7

Ce tableau présente une synthèse des résultats de l'analyse comparative des erreurs liées à l'estimation du stock hydrique dans les banquettes. L'écart-type (débiaisé) entre les trois tubes de la banquette B2 représente 4 fois la valeur de l'incertitude moyenne ce qui veut dire que les

différences spatiales y sont très significatives. Contrairement à la parcelle B3, l'écart-type entre les tubes apparait relativement plus faible, de l'ordre de 17 mm, que l'incertitude commise sur le calcul du stock, de l'ordre de 20 mm. Ce qui témoigne d'une faible variance spatiale sur le stock de cette banquette.

En outre, la connaissance de la variance et de l'incertitude sur l'estimation des valeurs du stock nous a permis de calculer les valeurs limites droite et gauche encadrant la valeur du stock hydrique réellement estimée. Ces limites s'obtiennent en choisissant un intervalle de confiance à 80 % et en supposant que la loi de Gauss s'applique à la variable stock. L'évaluation de ces limites peut se faire en ajoutant et soustrayant l'incertitude de la valeur du stock, puis on multiplie les deux résultats par 1,28. Autrement dit, limites droite et gauche (IC à 80 %) = stock \pm incertitude $s(\hat{s}) \times 1,28$. On s'appuie sur le tube T2 de la parcelle B1 pour illustrer le stock avec un IC à 80 %. La Figure 4.18 présente l'évolution du stock et les limites droite et gauche déterminées.

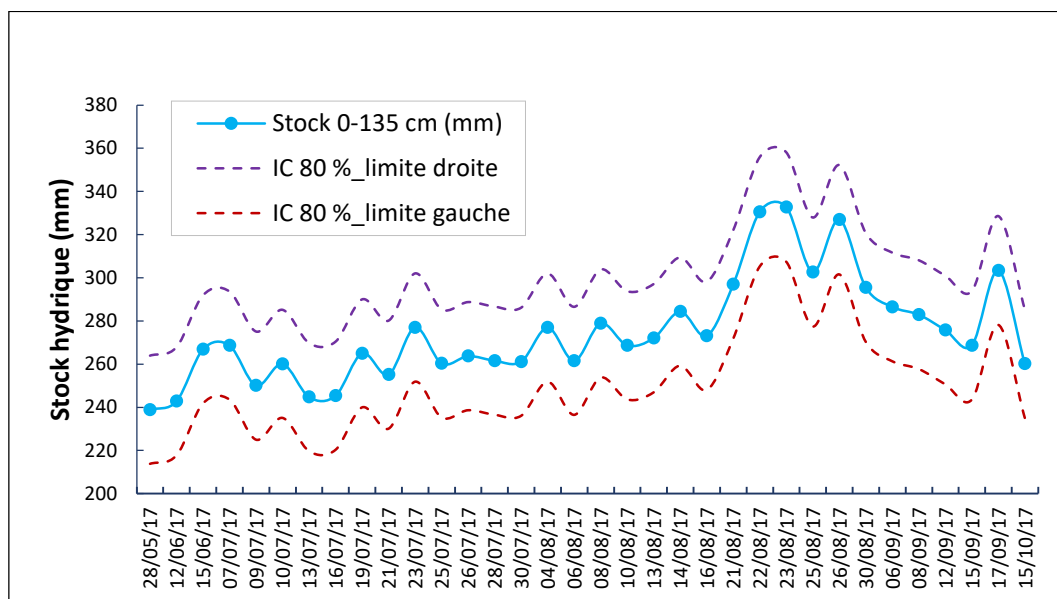


Figure 4.18. Dynamique du stock et intervalle de confiance à 80 %, pour le tube T2 de la parcelle B1.

Les pointillés délimitent l'intervalle de confiance à 80 % (limite à droite en violet et limite à gauche en rouge) sur l'estimation du stock.

4.5.2.5. Effet des banquettes sur la variation de stock hydrique

La Figure 4.19 montre les variations événementielles de stock (ΔS) plus importantes sur la banquette que sur la surface témoin. Ces variations de stock sont calculées à partir des profils de teneur en eau mesurés immédiatement avant et après chaque averse dans la tranche 0-135

cm. Le gain en mm d'eau est toujours bien net et environ doublé grâce à la banquette. A cette échelle ponctuelle (tubes d'humidité), on constate parfois que la lame d'eau infiltrée peut dépasser la lame précipitée. Cet effet des apports par l'amont constitue une preuve particulièrement nette de l'efficacité de cette technique. On peut conclure que l'aménagement en banquettes joue un rôle primordial en stockant localement dans le sol toujours plus de la moitié de ce qui est précipité, le reste de l'eau étant ruisselé par débordement de l'ouvrage ou évaporé. Il faut, cependant, notifier l'influence de la position de la banquette par rapport aux autres banquettes.

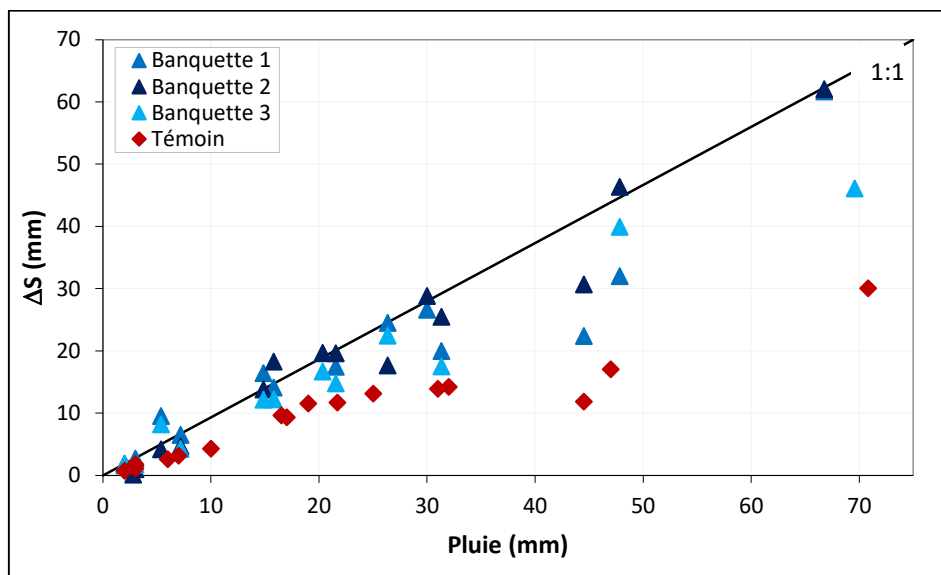


Figure 4.19. Variations de stock hydrique à l'échelle locale des banquettes et dans une surface témoin. Sont représentées sur cette figure les valeurs moyennes de ΔS des trois tubes.

4.6. Effet des banquettes sur la régénération de la végétation

Les banquettes ont aussi un effet positif sur le développement du couvert végétal (Figure 4.20). L'analyse de ces photos montre une colonisation du bourrelet par la végétation dès la deuxième année de réalisation de l'ouvrage (Figure 4.20 a). Les Figures 4.20 b, c et d montrent l'évolution de la croissance de la végétation dans la banquette les années suivantes. La végétation herbacée et ligneuse (*Guiera senegalensis* entre autres) profite en effet des conditions d'humidité plus favorables créées par les banquettes pour coloniser le long du tracé des fossés et des bourrelets. Au niveau de l'impluvium, la régénération apparaît très lente à cause de l'encroûtement du sol qui limite sa conductivité hydraulique (Vandervaere et al., 1997 ; Vandervaere et al., 1998 ; Malam Abdou et al., 2016 ; Malam Abdou, 2016).

Le couvert végétal, une fois suffisamment développé, pourrait à long terme provoquer la réduction des écoulements. Une étude menée par GIZ (2015) a montré que les banquettes réalisées sur des terres agricoles augmentent la superficie cultivable et la productivité des terres grâce à la collecte des eaux de ruissellement et au freinage de l'effet des vents par la végétation qui s'y développe.

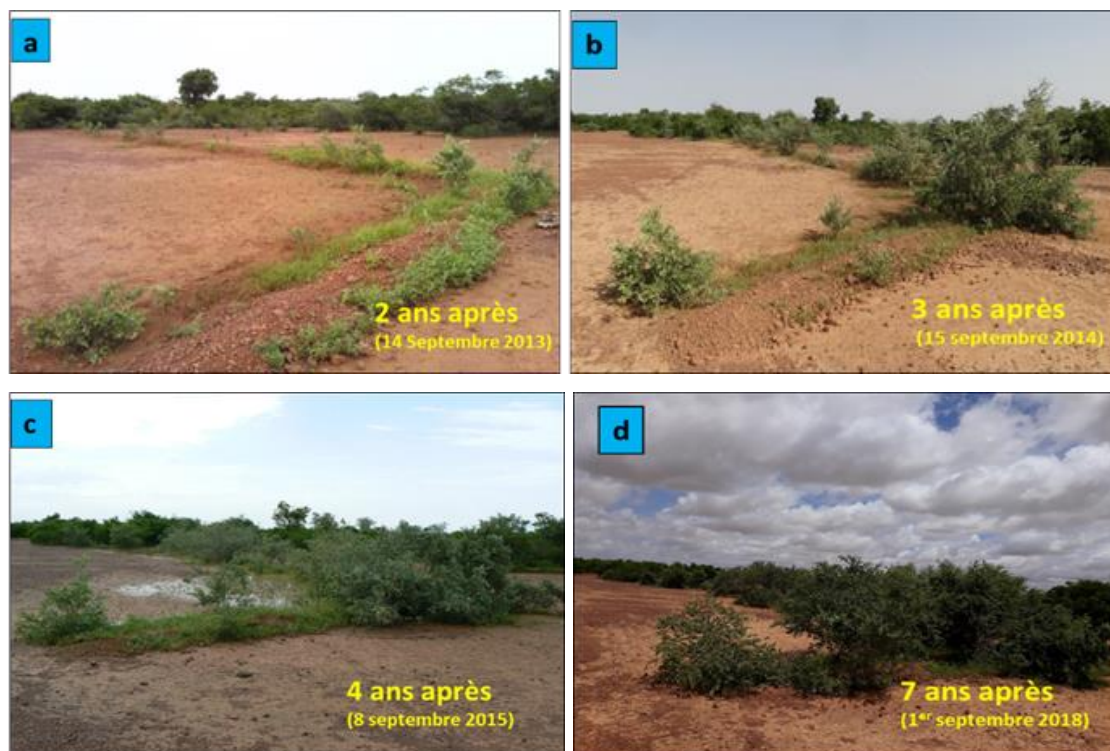


Figure 4.20. Effet d'une banquette sur l'évolution du couvert végétal (Ingatan Warzagan et al., 2018).

D'autres études, notamment Ganaba (2005) ; Soumana et al. (2011) ; Avakoudjo et al. (2013), ont démontré que les aménagements en demi-lunes, cordons pierreux, digues filtrantes, sous-solage et scarifiage ont également des impacts positifs sur la reconstitution de la végétation herbacée et ligneuse. La variabilité spatiale de l'impact des banquettes antiérosives se traduit par un impact positif sur le développement végétatif de la culture de l'orge en milieu semi-aride Tunisien (Khlifi, 2008).

Finalement, l'aménagement en banquettes se traduit par un meilleur développement du couvert végétal dans les zones du fossé et du bourrelet. Les banquettes par leur capacité de rétention d'eau superficielle améliorent les conditions d'humidité du sol favorables au développement de la végétation. La Figure 4.21 illustre l'effet des banquettes réalisées sur une surface dénudée en

aval des bandes boisées dégradées sur l'extension de la végétation herbacée. La Figure 4.22 montre l'influence du stockage d'eau en surface sur la croissance végétale du bourrelet.



Figure 4.21. Effet d'une banquette sur la régénération du couvert végétal sur une zone dégradée en aval d'une bande boisée en dégradation.



Figure 4.22. Rétention d'eau en surface de la banquette corrélée au développement de la végétation sur le bourrelet.

Cet effet bénéfique des banquettes mais relativement limité dans l'espace peut expliquer l'impact positif localisé de ce type d'aménagement sur l'amélioration du bilan hydrique grâce à l'effet des cuvettes constituant des collecteurs principaux des eaux du ruissellement. La valorisation agricole de cette ressource par le travail du sol (labour, sarclage combinés aux cordons pierreux) a été étudiée en zone soudano-salienne du Burkina Faso (Lamachère et Serpantié, 1991).

4.7. Effet du sous-solage sur le comportement hydrologique des sols

4.7.1. Caractérisation du fonctionnement des surfaces de sous-solage

En milieu semi-aride où la pluviométrie constitue un facteur limitant la croissance végétale, la stratégie d'aménagement doit être orientée vers la réduction des pertes d'eau pluviale par ruissellement en surface. Pour cela, les techniques favorisant l'infiltration sont à encourager. Le sous-solage du sol constitue l'une des techniques d'aménagement choisies pour cette étude. Nous présenterons dans cette partie les résultats obtenus au cours de nos expérimentations menées sur des surfaces traitées par cette technique de réhabilitation des sols.

Le sous-solage comme la plupart des techniques du travail du sol permet de détruire la couche encroûtée afin d'améliorer sa capacité d'infiltration. Ainsi, alors que les banquettes visent à bloquer mécaniquement le ruissellement, ce qui laisse une partie de l'eau s'évaporer, le sous-solage vise, lui, à réduire la fraction ruisselée. La façon traditionnelle de détruire les croûtes, qui contrôlent le partage entre eaux d'infiltration et de ruissellement (Casenave et Valentin, 1991 ; Vandervaere et al., 1994), consiste à procéder au sarclage et/ou au labour (Lamachère et Serpantié, 1991). Il s'agit d'un moyen très efficace pour réduire l'aptitude des sols à ruisseler et faciliter l'infiltration (Karimata, 2001). Une étude récente a par ailleurs démontré que le sarclage, malgré son effet bénéfique immédiat, peut entraîner l'encroûtement des sols sableux cultivés du sahel sur le long terme (Malam Abdou, 2016). Mais **peu ou prou sont les études qui ont quantifié le niveau de réduction des ruissellements en fonction des dimensions des aires aménagées à l'échelle du bassin versant**. Notre objectif s'inscrit dans cette perspective. Il est à noter par ailleurs que le sous-solage est une technique traditionnelle de gestion des sols qui peut être réalisée comme seule technique de restauration ou en association avec d'autres types d'aménagement. Pour le cas de cette étude, le sous-solage est réalisé sur le plateau à brousse tigrée en amont ou en aval des bandes boisées afin d'apporter un supplément d'eau à ces dernières permettant de contribuer éventuellement à leur développement.

4.7.2. Evolution du comportement hydrique des sols traités par sous-solage

Le protocole expérimental (voir § 3.3.2) a permis de comprendre comment est l'évolution du comportement hydrologique des parcelles aménagées par sous-solage. Sans aménagement, les croûtes superficielles induisent une réduction de la conductivité hydraulique et de la porosité efficace de la surface du sol (Peugeot, 1995 ; Perez et al., 1999). La destruction de celles-ci par un remaniement profond du sol peut améliorer, ne serait-ce que temporairement, la porosité du

sol, la taille des pores et, par suite, l'infiltration de l'eau. Le suivi évènementiel des profils hydriques permet de quantifier cet impact.

La Figure 4.23 permet de constater l'évolution du comportement hydrique des surfaces sous-solées et leur effet sur la réduction du ruissellement au cours de la saison. Les observations du terrain montrent des résultats appréciables concernant l'efficacité du sous-solage vis-à-vis du partage de la pluie entre ruissellement-infiltration. En effet, le sous-solage, en retardant la production de ruissellement, favorise fortement l'infiltration. Cet effet bénéfique et régulateur du ruissellement est plus important au début qu'en fin de la saison. Au début, les zones de sous-solage peuvent stocker une bonne quantité des pluies précipitées. Mais, cet effet diminue, par conséquent, avec le temps en fonction du cumul pluviométrique entraînant progressivement les processus de ré-encroûtement du sol comme l'ont démontré d'autres études (Lamachère et Serpantié, 1991 ; Malam Abdou, 2016) sur le sarclage des sols cultivés au Sahel. Cependant, au milieu de la saison (quand le sol est très humide), on assiste à une apparition du ruissellement dans les parcelles (Figure 4.24). Les faibles pluies (< 15 mm) qui suivent la réalisation du sous-solage ne déclenchent pratiquement pas de ruissellement (observation personnelle du terrain). En revanche, celui-ci se produit bien sur les zones alentour des parcelles aménagées (Figure 4.23). Aussi, malgré le caractère agressif des pluies sahéliennes (pluies intenses à caractère orageux) qui tombent sur des sols déjà fragiles, l'effet du sous-solage profond reste persistant sur une période dépassant l'échelle saisonnière.



Figure 4.23. Comportement hydrique des surfaces dégradées sous l'effet du sous-solage.



Figure 4.24. Processus de ré-encroûtement et apparition de ruissellement (photos de gauche et de droite) à l'échelle de parcelle sous-solée.

D'après cette figure, l'aménagement a induit une forte variabilité temporelle et spatiale de l'infiltration et du ruissellement. Grâce au sous-solage, les conditions d'humidité du sol en surface (0-5 cm de profondeur) ont significativement augmenté, d'un facteur deux environ (Figure 4.25) mais cet effet remarquable diminue au fur et à mesure que le cumul pluviométrique devient important. Celui-ci entraîne le déclenchement des processus de ré-encroûtement de la surface.

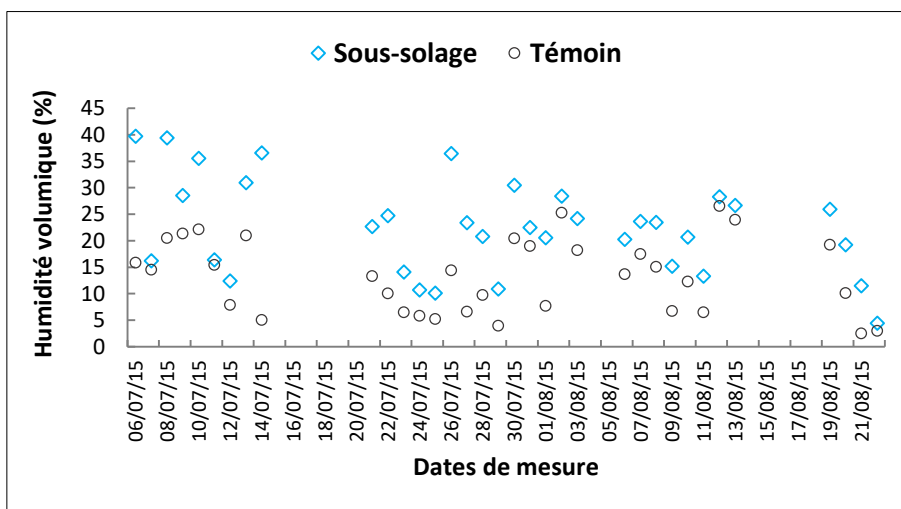


Figure 4.25. Effet du sous-solage sur l'amélioration des conditions d'humidité volumique de surface (0-5 cm) par rapport au témoin.

Les résultats présentés sur cette figure sont obtenus à l'aide de la sonde capacitive itinérante, Delta T SM200.

Les résultats obtenus pendant la saison 2017 prouvent que l'effet du sous-solage persiste même au-delà de la 2^e année de sa réalisation. Nous tenterons plus loin de démontrer l'effet progressif de la technique du sous-solage en fonction du temps sur le fonctionnement hydrique des sols.

4.7.3. Impact du sous-solage sur la teneur en eau volumique (échelle ponctuelle)

Le suivi de la teneur en eau s'est effectué de façon quotidienne durant deux saisons (2016 et 2017) grâce aux mesures faites avant et après chaque pluie. Cette fréquence des mesures nous a permis de caractériser finement l'évolution du comportement hydrologique des surfaces sous-solées. Les résultats obtenus sont présentés de deux façons : une étude globale des profils hydriques avec un pas de temps saisonnier et une analyse présentant des valeurs mensuelles de teneur en eau afin de faire ressortir de façon plus visible l'effet du sous-solage. Cette approche nous paraît pertinente pour l'étude des mesures ponctuelles de d'humidité du sol. En 2016, les premières mesures d'humidité ont lieu à la fin du mois de juin pendant que les sols aménagés présentaient déjà une certaine humidité due à une pluie d'environ 14 mm. Les profils présentés pour 2016 sont obtenus à partir de cette date.

4.7.3.1. Inter-comparaison des profils hydriques

En référence aux méthodes précédemment décrites (§ 3.3.3.5 du chapitre 3), l'utilisation de l'équation 3.5 conduit à l'obtention des résultats reportés sur les Figures 4.26 et 4.27. Celles-ci présentent l'ensemble des profils d'humidité volumique mesurés sur des tubes représentatifs du sous-solage sur la parcelle SL2 en 2016 et 2017. Elles montrent la distribution verticale des teneurs en eau dans le sol aménagé, à des dates différentes. Le résultat des profils d'humidité mesurés sur la parcelle SL1 est donné en Annexes C1 et C2.

Notifions qu'en 2017, le sous-solage n'a pas été ré-effectué afin de ne pas endommager le dispositif de mesures. Le seul aménagement suivi est celui de 2016.

Chaque profil hydrique représenté sur ces figures correspond à une date de mesure d'humidité donnée (y compris les mesures réalisées avant pluie). Ces deux figures proposent ainsi une analyse comparative des profils des teneurs en eau entre deux campagnes, 22 mesures en 2016 contre 35 pour la saison 2017. On constate une différence de teneur en eau volumique (θ) en surface, notamment dans les vingt premiers centimètres, correspondant à la couche supérieure du sol fortement remaniée lors du sous-solage. La teneur en eau volumique est ainsi nettement plus élevée avec des valeurs avoisinant $0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Celle-ci s'observe au début de la première saison (en juin 2016). Par contre, en deuxième année du sous-solage (saison 2017), la teneur en eau maximale ne dépasse pas $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Ces résultats traduisent une diminution de l'efficacité du sous-solage au cours du temps. L'observation directe sur le terrain a permis en outre de constater un degré d'impact très significatif du sous-solage sur l'infiltration à tel point que le sol absorbe la quasi-totalité des deux premières pluies qui suivent la réalisation de

l'aménagement. Cela constitue une plus-value considérable apportée par cette technique en termes de rétention d'eau.

Les profils hydriques relevés au milieu de la saison sont assez souvent les plus humides. Ceci est dû au rapprochement des pluies entre elles. On remarque que les variations de teneur en eau sont plus importantes en surface qu'en profondeur, ce qui se traduit par un stockage d'eau important dans la partie sous-solée correspondant à la tranche de sol ameublie de 0 à 40 cm de profondeur. Par exemple, il est tombé une pluie de 59 mm le 29 juin 2016. Le stock moyen lui correspondant s'élève à 140 mm, alors qu'il n'est que de 90 mm sur témoin. L'impact se manifeste aussi en profondeur (à 60 cm) mais avec de plus faibles variations de teneur en eau. A partir de 70 cm, on note une constance des valeurs de teneur en eau (θ) pour certains tubes. On peut donc conclure qu'au pas de temps saisonnier, le ruissellement est nettement diminué en faveur de l'infiltration.

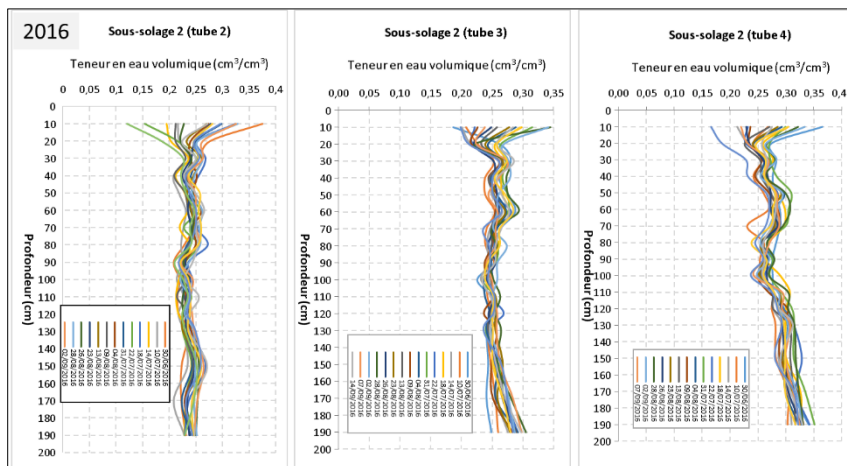


Figure 4.26. Evolution des profils de teneur en eau volumique (θ) et du front d'infiltration du sol sous parcelles de sous-solage (SL2) au cours du temps (saison 2016).

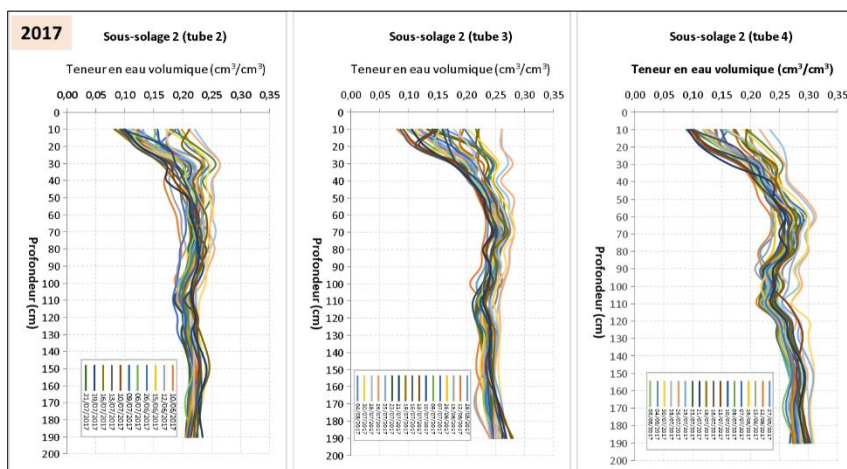


Figure 4.27. Evolution des profils de teneur en eau volumique (θ) et du front d'infiltration du sol sous parcelles de sous-solage (SL2) au cours du temps (saison 2017).

4.7.3.2. Analyse des résultats de l'infiltration

4.7.3.2.1. Impact du sous-solage l'infiltration ponctuelle (2016 et 2017)

Pour gagner en clarté, nous avons représenté les mesures des mois caractéristiques de la distribution temporelle des pluies sur le site d'étude. Il s'agit dans ce cas des valeurs maximales de θ de chaque mois de la saison excepté le mois de mai, pour lequel nous ne disposons pas des mesures de teneur en eau initiale en 2016. La lecture plus fine des profils hydriques permet de mieux comprendre l'effet du sous-solage sur l'infiltration avec un pas d'analyse mensuelle. Ces derniers traduisent la teneur en eau volumique déterminée par profondeur de mesure à l'aide de l'étalonnage de la sonde (§ 4.3.1). L'analyse conduit à la caractérisation des différents états hydriques des sols aménagés du début (état sec du sol en mai-juin) à la fin de la saison pluvieuse (en octobre). Avant d'interpréter les résultats de 2016, nous rappelons que le suivi a commencé le 20 juin et non pas en mai.

La Figure 4.28 montre l'évolution mensuelle des teneurs en eau des zones sous-solées. Les valeurs maximales d'humidité s'observent dès le début de la saison pluvieuse, en juin. Ainsi, la teneur en eau dans les dix premiers centimètres (observée suite à la pluie de 59 mm survenue le 29 juin) est en moyenne deux fois plus élevée que celle mesurée en fin de saison (en octobre). A titre illustratif, la teneur en eau du tube T4 (SL1) observée en juin est de $0,37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Par contre en octobre, elle a significativement baissé pour revenir à $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. L'analyse de l'ensemble des profils hydriques met en évidence une variation plus importante de teneur en eau jusqu'à une profondeur de 30 cm. En fin de saison, on assiste à une décroissance rapide de 34 % en moyenne en août à environ $19 \pm 3 \%$ en octobre. Les valeurs de teneur en eau sont donc moindres en saison 2017 correspondant à la deuxième année de l'aménagement. Sont représentées, en outre, sur ces graphiques les valeurs moyennes des incertitudes liées aux estimations de teneur en eau volumique ($\hat{\theta}$). L'absence de différence sensible sur les valeurs de ces incertitudes nous a poussé à ne les représenter que sur les profils extrêmes.

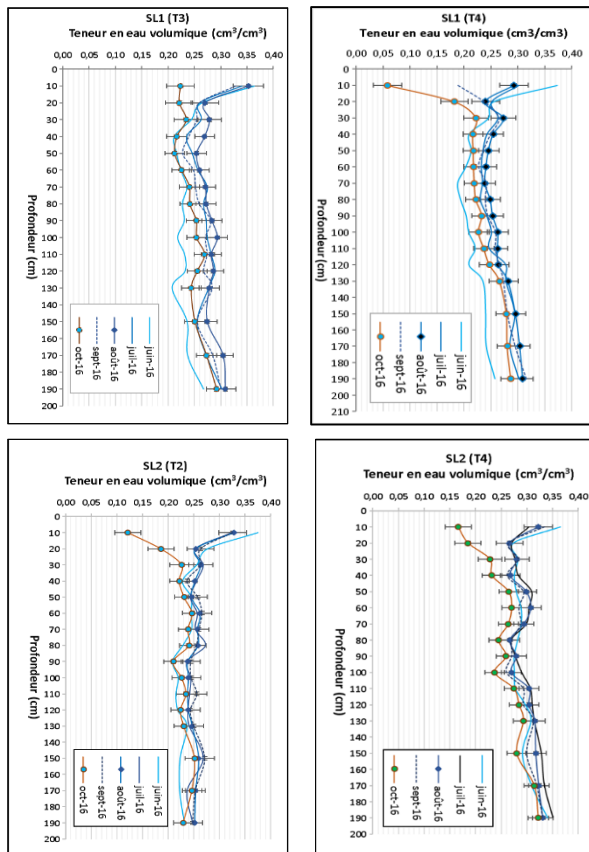


Figure 4.28. Dynamique mensuelle des profils de teneur en eau obtenus sur quatre des six tubes installés dans les zones remaniées par sous-solage du sol en 2016.

Les barres horizontales correspondent aux valeurs moyennes des incertitudes calculées sur les profils de teneur en eau volumique mesurés durant le mois considéré.

La Figure 4.29 montre les variations mensuelles du profil de teneur en eau et du front d'infiltration dans les parcelles du sous-solage en 2017. Ces profils traduisent aussi les valeurs maximales de l'humidité des mois caractérisant la saison pluvieuse. Pour le mois de mai, le profil représenté correspond à la valeur minimale. D'après l'analyse de la figure, la teneur en eau de surface est du même ordre de grandeur que celle mesurée au début de la saison ($0,09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Cependant, une nette différence se dégage à partir de 30 cm de profondeur où la teneur en eau croît pour atteindre $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en moyenne. Au milieu de la saison (juillet, Août), la teneur en eau continue de croître considérablement en surface mais aussi en profondeur (de 50 à 60 cm). Elle passe globalement de $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en juin à plus de $0,26 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en août. Le rapprochement des pluies durant la période de juillet à août constitue le facteur explicatif de cette augmentation relative de la teneur en eau. En octobre, la tendance est en baisse sur tous les tubes du sous-solage, ce qui témoigne de l'assèchement rapide des sols en fin de saison.

A 60-70 cm de profondeur, on constate une diminution de teneur en eau volumique avant de se stabiliser autour de 100 cm et plus. Nonobstant, des faibles variations mais très nettement différentes de celles observées en surface s'individualisent au-delà de la profondeur 135 cm. Le front d'infiltration, quant à lui, a connu un accroissement remarquable tandis que le front d'humidification (qui limite le sol humide du sol sec sous-jacent) est plus important entre 10-50 cm de profondeur. L'analyse à l'échelle mensuelle des profils d'humidité montre que l'eau s'infiltré mieux au milieu des zones remaniées comme l'illustre le comportement hydrologique des tubes T2, T3 et T4 localisés dans celles-ci. Comme pour l'ensemble des profils, l'incertitude $S(\theta)$ varie de $\pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en surface (10-20 cm de profondeur) à $\pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur les mesures réalisées à partir de 30 cm de profondeur. La même représentation des incertitudes sur l'estimation de teneur en eau (c'est-à-dire la moyenne des erreurs sur les extrêmes) a été respectée pour tous les graphiques afin de ne pas trop les surcharger.

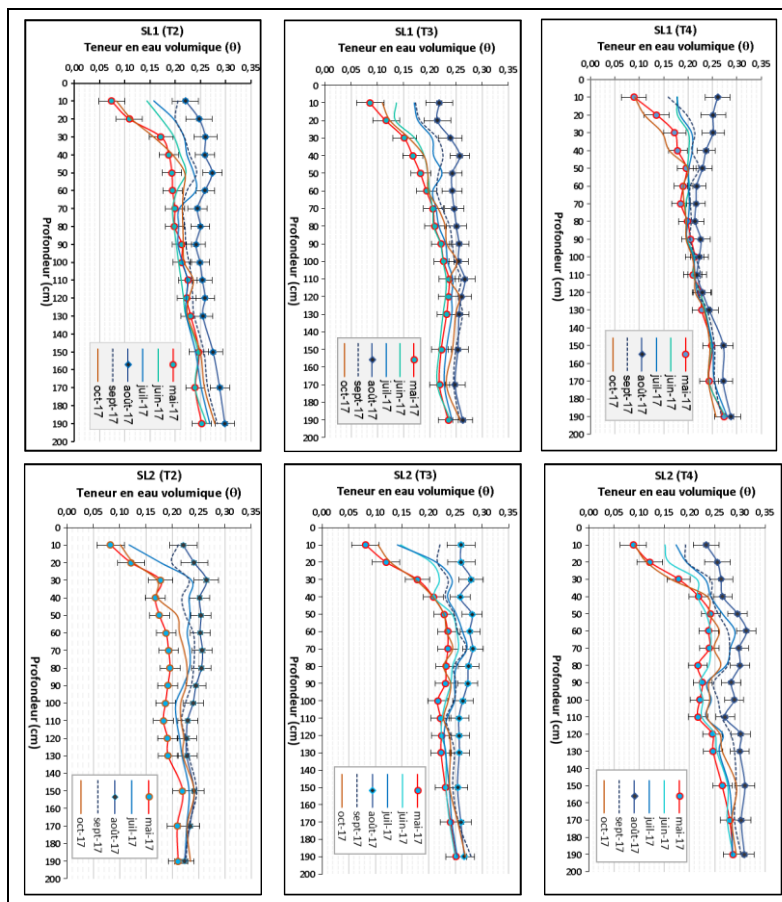


Figure 4.29. Dynamique saisonnière de la teneur en eau dans les parcelles du sous-solage (saison 2017).

Les barres horizontales correspondent aux valeurs moyennes des incertitudes qui font environ la même largeur sur tous les tubes. Elles ont été calculées en faisant la moyenne des erreurs déterminées sur tous les profils de teneur en eau d'un mois donné.

Retenons en somme que grâce au sous-solage, la profondeur du front d'infiltration a plus que triplé. Sur certains tubes, l'infiltration s'observe au-delà même de la profondeur maximale de mesures, 190 cm. Ceci se traduit donc par un accroissement considérable du stock hydrique dans le premier mètre du sol. Ces résultats de 2017 sont bien cohérents avec ceux de 2016 et traduisent clairement l'efficacité de la technique du sous-solage à l'échelle locale. Néanmoins, la comparaison des deux périodes différentes montre une baisse notable de teneur en eau en 2017 par rapport à 2016 que l'on peut attribuer à la réduction progressive de la porosité mais également à la pluviométrie largement déficitaire (Tableau 4.1).

4.7.3.2.2. Infiltration sur les sols en amont et en aval du sous-solage

L'influence du sous-solage sur l'infiltrabilité du sol à l'amont et à l'aval de la zone travaillée est illustrée par la Figure 4.30. Sur le sous-solage SL1, l'effet sur l'infiltration est plus prononcé en amont (tube T1) qu'en aval (tube T2). Ce comportement est différent de celui qu'on observe sur le sous-solage SL2 où la profondeur d'infiltration est importante. On rappelle que ces tubes sont situés à environ 1 m de la zone travaillée. Globalement, le fonctionnement de ces tubes (Annexe C3) est intermédiaire entre celui de la zone sous-solée proprement dite et celui du témoin, mais plus proche du comportement du témoin. On en conclut que le bénéfice du sous-solage s'étend très peu spatialement au-delà de la partie travaillée.

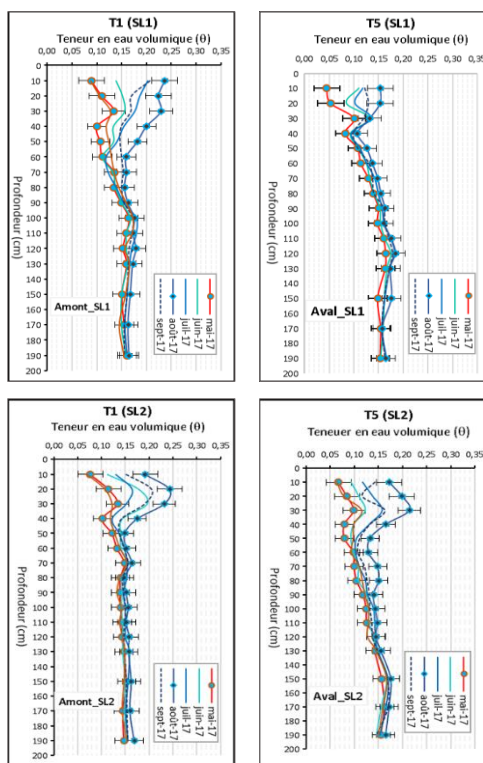


Figure 4.30. Impact du sous-solage sur l'infiltrabilité du sol en amont (tube T1) et en aval (tube T5) pour les parcelles SL1 et SL2.

4.8. Evolution du stock hydrique des surfaces aménagées en sous-solage

Du fait de l'installation tardive du dispositif de mesures en 2016, l'analyse doit se focaliser sur les données de la deuxième campagne. Les résultats de 2016 montrent toutefois le comportement notable des certains tubes des parcelles (Annexe C4). Sur la Figure 4.31, sont portés les résultats des mesures de la saison 2017 en lien avec la distribution temporelle des pluies. Il s'agit plus précisément de l'évolution temporelle du stock déterminé dans la tranche 0-135 cm. Rappelons que cinq tubes sont installés sur chacune des deux parcelles, trois (T2, T3 et T4) dans la zone remaniée et les deux autres (T1 et T5) à l'extérieur de celle-ci. Dans ce cas, il est possible d'analyser et comparer leurs comportements hydriques séparément.

→ Fonctionnement des tubes de la parcelle SL1

En observant la dynamique du stock, on constate que les tubes T2 et T3 (distants d'une dizaine de mètres) ont des comportements hydrologiques semblables. Le tube T4 est moins humide avec un stock assez nettement inférieur à celui des tubes précédents.

→ Fonctionnement des tubes de la parcelle SL2

Pour la parcelle SL2, ce sont les tubes T3 et T4 qui se comportent de manière identique avec des valeurs élevées du stock. La valeur maximale dépasse 365 mm, ce qui est supérieur au stock de l'autre parcelle. Le tube T2 se détache des deux autres en présentant des valeurs de stock nettement inférieures. Le même comportement des parcelles a été remarqué pour la saison 2016.

Le comportement des tubes situés au voisinage des zones sous-solées est illustré par la Figure 4.32 où l'on voit que le stock varie annuellement entre 140 et 240 mm, approximativement comme le stock de la parcelle témoin. Au sein des parcelles, le stock varie de l'ordre de 225 ± 20 mm en mai (SL1, tous tubes) à plus de 370 ± 20 mm en août (tubes T3 et T4 du SL2). La comparaison du comportement hydrique des tubes d'une même parcelle permet de caractériser au mieux les propriétés hydrodynamiques communes des sols profondément remaniés avec un bénéfice très marqué, environ 100 mm, par rapport au témoin.

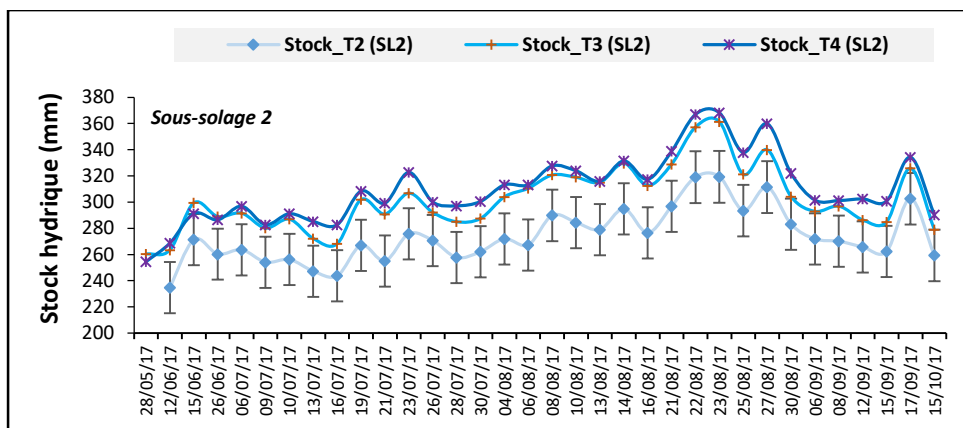
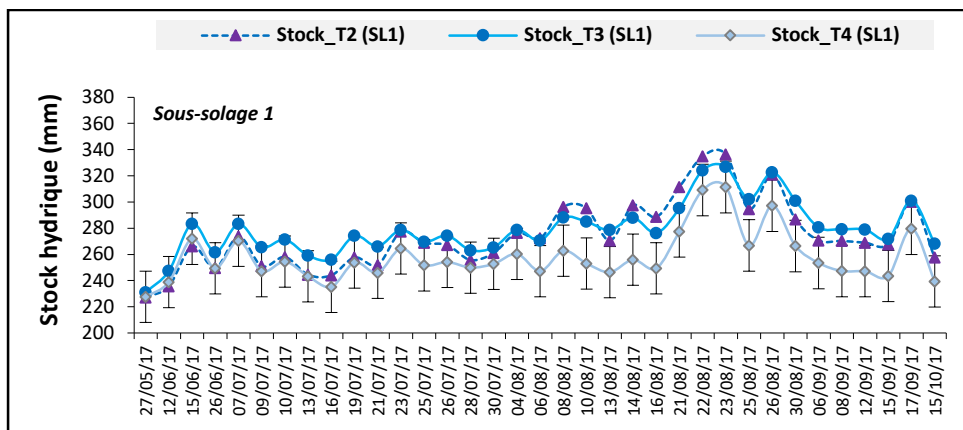
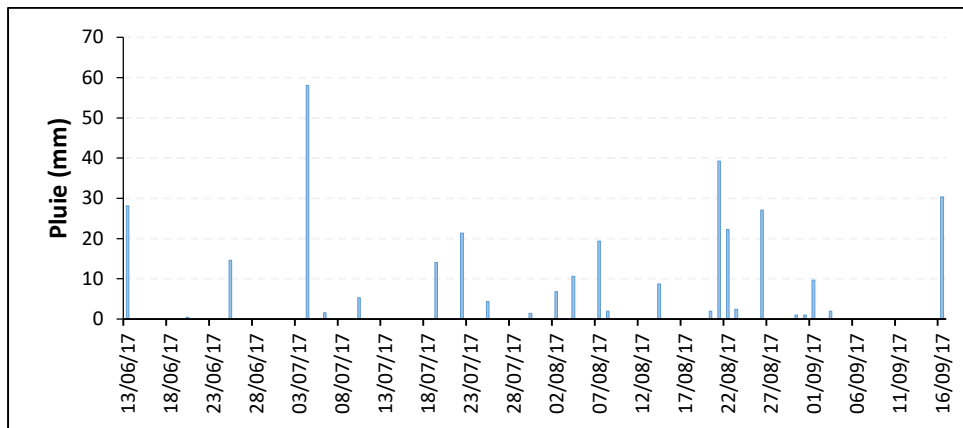


Figure 4. 31. Evolution du stock d'eau dans les parcelles de sous-solage au cours du temps. Les barres verticales correspondent aux incertitudes $s(\hat{s})$ sur l'estimation du stock représentées pour le tube T2 de la SL2. Leur largeur est identique pour tous les autres tubes.

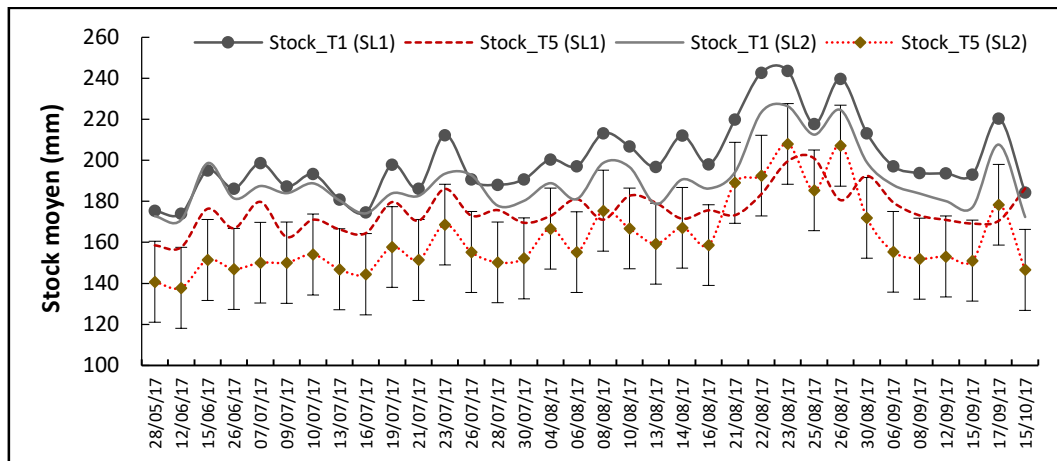


Figure 4.32. Evolution au cours du temps du stock d'eau immédiatement en amont (tubes T1, en noir) et en aval (tubes T5, en rouge) des parcelles expérimentales (SL1 & SL2).

Les barres verticales représentent les incertitudes sur le stock du tube T5 de la parcelle SL2 et sont identiques pour tous les autres tubes.

4.9. Analyse comparative de l'évolution de stock d'eau moyen

Le stock moyen a été calculé sur les valeurs des trois tubes par parcelle. Il s'agit donc de la moyenne arithmétique des stocks obtenus uniquement sur les tubes de la zone remaniée de chaque parcelle. Les Figures 4.33 et 4.34 proposent une étude comparative de l'évolution du stock moyen de la 1^{ère} année de suivi (2016) à la 2^e année des mesures en 2017 pour les parcelles SL1 et SL2. Une différence significative apparaît entre ces deux périodes et les constats suivants se dégagent :

- ✓ les valeurs, de 310 à 360 mm en 2016, ne sont plus que de 240 à 330 mm en 2017. Cela reste cependant un net bénéfice par rapport au témoin (150 à 240 mm) ;
- ✓ la forte fluctuation du stock hydrique d'une date de mesure à l'autre. Celle-ci est bien entendu fonction des événements pluvieux ;
- ✓ la tendance à l'augmentation progressive des amplitudes des stocks événementiels : pour la saison 2017 (elle est de 90 mm au lieu de 50 mm en 2016).

On constate d'une manière générale une phase d'humectation importante dès le début de la saison 2016 suivie d'une tendance à l'assèchement du sol vers la fin de la saison (en octobre). La saison 2017 se caractérise par une phase d'humectation rapide en juillet-août suivie d'un assèchement progressif en fin de saison.

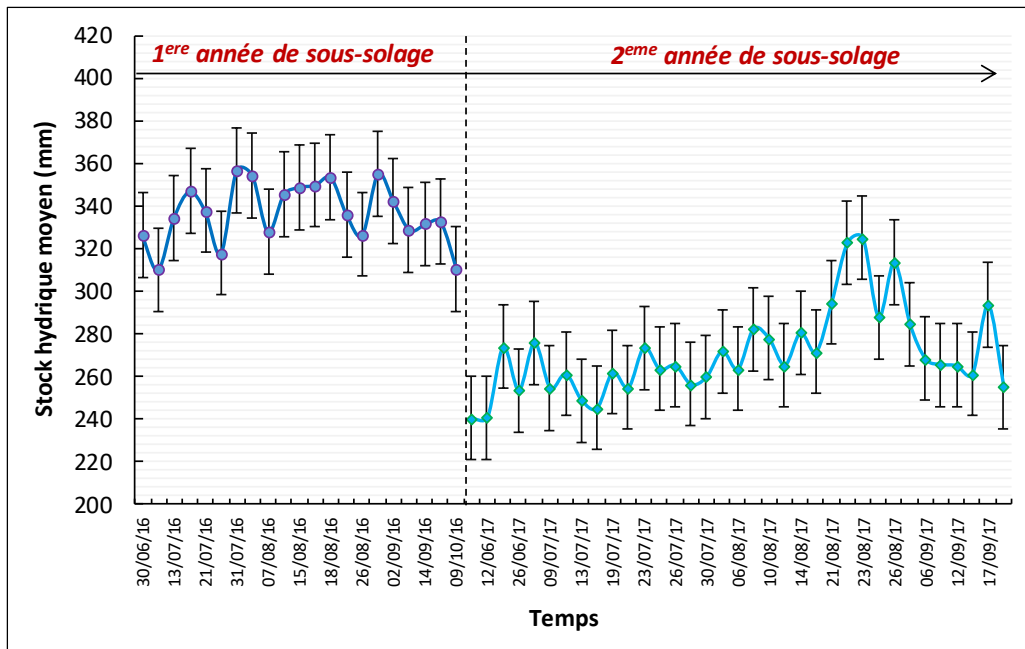


Figure 4.33. Evolution du stock hydrique pour le sous-solage en fonction du temps (cas de la parcelle SL1).

Sont représentés sur cette figure les stocks moyens calculés par date de mesure sur les trois tubes (T2, T3 et T4) situés dans la parcelle. Chaque barre d'erreur verticale sur ce graphe représente l'incertitude moyenne sur le stock liée à l'utilisation de la méthode neutronique.

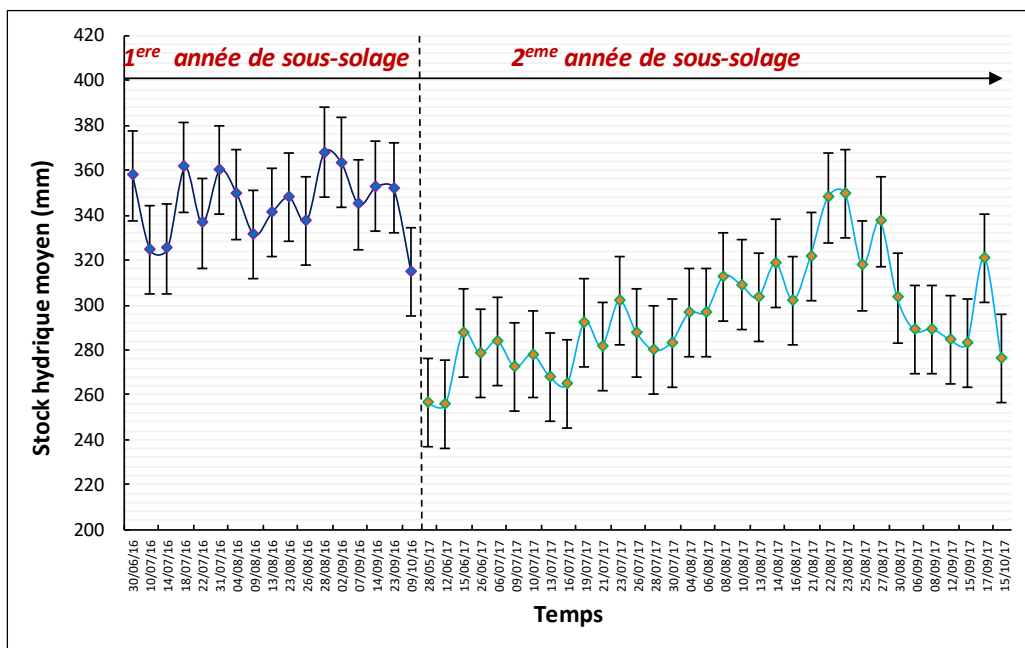


Figure 4.34. Evolution du stock hydrique pour le sous-solage en fonction du temps (cas de la parcelle SL2).

Sont représentés sur cette figure les stocks moyens calculés par date de mesure sur les trois tubes (T2, T3 et T4) situés dans la parcelle. Chaque barre d'erreur verticale sur ce graphe représente l'incertitude moyenne sur le stock.

Par rapport à l'analyse des **incertitudes sur l'estimation du stock hydrique**, la Figure 4.35 reprend les données de la Figure 4.33 mais, cette fois, en y associant l'écart-type (débiaisé) des trois valeurs de stock des tubes par parcelle. On remarque que ces écart-types (ou erreurs spatiales) sont plus petits, surtout en 2017, que les incertitudes sur l'estimation du stock. Ceci permet de déduire qu'à l'échelle de cette parcelle la variance spatiale n'est pas trop limitante. C'est un indicateur pertinent en termes de perspectives pour une future étude à grande échelle : un seul tube pourrait suffire. Ces valeurs faibles de l'écart-type (débiaisé) indiquent que l'erreur commise lors des estimations du stock moyen est petite. Enfin, la nette réduction de cet écart-type spatial en 2017 par rapport à 2016 montre que la parcelle s'est homogénéisée. Très probablement, les plus gros macropores se sont tassés en 2017 ce qui réduit à la fois le stock total et les différences entre tubes. La Figure pour la SL2, très similaire, est donnée en Annexe C5.

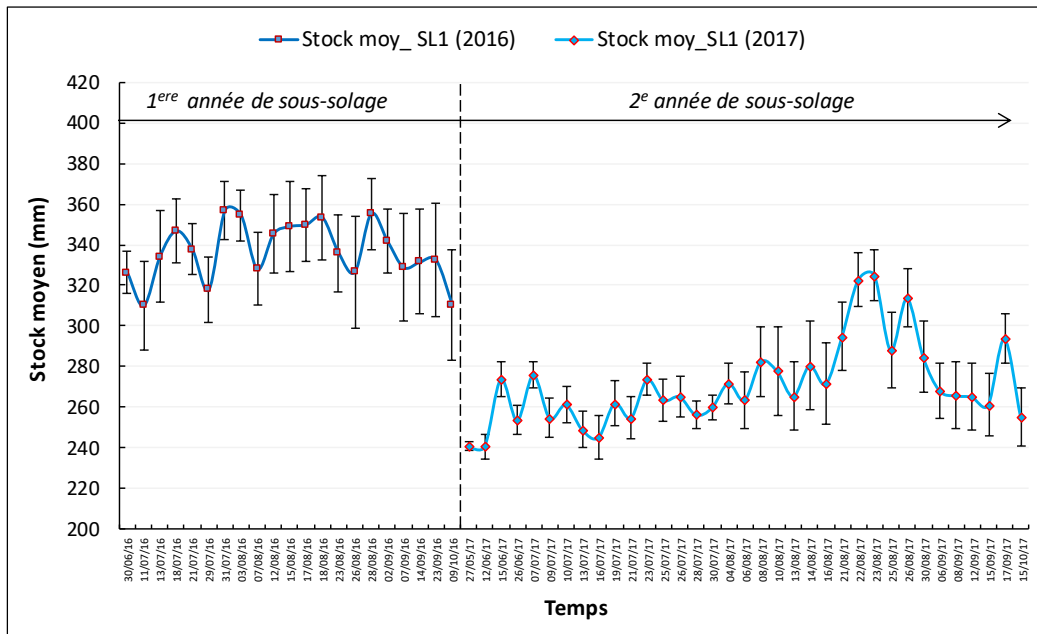


Figure 4.35. Evolution du stock hydrique du sous-solage SL1 avec \pm écart-type spatial (débiaisé).

Chaque barre d'erreur correspond à l'écart-type entre les trois valeurs des tubes de la parcelle.

Les paramètres statistiques déterminés indiquent que la variabilité spatiale de la teneur en eau est faible au sein d'une même surface aménagée. L'observation de la variance du stock et de l'écart-type faibles confirme cette tendance. Connaissant la variance du stock à diverses profondeurs, il est possible de calculer les limites droite et gauche de ce paramètre par intervalle de confiance à 80 %. La Figure 4.36 illustre ce calcul pour le stock du tube T2 de la SL1.

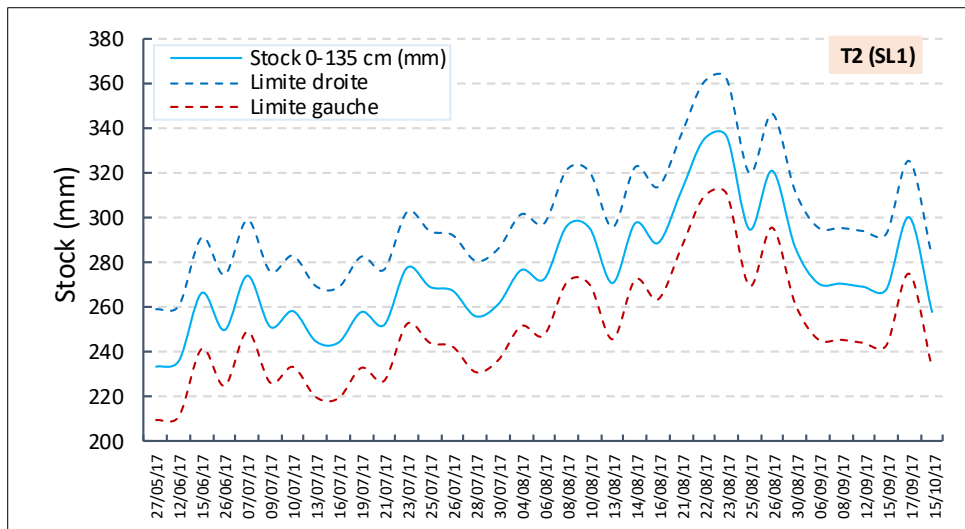


Figure 4.36. Tube 2 de la parcelle de sous-solage SL1. Limites droite et gauche de l'intervalle de confiance IC à 80 % sur le stock.

4.10. Analyse de la variation du stock en fonction de la pluie

La comparaison des variations du stock d'eau (ΔS) dans la couche 0-135 cm avec les lames précipitées est présentée dans la Figure 4.37 pour l'année 2017. Il s'agit de la relation obtenue pour les trois tubes des surfaces sous-solées. Cette analyse montre que pour certaines pluies inférieures à 20 mm, les lames d'eau infiltrées peuvent être supérieures aux pluies tombées, ce qui implique l'existence d'apports supplémentaires par l'eau de ruissellement venant de l'amont. Au contraire, pour les pluies supérieures à 40 mm, l'infiltration est inférieure à la pluie, ce qui montre qu'une partie de l'eau a ruisselé hors de la parcelle. Par rapport au témoin, le gain est remarquable et ce, pour toutes les pluies. Les résultats présentés ici sont obtenus sur la base de la sonde à neutrons. Ce sont donc des résultats provisoires en attendant le calcul des variations du stock à l'échelle des parcelles par EM38.

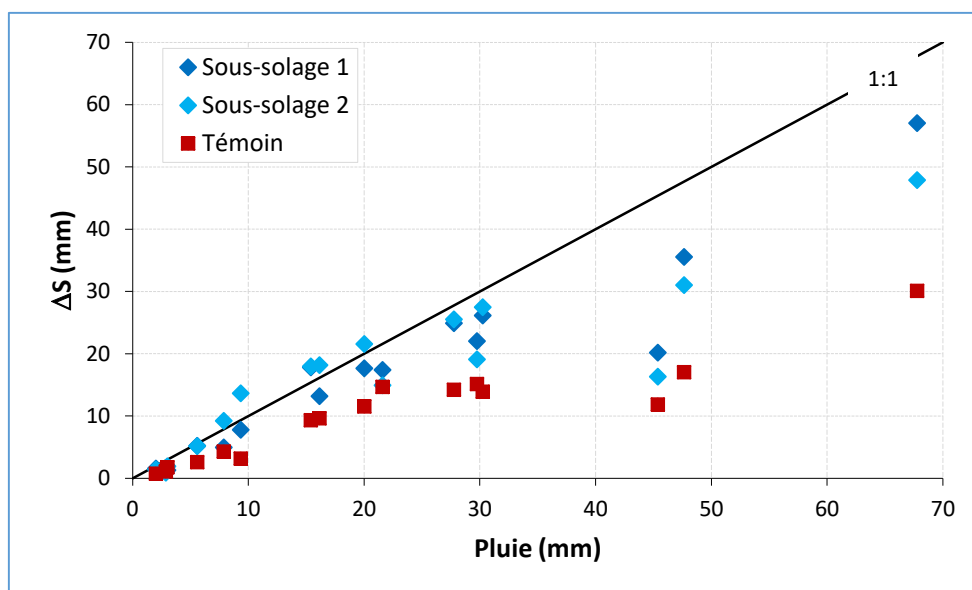


Figure 4.37. Variation événementielle de stock hydrique en fonction de la pluie sur les parcelles de sous-solage SL1 et SL2 en comparaison avec le témoin

4.11. Influence du sous-solage sur la régénération des sols nus dégradés

En favorisant l'infiltration plutôt que le ruissellement, l'aménagement par sous-solage entraîne l'accroissement de la productivité de la biomasse végétale (Figure 4.38) des espaces nus dans lesquels, sans aménagement, rien ne pousse. La végétation, surtout herbacée, tend à s'installer dès même le début de la saison pluvieuse, soit au début du mois de juin.

Le sous-solage est plus efficace sur le développement du couvert végétal (notamment les herbacées) avec une densité plus importante à l'échelle parcellaire en comparaison avec les banquettes ayant un impact très limité dans l'espace. La régénération des ligneux y est par conséquent très lente. On note cependant l'apparition de quelques individus de *Guiera senegalensis*, de *Combretum micrantum*, de *Combretum glutinosum* et *Accacia nilotica* qui sont à chaque fois détruits par les passages annuels de la sous-soleuse suite à la reprise de l'aménagement (sous-solage) en 2016 ou broutés par les animaux. Sur les banquettes, en revanche, la végétation résiste et profite de l'amélioration de l'humidité du sol pour se développer pendant plusieurs années mais uniquement le long des cuvettes creusées.



Figure 4.38. Impact du sous-solage sur la régénération du couvert végétal, parcelle SL1 en août 2016.

Conclusion partielle

En conclusion, les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence les différents impacts des banquettes et du sous-solage sur l'amélioration du comportement hydrologique des sols. Dans un environnement semi-aride où les précipitations fluctuent d'une année à l'autre, la mise en œuvre de l'aménagement en banquettes se traduit par une nette augmentation de la teneur en eau. En surface (10 cm de profondeur), celle-ci croît de $0,07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à une valeur maximale comprise entre $0,20$ et $0,36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur les banquettes alors qu'elle varie de $0,08$ à $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur le témoin. Le front d'infiltration est remarquablement plus profond surtout sous les fossés des banquettes où il peut représenter plus de trois fois l'infiltration sur le témoin. Cela fait que le contenu en eau du sol a significativement augmenté pour être environ deux fois important que sur le sol non travaillé.

Le sous-solage, en retardant la production du ruissellement, favorise aussi l'infiltration et la rétention d'eau dans le sol. L'étude de la dynamique des profils d'humidité obtenus montre que la profondeur du front d'infiltration a plus que triplé par rapport au sol nu (témoin). Dans certaines conditions, l'infiltration s'observe au-delà même de la profondeur maximale de mesure d'humidité (190 cm). Cela constitue une plus-value considérable apportée par cette technique de remaniement profond du sol (sous-solage) en termes de rétention d'eau.

En plus, la mise en relation des variations du stock hydrique (ΔS) avec la lame précipitée montre que le sous-solage retient plus d'eau localement que les banquettes qui perdent une partie de l'eau stockée superficiellement par évaporation. Dans les deux cas, l'impact sur la réduction du ruissellement à l'échelle locale est plus que significatif car la lame d'eau stockée dans le sol peut parfois dépasser la quantité de la pluie.

Les effets de ces deux techniques de CES vont à présent être étudiés à l'échelle des surfaces aménagées (échelle de la parcelle) puis des bassins versants.

Chapitre 5. Détermination du stock hydrique à partir des mesures EM38

La méthode de mesure de conductivité électrique par EM38 utilisée dans ce travail vise à quantifier et cartographier l'impact hydrologique des actions d'aménagement à l'échelle de la parcelle. Dans ce contexte, la connaissance des techniques de CES améliorant la capacité de rétention d'eau dans le sol est indispensable pour la compréhension du comportement hydrologique des sols à l'échelle de la parcelle puis du bassin versant. Sont présentés dans ce chapitre les résultats de la méthode de prospection EM38 par rapport à l'étude du fonctionnement hydrique des sols. Nous exposerons les différentes relations d'étalonnage obtenues et utilisées pour évaluer l'efficacité des aménagements. Le résultat de la cartographie du stock hydrique estimé sur les différentes surfaces aménagées sera ensuite présenté et interprété dans ce chapitre.

5.1. Résultats de la méthode géophysique (conductivité électrique apparente)

L'analyse statistique des données a permis d'étudier la dynamique spatio-temporelle de la conductivité électrique mesurée dans les parcelles aménagées par rapport au témoin. Rappelons qu'il a été démontré que les variations de température influencent la conductivité électrique du sol (Michot et al., 2007). Ainsi, pour contrôler cet effet de température, nous avons effectué des aller-retours réguliers sur une base fixe définie par parcelle. Ceci nous a permis de corriger préalablement les données brutes par application des équations 3.25 et 3.26. L'étape suivante a consisté à la réalisation des cartes à l'aide du logiciel Surfer 8. La présentation des données est faite sous forme d'images en 2D. Rappelons encore que la cartographie par EM38 a été menée suivant une maille de 5 x 5 m sur le sous-solage et de 2 x 2 m sur les banquettes (§3.4.2.3).

5.1.1. Evolution de la conductivité électrique apparente

La Figure 5.1 montre la variation des profils de conductivité électrique mesurés dans le sous-solage et les banquettes. Il s'agit dans tous les cas de la conductivité électrique apparente verticale (c'est-à-dire, en mode vertical) notée CEav. On constate de manière générale que la gamme des valeurs de conductivité électrique varie en moyenne entre 1 et 10 mS/m⁻¹ sur les parcelles constituées essentiellement des sols sablo-limoneux (Tableau 4.2 à 4.4). Dans le sous-solage (Figure 5.1 "SL1"), on note la présence des anomalies de forte amplitude de conductivité électrique. Elles sont encerclées d'une ellipse en pointillés noirs. Ce sont des endroits fortement conducteurs où les mesures sont probablement bruitées. L'hypothèse de la présence d'un déchet

métallique enfoui dans le sol est peu plausible pour la seule saison que le site est situé en milieu rural (sur un plateau non cultivé et loin des centres habités). Ces zones de forte conductivité électrique peuvent être des chemins préférentiels de l'infiltration de l'eau. En outre, la combinaison des mesures et observations de terrain montre que la conductivité électrique varie d'un point de mesure à un autre en fonction de l'état d'humidité du sol. Un écart assez prononcé entre les valeurs mesurées au début (en mai) et au milieu (en août) de la saison est bien observé, conformément aux attentes. Enfin, ces profils montrent la réponse des surfaces aménagées prospectées face aux apports d'eau des pluies.

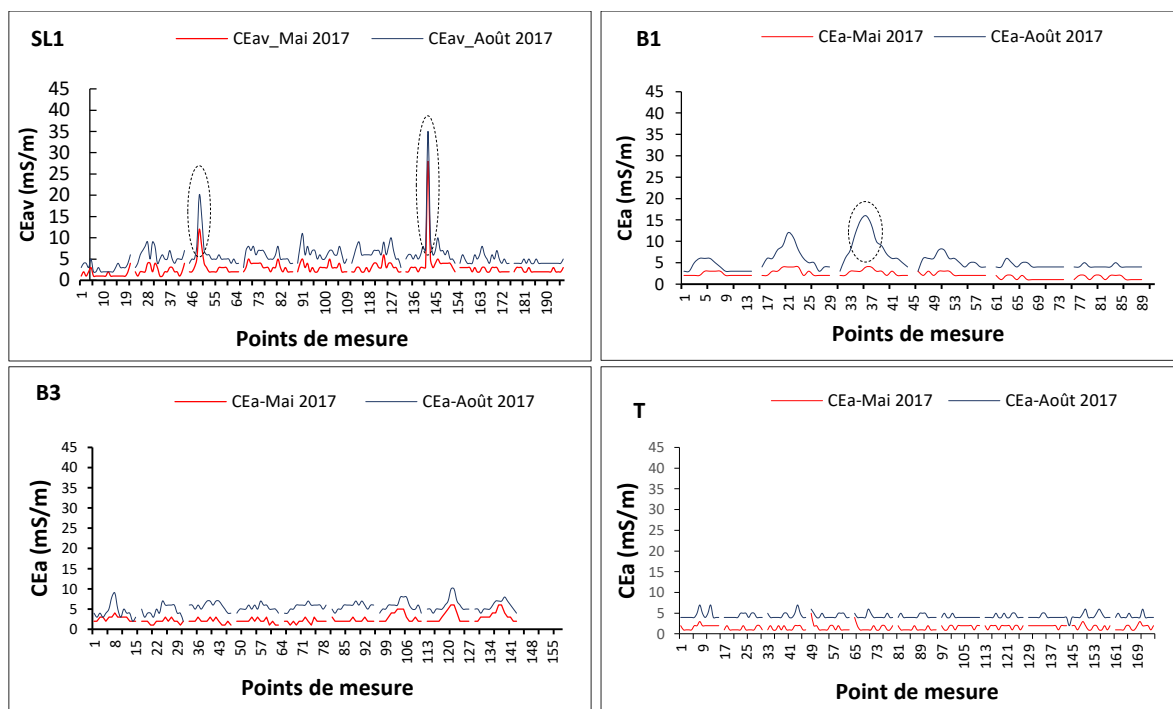


Figure 5.1. Variations de la conductivité électrique apparente verticale des profils (mesures prises en mode vertical) mesurés dans le sous-solage (SL1), dans les banquettes (B3 et B1) et sur le témoin.

Les profils en rouge indiquent la situation initiale (en mai), en bleu, ils correspondent à la conductivité électrique mesurée au milieu de la saison (en août). Les portions de courbe correspondent aux différentes lignes de mesure, de l'aval vers l'amont.

5.1.2. Interpolation par krigeage spatial des mesures EM38

Le protocole expérimental mis en œuvre a permis de collecter les données qui ont été dépouillées et analysées par la méthode d'interpolation spatiale afin d'estimer les valeurs de conductivité en des points non prospectés dans les parcelles. Elle permet d'aboutir à la cartographie grâce au module Grid data du logiciel surfer. La Figure 5.2 montre un exemple

des cartes d'iso-contours réalisées à partir des profils longitudinaux de conductivité électrique apparente.

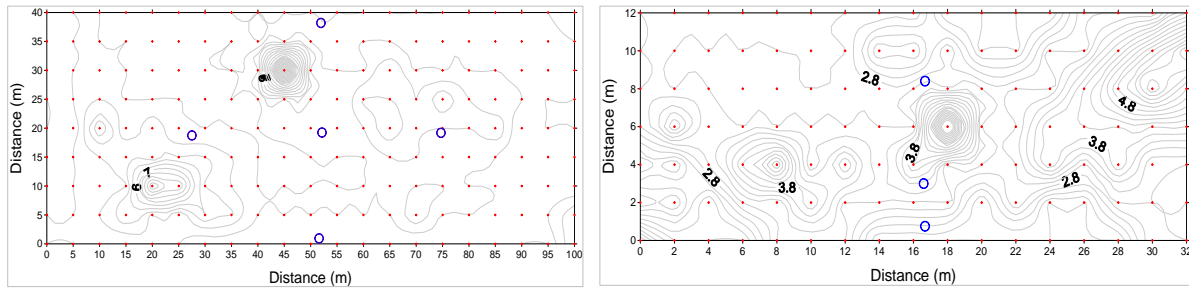


Figure 5.2. Exemple des cartes d'iso-contours de CEav obtenues à l'aide de la grille d'interpolation régulière dans une parcelle du sous-solage (carte de gauche) et dans une banquette (carte de droite).

Les ronds bleus et les points rouges indiquent respectivement les tubes neutroniques et les points de suivi de la conductivité électrique.

5.1.3. Evolution spatio-temporelle de la conductivité électrique apparente

L'analyse de la dynamique temporelle de la conductivité électrique des parcelles s'est basée sur les calculs des écarts et des rapports de conductivité électrique apparente avec les couples de valeurs avant et après pluie. La spatialisation de ces données a permis d'identifier les zones dynamiques et stables à l'échelle saisonnière. Cette approche d'analyse permet de décrire la structuration spatiale de la conductivité électrique apparente mesurée dans chaque parcelle. Une première interprétation des données est ainsi effectuée sur la base de ces cartes des écarts et des rapports de conductivité électrique apparente. Néanmoins, il faut noter que la réduction de deux valeurs en une seule (écart ou rapport) fait nécessairement perdre de l'information.

❖ Cartographie des écarts de conductivité électrique apparente

Pour la caractérisation de la dynamique temporelle des parcelles, nous avons réalisé une cartographie des écarts (CEav après – CEav avant). L'essentiel des résultats cartographiques se trouve en Annexes D1 à D6. La Figure 5.3 donne un exemple des cartes des écarts (ou deltas) de conductivité électrique apparente. Leur analyse permet de faire ressortir i) des variations de conductivité électrique apparente assez fortes dans les aménagements par rapport au témoin ; ii) la présence des zones dynamiques (plus ou moins conductrices) et stables en termes de conductivité électrique.

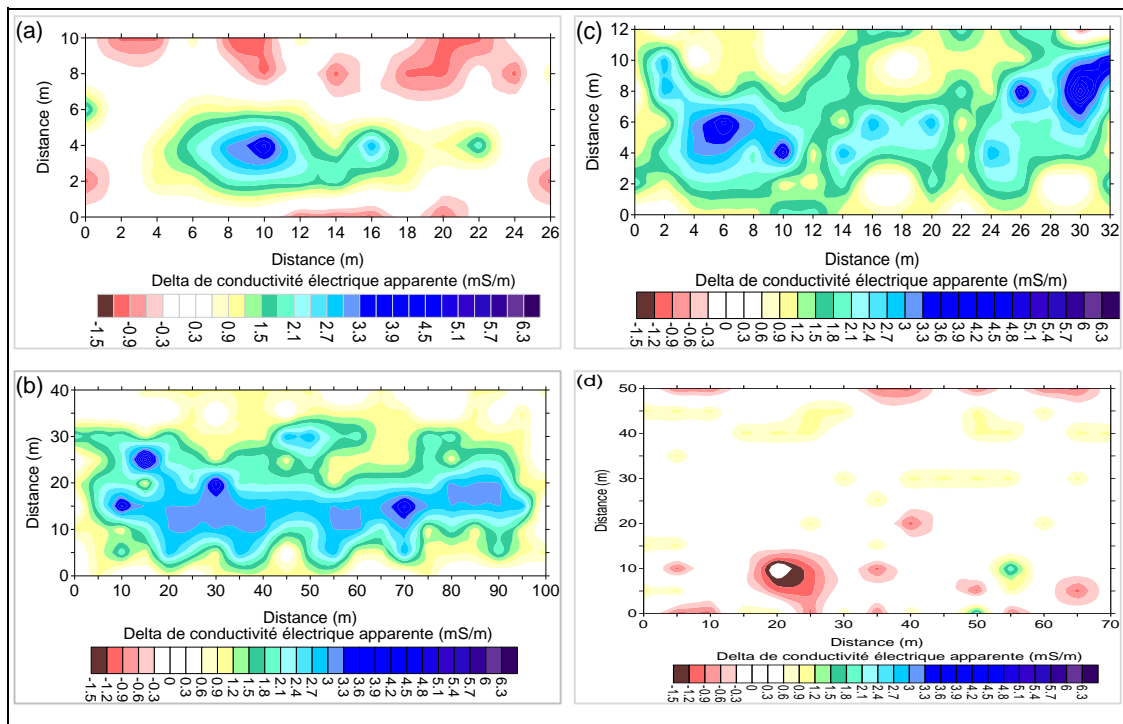


Figure 5.3. Cartographie des deltas de conductivité électrique dans les banquettes (a et c), sur la parcelle de sous-solage 1 (b) et sur le témoin (d). Les mesures de conductivité spatialisées ici comme exemple ne sont pas effectuées à la même date.

Ces cartes réalisées sur la base des mesures effectuées à des dates différentes montrent que les écarts de conductivité (exprimés en mS/m) sont systématiquement plus faibles sur le témoin que les surfaces aménagées en banquettes ou en sous-solage pendant la période de suivi.

❖ Cartes des rapports de conductivité électrique apparente

On s'appuie sur le calcul des rapports de conductivité apparente pour décrire la dynamique événementielle des parcelles suivies. Ceux-ci se présentent sous forme de ratio (équation 3.29) traduisant une gamme de couleurs distribuées autour de la valeur 1 ($\pm 0,2$) qui indique l'absence de variation. Les valeurs supérieures ou inférieures traduisent les zones dynamiques. Les cartes des rapports de CEa réalisées sont présentées en Annexe E, un exemple est donné sur la Figure 5.4 pour les mêmes dates et événements que ceux de la Figure 5.3. Elles décrivent la réponse de l'appareil EM38 utilisé sur les parcelles aménagées et leur évolution en fonction de la pluie et ce, par rapport à un état initial mesuré avant chaque pluie. Leur analyse laisse constater une augmentation de la conductivité électrique des surfaces aménagées qui passent d'un état plus sec au début de la saison à un état fortement humide pendant les mois de juillet et août. Cette augmentation de la conductivité est fortement liée au rapprochement des épisodes pluvieux durant cette période. Sur toutes les cartes, les valeurs des rapports calculées varient en moyenne

entre 1 et 5 (très rarement inférieurs à 1). L'interprétation de celles-ci permet de distinguer trois types des zones bien distinctes : les zones de diminution (représentées en couleurs chaudes) et d'augmentation (en couleurs froides) de la conductivité électrique. Les zones claires (laissées en blanc) indiquent les endroits stables. Les rapports sont presque du même ordre de grandeur sur toutes les parcelles en banquettes mais différents de ceux du sous-solage (ayant les valeurs les plus grandes obtenues) et du témoin (les valeurs les plus proches de 1 obtenues).

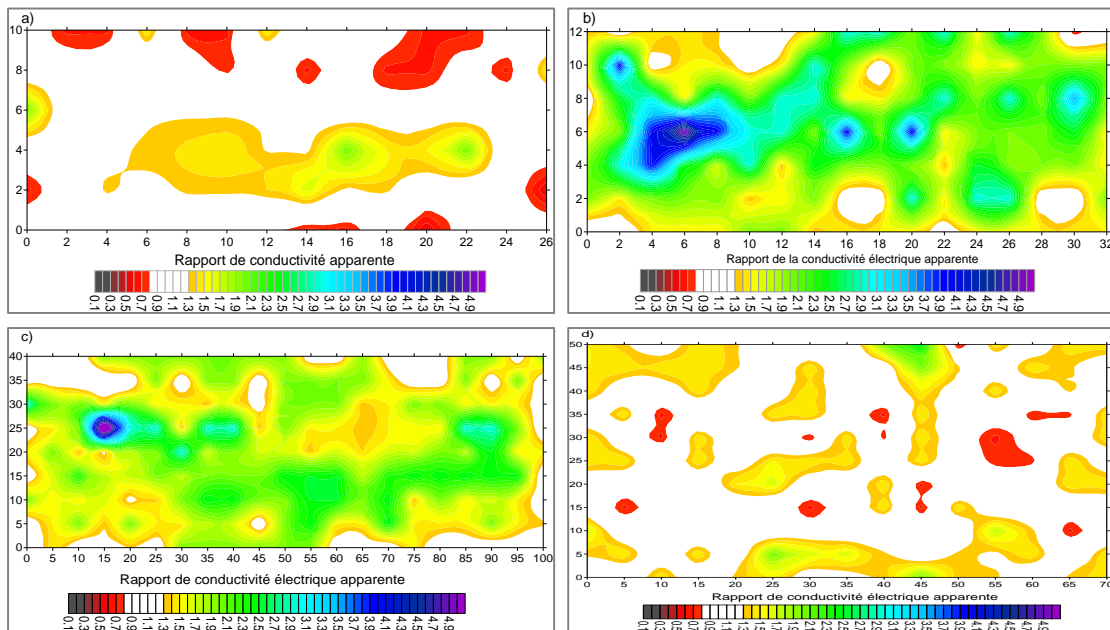


Figure 5.4. Cartographie des rapports de conductivité électrique apparente dans les banquettes (a et b), sur la parcelle de sous-solage 1 (c) et sur le témoin (d). Les mesures de conductivité spatialisées ici comme exemple ne sont pas effectuées à la même date.

A ce niveau d'interprétation, les calculs des écarts ou des rapports ne permettent pas d'estimer directement la teneur en eau encore moins de quantifier le stock hydrique, d'où l'intérêt d'utiliser et d'étalonner l'EM38 avec les mesures de l'humidité. Pour cela, il existe plusieurs méthodes d'étalonnage. Parmi celles-ci, on peut citer la méthode de régression linéaire simple pour trouver la relation statistique entre les mesures électromagnétiques et les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (Saoud, 2014) et la méthode basée sur les régressions multiples proposée par Rhoades et Corwin (1981). Elle consiste à relier les mesures de conductivité électromagnétiques avec la CE_{ps} pour chacune des couches. Par ailleurs, certains travaillent avec les rapports (Descloitres et al., 2001 ; Seladji, 2010 ; Parate, 2016 ; Wubda, 2017) afin de mettre en évidence la dynamique et la comparaison des conductivités mesurées à différentes dates ou périodes par rapport à un état de référence. Le calcul des variations des conductivités se fait à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Rapport de CEa (\%)} = \frac{CEa_{\text{final}} - CEa_{\text{initiale}}}{CEa_{\text{initiale}}} \times 100 \quad (5.1).$$

En plus, l'étalonnage des mesures électromagnétiques peut être effectué en utilisant les mesures électriques de laboratoire (Laperrousaz et Barbiéro, 1999) basées sur la régression des relations entre la conductivité électrique mesurée et la conductivité des extraits de sol saturé, la texture (Heil et Schmidhalter, 2017 ; Sanches et al., 2018) ainsi que d'autres propriétés du sol (Doolittle et Brevik, 2014). Le passage des mesures de terrain à l'esquisse cartographique (cartes des écarts ou des rapports de CEa) s'accompagne d'une perte évidente de l'information. Ce qui nous amène à étalonner directement l'appareil EM38 avec les mesures de l'humidité du sol. Les résultats de cette approche d'étalonnage sont exposés dans cette partie.

5.2. Résultats de l'étalonnage des mesures EM38

L'induction électromagnétique constitue une des mesures indirectes de la teneur en eau reposant sur la relation entre conductivité électrique apparente et teneur en eau (Busselen, 2018). Le lien direct entre ces deux grandeurs prend en compte la conductivité des particules de sol, la teneur en sel, la teneur en eau et la température (Doolittle et Brevik, 2014). De ce fait, vouloir déterminer les variations de teneur en eau à l'aide de cette méthode est une tâche difficile car la conductivité peut dépendre de la variation de teneur en argile (Heil et Schmidhalter, 2012 ; Heil et Schmidhalter, 2017). Ainsi, il est difficile de distinguer l'impact de chacun de ces facteurs (Busselen, 2018). Cependant, les propriétés texturales et la structure du sol ne changent pas trop au cours de la saison, les mesures répétées dans le temps peuvent donc permettre d'étudier la dynamique de l'eau, principal facteur de changement, dans le sol. Dans ces conditions, l'étalonnage des mesures EM38 est fondamental avant toute exploitation préalable des données. Il doit être spécifique au site (Heil et Schmidhalter, 2017) car les résultats ne sont souvent pas extrapolables sur d'autres sites ayant des caractéristiques différentes (Job et al., 1992 ; Montoroi et al., 1997). On s'est néanmoins basé sur la méthode neutronique (cf. § 3.2.1) pour étalonner l'EM38. Les résultats obtenus seront présentés suivant deux options.

5.2.1. Première possibilité : étalonnage basé sur les variations de stock

Les variations du stock (ΔS) et les rapports de conductivité électrique apparente (RCEav) sont respectivement déterminés par la méthode neutronique et par l'EM38. Ces grandeurs sont calculées par application des équations 3.8 et 3.29 de façon respective. Les résultats de corrélation entre ces variables sont présentés par parcelle et par tube. Il faut noter que ces

relations sont exposées ici pour information car elles ne seront pas utilisées pour la spatialisation et le calcul de la variation du stock à l'échelle parcellaire.

5.2.1.1. Corrélation entre variation du stock-rapports de CEav (tube par tube)

✓ Sur le site aménagé en banquettes

Pour parvenir à l'étalonnage de l'EM38 dans les banquettes, la technique de régression linéaire simple a été utilisée sur un nombre total des neuf tubes judicieusement répartis entre les trois banquettes suivies. Les relations linéaires sont effectuées sur un échantillon de 14 couples des variables (RCEa, ΔS) pour les banquettes B1 et B2 et de 12 couples pour la banquette B3. Le Tableau 5.1 présente les résultats des corrélations obtenues par tube et par banquette. Les valeurs de CEav sont obtenues par la moyenne de quatre mesures très proches du tube (principe des 4 voisins déjà énoncé plus haut).

Tableau 5.1. Récapitulatif des régressions linéaires entre les rapports de conductivité électrique apparente (RCEav) et les variations du stock (ΔS) estimées entre 0-135 cm de profondeur pour les banquettes.

Sites	N° tube	Relation rapport CEav- ΔS	R ²	Taille de l'échantillon
Banquette 1	T1	$\Delta S = 29,46RCEav - 29,75$	0,80	14
	T2	$\Delta S = 46,89RCEav - 49,61$	0,77	14
	T3	$\Delta S = 40,26RCEav - 41,89$	0,75	14
Banquette 2	T1	$\Delta S = 27,24RCEav - 28,43$	0,78	14
	T2	$\Delta S = 26,73RCEav - 24,92$	0,86	14
	T3	$\Delta S = 30,34RCEav - 31,02$	0,78	14
Banquette 3	T1	$\Delta S = 61,59RCEav - 69,24$	0,72	12
	T2	$\Delta S = 26,94RCEav - 26,70$	0,65	12
	T3	$\Delta S = 66,82RCEav - 72,35$	0,81	12

L'analyse de ce tableau montre l'existence des corrélations fortes entre les variables RCEav et ΔS . Les coefficients de détermination (R²) sont compris entre 0,72 et 0,92 sur tous les tubes sauf la valeur la plus faible (R² = 0,65) qui s'observe sur le tube T2 de la banquette B3. Ces résultats montrent que l'augmentation des variations de stock induit par les fortes pluies entraîne l'augmentation des rapports de conductivité électrique correspondants. Après certaines pluies, la conductivité dans certains endroits des banquettes peut être parfois le double de la

situation initiale observée au début de la saison en mai pendant que le sol était encore sec. La Figure 5.5 présente quelques corrélations obtenues sur les tubes des banquettes B1 et B2. Elle montre la distribution des nuages des points autour des droites de régressions et l'allure de leurs pentes respectives. Les corrélations pour la banquette B3 sont en Annexe F.

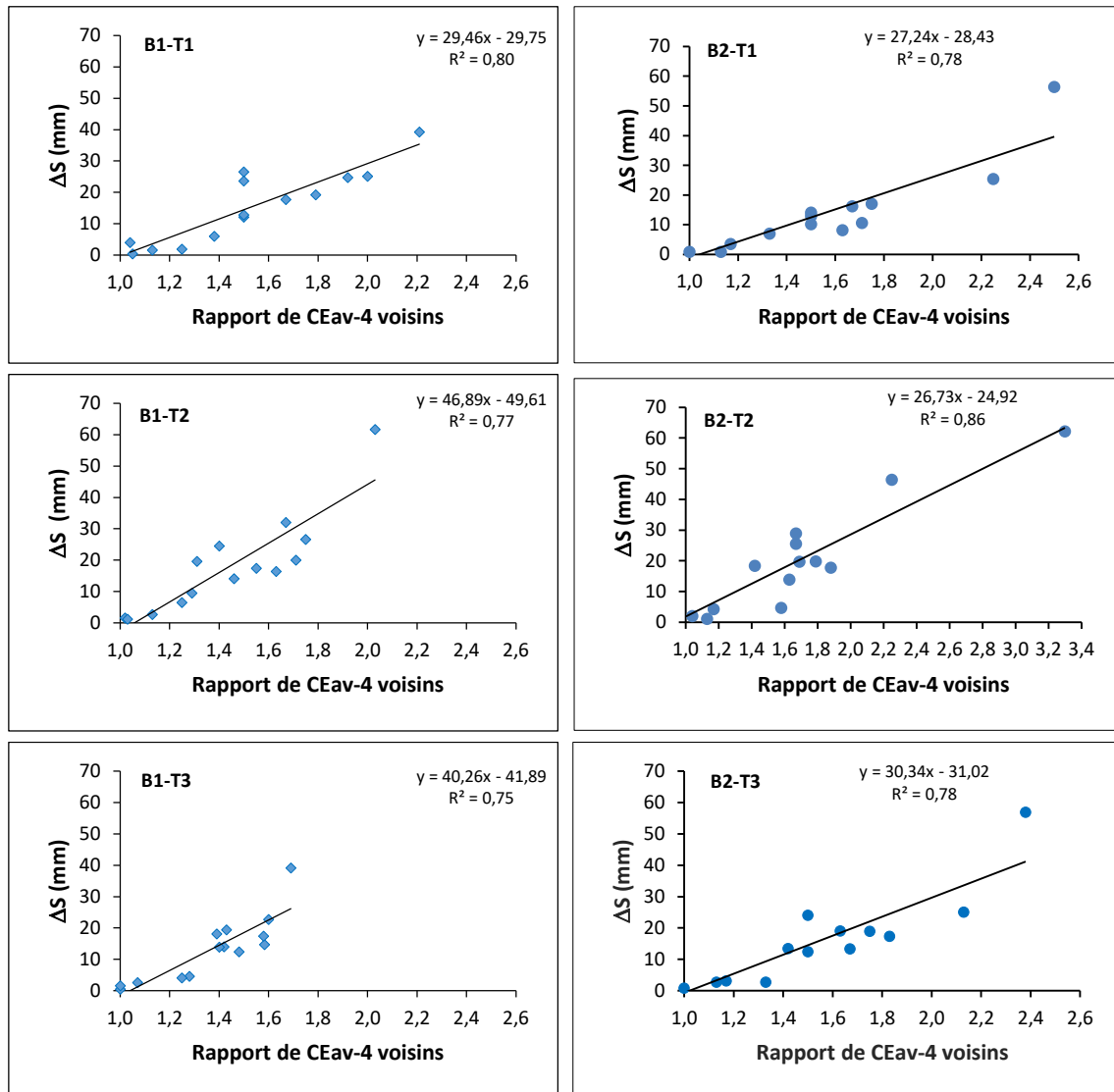


Figure 5.5. Relations entre les rapports de conductivité électrique des quatre voisins et la variation du stock hydrique ΔS (cas des banquettes B1 et B2).

✓ Sur les parcelles du sous-solage

Le même protocole des mesures a été appliqué sur le site de sous-solage. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 5.6 qui indique que le rapport de conductivité électrique croît avec les variations du stock (ΔS). Ces corrélations sont établies sur les dix tubes des deux parcelles de sous-solage (Annexes G1 et G2). Les relations sont nettement significatives avec des

coefficients de détermination (R^2) remarquablement forts, de l'ordre de 0,74 à 0,92 (Tableau 5.2). Cela implique que les rapports de conductivité apparente expliquent 74 à 92 % de la variation du stock dans le sous-solage. Les pentes des droites apparaissent assez homogènes (elles sont comprises entre 24 et 36 mm).

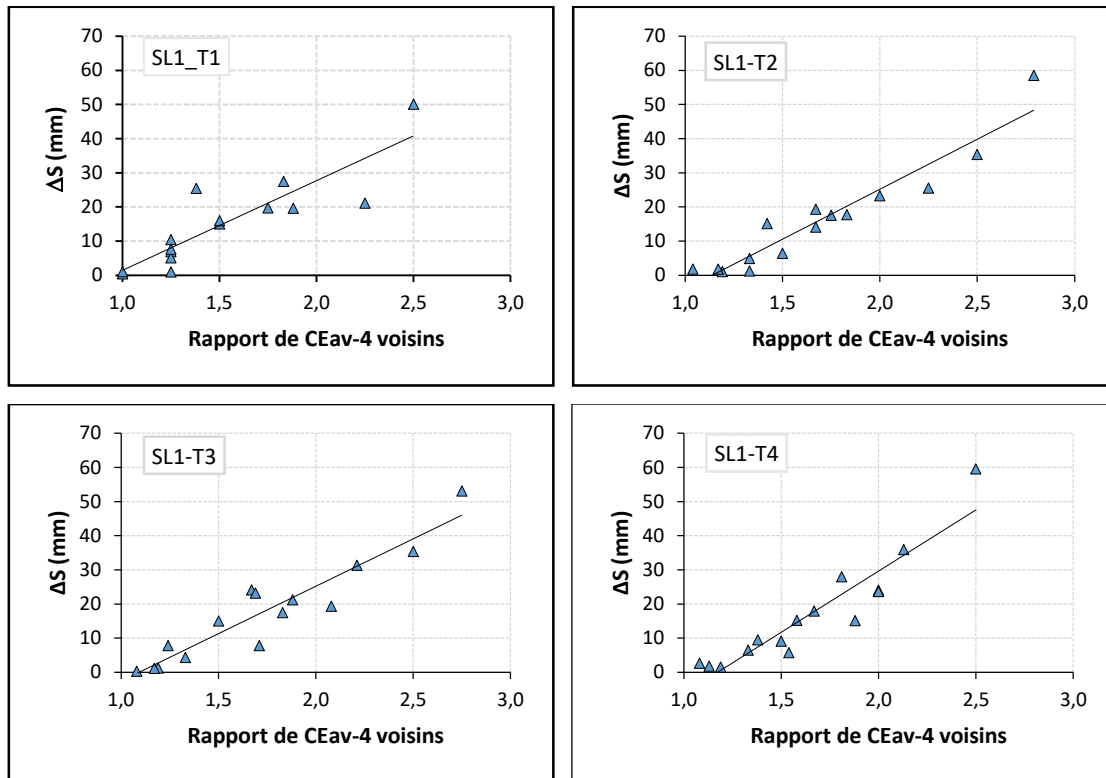


Figure 5.6. Exemple des relations entre rapport de conductivité apparente et variation de stock hydrique (ΔS) obtenues sur les tubes de la parcelle SL1.

Le récapitulatif des équations montrant le lien entre les variables est donné au Tableau 5.2 mettant en évidence que l'augmentation des rapports de conductivité électrique est relativement liée à l'accroissement des variations du stock. La gamme des valeurs de ces rapports varie entre 1 et 3 pour un ΔS variable de 0 à 60 mm.

Tableau 5.2. Récapitulatif des régressions linéaires entre les rapports de conductivité électrique apparente RCEav et les variations du stock (ΔS) estimées entre 0-135 cm de profondeur pour le sous-solage.

Sites aménagés	Tubes	Equations RCEav- ΔS	Valeur R ²	Taille échant.
Sous-solage (SL1)	T1	$\Delta S = 26,24RCEav - 24,78$	0,78	15
	T2	$\Delta S = 29,28RCEav - 33,36$	0,91	15
	T3	$\Delta S = 27,73RCEav - 30,27$	0,88	15
	T4	$\Delta S = 35,89RCEav - 42,10$	0,87	15
	T5	$\Delta S = 26,28RCEav - 26,26$	0,86	15
Sous-solage (SL2)	T1	$\Delta S = 24,77RCEav - 25,56$	0,74	15
	T2	$\Delta S = 23,61RCEav - 23,04$	0,92	15
	T3	$\Delta S = 25,24RCEav - 25,65$	0,82	15
	T4	$\Delta S = 28,05RCEav - 28,47$	0,79	15
	T5	$\Delta S = 29,17RCEav - 29,03$	0,76	15

✓ Sur la parcelle témoin

La Figure 5.7 présente les corrélations obtenues sur la parcelle témoin. Le premier constat est que les valeurs des rapports de conductivité apparente sont plus faibles, elles ne dépassent guère 1,90 pour un ΔS compris entre 0 et 40 mm. Malgré la dispersion plus prononcée des nuages de points autour des droites (surtout sur le tube T2), les corrélations sont hautement significatives avec un coefficient R² compris entre 0,75 et 0,87. Cependant, on remarque une certaine dispersion qui peut s'expliquer par l'encroûtement qui, en limitant la profondeur d'infiltration, modifie la relation entre les deux grandeurs.

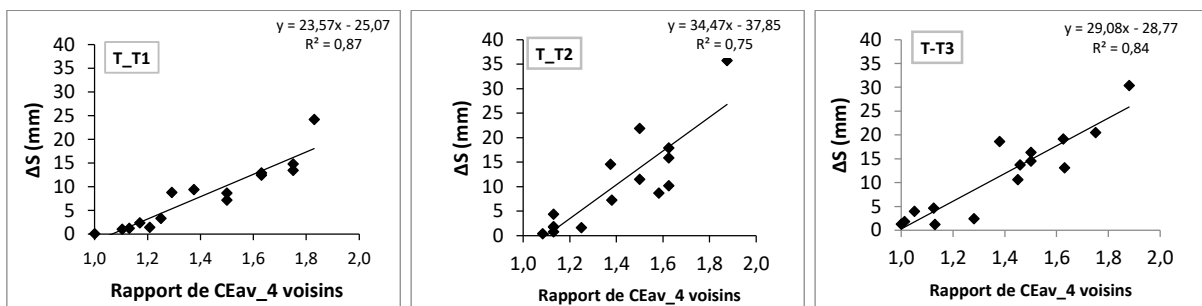


Figure 5.7. Relations entre rapport de conductivité électrique apparente (CEav des quatre plus proches possibles voisins) et variation de stock (ΔS) obtenues sur le témoin.

5.2.1.2. Corrélation entre ΔS et rapport moyen de la CEav de la parcelle entière

Outre les corrélations locales (tube par tube) entre ΔS et rapports de CEav des 4 voisins, nous avons aussi essayé de corrélérer les mêmes valeurs de ΔS (toujours tube par tube) avec les rapports moyens de la conductivité apparente calculés à l'échelle de la parcelle entière. Ils sont déterminés par date de pluie en utilisant l'équation 3.30. L'objectif visé ici consiste à vérifier si, en utilisant les valeurs moyennes obtenues sur la parcelle entière et un seul tube neutronique, les corrélations peuvent se dégrader ou non. Si elles ne se dégradent pas, alors il serait théoriquement possible de suivre une parcelle par EM38 et un seul tube neutronique. Le Tableau 5.3 donne une synthèse des résultats obtenus par tube et par parcelle.

On constate que les corrélations restent élevées avec un coefficient de détermination (R^2) se situant entre 0,71 et 0,90 sur l'ensemble des tubes du sous-solage. Sur les banquettes, les relations sont aussi satisfaisantes. Le plus faible coefficient de détermination ($R^2 = 0,71$) est observé sur le tube T1 de la banquette B2, tandis que le plus élevé ($R^2 = 0,90$) est obtenu sur les tubes T1 et T3 des banquettes B1 et B3 respectivement. Pour le cas spécifique du témoin, la relation apparaît moindre par rapport aux résultats obtenus sur les aménagements. La valeur de R^2 ne dépasse pas 0,71 pour les trois tubes de ladite parcelle. Ceci s'explique simplement par les gammes de variation restreintes des variables mises en jeu.

Tableau 5.3. Résumé des coefficients des corrélations linéaires R^2 entre le rapport moyen de la conductivité électrique apparente de la parcelle entière et les variations de stock (ΔS).

Parcelles expérimentales	Numéros des tubes d'humidité				
	Tube 1	Tube 2	Tube 3	Tube 4	Tube 5
Sous-solage 1	0,75	0,75	0,89	0,80	0,90
Sous-solage 2	0,79	0,88	0,71	0,77	0,80
Banquette 1	0,90	0,80	0,80		
Banquette 2	0,71	0,80	0,77		
Banquette 3	0,83	0,80	0,90		
Témoin	0,71	0,70	0,70		

Globalement, les résultats mettent en évidence l'existence de relations statistiques nettes entre les rapports de conductivité apparente et les variations du stock (Annexe G). La dispersion, bien que limitée, ne permet pas de remettre en cause la linéarité de ces relations. Suite à ces résultats, on peut déduire que parmi les paramètres dont dépend la conductivité électrique du sol, les variations du stock d'eau du sol jouent un rôle particulièrement sensible sur la fluctuation du signal EM38. Toutefois, les paramètres des régressions linéaires obtenus changent d'un site à

l'autre en fonction du type d'aménagement et du point de mesure considéré. Par rapport à la relation entre CEa et θ , Laperrousaz et Barbiéro, (1999) ont par ailleurs obtenu un coefficient de détermination de 0,60, donc assez similaire à nos résultats.

Malgré les bonnes corrélations obtenues, cette méthode d'étalonnage de l'EM38 basée sur les rapports de conductivité électrique et les variations de stock engendre une perte d'information due aux calculs des grandeurs par variations. Pour cette raison, nous avons choisi d'étalonner directement l'EM38 avec le stock hydrique. Ceci permettra de connaître non seulement les variations de stock mais aussi les stocks eux-mêmes.

5.2.2. Deuxième principe : étalonnage de l'EM38 avec le stock hydrique

Afin de leur donner un sens hydrologique et agronomique, les mesures de conductivité électrique ont été étalonnées sur la base du modèle de régression linéaire simple. Les données mesurées en mode vertical sont utilisées afin d'établir des corrélations statistiques avec le stock hydrique déterminé indirectement après étalonnage de la sonde à neutrons. C'est cette méthode qui fait perdre le moins d'information. Nous présentons dans cette partie, les résultats de l'étalonnage effectué par parcelle expérimentale.

5.2.2.1. Analyse des relations conductivité électrique apparente-stock

Avec les mesures EM38 effectuées en mode vertical, la capacité d'exploration du sol de l'appareil peut ainsi atteindre 1,5 m dans un profil du sol homogène (Corwin et Lesch, 2005). Notons par ailleurs que la profondeur maximale de nos mesures d'humidité neutronique est de 190 cm.

5.2.2.1.1. Analyse des relations d'étalonnage de la parcelle témoin

La Figure 5.8 présente la distribution des nuages de points sur les droites d'étalonnage réalisées sur le témoin. D'après ce graphique, les nuages de points sont légèrement différents pour les trois tubes, signe de variabilité spatiale non expliquée, peut-être en partie liée à l'effet de l'installation des tubes. Bien que les corrélations soient bonnes, R^2 compris entre 0,76 et 0,81, on remarque que les tubes présentent un état d'humidité nettement plus sec par rapport à ce qui s'observe sur les banquettes et le sous-solage (voir plus loin). La gamme des valeurs de conductivité électrique varie seulement de 1 mS/m à moins de 4 mS/m pour un stock variable entre 150 et 235 mm tout au long de la période d'expérimentation.

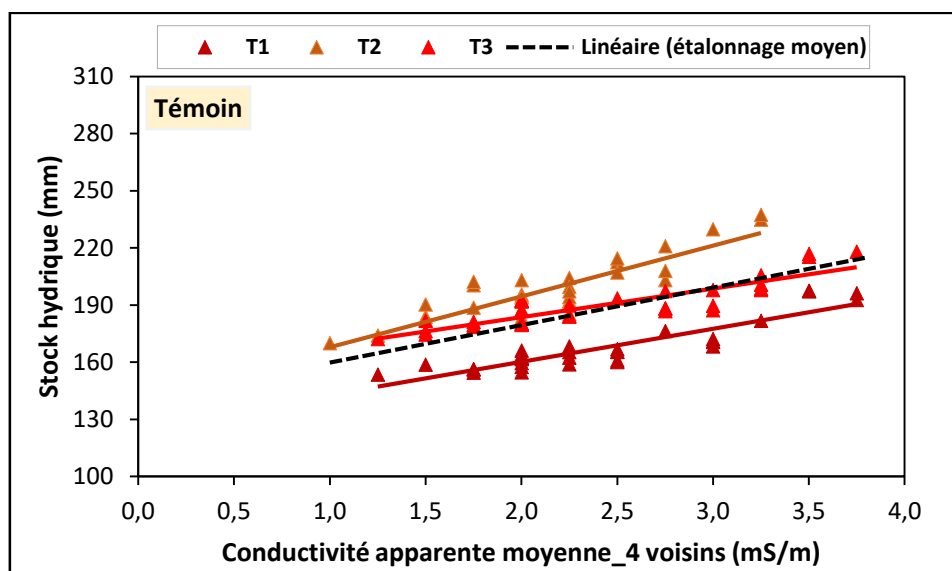


Figure 5.8. Distribution des nuages de points et détermination d'un étalonnage moyen (droite en pointillés) sur le témoin. Les droites en rouge indiquent les régressions linéaires déterminées par tube de mesure neutronique.

Quant au Tableau 5.4, il présente le résumé des coefficients des relations et leurs incertitudes associées. Celui-ci illustre des valeurs des corrélations fortes obtenues sur les trois tubes d'humidité installés dans la parcelle témoin.

Tableau 5.4. Valeurs des coefficients (pente a et ordonnée à l'origine b) et leurs incertitudes pour la parcelle témoin.

N° tube-témoin	a	S(a)	b	S(b)	R^2	Couples des mesures
T1	17,35	± 1,49	125,49	± 3,73	0,81	33
T2	26,69	± 2,62	141,14	± 5,79	0,77	33
T3	14,95	± 1,50	153,80	± 3,77	0,76	33

Ces coefficients (pente et ordonnée à l'origine) sont utilisés pour déterminer un étalonnage moyen valable à l'échelle de la parcelle témoin.

➤ Analyse statistique des erreurs d'étalonnage sur le témoin

Le Tableau 5.5 donne les résultats de calcul des erreurs dues à l'étalonnage de l'EM38 sur le témoin. Les grandeurs de ces paramètres calculées entre les variables CEav et stock permettent de quantifier la qualité de l'étalonnage effectué sur le sol non aménagé.

Tableau 5.5. Résultats des estimations d'erreurs liées à l'étalonnage sur le témoin.

Paramètres statistiques	Parcelle témoin		
	T1	T2	T3
Stock moyen (\bar{S}) (mm)	167,6	198,6	190,1
CEav moyenne (mS/m)	2,42	2,15	2,42
Ecart-type résiduel (mm)	5,3	7,5	5,6
Variance du stock (mm ²)	149,1	245,0	133,7
Variance de CEav (mS ² /m ²)	0,40	0,26	0,46
Variance résiduelle (mm ²)	27,7	56,2	31,7

L'analyse de ce tableau laisse constater que l'écart-type résiduel est faible, sa valeur est comprise entre 5 et 8 mm, ce qui montre une erreur très petite sur les estimations du stock.

➤ Analyse de l'étalonnage moyen sur le témoin

Sur le sol nu, un étalonnage moyen a été déterminé sur la base des relations présentées sur la Figure 5.8 et des coefficients du Tableau 5.4. Les coefficients moyens que présente le Tableau 5.6 sont utilisés pour estimer le stock à partir des mesures de conductivité électrique pour la parcelle entière. Pour cela, l'équation utilisée est de type :

$$\text{Stock (mm)} = 19,67 \text{ CEav} + 140,14 \quad (5.2).$$

Où CEav est la conductivité électrique apparente d'un point quelconque de la parcelle.

Tableau 5.6. Coefficients de la droite d'étalonnage moyen réalisé sur le témoin.

Site	Pente moyenne (\bar{a})	Intercept moyen (\bar{b})
Témoin	19,67	140,14

5.2.2.1.2. Relations d'étalonnage sur les surfaces en banquettes

Le Tableau 5.7 présente les coefficients des régressions linéaires obtenus et les incertitudes liées à l'estimation de ces grandeurs. Les corrélations sont très satisfaisantes sur l'ensemble des tubes, les valeurs du coefficient R^2 sont comprises entre 0,61 et 0,90. Cette relation peut se traduire par l'équation 5.3 reportée dans le Tableau 5.7. Sont également données dans ce dernier, les incertitudes sur la pente et sur l'ordonnée à l'origine des droites d'étalonnage. L'analyse de ce tableau indique l'existence des erreurs commises lors de l'étalonnage mais qui ne sont pas trop grandes. La plus forte incertitude sur la pente ($\pm 3,5$) s'observe sur le tube T3

de la banquette B3 et la plus faible ($\pm 0,73$) sur le tube T3 de la banquette B1. Quant aux incertitudes sur l'ordonnée à l'origine des droites, elles varient de $\pm 2,6$ à $\pm 16,2$.

Tableau 5.7. Caractéristiques des régressions linéaires effectuées entre la conductivité apparente (CEav) et le stock hydrique et leurs incertitudes associées. a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine des droites.

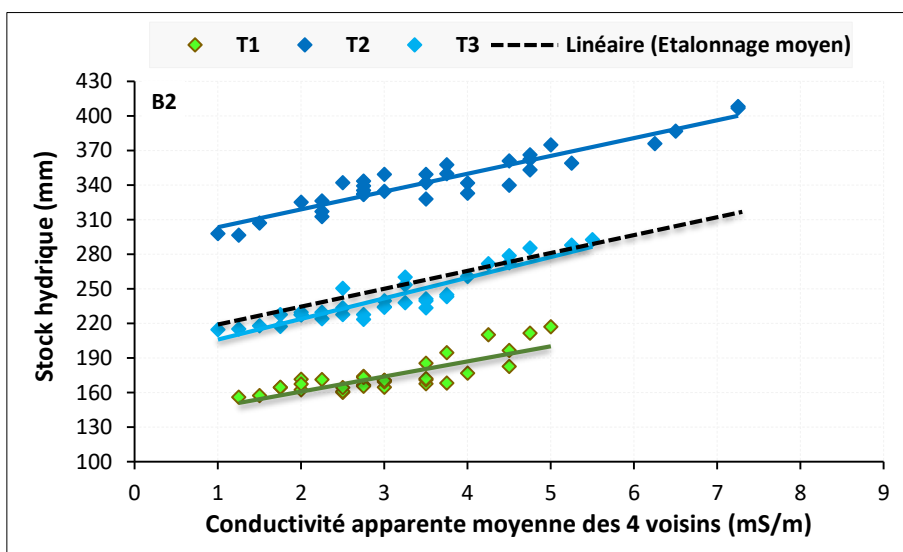
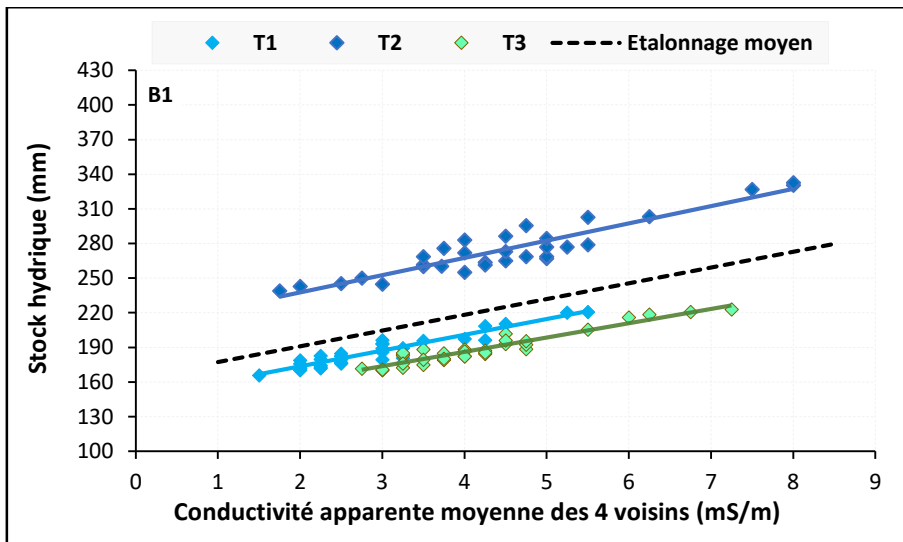
N° tubes/parcelle	Stock = a × CEav + b (5.3)					
	a	S(a)	b	S(b)	R ²	Couples des mesures
Tube 1 (B1)	13,66	±0,84	146,14	± 2,59	0,90	32
Tube 2 (B1)	12,38	± 1,09	136,67	± 5,12	0,86	32
Tube 3 (B1)	14,95	± 0,73	207,67	± 3,20	0,90	32
Tube 1 (B2)	13,09	± 1,65	134,82	± 5,20	0,67	33
Tube 2 (B2)	15,45	± 1,01	287,87	± 4,06	0,88	33
Tube 3 (B2)	17,90	± 1,40	188,10	± 4,52	0,84	33
Tube 1 (B3)	16,74	± 1,74	210,61	± 8,09	0,79	27
Tube 2 (B3)	21,55	± 2,39	233,14	± 9,24	0,76	27
Tube 3 (B3)	22,37	± 3,54	179,69	± 16,21	0,61	27

D'après ces résultats, il existe une bonne relation entre le stock et la conductivité électrique apparente. En effet, cette dernière explique 61 à 90 % (80 % en moyenne) de la variance du contenu en eau du sol aménagé par des banquettes. Il est toutefois important de notifier la faible variation de la conductivité (sensibilité faible de l'EM38) lorsque les mesures s'effectuent après les petites pluies (≤ 5 mm). Plusieurs études (Sheets et Hendrickx, 1995 ; Corwin et Lesch, 2005 ; Heil et Schmidhalter, 2012) ont par ailleurs démontré ce lien fort entre la rétention d'eau du sol et la conductivité apparente mesurée par EM38.

➤ Présentation et analyse comparée des droites d'étalonnage

Pour comparer le comportement hydrique des tubes des banquettes, la Figure 5.9 montre la distribution des nuages de points autour des droites d'étalonnage réalisées par tube et par parcelle. Celle-ci montre le comportement hydrologique des tubes d'une même banquette puis entre les banquettes. Chaque point sur cette figure représente un couple des variables (CEav, stock). La comparaison fait apparaître que, pour une valeur donnée de CEav, les tubes T2 (situés dans les fossés) sont plus humides que les autres tubes (notamment T1 et T5 situés respectivement sur l'impluvium et en aval) présentant un comportement hydrique presque similaire. Cette différence peut être due à l'effet du fossé sur la capacité et la durée plus longue de rétention superficielle d'eau du ruissellement pouvant favoriser le drainage de l'eau. Pour la

banquette B3 particulièrement, malgré de légères différences, le comportement hydrique de ses trois tubes apparait plus homogène, avec le tube T2 du fossé à nouveau plus humide pour une valeur de CE_{av} donnée. La gamme de valeurs de conductivité apparente varie en moyenne de 1 à un maximum de 8 mS/m pour un stock fluctuant entre 150 et 410 mm sur l'ensemble des tubes des banquettes. Ceci a été aussi constaté sur les autres banquettes. Enfin, il faut souligner la linéarité tout à fait acceptable de ces relations.



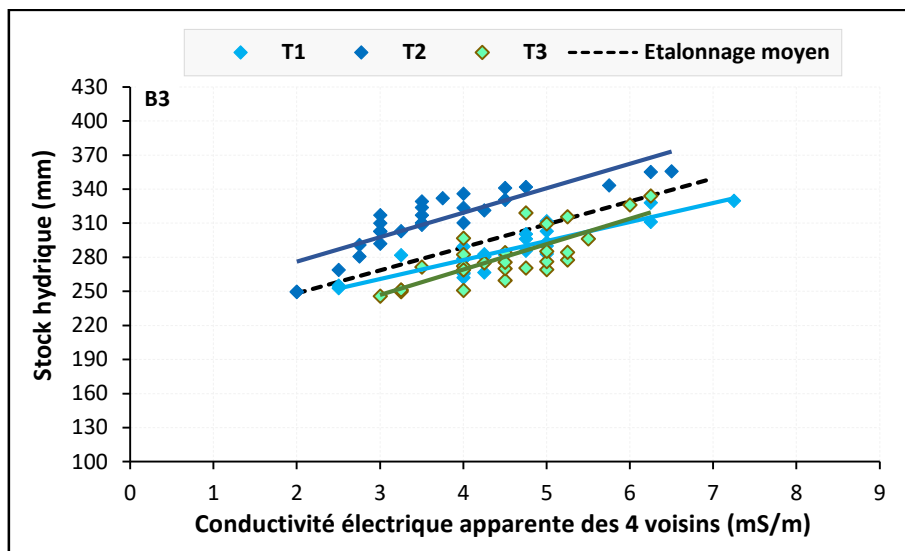


Figure 5.9. Distribution des nuages de points et détermination des droites d'étalonnage sur les banquettes. Les droites en pointillés représentent la droite d'étalonnage moyen des trois tubes.

➤ Analyse statistique des erreurs dues à l'étalonnage

Une analyse statistique des erreurs dues à l'étalonnage a été effectuée sur l'ensemble des tubes. Le Tableau 5.8 présente la synthèse des résultats de ces calculs. Celui-ci donne la description des variables notamment le stock moyen et la conductivité électrique moyenne, l'écart-type résiduel, la variance sur le stock et sur la conductivité électrique et enfin la variance résiduelle.

Tableau 5.8. Résultats des calculs d'erreurs liées à l'étalonnage sur les banquettes.

Paramètres statistiques	Banquette B1			Banquette 2			Banquette B3		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Stock moyen (mm)	186,0	274,5	188,9	174,1	344,9	242,5	286,4	312,4	280,4
CEav moyenne (mS/m)	2,92	4,47	4,22	3,00	3,68	3,04	4,53	3,70	4,50
σ résiduel (mm)	4,4	8,8	4,4	8,7	8,9	8,7	8,8	13,3	14,6
Var. stock (mm ²)	191,2	562,0	200,5	228,1	681,8	472,1	364,9	750,4	554,3
Var. CEav (mS ² /m ²)	0,92	2,17	1,18	0,89	5,83	1,24	1,02	1,24	0,68
Var. résiduelle (mm ²)	19,6	77,1	19,2	75,5	79,7	75,1	77,8	176,5	213,6

Ces différents paramètres permettent d'apprécier la qualité ou la précision avec laquelle est effectué l'étalonnage de l'appareil EM38 sur les sols aménagés en banquettes. Enfin, on remarque une forte variance résiduelle entre les tubes d'une même banquette mais aussi d'une banquette à l'autre. L'écart-type résiduel, plus élevé (environ 15 mm) sur le tube T3 de la

banquette B3, est plus faible pour les tubes des banquettes B1 et B2 (entre 4 et 9 mm). La précision varie donc assez significativement d'un tube à l'autre et d'une banquette à l'autre.

➤ **Analyse des coefficients d'étalonnage moyen valable par banquette**

En comparant les tubes d'une même parcelle en fonction de leurs comportements hydriques, on a pu déterminer un étalonnage moyen spécifique par banquette (Figure 5.9). Les équations d'étalonnage des tubes ont été utilisées pour calculer les coefficients pente et intercept moyens permettant de convertir directement la conductivité électrique en stock hydrique à l'échelle de la parcelle entière. Le Tableau 5.9 présente les résultats obtenus pour les trois banquettes. Ce sont ces coefficients qui ont été utilisés pour effectuer la conversion des valeurs de la conductivité électrique apparente en stock par le biais de l'équation 5.4 reportée dans ce tableau. Notons que l'opération est appliquée point par point de mesure jusqu'à couvrir l'ensemble de la parcelle, supposant ainsi que les emplacements choisis pour les trois tubes sont représentatifs de la diversité des points de chacune des banquettes.

Tableau 5.9. Coefficients des droites d'étalonnage moyen valable par parcelle.

Coefficients d'étalonnage moyen	Stock (mm) = $\bar{a} * CEav + \bar{b}$ (5.4)		
	B1	B2	B3
Pente moyenne (\bar{a})	13,67	15,50	20,22
Intercept moyen (\bar{b})	163,49	203,60	207,81

Les coefficients de la pente et d'intercept présentés ici sur ce tableau sont obtenus moyennant les coefficients des équations des droites des trois tubes par banquette.

5.2.2.1.3. Résultats des relations d'étalonnage sur le sous-solage

Entre 2016 et 2017, le suivi événementiel a permis d'obtenir un échantillon de 33 couples (CEav, stock) qui a permis d'effectuer des relations des régressions. Le résultat obtenu est reporté sur la Figure 5.10 qui compare la distribution des nuages de points sur les différentes droites d'étalonnage. L'analyse montre l'existence d'un lien fort entre le stock hydrique et la conductivité apparente mesurée en mode vertical. Les corrélations sont en effet bonnes pour l'ensemble des tubes. Pour la parcelle SL1, le coefficient de détermination R^2 varie de 0,59 à 0,85. Les pentes des droites de régression (de l'ordre de 11,5 à 18,5) sont sensiblement différentes d'un tube à l'autre, ce qui peut s'expliquer par des macroporosités différentes. Le

Tableau 5.10 présente la synthèse des régressions linéaires obtenues et les incertitudes associées à l'estimation de ces grandeurs.

Tableau 5.10. Caractéristiques des régressions linéaires effectuées entre la conductivité apparente (CEav) et le stock hydrique et leurs incertitudes associées. a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine des droites.

N° tube/parcelle	a	S(a)	b	S(b)	R ²	Couples des mesures
Tube 1 (SL1)	17,26	± 1,81	165,95	± 3,90	0,75	33
Tube 2 (SL1)	14,03	± 2,11	221,29	± 8,35	0,59	33
Tube 3 (SL1)	15,12	± 1,36	216,52	± 5,88	0,80	33
Tube 4 (SL1)	11,49	± 0,88	216,29	± 3,40	0,85	33
Tube 5 (SL1)	18,46	± 1,55	140,69	± 3,03	0,82	32
Tube 1 (SL2)	15,78	± 0,93	154,10	± 2,24	0,90	33
Tube 2 (SL2)	11,56	± 1,06	217,95	± 5,33	0,80	32
Tube 3 (SL2)	15,48	± 0,87	242,20	± 3,51	0,91	33
Tube 4 (SL2)	17,66	± 1,50	246,53	± 5,65	0,82	33
Tube 5 (SL2)	13,07	± 0,63	117,54	± 2,19	0,93	32

Sur la parcelle SL2, les coefficients de détermination R², plus élevés, sont compris entre 0,80 et 0,93. Les pentes (de l'ordre de 11,6 à 17,7) apparaissent voisines de celles de l'autre parcelle SL1. La conductivité électrique apparente croît en fonction du contenu en eau disponible après les événements pluvieux, pouvant atteindre plus de 8 mS/m⁻¹ (toujours moins de 4 mS/m⁻¹ sur le témoin) dans certains secteurs des zones remaniées où le stock maximum (calculé par les tubes T2, T3 et T4, ceux de la zone travaillée) dépasse 370 mm au cours de la saison (jamais plus de 235 mm sur le témoin).

Les positions très différentes des droites des tubes intra-parcellaires (T2, T3 et T4), d'une part, et extra-parcellaires (T1 et T5), d'autre part, justifient l'utilisation de deux droites moyennes (Figure 5.10).

En somme, pour les dix tubes des deux parcelles de sous-solage, le coefficient de détermination, compris entre 59 et 93 %, atteste de la bonne liaison des variables. De plus, comme pour les banquettes et le témoin, la linéarité n'a pas de raison valable d'être remise en cause.

D'après les travaux de Kachanoski et al. (1990) et de Goulet et Barbeau (2006), il existe une relation linéaire, de pente négative, entre la résistivité électrique (l'inverse de la conductivité électrique) et la concentration de l'eau dans les pores. Ceci est illustré par la Figure 5.11 qui

montre ce lien de la résistivité électrique à l'humidité pondérale mesurée sur trois parcelles expérimentales différentes. Néanmoins, dans le cas de nos résultats, la corrélation porte directement sur le stock hydrique du sol, variable dont l'intérêt hydrologique et agronomique est supérieur.

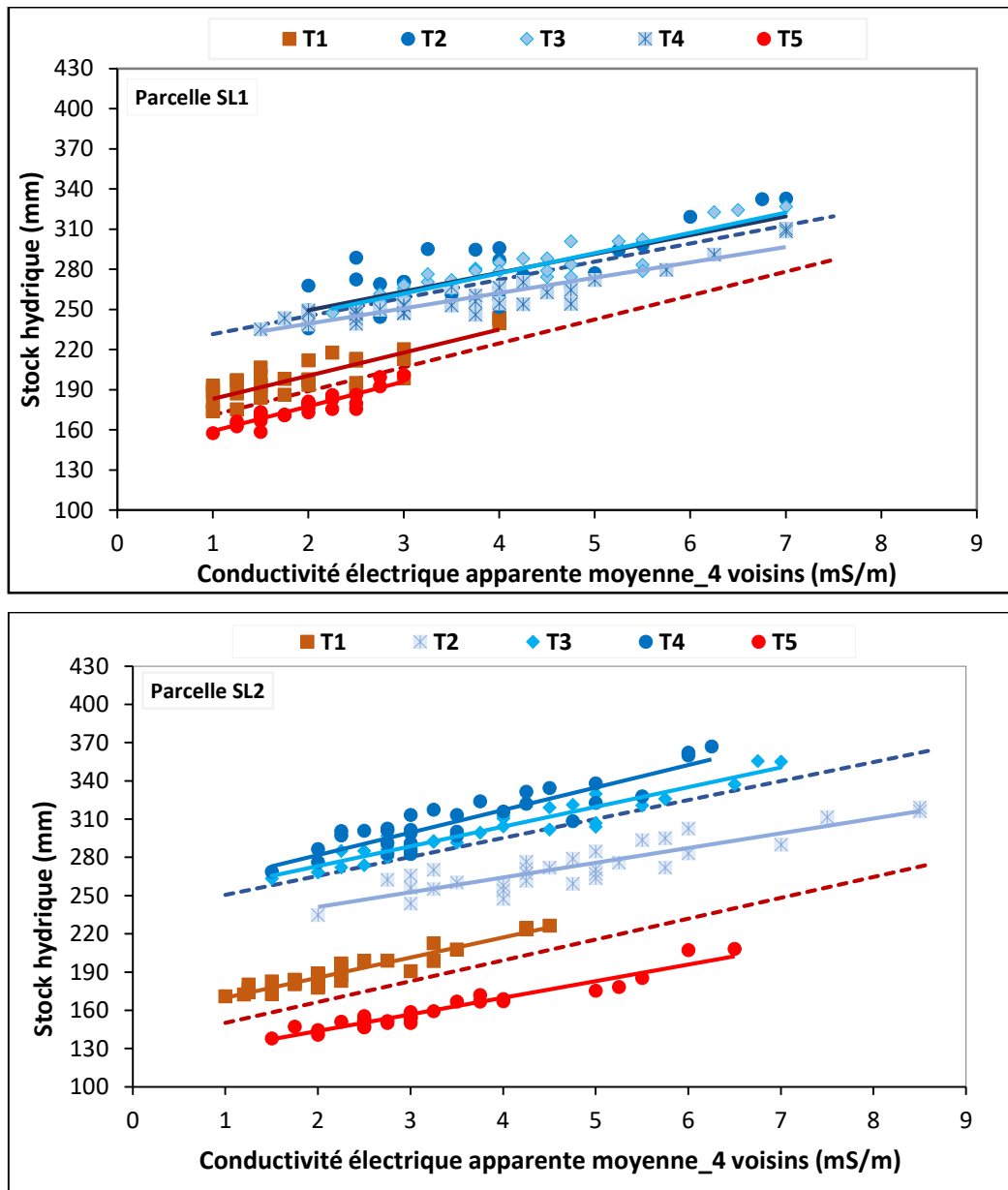


Figure 5.10. Distribution des nuages de points autour des droites d'étalonnage sur les parcelles du sous-solage.

Les nuages des points en rouge correspondent aux tubes de la zone non remaniée, tandis qu'en bleu, ils correspondent aux tubes de la zone sous-solée proprement dite. Les droites en pointillés indiquent respectivement l'étalonnage "out" des surfaces non travaillées (en rouge) et l'étalonnage "in" de la partie sous-solée (en bleu).

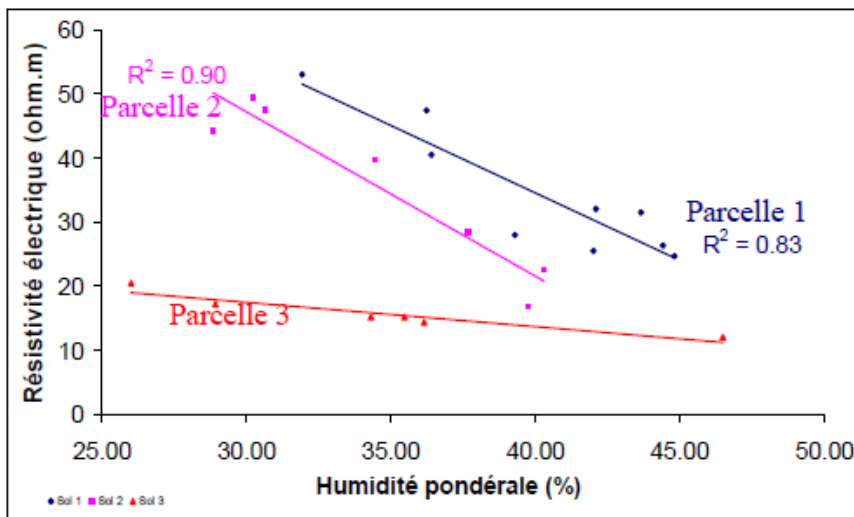


Figure 5.11. Relation entre l'humidité pondérale des sols de trois parcelles et leur résistivité électrique. D'après Goulet et Barbeau (2006).

➤ Analyse statistique des erreurs d'étalonnages réalisés sur le sous-solage

L'estimation des incertitudes permet de juger de la valeur de la méthode d'étalonnage employée pour prédire le stock hydrique à l'échelle parcellaire. Le Tableau 5.11 présente le récapitulatif des résultats permettant d'évaluer la qualité des relations d'étalonnage réalisées.

Tableau 5.11. Valeurs des différents termes d'erreurs permettant d'évaluer la qualité des régressions linéaires effectuées sur les surfaces de sous-solage.

Paramètres statistiques	Sous-solage SL1					Sous-solage SL2				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Stock moyen (mm)	199,8	273,8	279,5	257,8	175,4	189,6	273,0	300,8	309,4	159,8
CEa moyenne (mS/m)	1,96	3,74	4,17	3,61	1,88	2,25	4,77	3,79	3,56	3,23
σ résiduel (mm)	8,9	15,3	8,6	6,9	4,2	4,6	9,0	6,8	10,2	4,2
Var. stock (mm ²)	313,3	564,6	368,0	309,3	100,0	215,9	400,5	528,2	568,1	267,3
Var. CEav (mS ² /m ²)	0,78	1,69	1,29	1,99	0,24	0,78	2,39	2,01	1,49	1,46
Var. résiduelle (mm ²)	79,7	232,5	74,0	47,2	17,6	20,9	81,1	46,9	103,9	17,6

L'analyse de ces valeurs met en évidence des incertitudes raisonnables sur la pente (avec une valeur variable de $\pm 0,6$ à $\pm 2,1$) ainsi que sur l'ordonnée à l'origine des droites où $S(b)$ varie de $\pm 2,2$ à $\pm 8,4$ (Tableau 5.10). L'ordre de grandeur de l'écart-type résiduel varie entre $\pm 4,2$ à $\pm 15,3$ mm. De plus, on note une forte variance résiduelle entre les tubes d'une même parcelle et entre les parcelles. Eu égard à tous ces résultats, on peut déduire que la précision de l'étalonnage est suffisante pour une estimation correcte du stock à partir des mesures de conductivité électrique apparente. Pour finir, soulignons que l'erreur qui sera commise sur une

variation de stock est plus petite que la somme des deux erreurs faites sur les deux valeurs de stock. En effet, l'ordonnée à l'origine b disparaît du calcul qui ne dépend ainsi que de la pente. Notons à titre indicatif que la précision spatiale et temporelle du modèle de régression est étudiée par Sheets et Hendrickx (1995).

Finalement, les résultats obtenus offrent la possibilité de spatialiser de façon assez précise les variations temporelle et spatiale d'humidité des sols aménagés par sous-solage et donnent suffisamment de précision pour permettre une bonne estimation du stock à l'échelle de la parcelle.

➤ Analyse de l'étalonnage moyen valable par parcelle

La comparaison des comportements hydriques des différents tubes du sous-solage a permis de définir un étalonnage moyen valable par secteur dans une parcelle considérée (cf. § 3.4.3.6.1 pour la méthode utilisée). En observant la Figure 5.10, on peut facilement distinguer sur les parcelles de sous-solage deux secteurs aux comportements différents vis-à-vis de la réponse électromagnétique à l'humidité du sol, intra- ("in", T2, T3 et T4) et extra- ("out", T1 et T5) parcelle. Ceci nous a permis de procéder au regroupement des tubes en fonction de leurs comportements hydriques fortement influencés par le remaniement profond du sol. Concernant la méthode de calcul des coefficients pente et intercept moyens, on se réfère au chapitre 3, § 3.4.3.6. Le Tableau 5.12 présente la synthèse des coefficients moyens des différents étalonnages moyens déterminés par parcelle et par zone. Ces coefficients ont servi pour convertir la conductivité électrique sur chaque point de mesure en stock ponctuel, produire une cartographie du stock hydrique à l'échelle de la parcelle et ce, par événement pluvieux.

Tableau 5.12. Coefficients des droites d'étalonnage moyennes élaborées sur le sous-solage. Intérieur ("in", tubes T2, T3 et T4) et extérieur ("out", tubes T1 et T5) de la zone travaillée.

Coefficients moyens d'étalonnage	Sous-solage SL1		Sous-solage SL2	
	Etalonnage <i>in</i>	Etalonnage <i>out</i>	Etalonnage <i>in</i>	Etalonnage <i>out</i>
Pente moyenne (\bar{a})	13,5	17,9	14,9	14,4
Intercept moyen (\bar{b})	218,0	153,3	235,6	135,8

Nous terminons en disant que la mise en œuvre de cette méthode apporte un gain complémentaire intéressant pour évaluer quantitativement l'efficacité des différents aménagements. Ainsi, grâce à l'étalonnage direct des mesures électromagnétiques (EM38)

converties en stock hydrique, on peut maintenant cartographier ce stock et son évolution dans les zones aménagées.

5.3. Cartographie du stock hydrique à partir des mesures EM38

L'étalonnage de l'EM38 étant fait, on peut dès lors transformer les mesures lues à l'aide de cet appareil en mode vertical en stock hydrique. Pour cela, on peut se servir des droites moyennes d'étalonnage décrites précédemment pour estimer avec précision le stock sur chacun des points de mesure d'une parcelle donnée. Les valeurs du stock ainsi calculées sont ensuite interpolées afin de produire des cartes. La grille d'interpolation choisie est régulière et tient compte de la taille des parcelles afin de ne pas introduire le biais dans la réalisation des iso-contours cartographiques (Buvat, 2012).

5.3.1. Cartographie du stock hydrique (échelle de la parcelle)

L'estimation de stock concerne la tranche de sol 0-135 cm, proche de la profondeur de prospection EM38 en mode vertical. On admet que, pour les profondeurs supérieures à 1,5 m, l'infiltration devient faible comme on le voit sur les profils mesurés à la sonde neutronique. Il est toutefois important de rappeler que les mesures de conductivité (signal EM38) in situ ont été corrigées afin d'être interprétées de façon fiable. Les résultats cartographiques sont présentés parcelle par parcelle, la comparaison entre parcelles est ensuite discutée.

5.3.1.1. Analyse spatio-temporelle du stock hydrique des banquettes

Nous disposons des deux campagnes des mesures (2016 et 2017). Les mesures EM38 intégrant la conductivité électrique de l'ensemble du profil contribuant à la réponse de l'instrument ne permettent pas d'obtenir une image de la variabilité verticale du contenu en eau du sol ni de distinguer les différentes couches (Bisone et al., 2017). Notons que seuls les résultats des mesures en mode vertical seront présentés dans ce travail.

✓ Cartographie de la dynamique hydrique sur la banquette B1

Les cartes du stock hydrique ainsi obtenues au cours des saisons 2016 et 2017 sont représentées sur les Figures 5.12 et 5.13. Les cartes d'avant pluie sont représentées à gauche, tandis que celles d'après pluie sont à droite. Elles sont aussi classées en ordre de pluie croissante (en mm) de haut vers le bas. Une forte ressemblance dans le comportement hydrique de la banquette se dégage entre les deux saisons. Réalisées par la méthode d'interpolation spatiale basée sur le krigeage, celles-ci mettent en évidence la dynamique événementielle du stock hydrique en

fonction de la pluie. On constate bien entendu que le contenu en eau du sol s'accroît proportionnellement à la hauteur de l'événement pluvieux. Leur comparaison montre clairement l'impact hydrologique de la banquette et particulièrement du fossé (principale entité collectrice des eaux du ruissellement) en améliorant fortement les conditions hydriques (capacité de rétention d'eau) du sol traité. Globalement sur toutes les cartes (Annexe H1), les zones humides sont représentées par les couleurs froides et les zones sèches par les couleurs chaudes. Ainsi, le stock hydrique maximal (≈ 380 mm) représenté par la couleur bleu foncé s'observe au centre de la carte observée après la pluie du 22 août 2017. C'est la situation la plus humide de cette saison, elle est engendrée par une forte pluie d'environ 67 mm. En outre, les zones à faible capacité de rétention d'eau couvrent la partie amont (impluvium) et les extrémités gauche et droite des cartes. Remarquablement, les cartes d'avant pluie montrent que l'état initial qui précède un événement pluvieux donné a gardé la mémoire de la zone la plus humide. Cela veut dire que, la zone la plus humide de la banquette reste humide pendant toute la saison et se retrouve pendant la saison suivante également. Partant de ces résultats cartographiques, on peut dire que la méthode de conductivité électrique permet de visualiser spatialement les principales zones dynamiques (caractérisables le long du fossé) et stables sur l'ensemble de la banquette étudiée.

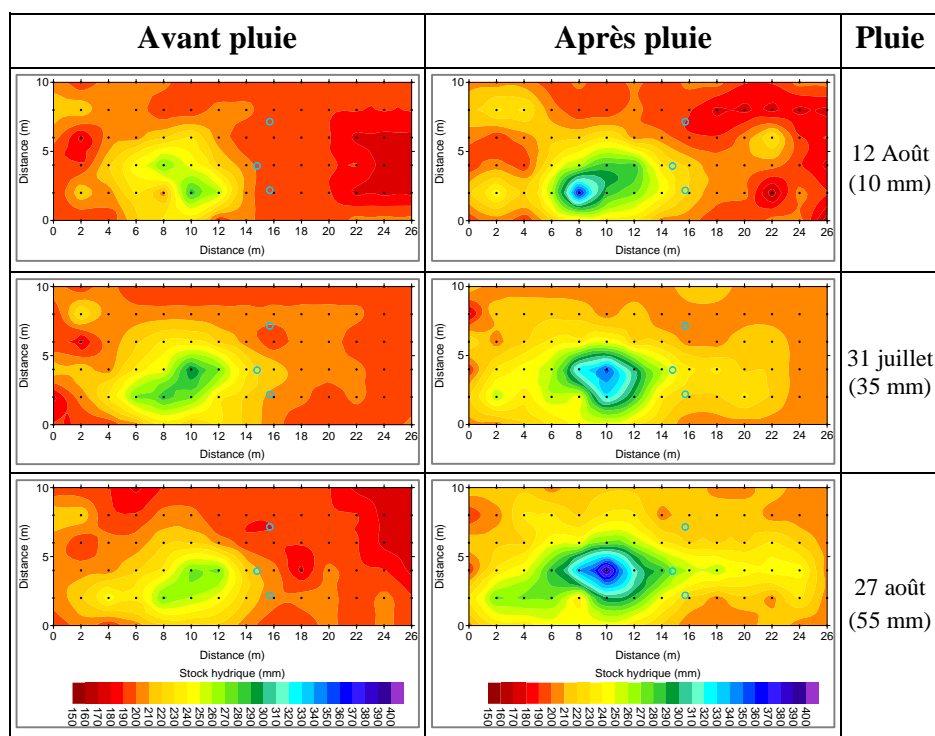


Figure 5.12. Banquette B1 : cartes du stock hydrique avant et après trois événements pluvieux choisis sur la saison 2016. Les points noirs et les ronds bleus indiquent respectivement les points de suivi de CEa et les tubes neutroniques. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

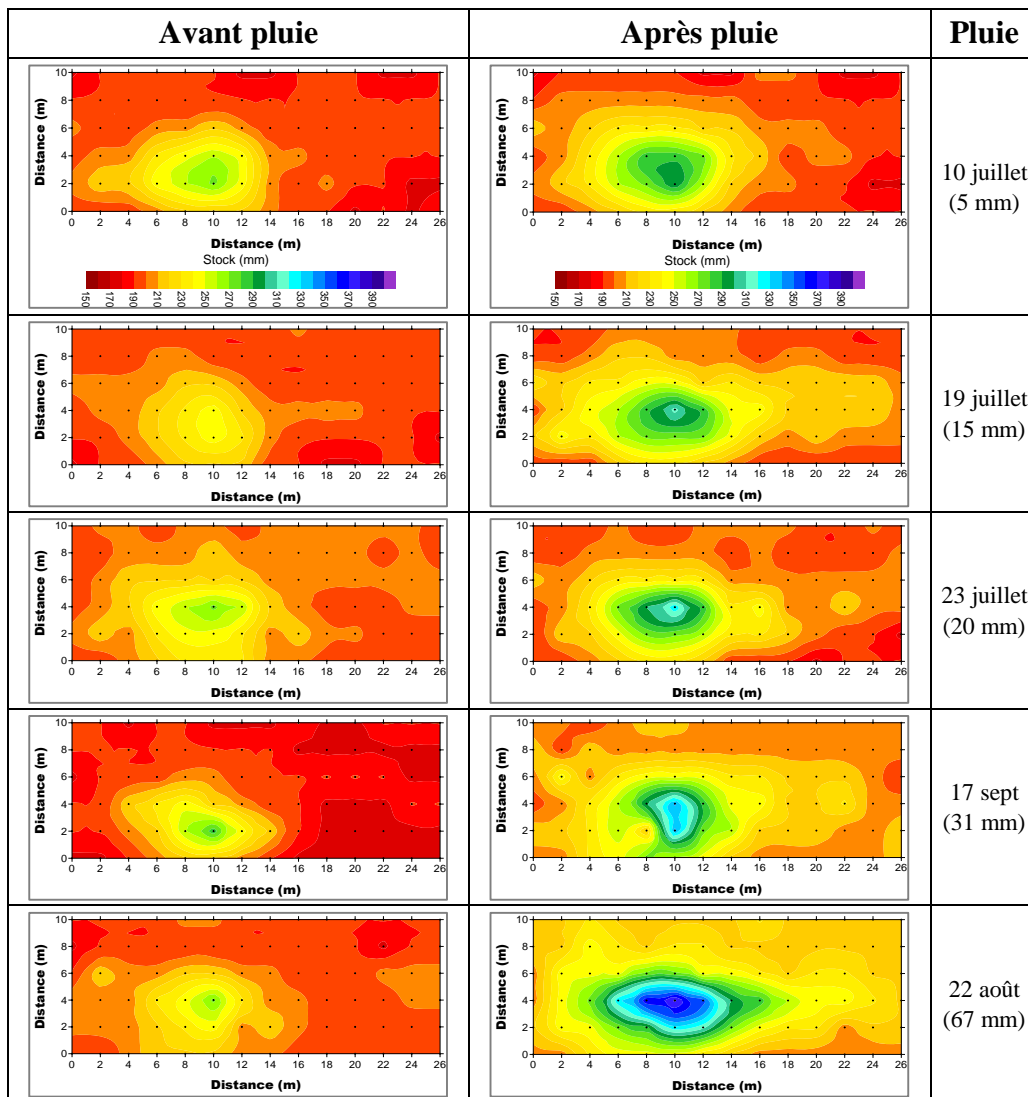


Figure 5.13. Banquette B1 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

✓ Cartographie de la dynamique hydrique sur la banquette B2

La Figure 5.14 présente les cartes obtenues avant et après chaque événement pluvieux pour la banquette B2 en 2017. Il s'agit des cartes des mêmes événements pluvieux que ceux présentés pour la banquette B1. L'échelle de couleurs choisie est uniforme pour toutes les cartes de toutes les parcelles afin de faciliter l'interprétation et la comparaison. A première vue, elles font apparaître un comportement hydrique différent de celui de la banquette B1 décrite précédemment. A la lecture de ces dernières, on remarque que la distribution spatio-temporelle du stock hydrique n'est pas totalement aléatoire sur l'ensemble de la banquette. Néanmoins, l'ensemble est moins hétérogène que celui de la banquette B1. L'humidité est mieux répartie entre zone de fossé et zone d'impluvium.

Au début de la saison (en juin) habituellement moins pluvieux, l'homogénéité du stock hydrique s'observe sur l'ensemble de la banquette notamment sur les cartes d'avant pluie. Puis une augmentation remarquablement significative de l'humidité du sol, plus hétérogène, se dégage à partir des pluies de plus de 20 mm. L'état d'humidité maximale est atteint à partir du mois d'août (carte du 22 août 2017) et dans une moindre mesure en septembre. Les fortes pluies observées au milieu de la saison (plus pluvieux) entraînent une extension spatiale de l'humidité du sol et une tendance à l'homogénéisation de l'humidité des secteurs stockeurs d'eau. Néanmoins, les zones les plus humides sont persistantes à la droite des images durant toute la saison de suivi (Annexe H2).

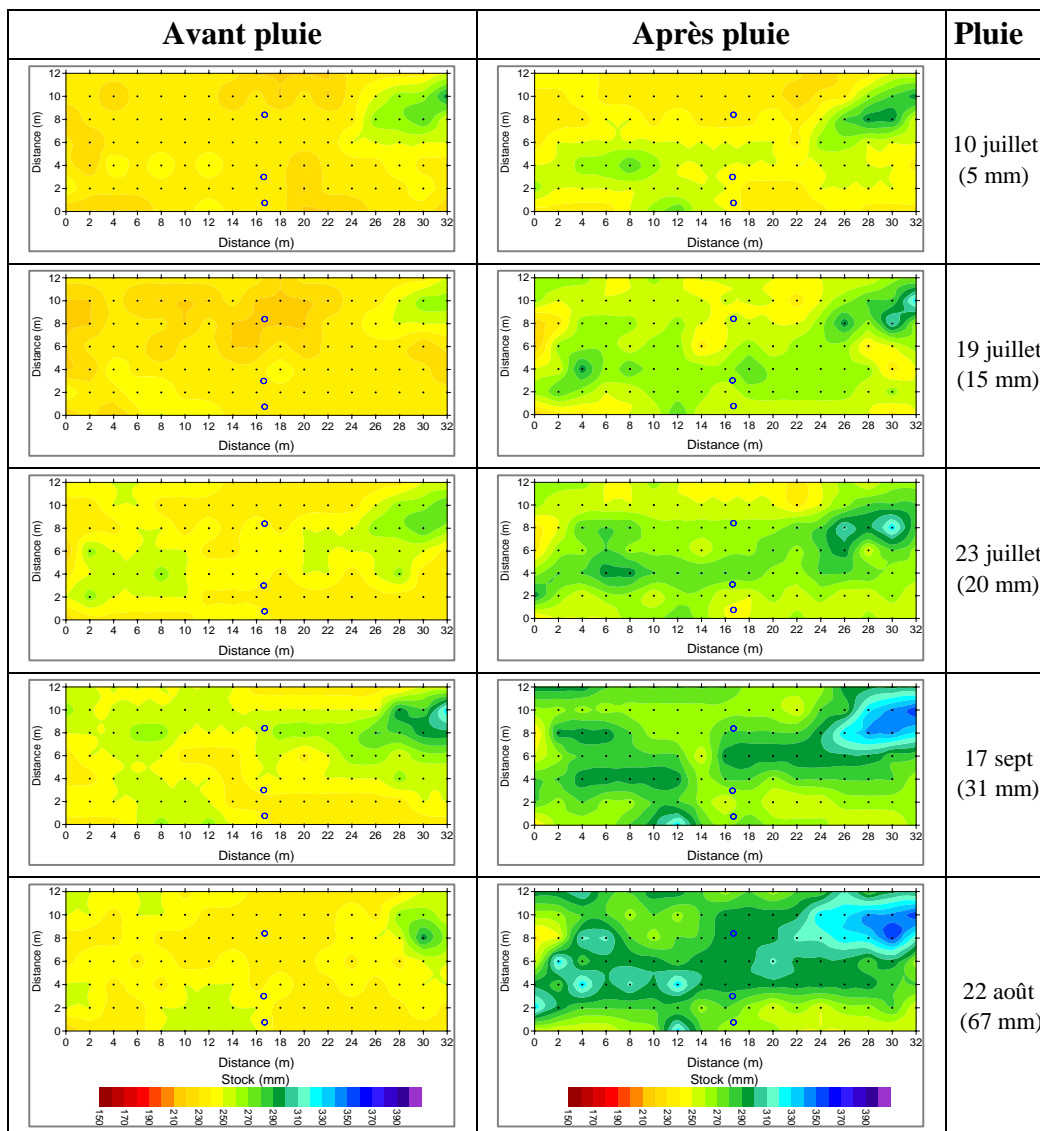


Figure 5.14. Banquette B2 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs et les ronds bleus indiquent respectivement les points de suivi EM38 et les tubes neutroniques. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

✓ **Spatialisation du stock hydrique à l'échelle de la banquette B3**

La banquette B3, compte tenu de ses dimensions plus grandes que celles de B1 et de B2, présente la plus grande capacité de détention superficielle d'eau. Ce qui fait qu'elle conserve plus d'humidité dans le sol. La Figure 5.15 représente, pour la zone prospectée, les couples des cartes du stock avant et après pluie de la saison 2017. Par l'interprétation de celles-ci, on peut directement déduire des informations quant à la dynamique événementielle du contenu en eau de la zone traitée, en comparaison avec le témoin (Figure 5.18) notamment. Les variations de stock sont particulièrement notables sur cette banquette pendant les grosses pluies. Cependant lors des petites pluies, des situations moins humides sont produites. Elles se caractérisent par un stockage d'eau beaucoup plus faible tendant à s'homogénéiser sur l'ensemble de la banquette. Des secteurs plus humides, avec un stock pouvant atteindre 400 mm, s'observent au centre de toutes les cartes et sont bien identifiables par les tâches bleues. A cet impact incontestable de la banquette s'ajoute celui de la végétation pionnière couvrant les secteurs les plus humides de la parcelle (cf. Annexe K). Elle est à l'origine de la forte humidité décelable à l'amont de la zone. Ce constat rejoint les résultats obtenus par Seladji (2010) qui rapporte que le prélèvement hydrique de la végétation et le système racinaire peuvent modifier l'humidité du sol et par conséquent la conductivité électrique. Surtout, cette végétation peut à nouveau remplir une fonction de blocage du ruissellement similaire à celle du bourrelet. Aussi, la caractérisation de la distribution spatiale du stock en fonction des données climatiques (pluies) a permis de démontrer l'existence d'une certaine hétérogénéité sur les parcelles. Enfin, ce travail cartographique contribue à l'évaluation qualitative de l'efficacité remarquable des banquettes.

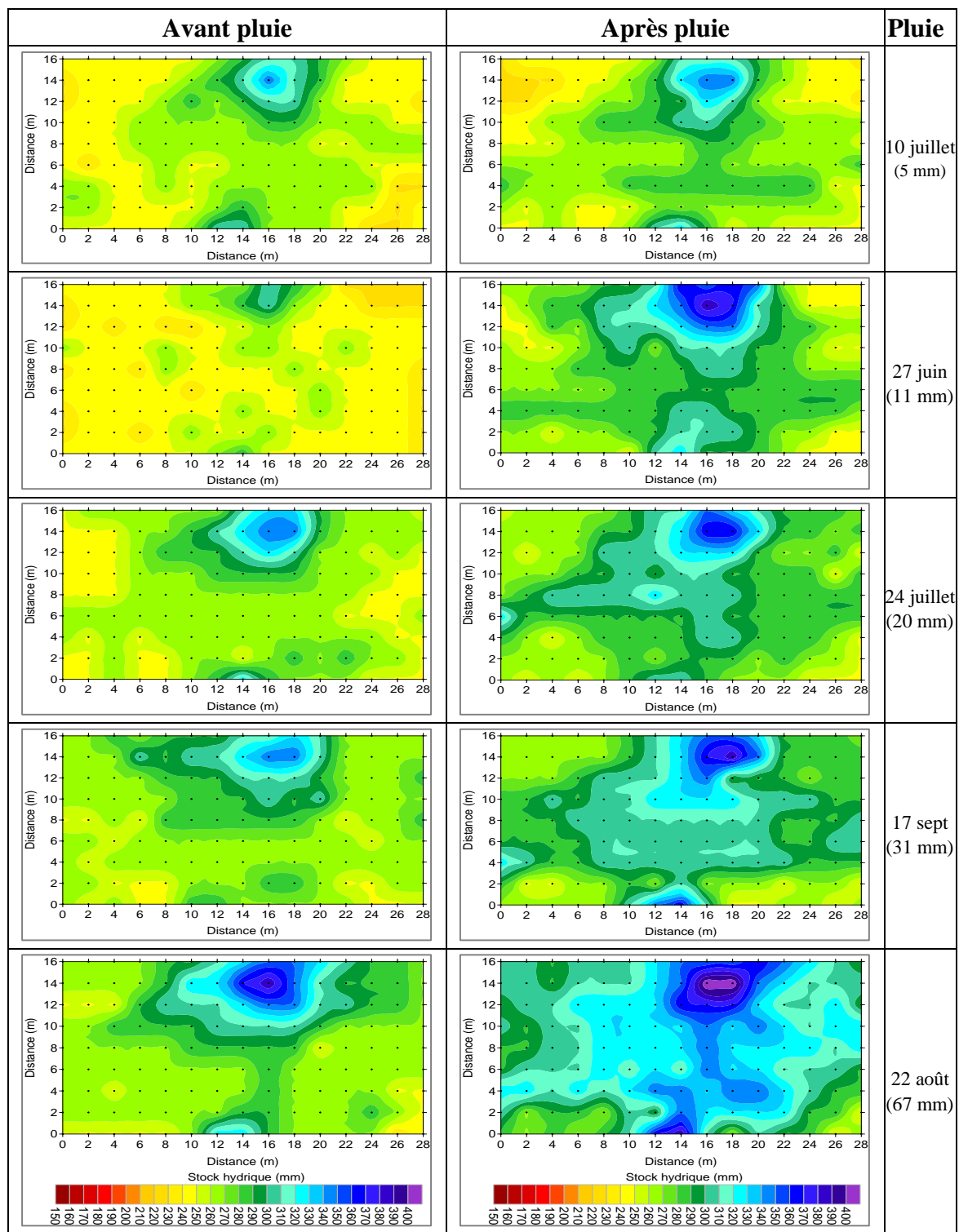


Figure 5.15. Banquette B3 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

La cartographie par étalonnage direct CEav-Stock a donc permis de spatialiser et de visualiser la distribution de valeurs du stock hydrique tout en s'assurant de ne pas perdre d'information potentiellement intéressante. Une des principales remarques de cette étude cartographique par

mesures électromagnétiques est qu'elle met clairement en évidence l'impact hydrologique de ce type d'aménagement sur la rétention d'eau du sol à l'échelle parcellaire. Dans ce contexte, on peut déduire que les mesures EM38 permettent de comprendre le fonctionnement de chacune des parcelles suivies et la variabilité spatio-temporelle de l'efficacité positive des banquettes. On peut ainsi noter que cet impact varie d'une banquette à l'autre selon les dimensions et la position topographique de celles-ci. Par ailleurs, une étude récente menée par Zouré (2019) dans le contexte sahélien du Burkina Faso a démontré sur des parcelles de 200 m² les performances des techniques de CES (zaï, demi-lunes, cordons pierreux et semis direct) à réduire le ruissellement et à augmenter le stock d'eau dans le sol, ce qui améliorerait la satisfaction des besoins hydriques des plantes. Avec le cordon pierreux, le Zaï et les demi-lunes les valeurs cumulées de ruissellement ont été réduites de 25 %, 50 % et 95 % respectivement et comparativement à la parcelle témoin (Zouré et al., 2019).

Ces résultats spatialisés complètent l'étude de l'impact hydrologique des banquettes à l'échelle plus locale. Les cartes font apparaître une différence significative des contrastes d'humidité entre les zones aménagées par rapport au témoin (présenté plus loin). En ralentissant significativement le ruissellement et éventuellement l'érosion, les banquettes provoquent la rétention de plus de la moitié de la fraction précipitée. Néanmoins, une partie de l'eau est perdue par évaporation contrairement au cas du sous-solage. Cette méthode spatialement intégrante et non destructive apparaît adaptée pour cartographier en deux dimensions (2D) la géométrie des zones humectées par l'aménagement en banquettes. Appliquée à l'échelle de la parcelle, elle peut apporter un complément intéressant aux mesures ponctuelles.

5.3.1.2. Spatialisation du stock hydrique sur les parcelles de sous-solage

Les principaux résultats présentés ici concernent le suivi de 2017. Ils permettront de bien décrire la distribution spatiale et l'évolution temporelle du stock hydrique à l'échelle des surfaces travaillées par sous-solage du sol.

- Estimation spatialisée du stock par conductivité électrique sur la parcelle SL1

La Figure 5.16 présente les cartes traduisant la dynamique temporelle du stock hydrique en réponse aux événements pluvieux. Les cartes de gauche indiquent l'état initial avant la pluie et celles de droite montrent l'état d'humidité du sol après pluie. La disposition dans l'ordre croissant du haut vers le bas suit l'importance de la hauteur précipitée. On constate d'une manière générale (cf. Annexe H4 pour plus de détails), l'influence très nette de la technique du sous-solage sur le stockage d'eau dans le sol après chaque événement pluviométrique d'une

quantité donnée. Entre 0-150 cm de profondeur retenue pour la spatialisation des données, le continu en eau du sol s'est révélé très sensible aux précipitations, augmentant relativement à la quantité d'eau tombée. L'interprétation visuelle met en évidence l'effet remarquablement bien réparti du sous-solage qui accroît la rétention d'eau des sols à l'échelle événementielle. On remarque la présence de deux endroits plus humides (fortement conducteurs) qui n'auraient pu être détectés par des simples mesures ponctuelles de l'humidité du sol. Ils se caractérisent et s'identifient sur toutes les cartes par des tâches en couleurs froides (bleu foncé et violet). Le stock hydrique très élevé dans ces secteurs avoisine 400 mm quel que soit l'importance ou non de l'averse. Ceci nous a poussé à vérifier sur le terrain les causes possibles de ces augmentations fortes et ponctuelles de la conductivité électrique apparente, suspectant un artefact lié à un déchet métallique. Pour cela, nous avons creusé ces zones en 2019 jusqu'environ 70 cm (cf. Annexe I pour la fosse creusée). Des constats suivants ont été relevés :

- la présence des petites galeries (conduits de l'eau) susceptibles d'influencer la conductivité électrique apparente ;
- la présence de la matière organique (débris végétaux) ;
- les endroits sont aussi dépressionnaires, ce qui provoque la concentration des eaux du ruissellement et leur infiltration plus longtemps ;
- pas de déchet métallique enfouis dans le sol.

Il existe d'autres éléments possibles d'explication, notamment la largeur du sillon du sous-solage aux environs de l'endroit où se trouvent ces points à forte conductivité électrique apparente. En effet, ce sillon fait environ 120 cm de large (pouvant probablement être dû au passage répété de la sous-soleuse), alors que les sillons voisins en amont et en aval mesurent 65 cm et 46 cm respectivement, ce qui pourrait provoquer de meilleures conditions d'accumulation d'eau et par conséquent d'infiltration profonde. De plus, l'un des points est situé à proximité d'une ancienne bande boisée. Bien que totalement dégradée, elle peut aussi avoir de l'influence notable sur les mesures de la conductivité électrique apparente du sol à ce niveau.

Dans l'ensemble, la parcelle du sous-solage SL1 présente des valeurs de stock qui fluctuent entre 200 et 350 mm. Concernant les surfaces alentours non remaniées, le stock hydrique, beaucoup plus faible, ne dépasse pas 160 mm. Sur ces surfaces caractérisées par des couleurs rouge et marron, la capacité d'infiltration est réduite par le phénomène d'encroûtement superficiel du sol.

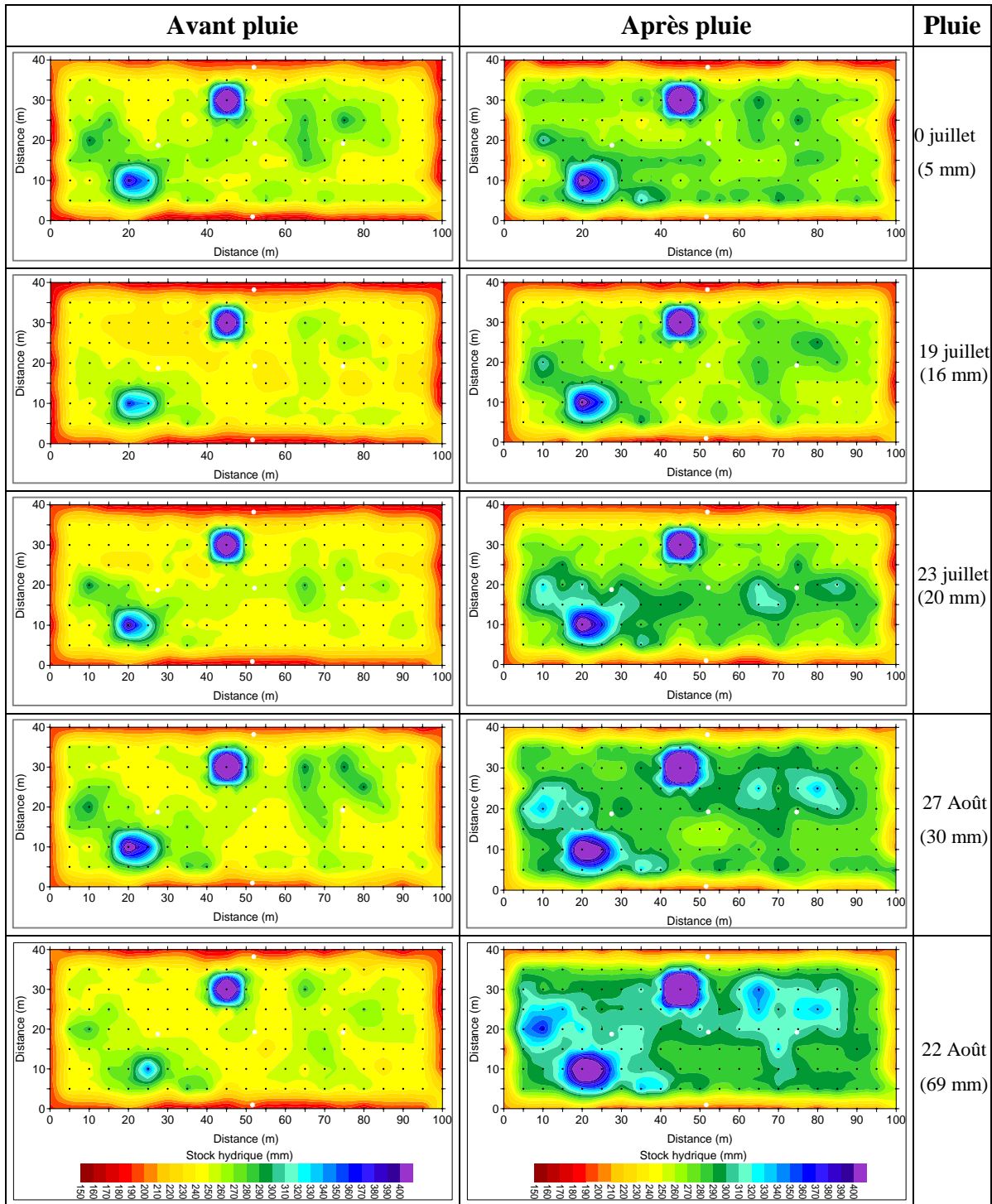


Figure 5.16. Sous-solage SL1 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017.

Les points noirs et les tâches blanches indiquent respectivement les points de suivi EM38 et les tubes neutroniques. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie. L'opération du sous-solage a eu lieu avant l'installation de la saison pluvieuse.

- Estimation spatialisée du stock par conductivité électrique sur SL2

Plusieurs cartes du stock ont été aussi réalisées sur la parcelle SL2. La Figure 5.17 présente quelques-unes de ces cartes de stock hydrique. L'ensemble des autres cartes se trouve dans l'Annexe H5. Elles montrent la même tendance c'est-à-dire les comportements initial et final de la parcelle lors de la pluie. L'interprétation de gauche vers la droite laisse présager une dynamique événementielle du stock d'eau du sol due au sous-solage et qui semble, encore une fois, relativement proportionnelle à la taille de l'événement pluvieux. En effectuant une analyse spatiale de la parcelle, on peut aussi y relever la présence d'une zone fortement conductrice. Après vérification sur le terrain (en 2019), le problème de ce point très conducteur a été finalement résolu : il s'agit d'une ancienne termitière (cf. Annexe J). Finalement, les cartes permettent de caractériser l'hétérogénéité spatiale des sols à l'échelle intra-parcellaire. Nonobstant, si des différences se dégagent entre les parcelles en termes de rétention d'eau, on note que les deux parcelles de sous-solage sont beaucoup plus homogènes que les banquettes.

En somme, le sous-solage en modifiant la porosité du sol a eu des effets positifs sur le fonctionnement hydrologique des sols dégradés en favorisant localement l'infiltration et le drainage vertical, ce qui a réduit leur aptitude à produire du ruissellement. Cependant, le processus de ré-encroûtement tend à se manifester en fonction de la durée et dès que le cumul des pluies devient important. Malam Abdou (2016) a montré, dans le même contexte du Sahel nigérien, que l'effet bénéfique du sarclage sur l'infiltration s'estompe dès qu'on enregistre un cumul de pluie de l'ordre de 80 mm après sarclage. Malgré tout, le sous-solage apparaît comme une technique performante de gestion des eaux de ruissellement au point de stocker au minimum 50 % de la lame de pluie précipitée, parfois 100 % et parfois même davantage grâce aux apports du ruissellement amont. En limitant l'évaporation puisque l'eau est rapidement évacuée vers le bas, elle présente un avantage fort sur les banquettes. Néanmoins, elle est plus difficile à mettre en œuvre. Le choix entre les deux techniques doit donc se faire en fonction des facteurs climatiques (durée et intensité des pluies) et économiques.

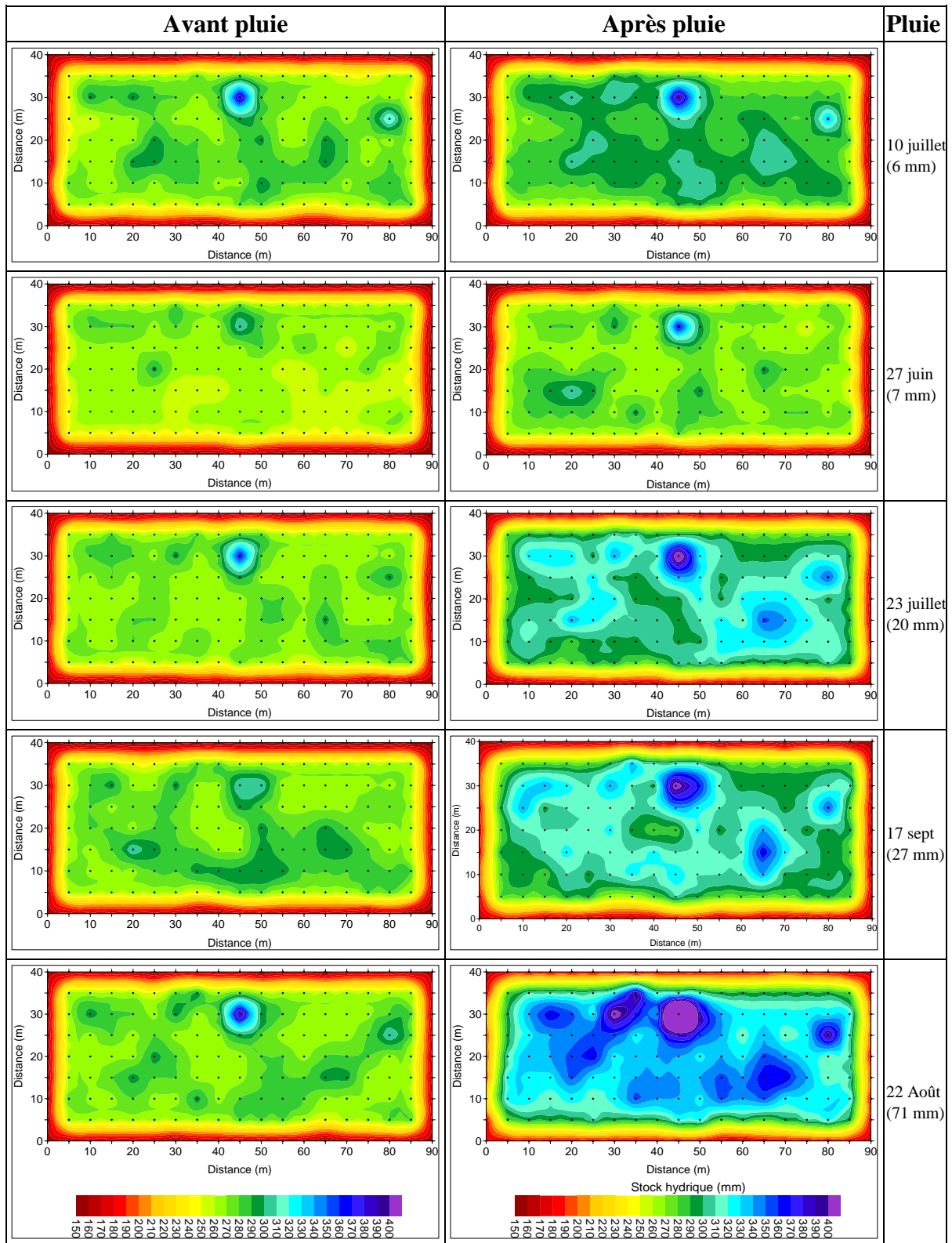


Figure 5.17. Sous-solage SL2 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017.

Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

La cartographie par conductivité électrique, après étalonnage, peut donc être un bon outil pour évaluer avec précision l'efficacité hydrologique des techniques de CES. Outre la spatialisation des données, l'apport de cette méthode est particulièrement important car elle permet de caractériser et suivre l'évolution de la géométrie des zones humectées par les aménagements. La partie suivante est consacrée à la comparaison des résultats avec le témoin.

5.3.1.3. Spatialisation du stock estimé à l'échelle du témoin

Sont représentées sur la Figure 5.18 les cartes permettant d'analyser la dynamique du stock hydrique événementiel sur le témoin. Le stockage d'eau est visiblement beaucoup plus faible que sur les aménagements, le code couleur ayant été conservé pour l'ensemble des cartes. Cela peut s'expliquer par le rôle prépondérant des caractéristiques des croûtes (Casenave et Valentin, 1990), en particulier dans les bandes nues des plateaux de brousse tigrée (Vandervaere, 1995 ; Vandervaere et al., 1997) qui limitent l'infiltration de l'eau lors des pluies. Pour toutes les mesures effectuées en 2016 et 2017, les résultats attestent d'une faible variation du stock hydrique et ce, tout au long de la saison pluvieuse. En comparant les états avant et après pluie, on remarque que la différence n'est pas très marquée surtout au début de la saison et pendant les petites pluies. De plus, on note un dessèchement très rapide du sol entre les averses. On constate toutefois quelques nuances mieux visibles entre les cartes mesurées avant et après pluie, en août et septembre, qui caractérisent le milieu et la fin de la saison pluvieuse. Un changement du fonctionnement hydrique du sol se dégage, comme l'illustrent les cartes du 22 août et du 17 septembre 2017, mais qui reste limité.

D'une manière générale, les quantités d'eau stockées dans le sol restent relativement plus faibles sur toute la durée de la saison (Annexe H6) comparativement aux banquettes et au sous-solage dans lesquels le stock hydrique peut être deux fois plus élevé. En effet, les lames d'eau estimées à partir des mesures électromagnétiques sont comprises entre 150 et 270 mm sur le témoin, alors qu'elles dépassent 370 mm sur les deux types d'aménagement. Plusieurs études ont démontré l'apport des techniques géophysiques basées sur l'utilisation de la méthode des mesures de conductivité électromagnétique dans la description et l'évaluation des processus d'infiltration de l'eau (Descloitres et al., 2001 ; Michot et al., 2001 ; Massuel et al. 2003 ; Coelho et al. 2015 ; Wubda, 2017), le suivi de l'état hydrique du sol (Bourgeois et al., 2007 ; Michot et al., 2007 ; Beck, 2008) mais aussi le suivi par cartographie de la dynamique de la salinité des sols (Job et al., 1997 ; Yao et Yang, 2010 ; Yao et al., 2016).

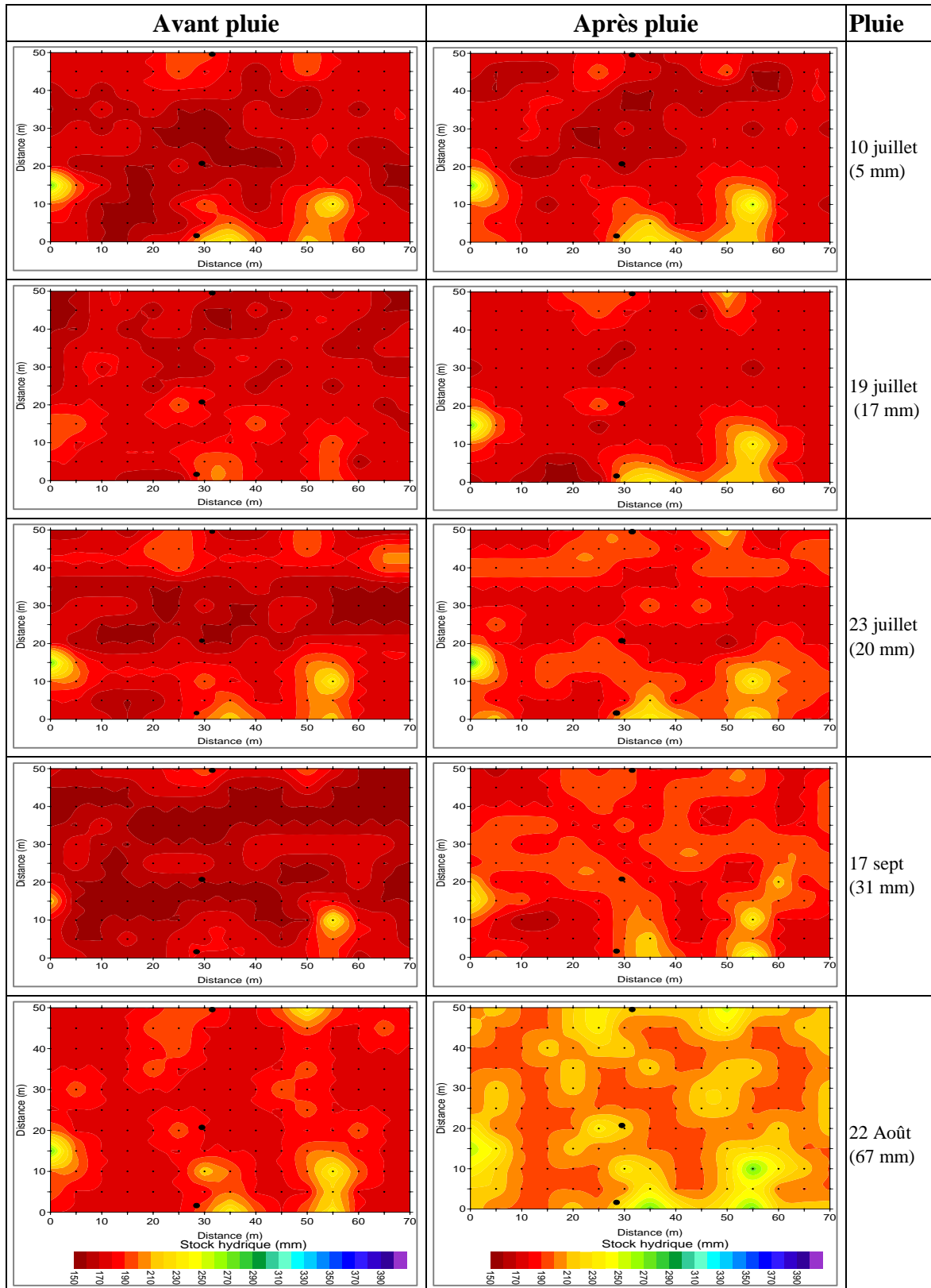


Figure 5.18. Parcelle témoin : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017.

Les petits et les gros points noirs indiquent respectivement les points de suivi EM38 et les tubes neutroniques. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

En résumé, on peut déduire que le protocole expérimental a permis d'aboutir à une spatialisation de l'efficacité hydrologique des techniques d'aménagement. Ainsi, on a constaté un impact très positif en termes d'amélioration de la réserve hydrique disponible pour une éventuelle restauration des bandes dégradées de plateau à brousse tigrée. Il ressort aussi de l'analyse spatiale des parcelles suivies que le sol nu (non aménagé) apparaît pratiquement plus sec tout au long de la saison pluvieuse par rapport aux surfaces aménagées en banquettes et par sous-solage, aussi bien pour les états avant qu'après pluie. Cela peut expliquer la prépondérance du ruissellement sur le plateau qui perturbe le fonctionnement hydrologique du système. Grâce aux banquettes et au sous-solage, l'impact sur la réduction du ruissellement est plus que significatif car la lame d'eau stockée dans le sol peut dans certaines conditions dépasser la hauteur de la pluie tombée. On peut cependant notifier des pluies plus intenses capables d'engendrer des ruissellements forts, même pour les zones aménagées. Néanmoins, quelle que soit la pluie, il existe toujours un gain en variation de stock par rapport au témoin. Nous pouvons maintenant le chiffrer avec précision, pour chaque type d'aménagement, en fonction de la pluie.

5.3.2. Bénéfice hydrique à l'échelle de la parcelle

5.3.2.1. Analyse des relations entre variations du stock (ΔS) et pluie

Pour estimer quantitativement l'efficacité des différents types d'aménagement à l'échelle de la parcelle, nous avons calculé, par événement, la variation du stock moyen déterminé à l'échelle parcellaire, puis établi une relation avec la pluie qui l'a engendrée. Par définition, le stockage correspond à l'emménagement d'eau dans le sol aménagé ou non entre deux mesures effectuées avant et après pluie.

Concernant la pluie, notons par ailleurs qu'on a utilisé les données du pluviomètre et du pluviographe les plus proches de chaque parcelle.

La variation du stock moyen (ΔS) à l'échelle de la parcelle entière peut être calculée en faisant la différence des stocks moyens estimés juste avant et après pluie, la formule s'écrit :

$$\Delta S = \bar{S}_{\text{après}} - \bar{S}_{\text{avant}} \quad (5.5)$$

où \bar{S} est le stock moyen estimé sur l'ensemble de la parcelle entière. Ce stock moyen (\bar{S}) de la parcelle s'obtient par l'équation suivante :

$$\bar{S} \text{ (mm)} = \frac{\sum S_{pi}}{N_{pm}} \quad (5.6)$$

S_{pi} = stock hydrique d'un point EM38 i de la parcelle à une date de mesure donnée et N_{pm} = nombre total des points de mesure EM38 dans la parcelle considérée.

Rappelons que les parties alentours des parcelles de sous-solage ne sont pas remaniées. Pour cela, un étalonnage spécifique pour ces surfaces non travaillées a été réalisé (chapitre 3 précédent, § 3.4.3.6.1.). Le stock hydrique estimé sur ces dernières est exclu du calcul pour ne prendre en compte que les valeurs du stock déterminées dans la zone remaniée proprement dite.

La synthèse des résultats obtenus est présentée sur la Figure 5.19 qui met en relation la variation de stock hydrique (ΔS) avec la pluie. Seuls les événements pour lesquels on dispose des mesures avant et après pluie ont été pris en compte. Cette approche permet d'évaluer et comparer l'efficacité des différentes techniques d'aménagement étudiées.

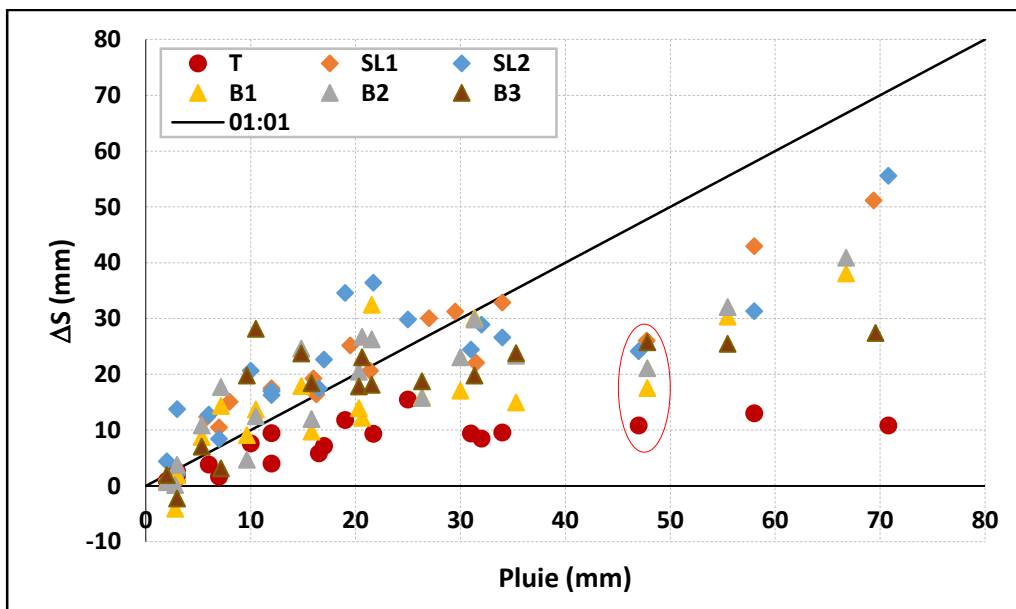


Figure 5.19. Variations de stock hydrique en fonction de la pluie (mesures de 2016 et 2017) dans les différentes parcelles aménagées et le témoin.

Sur cette figure, les variations du stock hydrique sont calculées à l'échelle de la parcelle par l'EM38 étalonné.

D'après l'examen de la figure, on constate les effets bénéfiques de chaque technique d'aménagement (banquettes et sous-solage) sur la rétention d'eau par rapport au témoin. Pour certaines pluies comprises entre 5-30 mm, la fraction de la lame stockée dans le sol peut dépasser la quantité précipitée. Ce qui prouve l'efficacité des techniques d'aménagement pour capter l'eau venant de l'amont. On constate que l'impact du sous-solage est plus important que celui des banquettes, sans doute en raison des moindres pertes par évaporation. Sur le témoin,

la variation de stock est toujours inférieure à la pluie, ce qui est logique puisqu'il n'y a pas d'apport par l'amont supérieur aux pertes vers l'aval.

5.3.2.2. Calcul du facteur de gain par type d'aménagement

En termes de gain (facteur gain = $\frac{\Delta S \text{ aménagement}}{\Delta S \text{ témoin}}$), par rapport au témoin (Figure 5.20), le stockage événementiel en mm d'eau est multiplié par un facteur en moyenne égal à 3.0 (entre 1 et 6 suivant les événements) pour le sous-solage (moyenne SL1 et SL2). Pour les banquettes (moyenne B1 et B2), le gain moyen est d'un facteur 2.4 (entre 0 et 8 suivant les événements). Le gain apporté par les banquettes est donc légèrement moindre que celui du sous-solage et plus variable d'une pluie à l'autre. Cette variabilité concerne surtout les petites pluies. Notons que l'ajustement a commencé à partir de 15 mm de pluie à cause du biais sur la variation du stock due aux faibles pluies.

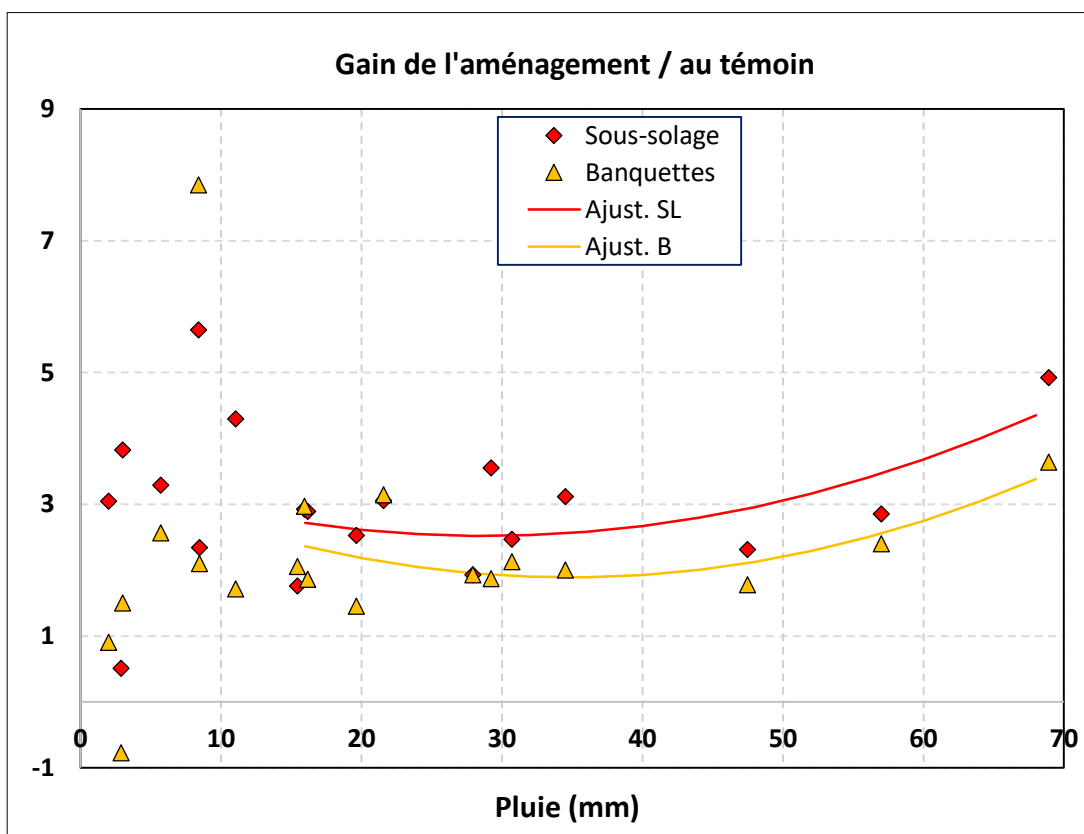


Figure 5.20. Facteur de gain en stockage hydrique apporté par l'aménagement par rapport au témoin.

Pour le sous-solage, on a pris la moyenne de SL1 et SL2. Pour les banquettes, on a pris la moyenne de B1, B2 et B3. La pluie en abscisse est celle de la parcelle témoin.

Remarquons que le facteur de gain semble augmenter au-delà de 3 ou 4 pour les fortes pluies (40 mm et plus), ce qui constitue une information très importante pour les décideurs dans un contexte de changement climatique où l'on peut s'attendre à une fréquence accrue des événements forts.

Il faut aussi noter que le stockage d'eau par les aménagements peut parfois être limité par l'intensité trop forte des pluies. En effet, le changement sans cesse d'intensité de la pluie pendant un événement, avec des pics élevés, a pour conséquence de favoriser les pertes d'eau par ruissellement. C'est le cas, par exemple, d'une pluie de 47 mm tombée le 05 juillet 2017 (encerclé en rouge, Figure 5.19). Malgré l'importance de cette pluie en termes de quantité, le gain en stock hydrique apparaît bas sur toutes les parcelles. Or, il s'agit de l'une des deux pluies les plus intenses de notre échantillon, avec une intensité maximale de l'ordre de 130 mm/h, et donc susceptible de provoquer un ruissellement qui franchit l'aménagement. Ces écarts de stockage et de gain relevés entre les parcelles lors de certaines pluies sont néanmoins significatifs. D'où l'intérêt de regarder les caractéristiques des pluies (intensité instantanée, cumul, coefficient de variation) afin de tenter de les expliquer.

5.3.2.3. Ajustements des relations pluie-variations du stock

Un ajustement non linéaire des différentes relations a été effectué sur les nuages de points de la Figure 5.19 précédente. La forme choisie est une exponentielle qui s'écrit de la manière suivante :

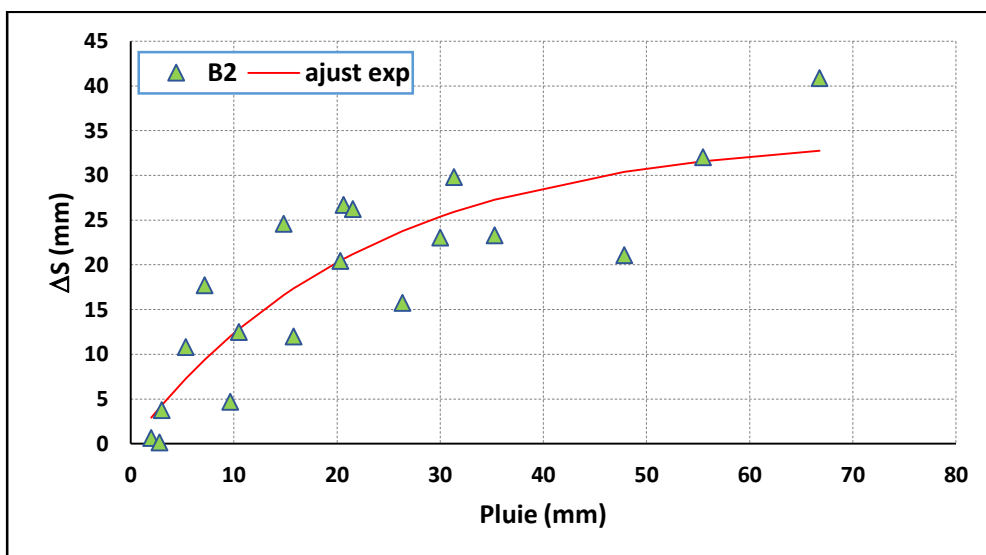
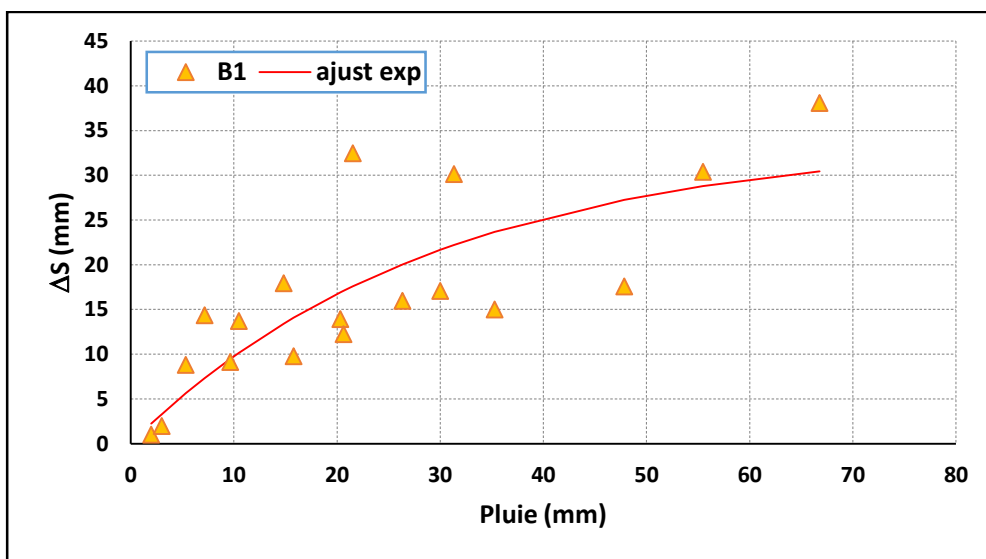
$$\Delta S = M [1 - \exp (-C P)] \quad (5.7)$$

où M représente le maximum du stockage possible obtenu quand la pluie P tend vers l'infini, et C est un facteur de sensibilité à la pluie. Les ajustements, calculés pour chaque aménagement, permettent de prédire la variation de stock en fonction d'une pluie P donnée et ainsi évaluer précisément les bénéfices des aménagements en termes quantitatifs par rapport au témoin. Ainsi, grâce aux ajustements exponentiels réalisés, nous avons estimé des fonctions de réponse aux pluies des différentes parcelles. Les Figures 5.21 et 5.22 présentent les relations ajustées obtenues sur les trois banquettes expérimentales et les deux parcelles de sous-solage. On peut remarquer, pour le cas de la banquette B3, une saturation du stockage (valeur maximale atteinte) à environ 25 mm d'eau pour une pluie de 40-50 mm. Pour les autres banquettes, la saturation n'est pas atteinte même pour une pluie de 65 mm. Pour les sous-solages, il n'y a pas de saturation atteinte même pour une pluie de 70 mm. Le stockage est meilleur pour SL1 qui semble également le plus éloigné de son stockage maximal même aux fortes pluies.

La banquette B3 est ainsi le seul des cinq aménagements suivis à présenter un effet de stockage maximal atteint. Le témoin, pour sa part (Figure 5.23), atteint bien une saturation de stockage, à environ 12 mm, soit la moitié du stockage de la moins bonne banquette, pour une pluie d'environ 50 mm. Ceci s'explique par l'encroûtement du sol.

Même si la technique des banquettes est déconseillée dans la restauration de la brousse tigrée, nos résultats montrent son efficacité dans la conservation du milieu naturel pouvant justifier leur coût.

Concernant le sous-solage, la capacité de rétention d'eau du sol dépasse nettement celle des banquettes encore plus celle du témoin.



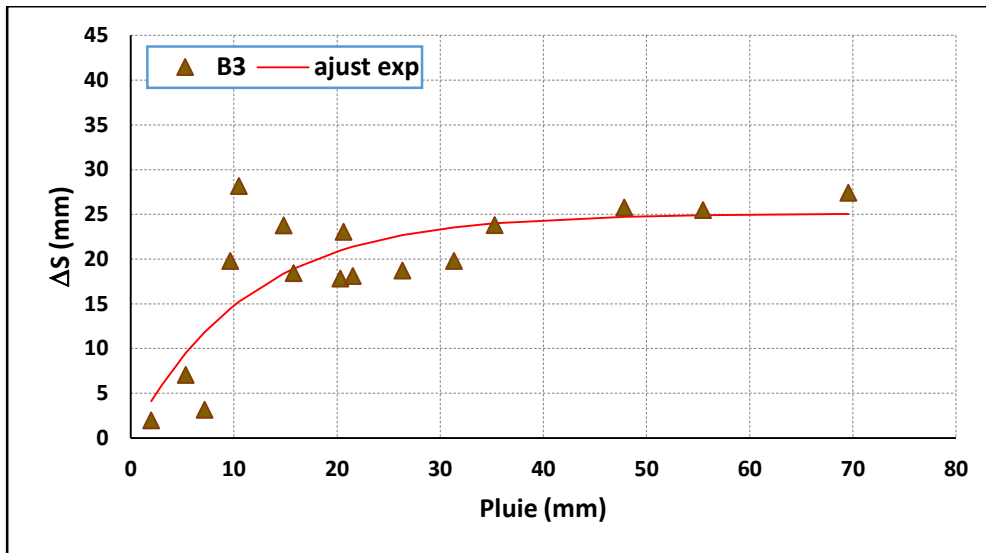


Figure 5.21. Relations pluie- ΔS (triangle) et ajustements sur les nuages de points (courbes) effectués sur les différentes banquettes expérimentales.

En résumé, eu égard aux résultats obtenus, il ressort de l'analyse des relations ajustées sur les parcelles de sous-solage que la capacité de stockage d'eau (Figure 5.22) est nettement supérieure à celle quantifiée dans les banquettes (Figure 5.21). Elle est de l'ordre de 3 à 4 fois plus faible sur le témoin (Figure 5.23) en comparaison avec l'aménagement du sol par sous-solage. Ces données viennent donc confirmer le rôle important des différents types d'aménagement en termes d'économie de l'eau en milieux semi-arides sahéliens. L'analyse donne des différences assez marquées en ce qui concerne la variation du stock hydrique en fonction de la pluie, très significatives sur le sous-solage par rapport aux banquettes et au témoin. La spatialisation du stock hydrique sur l'ensemble des parcelles étudiées a permis d'estimer la lame d'eau stockée dans le sol après chaque pluie. Cependant, la totalité de cette eau n'est pas forcément retenue, une partie étant extraite par l'évaporation, surtout pour les banquettes, et éventuellement le ruissellement de débordement d'ouvrage. Cette approche basée sur l'évaluation quantitative de l'efficacité des aménagements peut donc être un instrument incontournable de gestion durable des ressources naturelles en général et de l'agriculture des pays sahéliens en particulier.

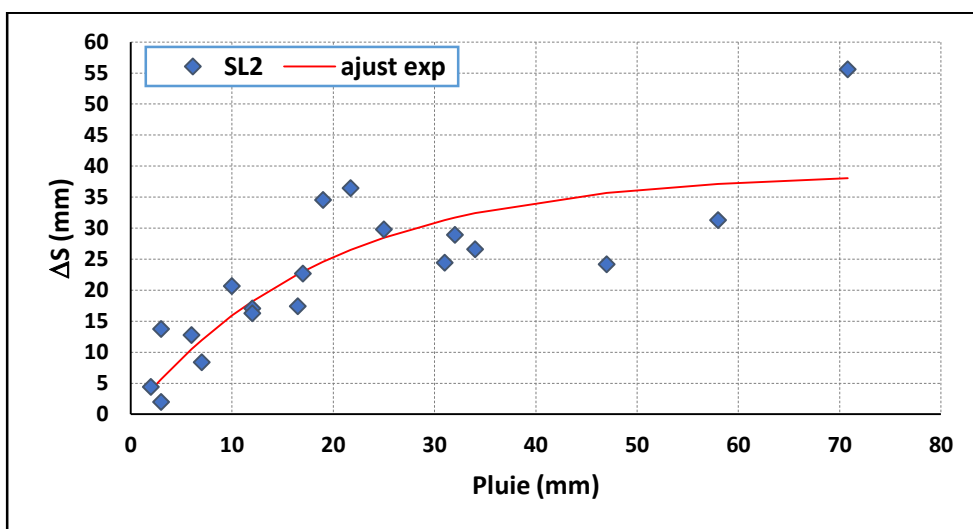
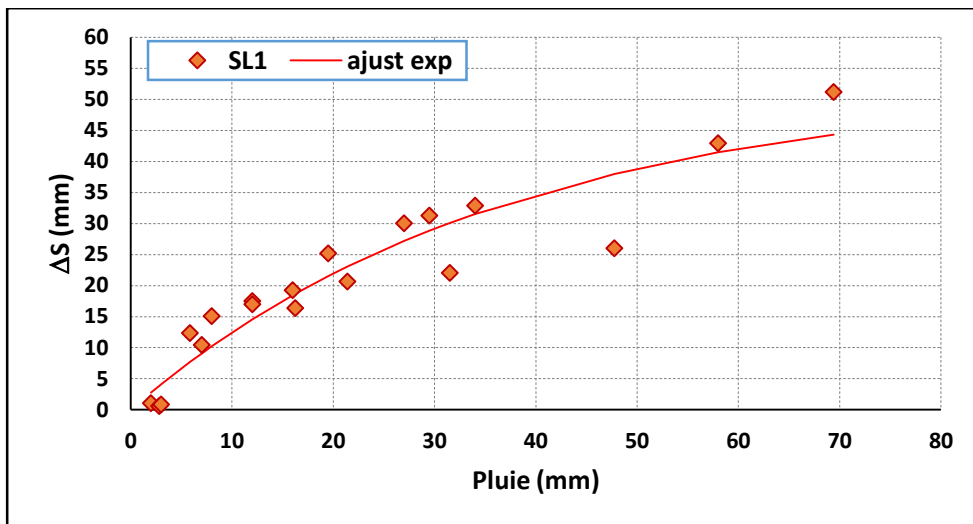


Figure 5.22. Relations pluie- ΔS (triangle) et ajustements sur les nuages de points (courbes) effectués sur les parcelles de sous-solage.

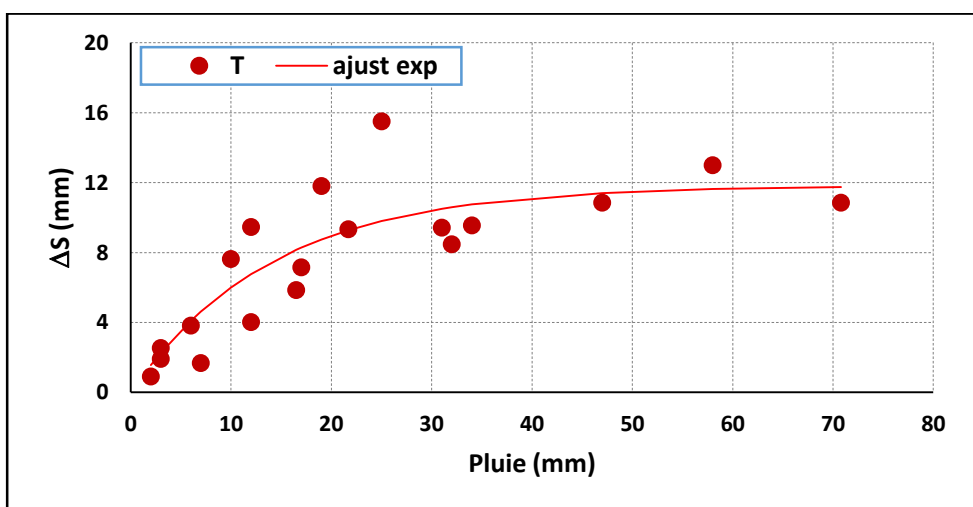


Figure 5.23. Relations pluie- ΔS (rond) et ajustements sur les nuages de points (courbes) effectués sur la parcelle témoin.

5.3.2.4. Influence de l'intensité des pluies sur la rétention d'eau

Pour mieux expliquer les relations pluie-variation de stock (ΔS), nous avons analysé les indicateurs suivants : le coefficient de variation ($CV = \text{écart-type}/\text{moyenne}$) de l'intensité des pluies au-dessus d'un seuil (1 mm/h par exemple dans le cas présent) et le rapport entre l'intensité maximale et le cumul de pluie. Ces deux indicateurs ont été calculés sur la série de toutes les pluies utilisées dans les relations (Figure 5.19). L'idée est de rechercher des variables liées à l'intensité de pluie et non à son cumul pour tenter d'expliquer pourquoi certains événements donnent un stockage inférieur à celui attendu, cas du 5 juillet 2017 typiquement. Les résultats du Tableau 5.13 nous renseignent sur l'influence de ces indicateurs sur la capacité de rétention d'eau des surfaces aménagées.

Tableau 5.13. Principaux résultats des calculs des indicateurs de pluie.

Dates	Moyenne (mm)	Écart-type (mm)	CV	I_max (mm/h)	Cumul (mm)	I_max/cumul
30/07/2016	32,09	42,77	1,33	135,48	32,10	4,22
12/08/2016	7,19	9,44	1,31	33,72	10,90	3,09
27/08/2016	15,85	27,69	1,75	106,80	52,70	2,03
12/09/2016	11,01	18,59	1,69	70,80	20,60	3,44
14/06/2017	3,90	4,38	1,12	36,60	28,10	1,30
26/06/2017	56,44	24,65	0,44	83,28	14,60	5,70
05/07/2017	14,49	27,59	1,90	129,84	58,00	2,24
10/07/2017	3,07	0,92	0,30	4,68	4,80	0,98
19/07/2017	5,43	3,57	0,66	18,12	14,10	1,29
22/07/2017	5,69	6,92	1,22	30,84	21,30	1,45
25/07/2017	7,46	5,80	0,78	18,84	4,40	4,28
30/07/2017	0,51	0,24	0,47	0,72	1,40	0,51
04/08/2017	18,26	24,85	1,36	68,88	17,40	6,50
08/08/2017	16,20	10,81	0,67	39,72	21,40	2,05
14/08/2017	9,94	9,39	0,95	29,76	8,70	3,42
22/08/2017	11,09	14,88	1,34	66,84	63,40	1,05
23/08/2017	3,29	1,22	0,37	5,28	2,40	2,20
26/08/2017	9,02	9,70	1,08	38,64	27,10	1,43
16/09/2017	6,39	11,08	1,73	66,48	30,30	2,19

CV = coefficient de variation et I_max = intensité maximale

D'après ce tableau, le coefficient de variation le plus fort ($CV = 1,90$) s'observe pour la pluie du 05 juillet 2017 où l'intensité maximale dépasse 129 mm/h. Ce qui peut expliquer la rétention d'eau inférieure aux attentes de toutes les parcelles durant cette date. On constate, de manière générale, que les fortes pluies sont celles qui ont les coefficients de variations les plus élevés constituant un autre élément d'explication des écarts importants observés traduisant le caractère

ruisselant des parcelles face à certaines pluies. Il est à noter qu'il paraît difficile de juger sur la pertinence de l'un ou de l'autre de ces indicateurs. Les tentatives de corrélation faites avec les résidus d'estimation de la variation de stock ont été décevantes. Ceci peut surprendre dans la mesure où la corrélation entre les deux indicateurs (Figure 5.24) montre un coefficient de détermination quasiment nul ($R^2 \approx 0$) indiquant deux types d'information bien distincts, mais on ne sait pas trop sur celui qui a le plus d'influence sur les écarts de stockage. Faute de temps, nous n'avons pu aller plus loin sur ce point pendant notre étude.

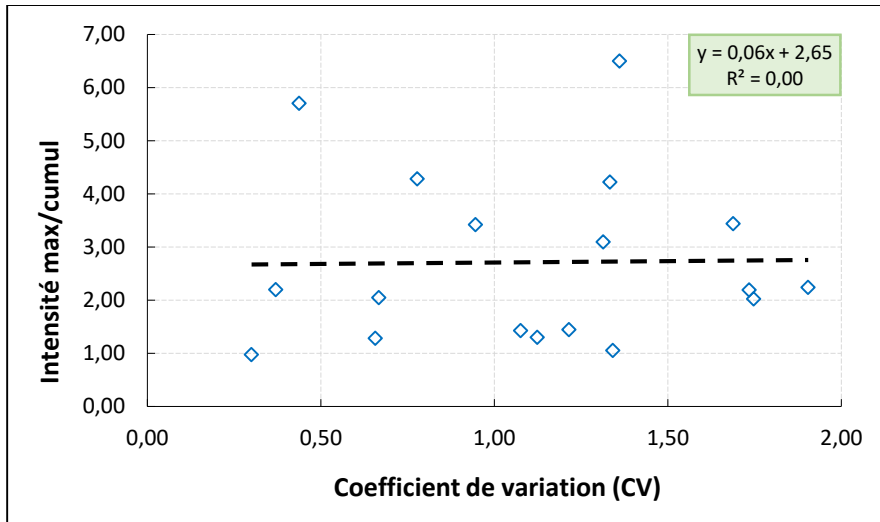


Figure 5.24. Corrélation entre le coefficient de variation (CV) et le ratio intensité maximale/cumul de pluie.

Conclusion partielle

La méthode d'induction électromagnétique utilisée dans ce chapitre visait à évaluer l'efficacité des différentes techniques d'aménagement à l'échelle de la parcelle. Pour cela, un suivi quotidien de la conductivité électrique (EM38) couplé à celui de l'humidité du sol (à l'aide de la sonde à neutrons) est effectué en conditions réelles sur des zones aménagées et leur témoin. La méthode des mesures de conductivité électrique, bien qu'elle soit intégrante et non destructive du sol, nécessite un étalonnage pour permettre une quantification spatialisée de la variation de contenu en eau du sol due aux aménagements. D'après les résultats obtenus, il existe une relation nette et acceptablement linéaire entre les grandeurs (CEav et stock) calculées. Il n'a donc pas été utile de calculer les grandeurs écarts (après – avant pluie) ou ratio (après / avant pluie) qui font perdre de l'information. L'étalonnage moyen obtenu par parcelle a permis de transformer les mesures ponctuelles de la conductivité apparente en stock hydrique. En appliquant ensuite la méthode d'interpolation spatiale par krigeage, on a pu cartographier la distribution spatiale et la dynamique temporelle du stock hydrique des parcelles étudiées. La

spatialisation du stockage événementiel montre des différences significatives influencées par le type d'aménagement et la quantité de la pluie tombée. Enfin, par comparaison avec le témoin et les banquettes, la technique du sous-solage présente le meilleur résultat à l'échelle parcellaire. Le gain en stockage hydrique est typiquement d'un facteur 3.0 ± 1.1 (en moyenne) par rapport au témoin tandis qu'il est de 2.4 ± 2.2 (en moyenne) pour les banquettes. Il est notable que ce facteur de gain semble augmenter pour les pluies fortes, ce qui renforce l'intérêt de ce type d'aménagement en cas d'évolution climatique vers des événements plus forts et intenses (Taylor et al., 2017 ; Panthou et al., 2018). Notons enfin que ce gain augmente en cas "**d'intensification climatique**" en cumul (P).

Par ailleurs, l'étude confirme l'intérêt de la méthode électromagnétique car elle permet de suivre par cartographie l'évolution du stock hydrique. En plus, ce dispositif fournit des informations précises et rapidement acquises sur des vastes surfaces ce qui fournit des estimateurs robustes.

Peu ou prou sont les études qui ont quantifié l'impact hydrologique de ces techniques d'aménagement à l'échelle du bassin versant. Le chapitre suivant est consacré à ce volet.

Chapitre 6. Analyse de la réponse hydrologique des bassins versants aménagés

Ce chapitre présente les résultats des mesures et observations hydrologiques effectuées à l'échelle des bassins versants étudiés. L'objectif visé à cette échelle est de quantifier l'impact des banquettes et du sous-solage en termes de réduction des écoulements et des inondations en aval. Pour cela, la démarche expérimentale adoptée consiste à comparer l'efficacité hydrologique de ces techniques en s'appuyant sur des données hydrométriques mesurées à l'exutoire. La similitude des caractéristiques physiques des bassins observés a permis de procéder à cette comparaison "toutes choses égales par ailleurs" et permettre ainsi d'évaluer l'impact hydrologique des aménagements.

6.1. Analyse de la pluviométrie et fonctionnement hydrologique des bassins

Les données pluviométriques utilisées dans ce travail sont collectées à l'aide des pluviomètres et pluviographes installés sur le site d'étude. La variabilité spatio-temporelle est l'une des caractéristiques remarquables des pluies en région sahélienne (Estèves et Lenoir, 1996). Le site de Tondi Kiboro ne fait pas exception à cette règle.

La Figure 6.1 donne quelques éléments caractéristiques de l'évolution de la pluviosité sur le site d'étude. En comparant le cumul annuel des pluies des 15 années d'observation, on constate que 2011 et 2017 ont été plutôt sèches par rapport à la moyenne de 560 mm (1905-2017) au niveau de la station de Niamey. En revanche, les années 2008 et 2015 sont plus humides avec respectivement 32 et 37 événements pluvieux. L'année la plus sèche (2011) n'a enregistré que 12 pluies au total avec un cumul annuel de 290 mm. Cela témoigne d'une variabilité temporelle qui reflète la tendance observée sur l'ensemble du Sud-Ouest nigérien comme l'illustre la Figure 2.7 (chapitre 2). Cependant, les conséquences de la pluviosité sur le partage entre ruissellement-infiltration peuvent se manifester non seulement en termes de quantité totale précipitée mais aussi par les intensités et la répartition spatio-temporelle des événements.

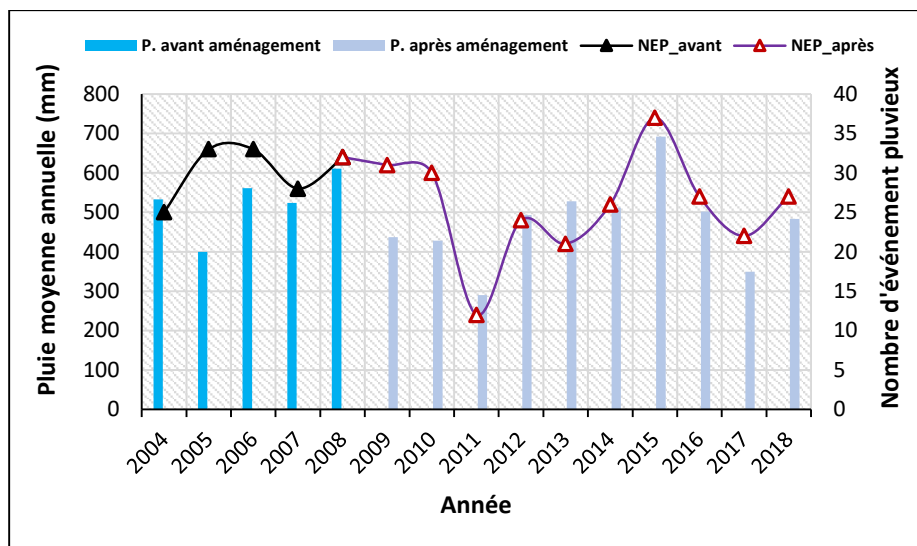


Figure 6.1. Répartition des pluies moyennes annuelles et des événements pluvieux de 2004 à 2018. P = période et NEP signifie nombre d'événements pluvieux

Il ressort de cette figure que pour la première période d'observation (2004 à 2008) avant aménagement, on compte au total 151 événements pluvieux (30 par an en moyenne) contre 257 pour la période après aménagement (26 par an). La variabilité de la pluviométrie présentée dans ce tableau peut avoir de l'impact sur les écoulements mais les comportements hydrologiques des bassins ne dépendent pas uniquement des caractéristiques de la pluie.

6.2. Cartographie de l'occupation du sol des bassins versants étudiés

Compte tenu du rôle prépondérant que jouent les états de surface sur le comportement hydrologique des bassins, une carte illustrant la situation actuelle des différents états de surface élémentaires répertoriés et des aménagements étudiés a été réalisée sur la base d'une image Google Earth Pro (qui date de février 2019). La Figure 6.2 montre la situation par type d'occupation du sol observée en ce moment.

La Figure 6.3 résume les proportions cartographiées par type d'occupation du sol et par bassin versant. Relativement à la superficie totale, les sols nus (dits aussi bandes nues) du plateau couvrent environ 49 % et 40 % des bassins TK amont Nord et TK amont Sud respectivement. Notons que dans les bandes boisées ne représentent que 20 % et 15 % des bassins, respectivement, les croûtes sont presque absentes à l'exception des croûtes de décantation (très peu perméable) et biologique présentes par endroits. Les éboulis sur les talus composés de blocs de démantèlement de cuirasse et des affleurements de grès sont organisés en surface gravillonnaire occupant environ 11 % des bassins. Quant aux surfaces encroûtées, elles constituent l'unité la plus encroûtée (ERO) de la partie aval de ces sous bassins amont.

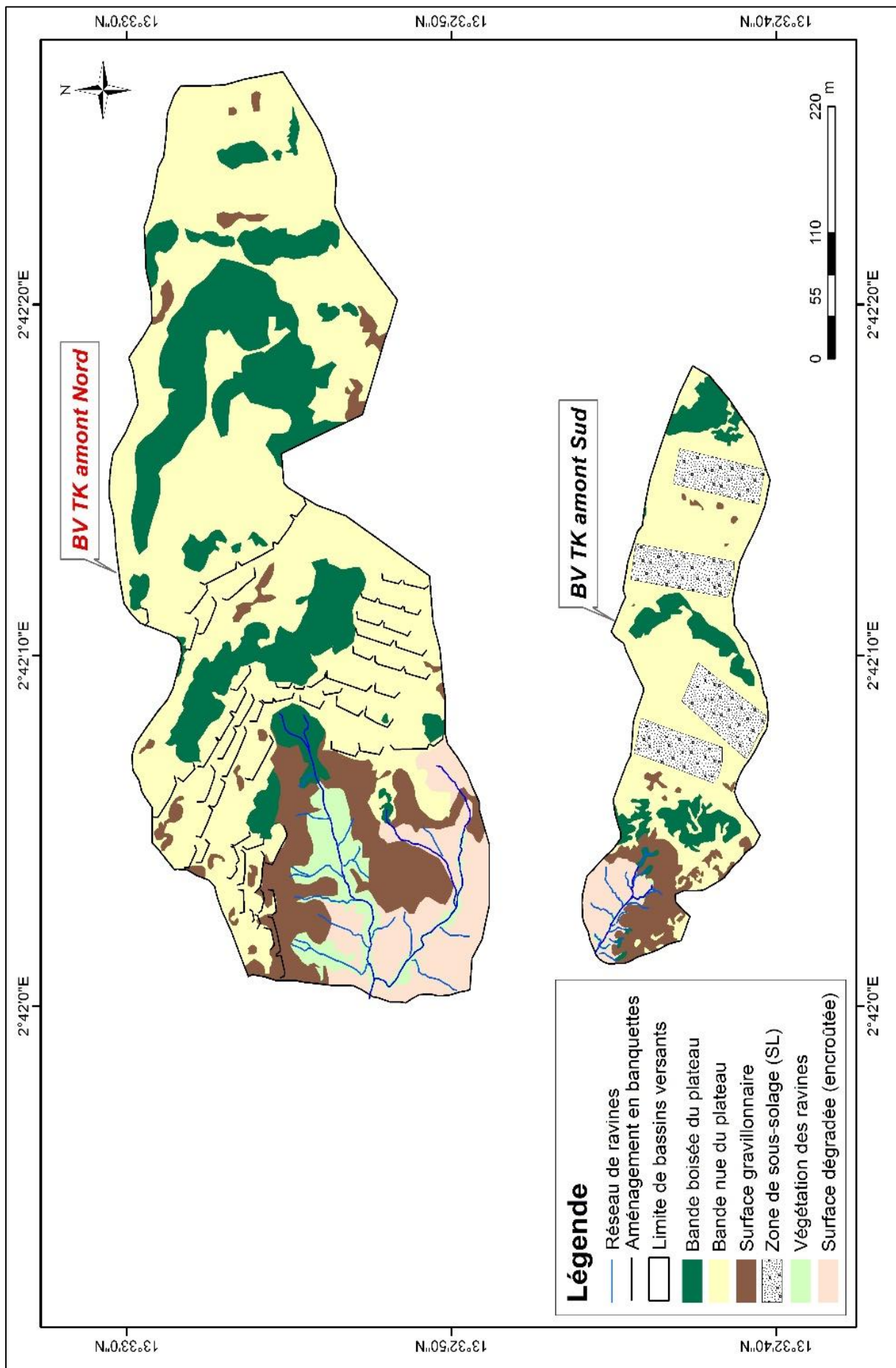


Figure 6.2. Résultats de la cartographie d'occupation des sols en 2019. La carte a été élaborée sur la base de l'image Google Earth Pro du 26 février 2019.

De manière générale, on remarque que les bassins versants sont dominés par des espaces producteurs et accélérateurs des ruissellements. En effet, la disparition du couvert végétal et l'extension des surfaces dénudées accentuent le ruissellement et par conséquent la baisse de la capacité d'infiltration limitée en surface par l'encroûtement rendant le sol plus compacte et imperméable. L'écoulement généré sur les bandes nues du plateau peut rejoindre le réseau hydrographique qui prend naissance sur le rebord du plateau. La faiblesse de la pente et l'absence du réseau de drainage bien marqué font que l'écoulement s'effectue en nappe transitant successivement entre les bandes nues et boisées avant d'atteindre directement le réseau des ravines qui le transfert vers les bas-fonds.

En ce sens, des aménagements antiérosifs réalisés peuvent devenir des remèdes possibles à ce niveau afin d'amortir et limiter la genèse des ruissellements et leurs transferts vers les autres unités géodynamiques. Nous avons exposé précédemment l'efficacité des aménagements aux échelles locale et parcellaire, il convient dès à présent d'analyser leur impact hydrologique à l'échelle du bassin versant.

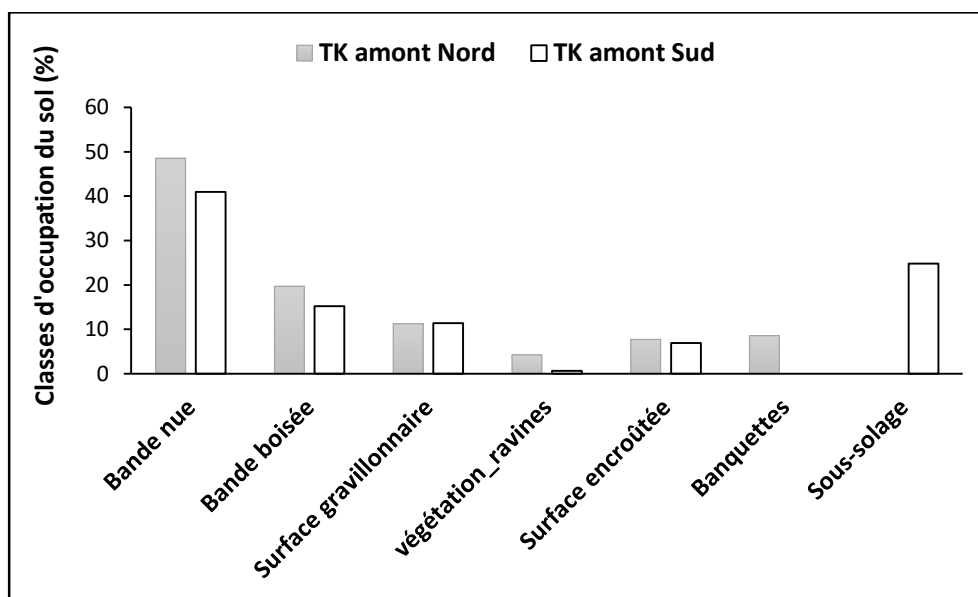


Figure 6.3. Proportion des différentes unités d'occupation des sols en 2019 à l'échelle des bassins versants de Tondi Kiboro.

Il faut noter que la proportion de surface aménagée en banquettes a été déterminée en intégrant l'espace inter-banquettes.

6.3. Effet des banquettes sur le fonctionnement hydrologique du TK amont Nord

Sur ce petit bassin versant de 17,7 ha, un traitement en banquettes a été réalisé dont le protocole est bien décrit au chapitre 2. La technique des banquettes est couramment utilisée du fait de son rôle supposé important sur l'infiltration et le stockage d'eau du sol à l'échelle locale. Mais l'efficacité de ce type d'aménagement a été très peu quantifiée dans le contexte des bassins versants sahéliens. Nous essayerons dans cette partie d'évaluer les effets hydrologiques des banquettes à cette échelle.

6.3.1. Impact des banquettes sur la relation pluie-lame écoulée

Pour évaluer l'efficacité des banquettes, nous avons réalisé une analyse comparative du comportement hydrologique avant et après aménagement du bassin versant. En effet, l'analyse du comportement d'un bassin versant s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin à une sollicitation (la pluie) influencée par un ensemble des processus hydrologiques (Rodriguez et al. 2013). Ainsi, le comportement hydrologique peut être mesuré en observant l'évolution des écoulements à l'exutoire du celui-ci. Une analyse de la relation pluie-lame écoulée à l'exutoire du bassin étudié est ainsi effectuée.

La Figure 6.4 présente la distribution des pluies et des lames écoulées avant et après l'aménagement du sous bassin TK amont Nord. Sur ce graphique, chaque point représente un événement pluvieux à une date donnée. L'importance des ruissellements avant aménagement est illustrée par la pente de la relation plus importante (0,25). Les lames d'eau écoulées sont assez linéairement corrélées aux hauteurs des pluies précipitées ($R^2 = 0,83$). Ainsi, la pluie seule explique 83 % de la variance observée du ruissellement sur le bassin. On remarque aussi que le déclenchement des écoulements, défini par le seuil à partir duquel on n'observe pas de ruissellement (Esteves et Rajot, 1999 ; Esteves, 2003) est de seulement 10 mm de pluie environ, ce qui est une valeur faible. Ce déclenchement rapide des ruissellements peut s'expliquer par la prédominance, sur la zone contributive du bassin, des croûtes favorisant le ruissellement dès le début de la pluie. Sur le même site, Bouzou Moussa et al. (2011) ont démontré sur différentes parcelles expérimentales que même les petites pluies de faible intensité déclenchent le ruissellement sur les zones encroûtées.

En revanche, après aménagement du bassin, on constate une baisse significative des ruissellements comme l'illustre la Figure 6.4 (carrés de couleur bleu à rouge) où la pente de la relation est beaucoup plus faible (0,17) avec un coefficient de détermination R^2 de 0,72. Cependant, cet indicateur mélange des années ayant des taux d'aménagements différents. En termes de seuil, on voit qu'après aménagement il faut une pluie d'au moins 20 mm (± 5 mm)

pour observer le déclenchement du ruissellement à l'exutoire. Un nombre important des pluies inférieures à 30 mm n'ont produit que des ruissellements très faibles (proches de 0) illustrant assez nettement l'influence de la fraction de pluie retenue par les banquettes.

En conclusion, on peut dire que le seuil d'apparition du ruissellement, qui est d'environ 7 mm en moyenne avant aménagement, a au moins triplé pour atteindre 20 mm. On note cependant quelques événements qui ont produit des ruissellements peu marqués ; les intensités de pluie ont probablement joué un rôle sur ces derniers. L'analyse des intensités montre que ce sont des événements les plus intenses avec des coefficients de variation des pluies (CV) les plus élevés supérieurs à 1,30.

L'étude met donc en évidence que les banquettes ont eu un effet régulateur des flux d'eau de ruissellement même pour les moyennes et les fortes pluies.

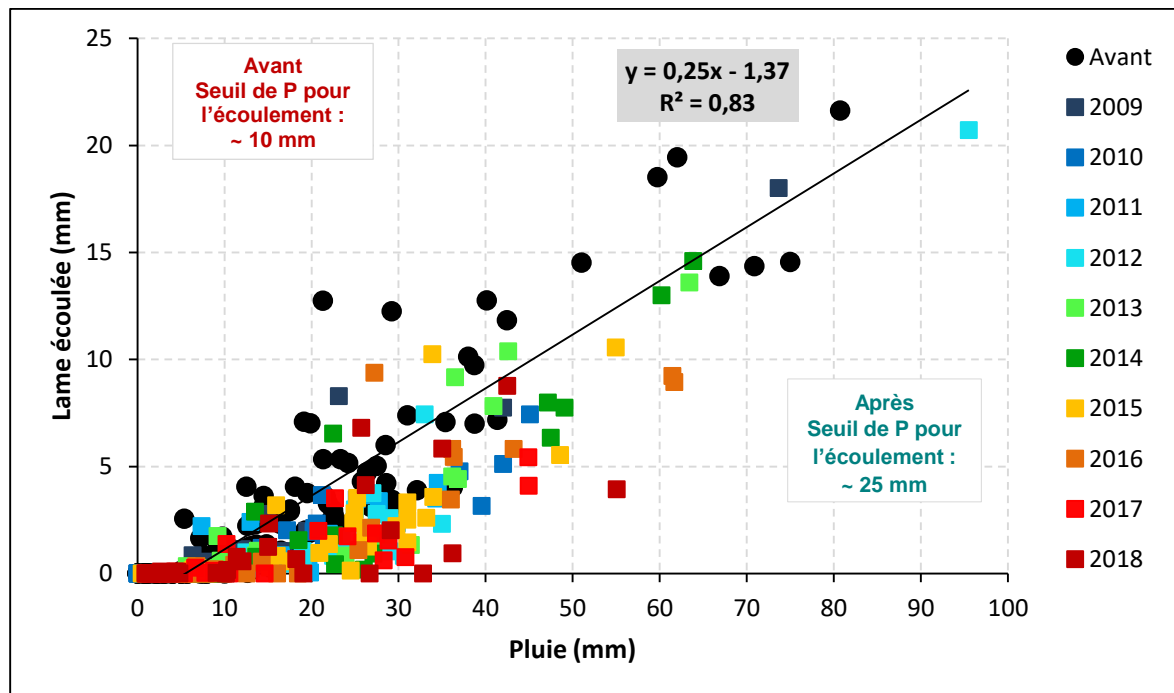


Figure 6.4. Pluies et lames écoulées événementielles avant (2004-2008) et après (2009-2018) aménagement en banquettes sur le bassin versant TK amont Nord.

La droite indique la régression linéaire avant aménagement.

Le résumé des relations pluie-lame écoulée obtenues avant et après aménagement du bassin est présenté le tableau suivant. Celui-ci indique l'existence d'un lien entre ces deux paramètres.

Tableau 6.1. Récapitulatif des relations pluie-lame écoulee avant et après aménagement sur le sous bassin TK amont Nord.

Notons bien que l'échantillon est hétérogène sur 2009-2018 car la surface aménagée change.

Périodes de mesures	Pluie moyenne	Relation pluie-lame écoulee (mm)	Coefficient de détermination (r^2)	Nombre total d'événements
2004-2008	525,58	Le = 0,25 P-1,37	0,83	139
2009-2018	468,16	Le = 0,17 P-1,20	0,72	252

6.3.2. Analyse des hydrogrammes avant et après traitement du bassin

Une autre façon d'évaluer l'efficacité des banquettes consiste à comparer l'évolution des hydrogrammes des crues pré- et post-aménagement du bassin. L'hydrogramme d'une crue se définit, en effet, comme étant la variation temporelle du débit après une sollicitation (pluie) du bassin versant correspondant en un point du cours d'eau. Généralement, la forme de ce dernier résultant d'un événement pluvieux de courte durée sur un versant suit un modèle qui se présente sous forme d'une courbe en cloche dissymétrique. Ainsi, on s'appuie sur quelques hydrogrammes de crues et les hyétogrammes des pluies pour mener cette analyse.

La Figure 6.5 présente une analyse comparative des hydrogrammes observés avant et après aménagement pour des pluies similaires (c'est-à-dire comparables en termes de hauteur précipitée). L'examen de celle-ci laisse constater qu'après aménagement, les hydrogrammes présentent des formes plus aplaties par rapport à la situation d'avant où les débits présentent des pics beaucoup plus élevés. On observe également un retard de réponse du bassin, dû au temps nécessaire de remplissage des ouvrages en banquettes. Les banquettes, en réduisant significativement l'apport en ruissellement des surfaces élémentaires du plateau, ont eu un impact sur l'écroulement des crues à l'exutoire. C'est donc une technique convenable aux endroits où le volume de ruissellement est élevé (Karimata, 2001) à la fois pour limiter les débits de pointe, très érosifs, et les volumes écoulés.

Hydrogramme avant aménagement

Hydrogramme après aménagement

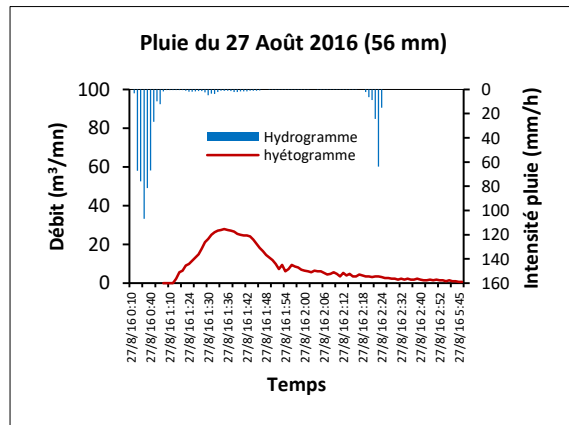
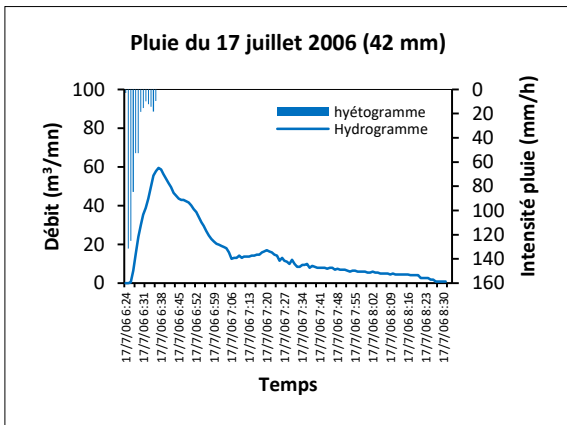
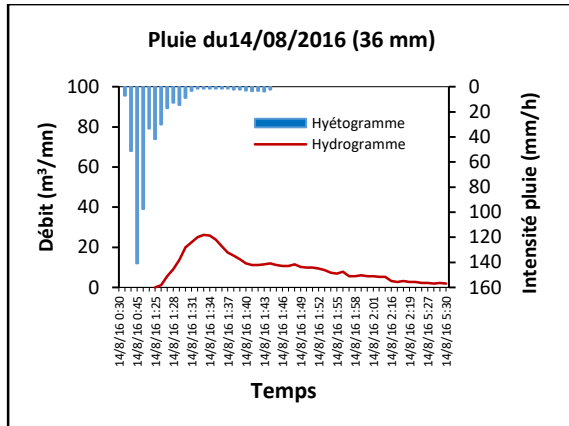
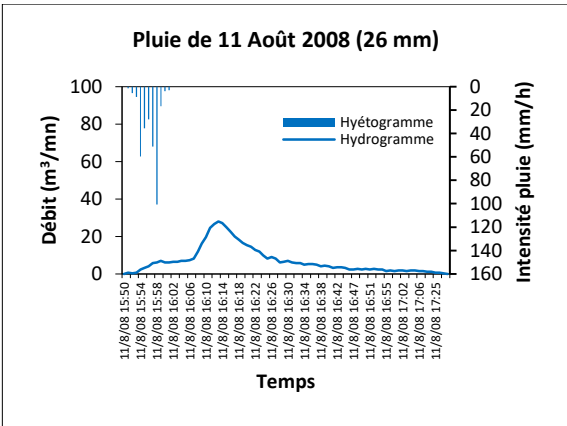
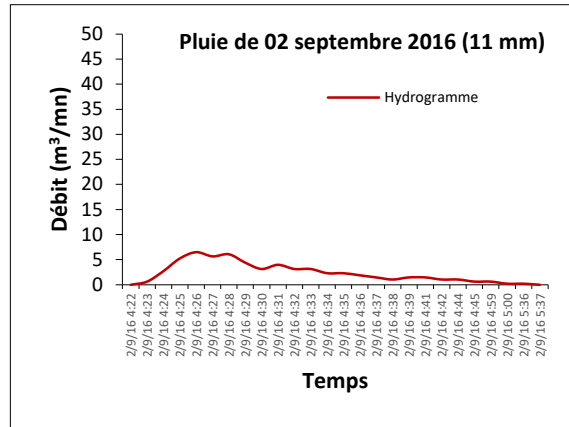
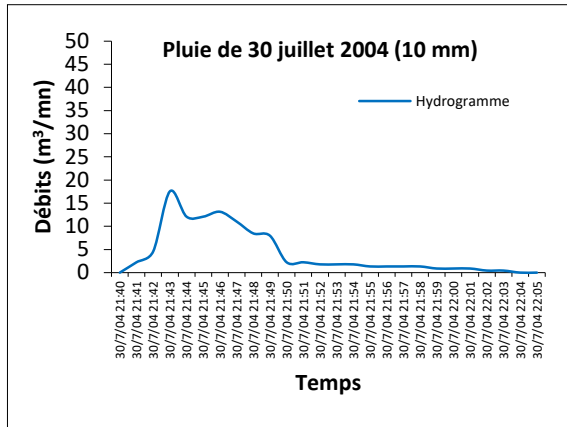


Figure 6.5. Quelques hydrogrammes des crues avant et après aménagement du bassin TK amont Nord.

6.4. Evolution de la superficie aménagée et du coefficient d'écoulement

Un autre moyen d'analyse classique et synthétique utilisé pour caractériser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant est le coefficient d'écoulement (CE). Il s'obtient par application de l'équation 3.37. En outre, c'est un indice utilisé en hydrologie de surface pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler (Musy et al., 2014).

Sur la période 2004-2008, le coefficient d'écoulement initial du bassin sans aménagement est de 17 % (variant entre 11 et 21 %). En 2010, 3 % de la zone contributive du bassin (constituée essentiellement du plateau latéritique) ont été aménagés par des banquettes. Par la suite, cette proportion a été progressivement rehaussée pour atteindre 9 % en 2016. Cette approche a ainsi permis d'analyser finement l'évolution des surfaces aménagées et celle du coefficient de ruissellement.

Les résultats que présente la Figure 6.6 montrent que l'augmentation des surfaces aménagées entraîne rapidement une diminution significative des écoulements, ce qui montre à nouveau l'efficacité des aménagements en banquettes sur la rétention d'eau et la limitation des écoulements à l'exutoire.

Entre 2009 et 2017, le coefficient d'écoulement est passé de 16 % à 7 % pour une surface aménagée finale de moins de 10 %. De 2012 à 2016, le coefficient d'écoulement s'est plus ou moins stabilisé autour de 10 % (± 2 %) puis en 2017-2018, il est passé à 7.5 %. Par contre, malgré une surface aménagée d'environ 4 % entre 2013 et 2014 le coefficient d'écoulement a connu une légère augmentation (13 %) par rapport à la situation de 2012. Cela peut s'expliquer par l'amélioration de la pluviométrie.

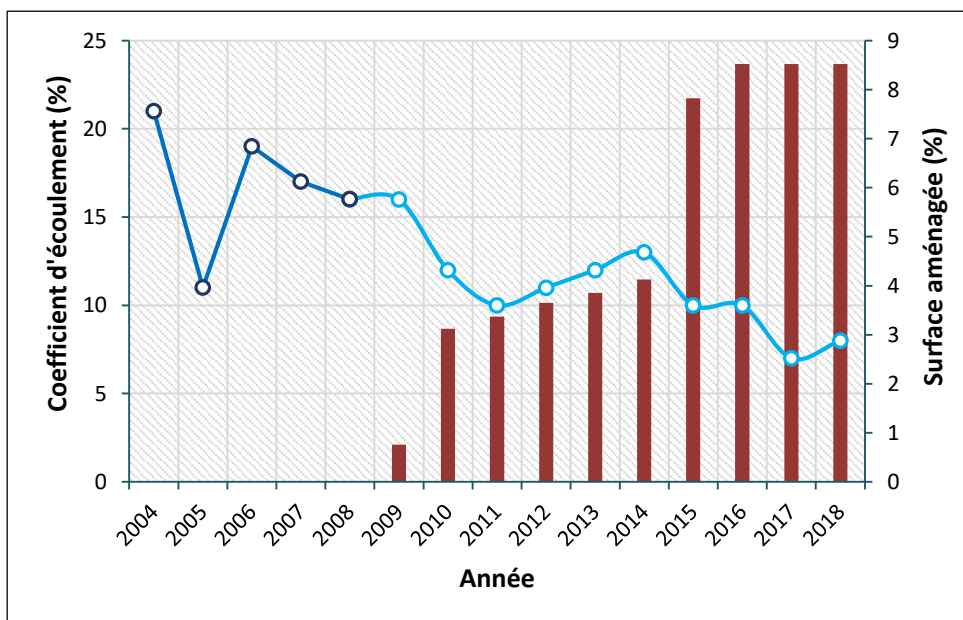


Figure 6.6. Evolutions concomitantes du coefficient d'écoulement et des surfaces aménagées sur le bassin TK amont Nord.

La courbe en bleu foncé et en bleu clair indique respectivement l'évolution du coefficient d'écoulement avant et après aménagement. L'histogramme montre l'évolution de la surface aménagée.

6.5. Evolution du CE en fonction du cumul annuel des pluies

La Figure 6.7 met en relation l'évolution du coefficient d'écoulement en fonction du cumul annuel des pluies. Il faut noter par ailleurs que les périodes d'observations sont caractérisées par une variation notable de la pluviométrie. L'examen de cette figure permet d'identifier facilement le lien entre les grandeurs représentées. En effet, bien que l'année 2015 soit la plus pluvieuse de la période (avec un cumul saisonnier ≈ 692 mm), le coefficient d'écoulement a connu une diminution en passant respectivement de 13 % à 10 % entre 2014 et 2015. Cette diminution peut s'expliquer par le doublement de la surface aménagée. L'analyse de l'évolution du coefficient d'écoulement montre la persistance de l'impact des banquettes tout le long de la période de suivi malgré l'amélioration de la pluviométrie pour certaines années.

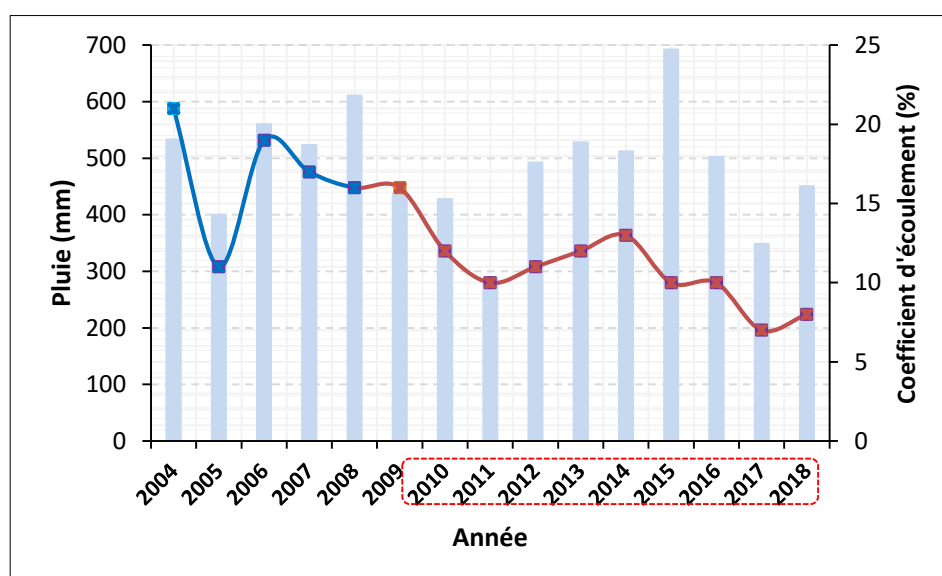


Figure 6.7. Evolution du coefficient d'écoulement (courbe bleue et rouge) en fonction de la pluie annuelle (histogramme).

Aussi, à l'échelle temporelle « de l'aménagement », nous pouvons facilement identifier l'impact du traitement en banquettes en lien avec la pluie sur l'écoulement du bassin versant.

6.6. Relation coefficient d'écoulement-proportion aménagée en banquettes

Pour mieux visualiser l'impact hydrologique des banquettes, nous avons adopté une démarche basée sur la corrélation multiple permettant d'expliquer les valeurs du coefficient d'écoulement annuel (variable à expliquer) avec deux variables explicatives (pluie annuelle et surface aménagée). Avec un échantillon de 11 observations, on a effectué la régression multiple afin d'analyser le lien de dépendance et évaluer le poids de chacune de ces variables explicatives

dans la détermination de la variable à expliquer (coefficient d'écoulement). Le coefficient de détermination est utilisé comme critère d'appréciation. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 6.8 indiquant deux types d'informations bien distinctes. Celle-ci montre l'absence de corrélation entre la pluie annuelle et le coefficient d'écoulement avec un coefficient de détermination R^2 de 0,05. Quant à la Figure 6.9, elle met en évidence la tendance du coefficient d'écoulement à répondre à la surface aménagée. L'évolution de cette dernière est fortement corrélée à la baisse des écoulements ($R^2 = 0,78$). Cela implique que la surface aménagée constitue la principale variable explicative du coefficient d'écoulement, elle explique à 78 % la variance de celui-ci.

Par ailleurs, il est visible que cette baisse du ruissellement est non proportionnelle à la dimension de l'aire aménagée sur le bassin versant. En particulier, avec une surface aménagée de 4 % en 2012, la diminution du coefficient d'écoulement annuel apparaît assez drastique, passant de 16 % (2009) à 11 %. En 2015, malgré le doublement de la proportion de l'aire aménagée, le coefficient reste sensiblement plus ou moins stable. Ceci illustre les fortes non linéarités de la réponse hydrologique à la proportion aménagée.

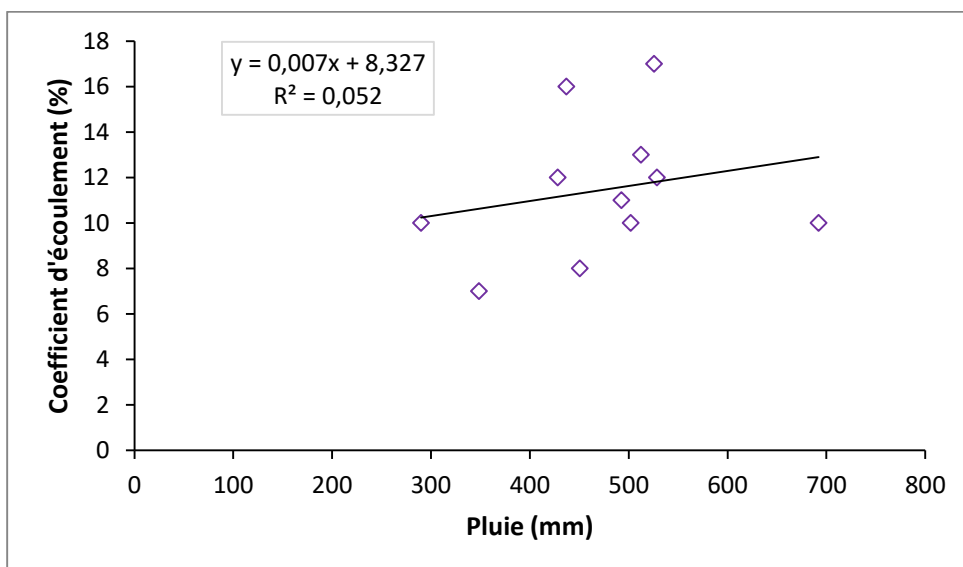


Figure 6.8. Evolution du coefficient d'écoulement en fonction du cumul annuel des pluies.

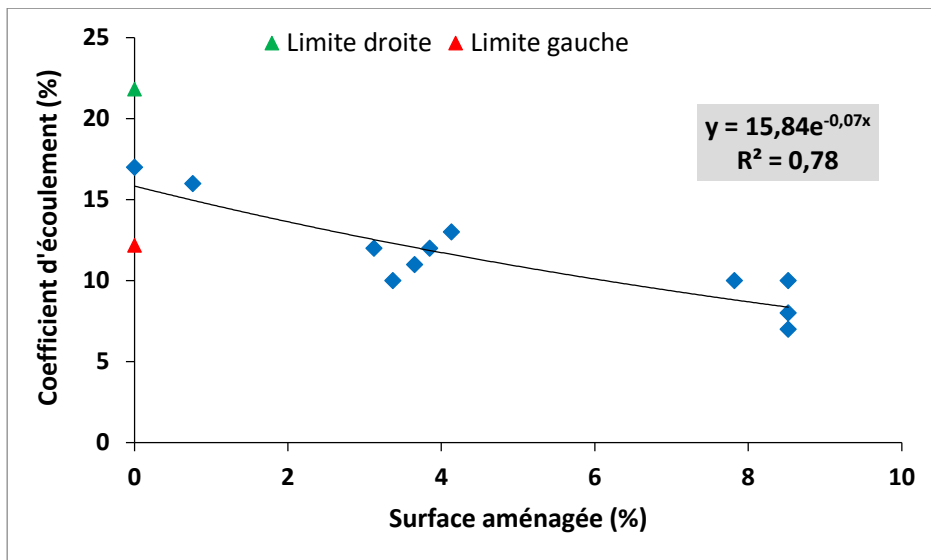


Figure 6.9. Ajustement par exponentielle décroissante de la relation entre surface aménagée et coefficient d'écoulement sur le bassin TK amont Nord.

La valeur du CE correspondant à 0 % de la surface aménagée est obtenue en calculant la moyenne (avec un écart-type = 3,77) de la période avant aménagement, 2004-2008. Les triangles (rouge et jaune) représentent l'intervalle de confiance à 80 % pour ce point.

La forme en trois blocs des points indique que l'aménagement du bassin n'a pas bien évolué de façon progressive. A partir de la relation, nous avons ensuite calculé les résidus d'estimation (CE data - CE calculé par application de l'équation ajustée) afin de les mettre en corrélation avec la pluie. Le résultat que présente la Figure 6.10 a permis de vérifier que les résidus (appelés aussi "le non expliqué") obtenus après l'aménagement sont corrélés avec la pluie ($R^2 = 0,53$). Ceci suggère une légère influence de la pluie sur les fluctuations du CE. Plus l'année est pluvieuse, plus le coefficient d'écoulement (CE) devient plus important par rapport à ce qu'on attendrait (c'est-à-dire au-dessus de la valeur 0 sur la Figure 6.10). Et, inversement quand l'année est plus sèche, le coefficient d'écoulement se retrouve un peu en dessous des attentes.

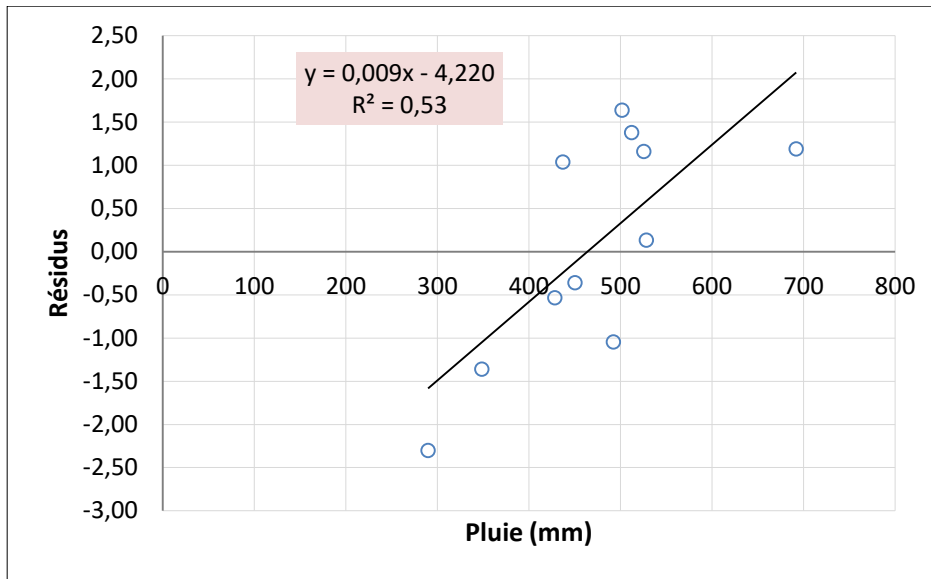


Figure 6.10. Corrélation entre pluie et résidus d'estimations du CE calculé à partir de l'équation ajustée.

Enfin, la réalisation de l'aménagement en banquettes a permis non seulement de réguler le flux d'eau des écoulements mais aussi d'économiser l'eau à l'échelle locale au profit de la végétation et des cultures. Les banquettes collectent en effet les eaux de ruissellement afin de les mettre à la disposition de manière disséminée dans le paysage, ce qui pourrait, à long terme, avoir un impact positif sur la restauration des espaces fortement encroûtés. De toute évidence, les banquettes ont de ce fait engendré une réduction significative de l'écoulement et de la dynamique hydro-érosive sur les unités situées en aval. Les études réalisées par Pouvaud et al. (1995), Givone (2005), Kergreis et Claude (1991) et Roose et al. (2008) fournissent par ailleurs des résultats intéressants sur le fonctionnement hydrologique des techniques de gestion de l'eau et des terres à l'échelle des bassins versants notamment sur l'écoulement et le transport des particules solides. Sur les sols dégradés d'Afrique de l'ouest, Roose et al. (2015) ont démontré que, d'un point de vue hydrique, les micro-barrages perméables (cordons, haies, bandes enherbées et diguettes) améliorent localement l'infiltration, mais surtout réduisent la vitesse du ruissellement et sa charge solide, donc l'érosion.

6.7. Détermination d'une aire optimale de l'efficacité des banquettes

L'étude montre qu'à l'échelle du petit bassin versant (de la taille de quelques hectares), il n'est pas nécessaire d'aménager la totalité de la surface du bassin pour réduire le ruissellement en deçà d'un seuil raisonnable. Il a suffi d'aménager moins de 10 % de la surface du sous bassin TK amont Nord pour réduire son ruissellement d'un facteur deux environ. Eu égard à la quasi

stabilité du coefficient d'écoulement dès que la surface aménagée atteint 4-5 % du bassin, cette proportion peut donc être considérée comme la surface optimale d'aménagement pouvant réduire les écoulements à un niveau acceptable, soit une valeur de CE annuel inférieure à 10 %. Ceci peut constituer un indicateur fort utile pour les acteurs du développement rural (ONGs, projets entre autres) qui interviennent pour la restauration de l'environnement. Certaines études ont par ailleurs notifié qu'une seule technique ne suffit pas à elle seule pour résoudre les problèmes et qu'il faut une combinaison de techniques pour permettre d'améliorer le milieu et la vie des paysans (Roose et al., 2015). Il faut aussi noter que ces aménagements même s'ils sont assez efficaces ont besoin d'être bien entretenus pour qu'ils soient plus durables. Plusieurs études menées antérieurement ont ainsi relevé les difficultés d'entretien des aménagements (Mietton, 1986 ; Roose et al., 2012).

6.8. Impact hydrologique du sous-solage à l'échelle du bassin versant

Sur le bassin TK amont Sud de 4,46 ha, nous disposons d'une seule année (2013) d'observation avant aménagement permettant de caractériser le fonctionnement initial dudit bassin. A partir de 2014, le bassin a connu un début d'aménagement en traitant par sous-solage une partie de la zone contributive constituée essentiellement du plateau latéritique. La réalisation de l'aménagement s'est poursuivie progressivement (en augmentant chaque année la proportion aménagée) jusqu'en 2016.

L'approche méthodologique utilisée pour caractériser et comparer le fonctionnement hydrologique du bassin est discutée au § 3.3.7 du chapitre 3. Dans ce qui suit, nous tenterons de présenter les principaux résultats acquis. Il nous paraît toutefois nécessaire de souligner qu'en 2017 et 2018, le dispositif de mesures (Thalimedes) a connu un dysfonctionnement qui ne permet pas l'utilisation des données.

6.8.1. Impact du sous-solage sur la relation pluie-lame écoulée

La Figure 6.11 propose une étude comparative de la régression liant la pluie à la lame écoulée événementielle avant et après sous-solage. La comparaison des relations représentées sur cette figure met en évidence une distribution des lames ruisselées non identique durant les périodes avant et après réalisation de l'aménagement.

En 2013, l'importance des ruissellements est indiquée par la pente plus forte (0,39) de la droite de régression (en noir). Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,86$) montre l'existence d'une forte corrélation indiquant que la hauteur de la pluie explique à 86 % la variation des lames écoulées durant cette période "sans aménagement". Cette aptitude du bassin à ruisseler dès le

début des pluies, 5 mm environ suffisent, est en effet attribuée à la dégradation des sols se traduisant par le développement des espaces nus fortement encroûtés. Ce comportement hydrologique initial du bassin est similaire à celui du sous bassin TK amont Nord.

Après la mise en place du sous-solage en 2014 (3 % aménagés), on constate un changement de comportement hydrologique par rapport à la situation initiale. D'après la Figure 6.11 toujours, il existe une relation assez linéaire entre les lames écoulées et les pluies observées après le sous-solage. Le remaniement du sol, en provoquant l'infiltration à l'échelle locale (§ 4.7.3.2), diminue en effet les volumes écoulés à l'exutoire dès la première année de réalisation. Cet impact sur la limitation des ruissellements est illustré par les relations de pentes relativement plus faibles (0,17 à 0,28) avec des coefficients de détermination R^2 compris entre 0,55 et 0,76 (Tableau 6.2). Néanmoins, on constate une dispersion assez marquée de nuage des points, due au fait que la surface sous-solée est passée de 3 à 25 % en deux années. Le remaniement plus profond du sol (de 30 à 40 cm) peut être un élément explicatif puisqu'il crée des conditions d'infiltration plus favorables mais variables dans le temps. Le seuil d'apparition d'écoulement d'environ 10 mm avant sous-solage a subi une augmentation au fur et à mesure qu'on augmente la proportion aménagée sans prendre de valeur nette. Certaines pluies de 25 mm ne produisent pas de ruissellements à l'exutoire, alors que d'autres de 8 mm en ont engendré mais de manière relativement faible. Ainsi, avec des pluies comprises entre 10-30 mm, la hauteur moyenne des lames ruisselées ne dépasse guère 8 mm (± 2 mm). Malgré des fortes pluies (de 30 à 60 mm), les lames écoulées (Le) restent inférieures à 15 mm (± 1 mm) à l'exception d'un seul événement observé le 12 août 2015 ($Le = 15,8$ mm). Par contre, certains événements probablement intenses produisent des ruissellements assez forts, à tel point que les lames écoulées se confondent à celles de la période avant aménagement. Ce qui peut fortement influencer la dispersion des points autour de la droite. La réponse du bassin sous-solé est donc sans doute fortement fonction de l'intensité de l'événement et non pas seulement de son cumul.

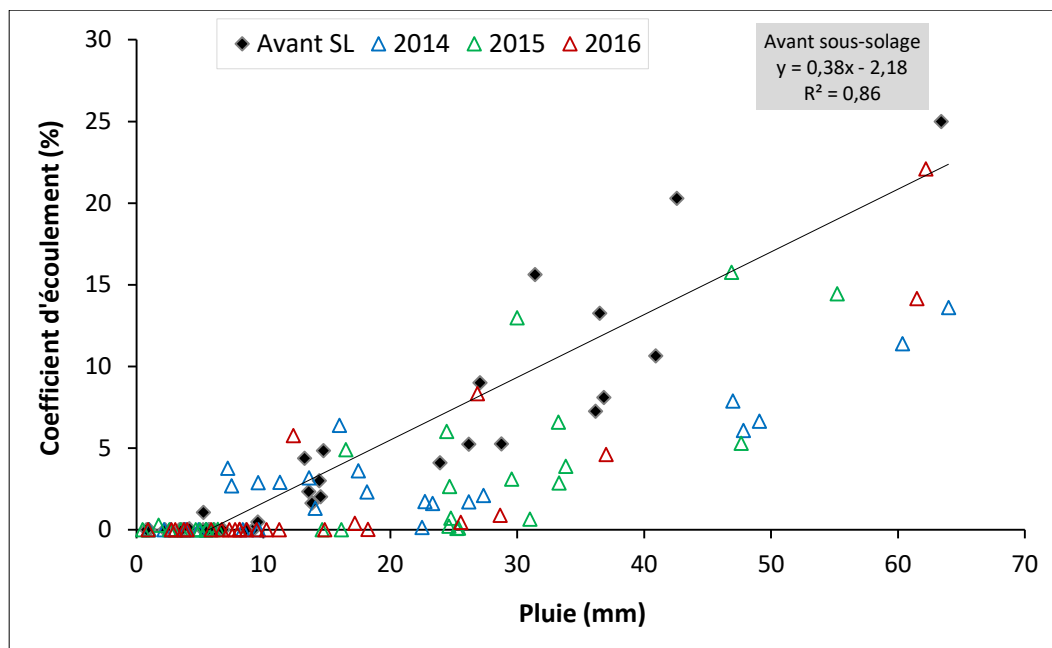


Figure 6.11. Comparaison des relations pluie-lame écoulee avant (noir) et après (bleu, vert et rouge) sous-solage du sol du bassin versant TK amont Sud. SL signifie sous-solage.

Dans les deux cas (avant et après aménagement), les corrélations entre les grandeurs mesurées sont néanmoins significatives. La droite en noir (Figure 6.11) indique de façon résumée l'importance des ruissellements avant le traitement du bassin tandis que les nuages de points en bleu, vert et rouge traduisent le comportement événementiel du bassin mais pour un pourcentage aménagé variable. Le Tableau 6.2 présente le récapitulatif des relations pluie-lame écoulee au cours des deux périodes de suivi. Il met en évidence qu'après aménagement la pluie n'explique que 55 à 76 % de la variance des écoulements.

Tableau 6.2. Récapitulatif des relations pluie-lame écoulee avant (2013) et après (2014-2016) aménagement par sous-solage du sol sur TK amont Sud.

Périodes de mesures	Relation pluie-lame écoulee (mm)	Coefficient de détermination (R^2)	Nombre total d'événements
2013 (avant)	Le = 0,39 P-2,24	0,86	32
2014 (après)	Le = 0,17 P-0,41	0,75	28
2015 (après)	Le = 0,22 P-1,54	0,55	30
2016 (après)	Le = 0,28 P-2,28	0,76	28

6.8.2. Comparaison des hydrogrammes avant et après sous-solage

Pour mieux illustrer l'effet du sous-solage, nous avons mené une étude comparative de deux hydrogrammes mesurés avant et après sous-solage. Ils sont générés par des pluies ayant des caractéristiques comparables. L'analyse consiste à relever leurs points communs et marquer leurs différences. Le constat est qu'une modification importante du débit est ainsi observée. En effet, la forme et les caractéristiques des hydrogrammes des crues événementielles ont subi de changement très significatif. L'hydrogramme événementiel passe d'une forme très aigüe (Figure 6.12) à la forme plus étalée (Figure 6.13). Cela traduit la diminution de débit maximum, d'un facteur presque deux, qui s'accompagne d'une augmentation du temps de base t_b (appelé aussi durée du ruissellement direct) et d'une diminution du volume ruisselé. Bien que l'intensité (Intensité max = 140 mm/h) et la hauteur de la pluie du 14 août 2016 (observée après sous-solage) soient supérieures à celles d'une autre pluie similaire tombée le 10 août 2013 (observée avant), le débit généré est nettement plus faible par rapport à celui de la dernière pluie observée avant sous-solage. Le sous-solage a de ce fait joué un rôle important sur l'écrtage des débits max des crues événementielles.

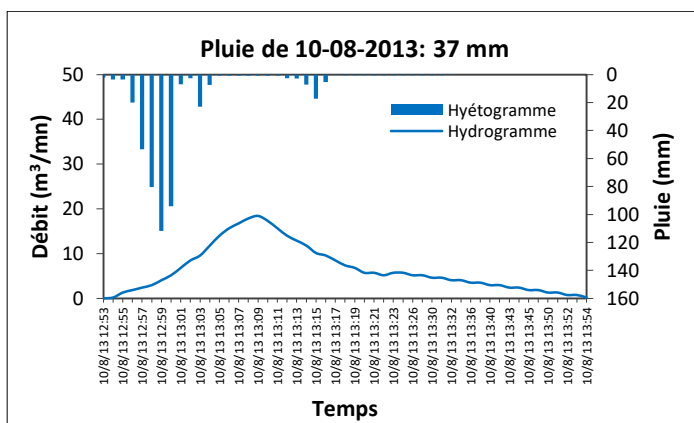


Figure 6.12. Réponse hydrologique initiale (sans sous-solage) du bassin TK amont Sud.

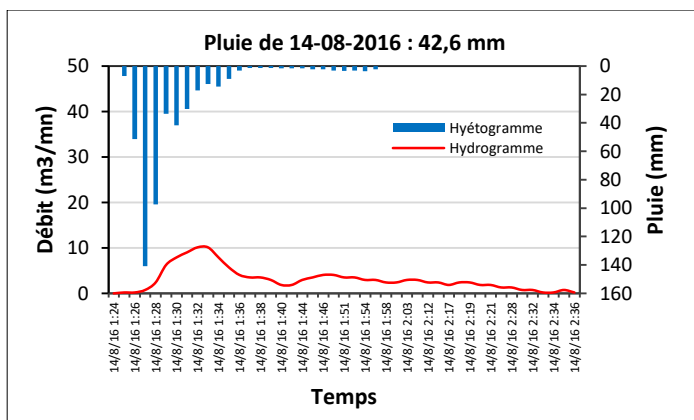


Figure 6.13. Réponse hydrologique après sous-solage du bassin TK amont Sud pour 25 % de sa surface.

6.8.3. Evolution de la surface aménagée et du coefficient d'écoulement

En 2013, le coefficient d'écoulement initial du bassin sans sous-solage est de 18 %. En 2014, la surface aménagée couvre ≈ 3 % de la zone contributive du bassin. Ce pourcentage aménagé a été progressivement rehaussé pour atteindre 13 % en 2015 et 25 % en 2016. Le comportement hydrologique du bassin est contrôlé par une station hydrométrique permettant de suivre l'évolution du coefficient d'écoulement en fonction de la dimension de l'aire sous-solée.

La Figure 6.14 montre l'évolution du coefficient d'écoulement et celle de la surface aménagée par sous-solage. L'examen de la figure met en évidence une variabilité interannuelle du coefficient d'écoulement pouvant être liée directement à l'aménagement. Avant le sous-solage, le fonctionnement du bassin se caractérise en effet par un coefficient d'écoulement qui, de 2013 à 2016, est passé de 18 % à 11 % de manière monotone décroissante. Malgré le doublement du pourcentage aménagé entre 2015 et 2016, le coefficient d'écoulement n'a été réduit que de 1%. Cela implique que la baisse du ruissellement est non proportionnelle à la dimension de la surface aménagée par sous-solage. Néanmoins, l'augmentation progressive de la surface aménagée a engendré une diminution sensible du coefficient d'écoulement mettant en évidence une nette différence des comportements hydrologiques du bassin entre les deux périodes. Ces résultats confirment une certaine efficacité du sous-solage en termes de gestion et de limitation des ruissellements. Le coefficient d'écoulement sortant annuel est ainsi divisé à peu près d'un facteur 1.6 avec 25 % de la surface sous-solée. Cet effet est moins spectaculaire que celui du bassin aménagé en banquettes pour lequel on avait gagné un facteur 2 (de 17 % à 8 %) avec moins de 10 % de surface aménagée. Cependant, le nombre d'années est assez réduit pour le bassin sous-solé conduisant à un échantillon statistique plus petit. On ne peut exclure que les variations de la pluviométrie annuelle aient bruité la relation. Finalement, on dispose quand même d'un indicateur intéressant du changement du régime hydrologique observé et pour une gestion efficiente des eaux de ruissellement à l'échelle du bassin versant.

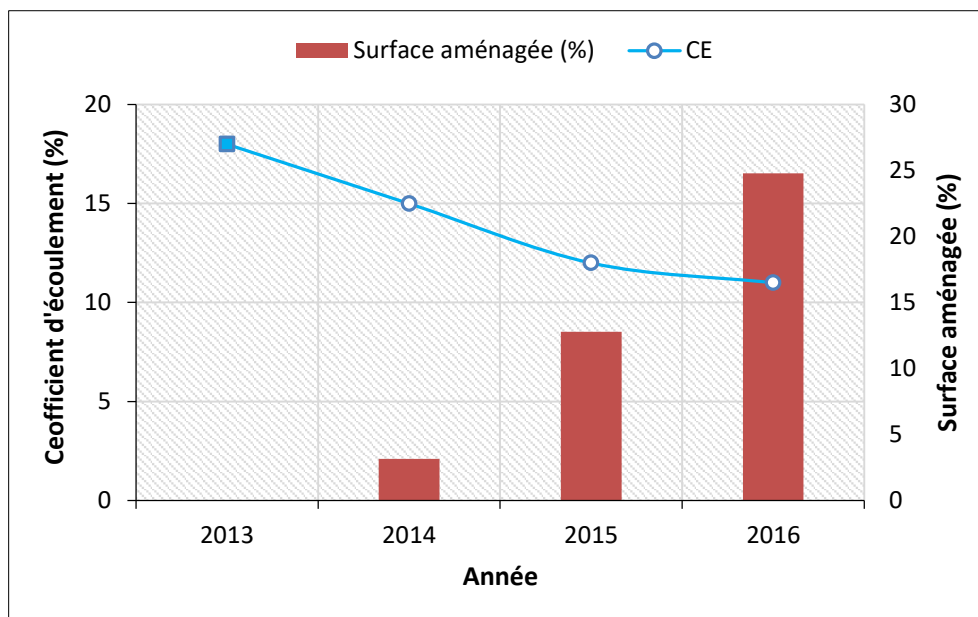


Figure 6.14. Evolutions concomitantes du coefficient d'écoulement et de la surface aménagée (sous-solage) sur le sous bassin TK amont Sud.

L'année 2013 indique le comportement hydrologique initial (sans aménagement) du bassin.

6.8.4. Analyse des corrélations entre les grandeurs mesurées

6.8.4.1. Relation entre proportion aménagée-coefficient d'écoulement

Pour déterminer la relation entre le coefficient d'écoulement et les variables telles que la surface aménagée et le cumul pluviométrique annuel, nous avons appliqué la méthode de régression linéaire multiple. Dans la Figure 6.15, nous présentons la tendance de ces variables et leur niveau de corrélation. Une relation forte est obtenue avec un coefficient de détermination R^2 de 0,87. Ce résultat montre que le rehaussement de la surface sous-solée entraîne la diminution du coefficient d'écoulement annuel puisque le pourcentage aménagé explique à 87 % l'évolution de ce coefficient d'écoulement sortant annuellement. Avec un sous-solage de 13 % du bassin TK amont Sud, le coefficient est passé de 18 % à 12 %, soit une diminution de 6 %. A 25 % de la surface aménagée, le coefficient d'écoulement a diminué pour atteindre 11%.

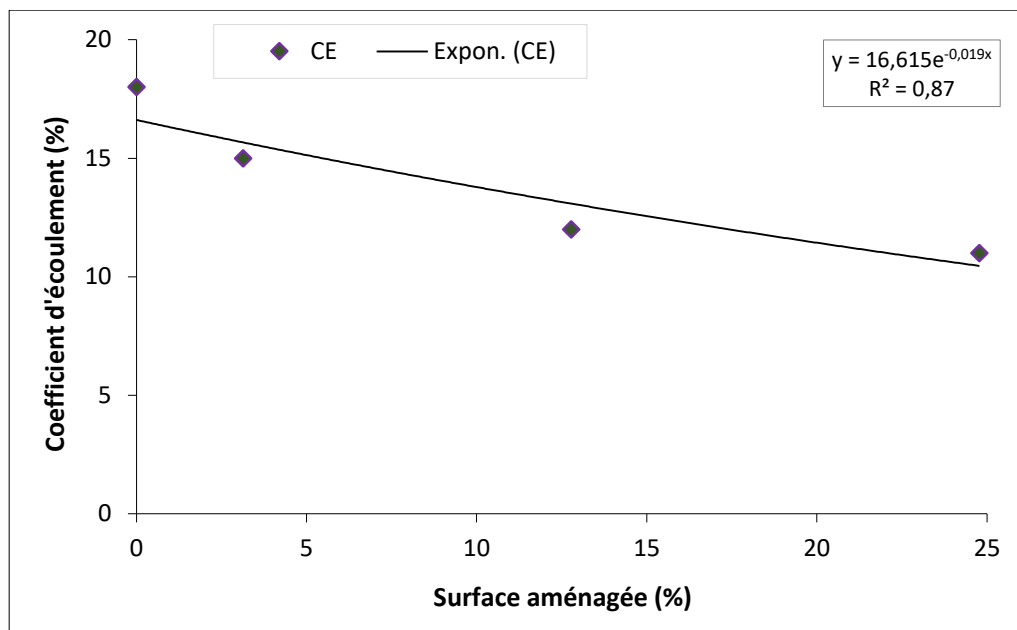


Figure 6.15. Relation ajustée de l'évolution du coefficient d'écoulement en fonction de la proportion aménagée sur le bassin TK amont Sud.

Notons que la valeur du coefficient d'écoulement correspondant à 0 % (sur l'axe) de la surface aménagée représente le CE de la situation initiale sans sous-solage (en 2013) du bassin.

La relation observée peut être modélisée par une exponentielle décroissante basée toutefois sur seulement quatre points. En l'état, l'étude constitue néanmoins un outil d'aide aux décideurs intervenant dans la gestion intégrée des ressources en eau et en sol à l'échelle du bassin versant.

6.8.4.2. Relation entre pluie annuelle et coefficient d'écoulement

La Figure 6.16 montre que la baisse du coefficient d'écoulement après le sous-solage n'est pas liée au cumul pluviométrique annuel. La relation est faible et le coefficient de corrélation est en deux blocs (c'est-à-dire sous forme haltère).

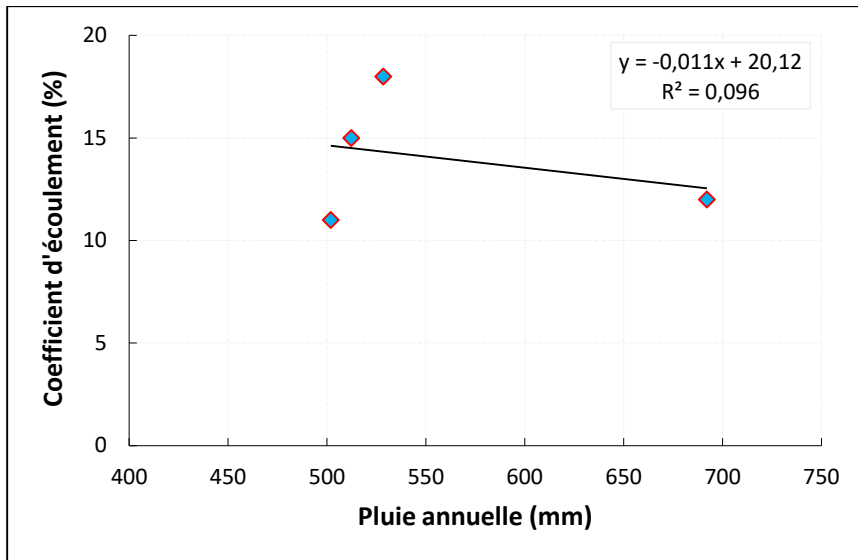


Figure 6.16. Relation pluie-coefficient d'écoulement sur le sous bassin versant TK amont Sud. Le coefficient d'écoulement (CE) obtenu avant sous-solage a été pris en compte dans l'établissement de cette relation.

Une relation liant les résidus calculés par l'équation de la droite ajustée (Figure 6.15) avec la pluie a été ensuite établie (Figure 6.17). Celle-ci est effectuée sur un échantillon réduit de 4 observations seulement réparties entre les périodes avant et après sous-solage. L'examen de la relation pluie-résidus a permis de constater une faible corrélation avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,38$. Elle met en exergue une légère influence de la pluie sur les résidus des coefficients d'écoulement calculés sur la période après sous-solage comme l'indique la figure ci-dessous.

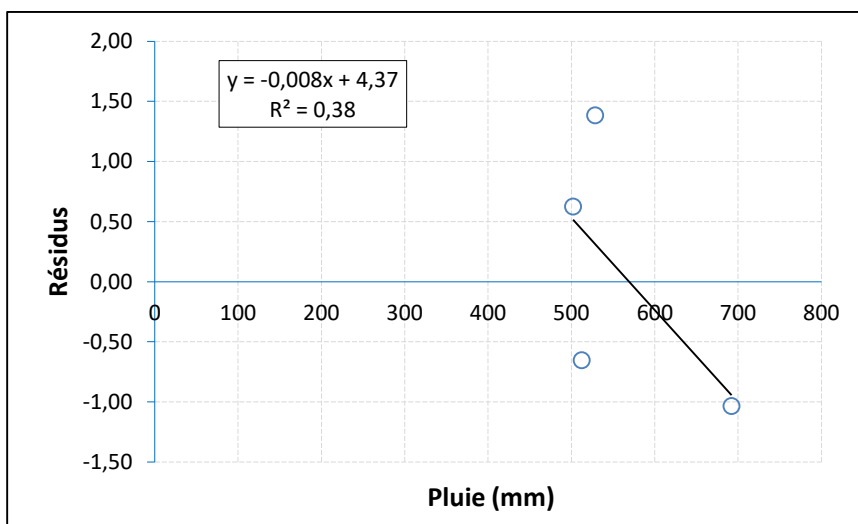


Figure 6.17. Relation pluie et résidus calculés à partir de l'équation ajustée.

6.8.5. Existe-t-il une surface optimale de l'efficacité du sous-solage ?

Au vu du nombre réduit d'observation, il paraît difficile de trancher sur une surface aménagée que l'on peut considérer comme optimale. Néanmoins, l'étude montre que le dispositif expérimental mis en œuvre sur ce sous bassin versant a permis d'évaluer quantitativement la plus-value apportée par le système d'aménagement par sous-solage sur la limitation des ruissellements et les inondations des unités géodynamiques en aval. Il a suffi de sous-soler 25 % du sous bassin versant TK amont Sud pour réduire le ruissellement d'un facteur 1.6 environ. Eu égard à la baisse significative du coefficient d'écoulement dès que le pourcentage aménagé atteint 13 % puis une baisse plus faible entre 13 et 25 %, nous pourrions donc considérer cette proportion de 15 % environ comme optimale. Néanmoins, le nombre de valeurs est trop petit pour conclure avec fermeté.

6.9. Comparaison du fonctionnement hydrologique des bassins versants aménagés

Dans ce paragraphe, nous comparons les impacts hydrologiques des différentes techniques d'aménagement étudiées (banquettes et sous-solage). L'analyse comparative de l'efficacité de celles-ci porte sur l'évolution du coefficient d'écoulement avant le traitement des bassins.

➤ Comparaison des bassins versants avant aménagement

Au regard des résultats obtenus, le comportement hydrologique initial des bassins apparaît quasiment identique. Avant aménagement, le coefficient d'écoulement moyen est de 17 % sur le sous bassin TK amont Nord et 18 % sur TK amont Sud (Figure 6.18). Cette similitude n'est pas surprenante du fait de leur contiguïté, leurs caractéristiques physiques et géomorphologiques et leur occupation des sols très semblables. Cet état plus ruisselant des bassins peut s'expliquer par le développement des zones de plus en plus encroûtées. En plus, le coefficient d'écoulement est d'autant plus grand quand le cumul annuel des pluies est important.

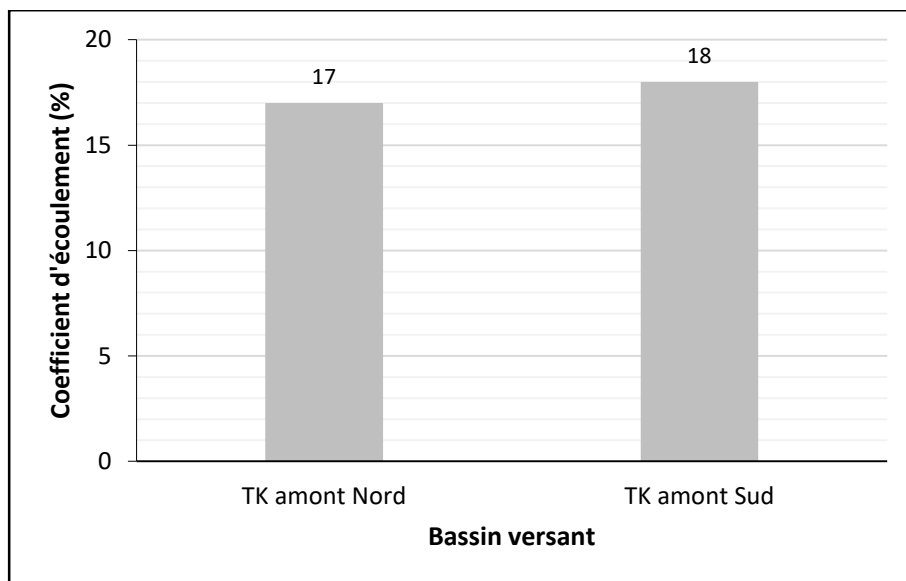


Figure 6.18. Comparaison des coefficients d'écoulement mesurés durant la période sans aménagements des bassins versants.

Pour TK amont Nord, le coefficient d'écoulement moyen s'obtient en faisant la moyenne sur la période 2004-2008 "avant aménagement". Pour TK amont Sud, il s'agit de la seule année 2013.

➤ Comparaison des comportements hydrologiques des bassins après aménagement

Au cours de la période après aménagement, on constate une nette différence dans les comportements hydrologiques des bassins. L'analyse comparée du fonctionnement du bassin aménagé en banquettes et du bassin sous-solé (Figure 6.19) suggère qu'à une surface aménagée égale (3 % sur chacun des bassins par exemple), la réduction de l'écoulement annuel est plus importante sur le bassin TK amont Nord que sur le bassin TK amont Sud. Avec moins de 10 % et 25 % de la surface aménagée sur les bassins Nord et Sud, respectivement, les coefficients d'écoulement ont diminué d'environ 8 points de pourcentage. Ces résultats mettent en évidence la différence d'impact hydrologique entre ces deux techniques appliquées à l'échelle du bassin versant. Bien que la surface aménagée en banquettes soit peu importante sur TK amont Nord, l'impact sur la limitation des ruissellements est plus significatif que celui observé sur le bassin traité par sous-solage. Pourtant, nos résultats du chapitre précédent montrent que le sous-solage stocke plus d'eau que la banquette. Ce paradoxe peut trouver son explication de deux manières : 1) l'eau évaporée, nettement plus importante pour les banquettes, quitte le bassin sans être non plus stockée en profondeur ; 2) les interactions, probablement complexes, entre les aménagements voisins (banquettes) n'ont pas été considérés dans notre étude et pourraient faire l'objet d'un prochain travail de recherche.

En somme, on constate pour l'essentiel qu'à l'échelle événementielle les relations pluie-lame écoulée sont bien distinctes entre les deux bassins versants en fonction du type d'aménagement. Dans les deux cas, les écoulements ont été nettement réduits. Localement, le sous-solage améliore mieux la capacité d'infiltration de l'eau que les banquettes mais son effet sur le débit du bassin est moindre. Les quelques éléments d'explication s'interprètent par le fait que les banquettes en stockant l'eau superficiellement pendant deux à trois jours après la pluie peuvent certainement perdre une bonne partie par évaporation. En plus, par manque du travail du sol de l'impluvium, la capacité d'absorption apparaît limitée par l'encroûtement superficiel du sol. Ce qui peut avoir de l'influence sur le drainage profond. Par contre, le sous-solage modifie profondément les conditions hydriques internes (et même superficielles) des sols auparavant encroûtés. Ceci améliore largement leur capacité d'infiltration.

A l'échelle annuelle, l'impact hydrologique des banquettes est plus prononcé que celui du sous-solage. Et cette différence observée persiste tout au long de la période de mesures après aménagements. Les banquettes en diminuant les flux de ruissellement sur le plateau provoquent un changement du fonctionnement hydrologique du bassin versant dans son intégralité.

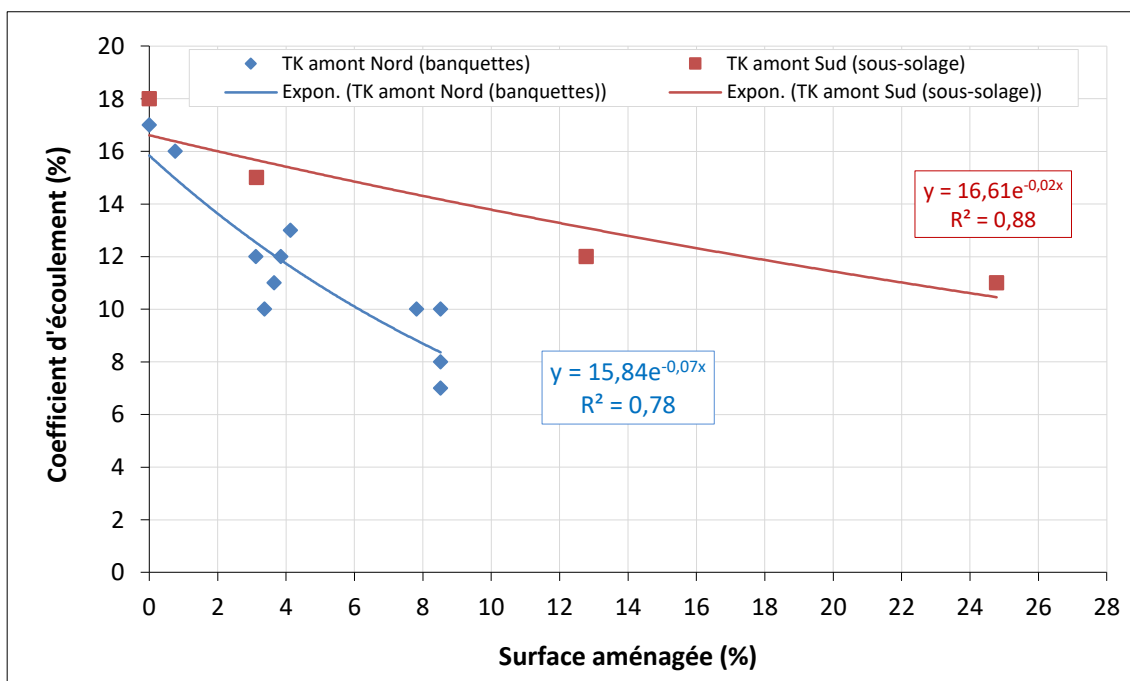


Figure 6.19. Analyse comparée des coefficients d'écoulement des bassins versants aménagés selon la surface aménagée. Valeurs mesurées (points) et ajustements par exponentielle (courbes).

Cette figure permet de comparer les comportements hydrologiques des bassins à des proportions aménagées à peu près égales. Même avec une surface aménagée comprise entre 12 et 25 % du bassin, le sous-solage a eu un impact nettement plus faible que les banquettes ayant significativement réduit l'écoulement avec une surface aménagée deux fois plus faible. Il est à noter que l'évaporation fait aussi baisser indirectement le coefficient d'écoulement du bassin aménagé par des banquettes.

Finally, grâce à leur grande capacité de rétention et/ou d'infiltration des eaux de ruissellement, les banquettes et le sous-solage se sont avérés efficaces pour remplir la fonction de lutte contre les conséquences indésirables de l'augmentation du ruissellement et des inondations pluviales. Localement le rôle des banquettes apparaît moindre que celui du sous-solage, mais on leur reconnaît à l'échelle du bassin versant une efficacité incontestablement remarquable. Le même constat a été fait par Hamza et Mamou (1995) sur des bassins versants aménagés en CES du Centre et du Sud-ouest de la Tunisie.

Conclusion partielle

Le dispositif mis en place a permis d'évaluer l'efficacité des banquettes et du sous-solage vis-à-vis du comportement hydrologique des bassins versants. L'analyse des résultats fait ressortir que ces techniques d'aménagement ont démontré leur efficacité en réduisant les lames écoulées événementielles (Figures 6.4 et 6.11) et, par conséquent, le coefficient d'écoulement annuel (Figures 6.6 et 6.14). Mais bien qu'ils soient soumis aux mêmes conditions pluviométriques, les bassins versants ne se comportent pas de manière identique au cours de la période après aménagement. Cette différence en termes d'impact hydrologique est observée tant à l'échelle de l'événement pluvieux qu'à l'échelle de l'écoulement sortant annuellement et peut s'expliquer par la structure différente des aménagements. En effet, le remaniement du sol (ou sous-solage) engendre une importante modification de la structure du sol en surface et en profondeur, ce qui a créé des conditions favorables à l'infiltration et au stockage d'eau dans le sol. Les banquettes, par contre, retiennent plus d'eau en surface, ce qui leur permet d'être plus efficace à l'échelle du bassin versant que le sous-solage mais font perdre des volumes sans doute importants par évaporation.

Chapitre 7. Synthèse et discussion des principaux résultats de l'étude

Ce présent chapitre propose une discussion des principaux résultats obtenus à travers les mesures effectuées aux échelles ponctuelle, parcellaire et du bassin versant pour mieux renforcer la compréhension de l'efficacité des techniques de conservation de l'eau et du sol. Les résultats issus des approches méthodologiques mises en application sur diverses échelles spatiales (ponctuelle, parcellaire et bassin versant) sont discutés successivement par type d'aménagement.

7.1. Discussion des résultats obtenus à l'échelle ponctuelle

A cette échelle, l'étude de la dynamique des profils d'humidité, de la teneur en eau volumique et du stock hydrique, variables déterminées indirectement après étalonnage de la sonde à neutrons, confirme le rôle des aménagements (banquettes et sous-solage) en termes d'infiltration et d'amélioration de comportement hydrique des sols dégradés. L'analyse des principaux résultats acquis pendant deux saisons des mesures 2016 et 2017 (cf. chapitre 4) a permis de faire ressortir les constats présentés en fonction des parcelles aménagées étudiées. Il est par ailleurs important d'examiner en premier lieu le comportement hydrologique du sol nu de la brousse tigrée avant d'aborder les surfaces aménagées.

7.1.1. Sur la parcelle témoin

La teneur en eau en surface reste faible tout le long de la saison pluvieuse. Elle varie de **0,05 à 0,17 cm³/cm³** ($\pm 0,03$ cm³/cm³) en surface (10 cm de profondeur). La valeur maximale de teneur en eau θ (0,20 cm³/cm³) s'observe à 20 cm de profondeur au milieu de la saison en août.

Le stock hydrique suivi pendant deux saisons des mesures neutroniques est faible et reste localisé dans les **50 à 60 premiers cm du sol** comme l'ont déjà démontré plusieurs études antérieures (Peugeot, 1995 ; Seghieri et al., 1996 ; Galle et al., 1997). Au-delà de cette profondeur, la teneur en eau volumique reste quasiment constante. Cela peut s'expliquer par l'encroûtement superficiel qui, en créant une barrière hydraulique, gouverne le régime d'infiltration et impose une condition non saturante dans l'horizon sous-jacent (Vandervaere et al., 1994 ; Perez et al., 1999). Ces auteurs ont aussi estimé de manière expérimentale que, pour ce type de sols ferrugineux, la résistance hydraulique d'une croûte structurale à une valeur de 9 h. L'analyse des variations du contenu en eau du sol en fonction de la pluie montre que plus de la moitié de la pluie événementielle ruisselle sur la zone nue, ce qui explique en partie

l'augmentation de la production et l'accélération du ruissellement dès que la pente devient forte. Dans le même contexte, Vandervaere et al. (1994) rapportent, en outre, que la brousse tigrée qui recouvre les plateaux latéritiques est caractérisée par un sol sablo-limoneux-argileux, peu perméable, conduisant à un ruissellement important renforcé par un fort encroûtement de surface.

Enfin, **les variations de stock d'eau**, d'amplitude maximale limitée à 50-60 mm environ, **sont aussi faibles**.

En somme, concernant le comportement hydrique du sol nu (témoin) de plateau à brousse tigrée, les résultats des mesures d'humidité ont montré que, sans aménagement, ce type de sol est caractérisé par une faible capacité d'infiltration favorisant ainsi le ruissellement. L'observation des profils de teneur en eau mesurés en 2016 et 2017, bien continus, ne fait pas apparaître de valeurs aberrantes par rapport à ce qui a été rapporté dans la littérature déjà existante. Les espaces dénudés de plateau se caractérisent néanmoins par une distribution des croûtes stables dans le temps qui limite l'infiltration et induit une forte aptitude au ruissellement qui y représente, au pas de temps annuel, plus de la moitié de la pluie (Peugeot, 1995).

7.1.2. Sur les surfaces aménagées en banquettes

Il est important de rappeler qu'après plus de huit ans de suivi (de 2009 à 2017), les banquettes sont encore dans un état de fonctionnement satisfaisant. Nonobstant quelques disfonctionnements provoqués par les pluies de forte intensité et le piétinement des animaux, les banquettes jouent un rôle remarquable dans la collecte et la rétention d'eau du ruissellement. Le suivi des banquettes par prise des vues permet de constater la bonne capacité de celles-ci à stocker l'eau en surface. Elles peuvent permettre **de doubler, voire tripler la lame d'eau en détection superficielle** pouvant durer d'un à trois jours après l'événement pluvieux selon les dimensions, la position topographique des banquettes et le volume précipité.

Ces résultats qualitatifs illustrant le bon fonctionnement des banquettes si elles sont bien et régulièrement entretenues lors des événements pluvieux corroborent ceux obtenus en Tunisie par Nasri et al. (2004) et Al Ali (2007) ayant évalué la capacité de stockage en eau des banquettes à rétention totale (beaucoup plus grandes que les banquettes étudiées dans ce travail) à hauteur de 50 à 80 % des apports collinaires. Ils ont ensuite démontré que lorsque les banquettes sont à rétention totale et que l'on n'assiste pas à des débordements ou à des ruptures de digues (ou bourrelet pour le cas de nos banquettes), le transfert d'eau et de sédiments reste limiter aux espaces inter-banquettes.

En termes de **gain sur la teneur en eau volumique en surface et l'infiltration**, l'examen des résultats obtenus sur les banquettes met en évidence les constats suivants :

- les variations de teneur en eau volumique (aussi bien en amont qu'en aval des banquettes) sont plus importantes en surface qu'en profondeur ;
- les fossés des banquettes enregistrent des valeurs de teneur en eau les plus élevées (plus de $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) en comparaison avec l'impluvium (où θ maximale = $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) et l'aval ;
- le front d'infiltration est remarquablement plus profond en amont qu'en aval des banquettes et en comparaison avec le témoin.

En effet, sous le fossé des banquettes, **l'infiltration peut représenter plus de quatre fois l'infiltration sur le sol nu**. Ce front d'infiltration qui peut, dans certaines conditions, atteindre 190 cm sous les fossés des banquettes est comparable à celui observé par Peugeot (1995) sur le front pionnier (partie amont de la zone boisée) de la brousse tigrée.

Ces résultats montrent que **l'amélioration de la capacité d'infiltration** diffère à l'échelle des compartiments (amont et aval) des banquettes. En effet, les fossés constituent de lieux d'accumulation des sédiments charriés par le ruissellement pendant la saison des pluies et dans une moindre mesure transportés par le vent en saison sèche. Cela conduit à la formation de dépôts sableux favorables à l'infiltration de l'eau. Lors d'une pluie, l'eau en s'accumulant en amont s'infiltrer efficacement comme en témoigne le front d'infiltration pouvant descendre jusqu'à 130 cm dans l'impluvium (profils hydriques du tube T1 de toutes les banquettes) et à plus de 150 cm dans le fossé (profils hydriques du tube T2). Al Ali (2007) a, par ailleurs, relevé le même constat mais sur des banquettes à rétention totale en Tunisie.

Bien qu'elles soient exposées aux risques de comblement, de débordement et de rupture sous l'action des eaux de ruissellement lors des fortes pluies, les banquettes permettent de diminuer nettement le ruissellement en faveur de l'infiltration. Une étude effectuée par Soumana et al. (2011) sur une brousse tachetée dégradée du Sud-Ouest du Niger confirme l'effet améliorant de l'humidité du sol avec 7 % de gain et des conditions écologiques par les ouvrages antiérosifs de type tranchées sylvopastorales. Aussi, en captant le ruissellement, les banquettes permettent de favoriser l'infiltration et d'augmenter la disponibilité des terres pour les productions agro-sylvo-pastorales sur les plateaux et les glacis (Moustapha, 2010).

A **l'échelle locale** toujours et pour un événement pluvieux donné, la quantité d'eau stockée est environ deux à trois fois plus élevée dans les banquettes que sur le site témoin. De plus, **la lame d'eau infiltrée peut dépasser la lame précipitée en raison des eaux arrivant par l'amont**.

On peut donc dire que, grâce aux banquettes, la **disponibilité d'eau dans le sol a significativement augmenté**. Il en résulte une modification positive des propriétés hydrodynamiques des sols pouvant donc conduire à la restauration progressive de leur fonctionnement hydrique.

Enfin, l'interprétation des différents résultats permet donc de mettre en évidence l'efficacité de la technique d'aménagement en banquettes à l'échelle ponctuelle. Ce type d'aménagement joue un rôle primordial en stockant localement dans le sol toujours plus de la moitié de ce qui est précipité, le reste de l'eau étant ruisselé par débordement de l'ouvrage ou évaporé, surtout pendant les périodes de fortes demandes évaporatoires. La durée plus longue de stockage en surface dans le fossé de la banquette lorsque le sol est saturé permet la reprise d'eau importante par évaporation. Ce résultat montre l'utilité d'infiltrer l'eau rapidement dans le sol afin de limiter les pertes évaporatoires et satisfaire les besoins en eau des plants comme l'a démontré Zouré (2019) à travers une étude expérimentale des techniques de Zai et de la demi-lune. Pour faire face à la variabilité du changement climatique, l'auteur a par ailleurs montré sur le long terme l'efficacité du Zai et de la demi-lune à atténuer les effets négatifs des poches sèches.

7.1.3. Sur les parcelles de sous-solage

Les résultats qualitatifs montrent l'efficacité de cette technique vis-à-vis du partage de la pluie entre ruissellement-infiltration. En effet, le sous-solage, en retardant la production de ruissellement, favorise fortement l'infiltration. Cet effet bénéfique et régulateur du ruissellement est plus important au début qu'en fin de la saison. Les mesures d'humidité effectuées à 0-5 cm de profondeur (obtenue par la sonde capacitive itinérante, Delta T SM200) montrent que les conditions d'humidité du sol en surface ont significativement augmenté, d'un facteur deux environ. Mais cet effet diminue progressivement avec le temps. Desconnets et al. (1991) et Malam Abdou (2016) ont abouti à des résultats similaires sur les sols sableux cultivés dans l'Ouest du pays. Ils ont démontré qu'à partir d'un cumul pluviométrique de 80 mm environ, l'effet bénéfique du sarclage sur l'infiltration est annihilé.

De plus, le suivi quotidien (avant et après chaque pluie) de l'humidité du sol à l'aide de la sonde à neutrons nous a permis de caractériser finement l'évolution du comportement hydrologique des surfaces aménagées par sous-solage. Les principaux résultats sont organisés comme suit :

❖ Impact du sous-solage sur l'évolution de la teneur en eau volumique et l'infiltration

Les variations de teneur en eau volumique sont plus importantes en surface qu'en profondeur, ce qui se traduit par un stockage d'eau important dans la partie sous-solée correspondant à la tranche de sol ameublie de 0 à 40 cm de profondeur. L'analyse de l'ensemble des profils hydriques met en évidence une variation plus importante de teneur en eau volumique jusqu'à une profondeur de 30 cm ($0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en moyenne). Au milieu de la saison, la teneur en eau continue de croître considérablement en surface mais aussi en profondeur (50-60 cm). A 60-70 cm de profondeur, une diminution de teneur en eau s'observe avant de se stabiliser ($0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) autour de 100 cm et plus selon le tube de mesure. L'analyse des valeurs mensuelles conduit à la caractérisation des différents états hydriques des sols aménagés du début (état sec du sol en mai-juin) à la fin de la saison pluvieuse (en octobre).

L'étude comparative de la 1^{ère} année (2016) et de la 2^{ème} année (2017) de sous-solage fait ressortir une différence (en baisse) de teneur en eau volumique ($0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) traduisant la diminution de l'efficacité du sous-solage au cours du temps et en fonction du cumul pluviométrique reçu par le sol.

Un autre constat frappant est le front d'infiltration qui a connu un accroissement remarquable. Celui-ci a plus que triplé en comparaison avec le témoin. En effet, sur certains tubes de mesure d'humidité, l'infiltration s'observe au-delà même de la profondeur maximale de mesure, 190 cm. Ceci se traduit donc par un accroissement considérable du stock hydrique dans le premier mètre du sol. Ce degré d'impact du sous-solage est très significatif à tel point que le sol absorbe la quasi-totalité des deux premières pluies qui suivent la réalisation de l'aménagement. Cela constitue une plus-value considérable apportée par cette technique en termes de rétention d'eau. Notons enfin que ces résultats bien cohérents entre les années de suivi traduisent clairement l'efficacité de la technique du sous-solage à l'échelle locale.

❖ Impact du sous-solage sur l'évolution du stock hydrique ponctuel

La comparaison du comportement hydrique des tubes d'une même parcelle et d'une parcelle à l'autre a permis de caractériser au mieux les propriétés hydrodynamiques communes des sols profondément remaniés avec un bénéfice très marqué, environ 100 mm, par rapport au témoin. L'étude de l'évolution du stock moyen des deux saisons des mesures pour les parcelles de sous-solage montre une différence significative et les constats suivants se dégagent :

- les valeurs, de 310 à 360 mm en 2016, ne sont plus que de 240 à 330 mm en 2017. Cela reste cependant un net bénéfice par rapport au témoin (150 à 240 mm) et par rapport aux banquettes (217 à 292 mm en moyenne) ;

- la forte fluctuation du stock hydrique d'une date de mesure à l'autre. Celle-ci est bien entendu fonction des événements pluvieux ;
- la tendance à l'augmentation progressive de l'amplitude des variations de stock événementiel : pour la saison 2017 (elle est de 90 mm au lieu de 50 mm en 2016).

Par ailleurs, les calculs des paramètres statistiques (incertitudes et écart-types débiaisés) indiquent que la variabilité spatiale de la teneur en eau est faible (± 6 mm pour SL2 et ± 12 mm pour SL1) au sein d'une même surface aménagée par sous-solage. Ceci constitue un bon indicateur en termes de perspective d'étude sur des surfaces plus larges.

❖ Impact sur les variations du stock (ΔS)

La comparaison des variations du stock hydrique (ΔS) dans la couche 0-135 cm au cours de chaque averse avec la lame précipitée montre que pour certaines pluies inférieures à 20 mm, les lames d'eau infiltrées peuvent être supérieures aux hauteurs des pluies tombées, ce qui implique l'existence d'apports supplémentaires par l'eau de ruissellement venant de l'amont. Au contraire, pour les fortes pluies supérieures à 40 mm, l'infiltration est inférieure à la pluie, ce qui montre que les pertes par l'aval sont supérieures aux apports par l'amont hors de la parcelle. Par rapport au témoin, le gain est remarquable et ce, pour toutes les pluies (Figure 4.37). Ces résultats obtenus à l'échelle locale (ou ponctuelle) ont permis d'atteindre le premier objectif spécifique de l'étude.

7.2. Discussion des principaux résultats obtenus à l'échelle de la parcelle

7.2.1. Apport de la CEa pour l'étude d'impact hydrologique des aménagements

La méthode de mesure de la conductivité électrique par EM38 utilisée dans ce travail de thèse vise à quantifier et cartographier finement l'impact hydrologique des actions d'aménagement à l'échelle parcellaire. Pour cela, un protocole expérimental de collecte des données a été mis en place de 2016 à 2017 sur le site d'étude afin d'atteindre cet objectif. La méthode de traitement et d'analyse spatiale de ces données (chapitre 3, sous-titre 3.4) a permis d'élaborer des cartes des écarts et des rapports de conductivité électrique apparente (chapitre 5, § 5.1.3). Leur interprétation montre, de manière générale, que la gamme des valeurs de conductivité électrique varie en moyenne entre 1 et 10 mS/m⁻¹ au cours de la saison des pluies. On a enregistré sur certains points des parcelles aménagées, des valeurs de conductivité électrique apparente dépassant 30 mS/m⁻¹. Toutefois, on remarque une forte variation de conductivité d'un point de mesure à un autre en fonction de l'état d'humidité du sol des zones étudiées. En outre, un écart

assez bien prononcé est observé entre les grandeurs mesurées au début (en mai) et au milieu (en août) de la saison, conformément aux attentes et à ce qui a été rapporté par d'autres études (Descloîtres et al., 2001 ; Wubda, 2017).

L'approche d'analyse basée sur la spatialisation des écarts et des rapports de conductivité apparente permet de décrire la structuration spatiale des conductivités électriques apparentes mesurées dans chaque parcelle. L'analyse des cartes obtenues permet de faire ressortir i) des variations de conductivité électrique apparente assez fortes dans les aménagements par rapport au témoin ; ii) la présence des zones dynamiques (plus ou moins conductrices) et iii) des zones stables en termes de conductivité électrique.

En somme, les écarts de conductivité apparente (exprimés en mS/m) sont systématiquement plus faibles sur le témoin par rapport aux surfaces aménagées en banquettes ou en sous-solage. Les cartes des rapports, quant à elles, décrivent la réponse de l'appareil EM38 utilisé sur les parcelles aménagées et leur évolution en fonction de la pluie et ce, par rapport à un état initial mesuré avant chaque pluie. Leur analyse laisse constater une augmentation de la conductivité électrique des surfaces aménagées qui passent d'un état plus sec au début de la saison à un état fortement humide pendant les mois de juillet et août. Ceci est dû au rapprochement des épisodes pluvieux durant cette période. Sur toutes les cartes, les valeurs des rapports calculés varient en moyenne entre 1 et 5 (rarement inférieurs à 1). Elles permettent de distinguer deux types de zones bien distinctes : les zones d'augmentation et de stabilité de la conductivité électrique.

Notons qu'à ce niveau d'interprétation, ces résultats ne permettent pas d'estimer directement la teneur en eau ni le stock à l'échelle parcellaire. Ainsi, pour pouvoir transformer la conductivité apparente en stock, nous avons procédé à l'étalonnage de l'appareil (EM38) en utilisant une approche métrologique appliquée à l'échelle locale (chapitre 3, § 3.4.3.5.1). Le principe des plus proches voisins possibles est utilisé (§ 3.4.3.5.2) pour établir le lien de corrélation entre les variables telles que CEav et stock (S). Les résultats des régressions linéaires effectuées sur un échantillon important de nombre des couples des variables attestent l'existence des relations statistiques nettes avec des coefficients de détermination significativement élevés (Tableaux 5.4, 5.7 et 5.10) et une bonne linéarité (Figures 5.8, 5.9 et 5.10). Il existe de ce fait une relation précieuse entre le stock et la conductivité électrique apparente. Celle-ci explique 80 % en moyenne de la variance du contenu en eau du sol aménagé par banquettes et par sous-solage du sol. Finalement, les résultats des droites d'étalonnage moyennes obtenues (Tableaux 5.6, 5.9, et 5.12) offrent la possibilité de spatialiser (par krigeage) les variations temporelle et spatiale d'humidité des sols aménagés et offrent suffisamment de précision pour permettre une bonne

estimation du stock à l'échelle de la parcelle (deuxième objectif de ce travail). Dans ce cas, la méthode EM38 couplée aux mesures de l'humidité neutronique apporte un gain complémentaire intéressant pour évaluer quantitativement l'efficacité des différents aménagements. Grâce au grand nombre de points de mesure, les estimations calculées sont d'une grande précision, ce qui autorise des comparaisons fiables entre parcelles ou entre dates des mesures.

Le lien existant entre les variables déterminées a été par ailleurs démontré par d'autres études expérimentales (Job et al., 1992 ; Job et al., 1995 ; Montoroi et al., 1997 ; Montoroi, 1997 ; Michot et al., 2001 ; King et al., 2003 ; Beck, 2008 ; Travelletti et al., 2012 ; Heil et Schmidhalter, 2017) menées dans le but de suivre par cartographie la teneur en eau et/ou la salinité des sols. Reedy et Scanlon (2003) ont, en outre, rapporté que l'application de cette méthode d'induction électromagnétique (EM38) permet d'obtenir de bons résultats de l'hétérogénéité du sol. Ils concluent que l'induction EM38 peut être utilisée pour surveiller la variabilité spatiale et temporelle de la teneur en eau sur des grandes surfaces.

7.2.2. Cartographie du stock hydrique à partir des mesures EM38

La cartographie par étalonnage direct CEav-Stock a permis de spatialiser et de visualiser la distribution des valeurs du stock hydrique sans perdre d'information potentiellement intéressante, ce qui serait le cas en utilisant les écarts ou les rapports de conductivité électrique. Une des principales remarques de cette étude cartographique par mesures électromagnétiques est qu'elle met clairement en évidence l'impact hydrologique des différents types d'aménagement sur la rétention d'eau du sol à l'échelle parcellaire. Réalisées par la méthode d'interpolation spatiale par krigeage, les cartes mettent en évidence la dynamique événementielle du stock hydrique en fonction de la pluie. Elles permettent en effet de caractériser l'hétérogénéité spatiale des sols à l'échelle intra et inter-parcellaire. Nonobstant, si des différences se dégagent entre les parcelles en termes de rétention d'eau, on note que les deux parcelles sous-solées sont beaucoup plus homogènes que les banquettes. De plus, les cartes font apparaître une différence significative des contrastes d'humidité entre les zones aménagées par rapport au témoin.

De manière générale, la méthode d'induction électromagnétique (EM38) semble être adaptée à la caractérisation de l'hétérogénéité/homogénéité des différentes parcelles comme l'ont démontré d'autres études (Michot et al., 2007 ; Yao et al., 2016 ; Busselen, 2018). Aussi, il est à constater que les lames d'eau estimées (échelle parcellaire) à partir des mesures

électromagnétiques sont comprises entre 150 et 270 mm sur le témoin, alors qu'elles dépassent 370 mm sur les deux types d'aménagement. Soulignons, par ailleurs, que cette méthode de mesure indirecte est de plus en plus utilisée pour caractériser l'humidité dans les couches superficielles du sol réagissant aux forçages climatiques (Brunet et al., 2003 ; Brunet et., 2007). On peut, en outre, notifier des pluies plus intenses capables d'engendrer des ruissellements forts, même pour les zones aménagées. Néanmoins, quelle que soit la pluie, il existe toujours un gain en variation de stock par rapport au témoin. Ainsi, des zones plus humides, avec un stock hydrique avoisinant 400 mm, s'observent sur toutes les cartes réalisées à l'échelle des banquettes (Figures 5.13, 5.14 et 5.15). Les secteurs les plus dynamiques des parcelles de sous-solage peuvent avoir des valeurs de stock hydrique dépassant 420 mm (Figures 5.16 et 5.17) alors que sur le témoin le stock dépasse rarement 260 mm (Figure 5.18).

De plus, les cartes constituent des preuves visuelles de l'impact du sous-solage et des banquettes sur l'infiltration de l'eau en modifiant les propriétés hydrauliques de surface du sol. Cependant, l'impact du sous-solage si significatif au début diminue progressivement avec le temps. On peut constater une reconstitution des croûtes due au compactage par l'énergie cinétique des gouttes des pluies et éventuellement le transport des éléments fins par le ruissellement après sous-solage. Ceci limite la durabilité de l'effet du sous-solage sur le long terme. Gasser et al. (2012) ont toutefois constaté que les effets du remaniement profond du sol peuvent persister au-delà même de trois ans après réalisation. Mais faute d'entretien, l'effet sur l'infiltration peut disparaître après quelques années, voire même dès la deuxième année, sauf dans le cas d'une installation permanente du couvert végétal (Sawadogo et Janvier, 2011). Bien que le sous-solage soit considéré comme une technique efficace sur une ou plusieurs saisons, les résultats obtenus par certaines études sont très variables en raison des causes d'ordre multiple liées aussi bien au type de sol qu'aux outils et conditions d'exécution (Weill, 2014). Notre présent travail ne traite pas de l'aspect sur le rendement agricole, mais il nous semble utile de notifier que d'autres travaux ont par ailleurs rapporté des effets positifs du sous-solage sur le rendement des cultures (Oussible et Bourarach, 2009). En plus, des expérimentations du sous-solage conduites sur des cultures annuelles au Canada (Gasser et al., 2012 ; Gasser et al., 2015) attestent des effets modestes et variables sur le rendement agricole. C'est donc une technique sécurisante pour l'agriculteur car elle permet de réduire les effets des aléas climatiques (Guyomard et al., 2013). Ainsi, le sous-solage est proposé par Debaeke et al. (2008) comme une des techniques permettant l'adaptation des cultures à la sécheresse. Dans la mesure où il permet une meilleure amélioration des conditions et propriétés hydriques du sol pour les plantes pionnières (chapitre

4, § 4.6), il peut trouver sa place dans le cadre d'une gestion efficace et durable des ressources naturelles. Selon la FAO (2015), le sous-solage trouve aussi sa place parmi les techniques de l'agriculture de conservation "AC"⁶ (Dugué et al. 2015).

Notons enfin que l'approche d'analyse cartographique à partir des mesures de la conductivité électrique apparente (EM38) permet d'estimer avec précision le continu en eau dans le sol (Reedy et Scanlon, 2003). C'est une méthode tout à fait appropriée si l'on souhaite travailler à l'échelle d'une parcelle agricole (Busselen, 2018).

7.2.3. Quantification du bénéfice hydrique à l'échelle de la parcelle

Pour estimer quantitativement l'efficacité des différents types d'aménagement à l'échelle de la parcelle, nous avons calculé, par événement, la variation du stock moyen déterminé à l'échelle parcellaire, puis établi une relation avec la pluie qui l'a engendrée. Les résultats montrent des effets bénéfiques de chaque technique d'aménagement (banquettes et sous-solage) sur la rétention d'eau par rapport au témoin. En termes de **gain moyen** (cf. Figure 5.20), le stockage événementiel en mm d'eau est multiplié par un facteur en moyenne égal à 3 pour le sous-solage alors que le gain moyen est d'un facteur 2.4 pour les banquettes. Le gain apporté par les banquettes est donc légèrement moindre que celui du sous-solage et plus variable d'une pluie à l'autre. Remarquons enfin que le facteur de gain semble augmenter au-delà de 3 ou 4 pour les fortes pluies, ce qui constitue une information très importante pour les décideurs dans un contexte de changement climatique où l'on peut s'attendre à une fréquence accrue des événements pluvieux forts.

Concernant le sous-solage, la capacité de rétention d'eau du sol dépasse nettement celle des banquettes encore plus celle du témoin.

En résumé, ces données viennent donc confirmer le rôle important des différents types d'aménagement en termes d'économie de l'eau en milieu sahélien. L'analyse donne des différences assez marquées en ce concerne la variation du stock hydrique en fonction de la pluie. Celles-ci sont très significatives sur le sous-solage par rapport aux banquettes et au témoin. La spatialisation du stock hydrique sur l'ensemble des parcelles étudiées a permis d'estimer la lame stockée dans le sol après chaque pluie. Cependant, la totalité de cette eau n'est pas forcément retenue, une partie étant extraite par l'évaporation, surtout pour les banquettes, et éventuellement le ruissellement de débordement d'ouvrage. Cette approche basée sur

⁶ L'agriculture de conservation est un système cultural qui peut empêcher la perte de terres arables tout en régénérant les terres dégradées (FAO).

l'évaluation quantitative de l'efficacité des aménagements peut donc être un instrument précieux de gestion durable des ressources naturelles en général et de l'agriculture des pays sahéliens en particulier.

En termes de régénération végétale, l'impact apparaît positif pour les deux types d'aménagement. L'étude montre l'effet bénéfique des banquettes en termes de maintien sur place des eaux de pluie se traduisant par un meilleur développement du couvert végétal le long des fossés et des bourrelets. Même si cet impact apparaît relativement limité dans l'espace, il peut toutefois expliquer l'efficacité durable des banquettes sur l'amélioration du bilan hydrique grâce à leurs cuvettes qui constituent des principaux collecteurs des eaux du ruissellement. Dans les régions sahélienne et soudanienne, plusieurs études (Ganaba, 2005; Moustapha, 2010 ; Yaméogo, 2012 ; Yaméogo et al., 2013 ; Zouré et al., 2019) constatent que ces technologies de conservation des eaux et des sols comme le Zaï, la demi-lune et les cordons pierreux ont eu des impacts positifs sur la gestion des ressources naturelles.

En favorisant l'infiltration plutôt que le ruissellement, le sous-solage a eu un impact positif sur la restauration du couvert végétal des espaces nus dans lesquels, sans aménagement, rien ne pousse. La végétation surtout herbacée tend à s'installer dès même le début de la saison pluvieuse, soit au début du mois de juin. Finalement, les aménagements assurent une amélioration de la réserve hydrique disponible pour une éventuelle restauration des bandes dégradées de plateau à brousse tigrée. Les résultats obtenus par Boubacar Na-Allah et al. (2017) confirment cette efficacité du sous-solage manuel sur la restauration des sols sahéliens dégradés mais cette étude conclue que cette technique d'aménagement, si elle est réalisée avec des outils traditionnels, doit être renouvelée au cours de la saison des pluies.

7.3. Synthèse et discussion des résultats à l'échelle du bassin versant

Le dispositif de meures mis en œuvre a permis d'évaluer l'efficacité des banquettes et du sous-solage vis-à-vis du comportement hydrologique des bassins versants étudiés (chapitre 6).

A cette échelle, les mesures des débits à l'exutoire avant et pendant l'aménagement permettent de calculer la lame d'eau ruisselée lors de chaque événement pluvieux. La mise en relation entre pluie-lame écoulee avant et après aménagement permet d'étudier finement l'efficacité de ces techniques d'aménagement en réduisant les hauteurs écoulées événementielles et, par conséquent, le coefficient d'écoulement annuel.

Ainsi, avant aménagement par banquettes (TK amont Nord), le seuil d'apparition du ruissellement est environ 10 mm de pluie en moyenne. Celui-ci a au moins triplé pour atteindre

20 mm avec une surface aménagée sur le bassin de moins de 10 %. L'étude montre donc que les banquettes ont eu un effet régulateur des flux d'eau de ruissellement même pour les moyennes et les fortes pluies. Cette différence des lames écoulées se traduit par un écart (baisse) important des matières transportées comme l'ont montré des études antérieures (Albergel et al., 2003 ; Keddar, Benina et Mourad, 2011 ; Bergaoui et Camus, 1955 ; Albergel et Diop, 2012).

En réduisant significativement l'apport des surfaces élémentaires du plateau, les banquettes ont eu un impact sur l'écrêtement des crues à l'exutoire. Après aménagement en banquettes du bassin, on remarque que les hydrogrammes présentent des formes plus aplatis par rapport à la situation d'avant où les pics des débits sont plus élevés. Un retard de réponse du bassin, dû au temps de remplissage des aménagements (banquettes), est également observé (Figure 6.5). Les banquettes ont réduit les écoulements de 16 % à 7 % de la pluie annuelle. On voit clairement qu'au cours de l'aménagement progressif du bassin entre 2009 et 2017, le coefficient d'écoulement annuel a été divisé par deux et ce, bien que la proportion de surface aménagée ne dépasse pas 10 % de celle du bassin TK amont Nord. En mettant en relation les variables telles que CE et surface aménagée, on remarque que l'augmentation de la surface aménagée entraîne une diminution significative du coefficient d'écoulement, ce qui montre à nouveau l'efficacité des aménagements en banquettes sur la rétention d'eau et la limitation des écoulements à l'exutoire. En plus, les résultats de la régression multiple effectuée montrent que la surface aménagée constitue la principale variable explicative du coefficient d'écoulement, elle explique à 78 % la variance de celui-ci. Toutefois, cette baisse du ruissellement apparait non proportionnelle à la dimension de l'aire aménagée sur le bassin versant, conformément au troisième objectif de l'étude. Une étude récente (Sanda et Mamadou, 2019) a démontré que l'efficacité des ouvrages antiérosifs (type banquettes) sur les plateaux du bassin versant de Boubon peut être liée à plusieurs facteurs dont entre autre la pente, l'état de dégradation du plateau, les types d'ouvrages antiérosifs utilisés ou même leur association. Mal utilisées, les banquettes pourraient ainsi avoir des effets négatifs sur le risque de ravinement.

Sur le **bassin versant TK amont Sud**, la réalisation du **sous-solage** en 2014 a eu pour impact le **changement de comportement hydrologique** dudit bassin par rapport à la situation initiale. En effet, la forte aptitude du bassin à ruisseler dès les faibles pluies (seuil de 10 mm environ) avant sous-solage a subi une augmentation au fur et à mesure qu'on augmente la proportion aménagée sans prendre de valeur nette. De ce fait, le sous-solage de la zone contributive du bassin a engendré une modification du débit observé à l'exutoire en provoquant l'écrêtement des débits max des crues événementielles. En outre, l'augmentation progressive de la surface

aménagée (sous-solage) entraîne une baisse sensible du coefficient d'écoulement mettant en évidence une différence du fonctionnement hydrologique avant/après traitement du bassin. En effet, entre 2013 et 2016, le coefficient d'écoulement sortant annuel est divisé à peu près d'un facteur 1.6 avec 25 % de surface sous-solée. Cet effet est moins spectaculaire que celui du bassin aménagé en banquettes pour lequel on avait gagné un facteur 2 avec moins de 10 % de surface aménagée. Cependant, le nombre d'années est assez réduit pour le bassin sous-solé conduisant à un échantillon statistique plus petit. On ne peut exclure que les variations de pluviométrie annuelle aient bruité la relation pluie-lame écoulée. Finalement, on dispose quand même d'un indicateur intéressant du changement du régime hydrologique observé et pour une gestion efficiente des eaux de ruissellement à l'échelle du bassin versant.

La comparaison montre néanmoins un comportement hydrologique initial quasiment identique sur les deux bassins versants. Mais bien qu'ils soient soumis aux mêmes conditions pluviométriques, les bassins versants ne se comportent pas de manière identique au cours de la période après aménagement. L'impact hydrologique des banquettes est plus prononcé, à l'échelle du bassin versant, que celui du sous-solage, ce qui confirme notre quatrième objectif spécifique de l'étude. Cette différence en termes d'impact hydrologique est observée tant à l'échelle de l'événement pluvieux qu'à l'échelle de l'écoulement sortant annuellement et peut s'expliquer par la structure différente des aménagements. En effet, le remaniement profond du sol (ou sous-solage) engendre une importante modification de la structure du sol en surface et en profondeur, ce qui a créé des conditions favorables à l'infiltration et au stockage d'eau dans le sol. Les banquettes, par contre, retiennent plus d'eau en surface, ce qui leur permet d'être plus efficace à l'échelle du bassin versant que le sous-solage mais font perdre des volumes d'eau sans doute importants par évaporation.

Notre étude peut donc permettre aux décideurs d'optimiser les surfaces à aménager, évitant "d'en faire trop" et ainsi plutôt d'assurer un meilleur entretien des aménagements existants. Des faibles proportions aménagées suffisent en effet pour réduire suffisamment l'écoulement. Il reste maintenant à poursuivre les études pour rechercher désormais les emplacements optimaux des banquettes ou d'autres types d'aménagements, au sein des bassins dégradés.

7.4. Apport scientifique de l'étude

Ce travail de recherche, par la quantification avec une précision acceptable de l'impact hydrologique des aménagements de l'échelle locale au bassin versant apporte enfin une

contribution quantitative à la connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants aménagés du système à brousse tigrée dans un contexte sahélien.

Partant des résultats obtenus à diverses échelles spatiales et temporelles, le travail propose en outre des indicateurs très utiles aux décideurs et opérateurs de développement rural qui interviennent dans la gestion durable des ressources naturelles et des écosystèmes sahéliens déjà fragiles. Finalement, l'étude met à disposition des populations locales et des acteurs du développement agricole des informations hautement importantes quant à l'efficacité hydrologique des techniques des conservations des eaux et des sols notamment les banquettes et le sous-solage afin d'atténuer les effets négatifs des perturbations climatiques en cours au Sahel. Cependant, il paraît important d'étudier l'efficacité des demi-lunes qui sont une autre technique de conservation des eaux et des sols (CES) couramment utilisée dans la zone d'étude. Les perspectives qu'ouvrent cette étude sont présentées de façon détaillée à la fin de la conclusion générale.

Conclusion partielle

Ce chapitre présente une synthèse et une discussion des principaux résultats obtenus mettant en évidence et chiffrant l'impact hydrologique des banquettes et du sous-solage dans les régions semi-arides. Le suivi hydrologique sur diverses échelles spatiales et temporelles a permis de quantifier les impacts de ces techniques de CES en termes d'amélioration de l'infiltration, de la capacité du stockage en eau du sol et du niveau de réduction des écoulements à l'échelle du bassin versant. Les résultats montrent en outre qu'en cas d'augmentation de la pluie moyenne par événement, l'efficacité des aménagements par rapport au témoin serait renforcée.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de l'étude vise à la quantification de l'efficacité des techniques d'aménagement sur la rétention d'eau et l'hydrologie des bassins versants endoréiques du Sud-Ouest du Niger. Plus spécifiquement, il s'agit d'évaluer l'efficacité de deux techniques d'aménagement, banquettes et sous-solage, sur l'amélioration du comportement hydrologique des sols à l'échelle locale et de déterminer, si possible, un seuil d'aménagement optimal (proportion de surface aménagée à l'échelle d'une unité hydrologique) qui réduit significativement et suffisamment le ruissellement à l'échelle des petits bassins versants sahéliens du Sud-Ouest du Niger.

Plusieurs travaux de recherche ont par ailleurs évalué la dégradation de la végétation, des sols et les causes de leur encroûtement au Sahel. Ils ont ensuite montré comment cet encroûtement était à l'origine du « paradoxe hydrologique du Sahel » (moins de pluies, mais plus d'eau d'écoulement dans les bassins versants). Du fait des contraintes climatiques et anthropiques, le fonctionnement hydrodynamique actuel de l'écosystème dit « brousse tigrée » caractéristique de cette région est perturbé. Ces contraintes ont pu entraîner des formes de dégradation entravant son fonctionnement hydrologique normal. Ceci n'est pas sans conséquences néfastes sur la vulnérabilité des populations.

Face à cette situation, des techniques de CES sont aujourd'hui largement répandues au Sud-Ouest du pays pour limiter les ruissellements et l'érosion. Elles ont été réalisées avec l'aide des ONGs et des projets locaux pour aider les populations locales à conserver l'eau là où elle tombe et limiter ainsi le ravinement et les inondations en aval. La technique des banquettes, étudiée ici, figure parmi les plus répandues avec pour but de collecter et stocker l'eau de ruissellement afin de réhabiliter les espaces dégradés. Le sous-solage est aussi couramment utilisé pour créer des conditions d'infiltrabilité du sol. Néanmoins, l'efficacité de ces aménagements est très peu quantifiée.

Un dispositif expérimental a été mis en place sur le site d'étude afin de **quantifier l'efficacité hydrologique** de ces différentes techniques d'aménagement à plusieurs échelles spatiales. Celui-ci a été décrit de façon détaillée au chapitre 3, § 3.3.1 concernant les **mesures d'humidité du sol par sondage neutronique (échelle locale ou ponctuelle)**, au paragraphe 3.4 pour la cartographie du stock à partir des **mesures EM38 (échelle parcellaire)** et enfin au paragraphe 3.5 pour les **mesures d'écoulement sur les bassins versants**. La mise en application de cette approche d'analyse s'est avérée pertinente car elle a permis d'aboutir à des résultats d'une haute précision découlant des mesures et observations menées sur le terrain. L'analyse de ce jeu

important des données collectées de manière expérimentale permet de dire que l'objectif principal fixé par l'étude est atteint. La synthèse des principaux résultats expérimentaux est présentée en respectant les échelles d'analyse évoquées plus haut.

A l'échelle ponctuelle, le suivi quotidien de l'humidité du sol durant deux saisons (2016 et 2017) a permis d'évaluer les effets des banquettes et du sous-solage (chapitre 4). Les résultats obtenus montrent des impacts très nets des banquettes en termes d'infiltration et d'amélioration du comportement hydrologique des sols dégradés. En effet, **la teneur en eau volumique en surface** qui reste très faible ($\theta \text{ max} = 0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) tout le long de la saison pluvieuse sur le sol nu a connu **une nette augmentation** grâce aux banquettes. Cependant, cet impact important sur la rétention d'eau du sol diffère suivant les compartiments (amont et aval) des banquettes. Ainsi, la teneur en eau (estimée à 10 cm de profondeur), sous le fossé des banquettes, peut atteindre $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ au milieu de la saison 2016 en comparaison avec l'impluvium et l'aval où ses valeurs sont plus faibles ($0,20$ et $0,19 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectivement). La comparaison des profils hydriques des deux saisons montre des résultats différents, mais satisfaisants. Les banquettes provoquent, en outre, une **amélioration de la profondeur d'infiltration**. Sur le sol nu, l'analyse des profils d'humidité événementielle montre que le front d'infiltration se limite à 50 cm. En dessous, la teneur en eau reste stable. Par contre, sur les banquettes, le front d'infiltration est remarquablement plus profond en amont qu'en aval des celles-ci. En effet, les banquettes favorisent l'infiltration lors des pluies jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 1,50 m soit le triple de ce qui s'observe sur le témoin. Cela est remarquable en termes de gain apporté par l'aménagement. En créant des conditions favorables à **l'infiltration locale**, les banquettes ont, par conséquent, augmenté la **capacité de stockage hydrique du sol**. Ainsi, pour un événement pluvieux donné, la quantité d'eau stockée est environ deux à trois fois plus élevée que sur le site témoin selon les événements. De plus, du fait des apports par l'amont, la lame infiltrée peut parfois dépasser la lame précipitée. On peut finalement déduire que grâce aux banquettes, **la disponibilité d'eau dans le sol a largement augmenté**. Cela entraîne une modification positive des écoulements de surface pouvant donc conduire à la restauration progressive du fonctionnement hydrique des sols et éventuellement au développement du couvert végétal.

Concernant le **sous-solage**, les résultats montrent l'efficacité de cette technique vis-à-vis du partage immédiat de la pluie entre ruissellement et infiltration. Là où les banquettes stockent l'eau en rétention de surface, le sous-solage, lui, favorise l'infiltration rapide de l'eau. Les mesures ponctuelles de l'humidité du sol (méthode de sondage neutronique) ont permis de

caractériser finement l'évolution événementielle, mensuelle et saisonnière du comportement hydrologique des surfaces sous-solées. Partant des résultats obtenus, les constats suivants se dégagent : i) un accroissement considérable de la teneur en eau en surface, avoisinant $0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ en début de saison 2016 ; ii) une diminution de la teneur en eau à partir de 60-70 cm de profondeur avant de se stabiliser autour de 100 cm et plus ; iii) un stockage d'eau beaucoup plus important dans la partie sous-solée correspondant à la tranche de sol ameublie de 0 à 40 cm de profondeur. Néanmoins, l'analyse comparative de la 1^{ère} année (2016) et de la 2^{ème} année (2017) de sous-solage fait ressortir une tendance en baisse de teneur en eau traduisant la diminution de l'efficacité du sous-solage au cours du temps et en fonction du cumul des pluies reçues par le sol. L'autre constat plus frappant est **l'augmentation remarquable du front d'infiltration**. Celui-ci a plus que triplé en comparaison avec le témoin. En effet, sur certains tubes de mesures, l'infiltration s'observe au-delà même de la profondeur maximale de mesure, 190 cm, ce qui surpasse l'effet des banquettes. Ceci témoigne d'un accroissement considérable du stock hydrique dans le premier mètre du sol. De plus, l'impact très significatif du sous-solage se traduit par l'absorption de la quasi-totalité des deux premières pluies qui suivent la réalisation de l'aménagement. Ce qui constitue une plus-value considérable apportée par cette technique en termes de rétention d'eau. Le gain en stockage hydrique induit par le sous-solage est très marqué, environ 100 mm, par rapport au témoin. Enfin, la mise en relation des **variations du stock d'eau (ΔS) avec la pluie** permet de conclure que, par rapport au témoin et aux banquettes, **le gain est remarquable et ce, pour toutes les pluies et d'un facteur trois en moyenne**.

A l'échelle de la parcelle, la méthode de mesure de conductivité électrique (EM38) utilisée dans cette thèse a pour but de (i) **quantifier avec précision** et (ii) **spatialiser l'impact hydrologique des aménagements** (chapitre 5). Pour cela, un suivi événementiel de la conductivité électrique a été effectué sur différentes parcelles pendant les deux saisons. L'adoption d'une démarche rigoureuse d'étalonnage de l'EM38, par le biais de la méthode de sondage neutronique (elle-même étalonnée à l'aide des mesures gravimétriques), a permis d'élaborer une procédure de **cartographie de stock hydrique** quantifié à l'échelle de la parcelle. En effet, l'étalonnage basé sur le principe des quatre plus proches voisins possibles a conduit à la détermination des coefficients des droites d'étalonnage permettant à leur tour de convertir les réponses données par EM38 en stock hydrique. Ces valeurs du stock estimées dans la tranche de sol 0-135 cm sont spatialisées par la méthode d'interpolation spatiale par krigeage. Le résultat permet de visualiser concrètement sous forme de **cartes en 2D la dynamique spatio-temporelle d'humidité du sol** engendrée par chaque événement pluvieux. Les résultats

cartographiques par mesures électromagnétiques mettent clairement en évidence **l'impact hydrologique des différents types d'aménagement sur la rétention d'eau du sol à l'échelle parcellaire** et permettent de repérer des zones plus humides et des zones plus sèches stables au cours de la saison. On peut de ce fait déduire que grâce aux banquettes et au sous-solage, **l'impact sur la réduction du ruissellement** est plus que significatif à tel point que le contenu en eau du sol peut parfois dépasser la quantité de la pluie tombée sur la parcelle. Quelle que soit la pluie, il existe toujours un **gain en variation de stock par rapport au témoin** (cf. Figure 5.20). Le **stockage événementiel en mm d'eau** est multiplié par un facteur en moyenne égal à 3 pour le sous-solage contre un gain moyen d'un facteur 2.4 pour les banquettes. Cela montre que le gain apporté par les banquettes est légèrement moindre que celui du sous-solage et plus variable d'une pluie à l'autre. Ce facteur de gain semble augmenter au-delà de 3 ou 4 pour les fortes pluies (40 mm et plus), ce qui constitue une information très importante pour les décideurs dans un contexte de changement climatique où l'on peut s'attendre à une fréquence accrue des événements pluvieux forts. On voit que le stockage du site témoin sature dès 40 mm de pluie, ne pouvant stocker davantage que 12 mm même si la pluie augmente. Cette saturation n'est pas visible pour les parcelles aménagées, sauf pour la banquette B3 avec un stockage plafonnant à 25 mm.

En résumé, ces données cartographiques viennent donc confirmer le rôle combien important de ces techniques d'aménagement en termes d'économie de l'eau en milieux sahéliens. De ce fait, l'utilisation du sondage électromagnétique (EM38) apporte **un gain complémentaire particulièrement intéressant et permet d'évaluer quantitativement l'efficacité des aménagements avec une grande précision.**

Il faut finalement retenir que les aménagements assurent une **amélioration de la réserve hydrique disponible** pour une éventuelle restauration des terres dégradées de plateau à brousse tigrée.

A l'échelle du bassin versant, le dispositif des mesures des débits aux exutoires a permis de suivre les comportements hydrologiques avant et après aménagement des bassins (chapitre 6). A cette échelle, la technique des banquettes a démontré son **efficacité en réduisant les lames écoulées événementielles** et, par conséquent, le **coefficient d'écoulement annuel**. D'après les résultats obtenus, on voit clairement qu'au cours de **l'aménagement progressif du bassin** entre 2009 et 2017, le **coefficient d'écoulement annuel a été divisé par deux** et ce, bien que la **proportion de surface aménagée ne dépasse pas 10 %** sur le bassin TK amont Nord. En mettant en relation ce coefficient d'écoulement avec la surface aménagée, on remarque que

l'augmentation de cette dernière entraîne une diminution significative du coefficient d'écoulement, ce qui montre à nouveau l'efficacité des banquettes sur la rétention d'eau et la limitation des écoulements à l'exutoire. Néanmoins, une part de cette réduction est due à l'évaporation directe de l'eau détenue en surface et correspond donc à une perte pour le bassin. Sur le bassin de sous-solage (TK amont Sud), la **forte aptitude du bassin à ruisseler dès le début des pluies** (qui était de 5 mm environ) avant sous-solage a subi **une diminution suite à l'aménagement**. De ce fait, le traitement en sous-solage d'une partie de la zone contributive du bassin a engendré l'écrêtage des débits max des crues événementielles. L'augmentation progressive de la surface sous-solée entraîne une baisse sensible du coefficient d'écoulement mettant en évidence une différence du fonctionnement hydrologique avant et après traitement du bassin. Entre 2013 et 2016, le CE sortant annuel est divisé à peu près d'un facteur 1.6 avec 25 % de surface sous-solée. Cet effet est moins spectaculaire que celui du bassin aménagé en banquettes pour lequel on avait gagné un facteur 2 (de 17 % à 8 %) avec moins de 10 % de surface aménagée. Finalement, on dispose quand même d'un indicateur intéressant du changement du régime hydrologique observé et pour une gestion efficiente des eaux de ruissellement à l'échelle du bassin versant.

Perspectives

Pour terminer, les **perspectives** qu'ouvre ce travail de thèse sont multiples. Tout d'abord, l'étude a permis de montrer que l'efficacité des techniques de CES sur le comportement hydrologique des espaces dénudés du plateau. Aucun effet négatif sur le fonctionnement normal de la brousse tigrée n'a été relevé au cours de cette étude. Cependant, l'impact des banquettes apparaît relativement limité dans l'espace en termes de régénération du couvert végétal. Pour cela, il serait intéressant de tester la combinaison des banquettes avec le sous-solage dont l'efficacité a été aussi incontestablement démontrée. Pour homogénéiser l'impact hydrique sur l'ensemble de la banquette, il faut casser les croûtes de l'impluvium qui diminuent la capacité du sol à absorber rapidement la totalité de l'eau stockée superficielle. On propose, pour cela, d'y appliquer la technique de sous-solage plus branchage en cours d'expérimentation dans le cadre d'une autre thèse. Il est très probable que cela pourrait rendre plus durable l'efficacité hydrologique et même permettre une valorisation efficace agro-pastorale de l'eau des banquettes. Toutefois, la combinaison des techniques de CES bien connue est de plus en plus recommandée par les acteurs du développement rural afin d'améliorer l'efficacité des ouvrages.

Notre étude a pu démontrer une efficacité supérieure du sous-solage en termes d'infiltration et de stockage d'eau à l'échelle parcellaire mais une efficacité supérieure des banquettes sur la réduction des débits à l'exutoire. L'évaporation pendant la rétention superficielle, terme de perte du bilan hydrologique, est sans doute la raison principale de cette différence. Il serait donc nécessaire d'estimer ce terme avec la meilleure précision possible. Cela demanderait un suivi des surfaces inondées en amont des banquettes, au cours des deux ou trois jours post-pluie durant lesquels elles persistent, et de mesurer ou estimer l'évaporation potentielle correspondant à la demande atmosphérique.

Comme autres **perspectives**, nous proposons de :

- mener des études analogues en zone de socle, exoréique, afin de voir comment les aménagements pour la conservation des eaux et des sols, à l'échelle locale, permettraient de lutter contre les crues et inondations, à l'échelle du bassin versant ;
- approfondir l'étude en prenant en compte les interactions amont-aval entre banquettes (déversement) pour la quantification de l'impact hydrologique des banquettes à l'échelle parcellaire ;
- quantifier l'impact de ces aménagements très répandus dans l'Ouest du Niger sur l'hydrologie à l'échelle régionale ;
- effectuer une étude de modélisation du fonctionnement hydrologique des bassins aménagés avec prise en compte de la dynamique environnementale afin de proposer un outil d'aide de gestion durable de la ressource en eau des ruissellements et en sol à l'échelle des bassins versants ;
- analyser l'aspect économique du problème afin de mettre en relation les coûts de la réalisation des aménagements et leur efficacité ;
- étudier l'efficacité de la combinaison d'autres techniques de récupération des sols comme la demi-lune et le zaï.

Références bibliographiques

Abdoul Habou, Z., Boubacar M. K., et Adam T. (2016). « Les systèmes de productions agricoles du Niger face au changement climatique : défis et perspectives ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 10 (3) : 1262-72. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i3.28>.

Achard, F (1997) « Pastoralisme et écosystèmes forestiers contractés du sud du Niger : ressources fourragères et impact du pâturage sur la forêt », pp. 15-24. *In* : fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens/sous la direction de J. M. d'Herbès. *John Libbey Eurotext*, Paris, 1997. P. 274.

AIEA (2003). Les sondes à neutrons et à rayons gamma : leurs applications en agronomie. Collection cours de formation n° 16/F, deuxième édition, 70 pages.

Al Ali, Y. (2007). *Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes. Analyse, fonctionnement et essai de modélisation en milieu méditerranéen (El-Gouazine, Tunisie Centrale)*. Thèse, Université Montpellier II, p. 170.

Alaoui, A. (2007). *Estimation du flux dans la zone non saturée. Méthode simple*. Connaissance de l'environnement n° 0702. Office fédéral de l'environnement, Université de Berne. 50 p.

Albergel, J. (1988). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m² au km² : étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Edit. *ORSTOM*, 343 p.

Albergel, J., Dacosta, H. et Pépin, Y. (1992). « Régionalisation des paramètres hydrologiques à prendre en considération pour l'aménagement d'un bas-fond rizicole dans l'estuaire de la Casamance (Sénégal) ». *VIII^e journées hydrologiques-ORSTOM*, pp. 363-83.

Albergel, J., Diatta M. et Pépin, Y. (2000). Aménagement hydraulique et bocage dans le bassin arachidier du Sénégal. *In* : La jachère en Afrique tropicale - Ch. Floret, R. Pontanier, *John Libbey Eurotext*, Paris, pp. 741-750.

Albergel, J., Pépin Y., Nasri S. et Boufaroua M. (2003). Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens. *Hydrology of the mediterranean and semiarid regions, IAHS*, Pub. N°. 278. pp. 373-379.

Albergel, J. et Diop S. (2012). Aménagements hydrauliques innovants pour la gestion conservatoire des eaux et des sols sur le tracé de la Grande Muraille Verte, pp. 319-347. *In* : La Grande Muraille Verte : capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux/sous la direction de Dia, A. et Robin Duponnois, R. (2012). *Éditions IRD*, 493 p.

Amani, A. et Nguetora M. (2002). Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. *Regional Hydrology : Bridging the Cap between Research and Practice. IAHS*, Publ. n°. 274, pp. 449-156.

Ambouta, J. M. K., (1994). *Etudes des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin au Sahel*. Thèse de l'Université Laval, Québec, 97 p.

Ambouta, J. M. K., (1997). Définition et caractérisation des structures de végétation contractée au Sahel : cas de la brousse tigrée de l'ouest nigérienne, pp. 41-57. *In* : fonctionnement et

gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens/sous la direction de J. M. d'Herbès. *John Libbey Eurotext*, Paris, 1997. P. 274.

Ambouta, J. M. K., Valentin C. et Laverdière M. R. (1996). Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse* 7 (4) : 269-75.

Ambroise, B. (1998). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Processus et facteurs. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 11, n° 4, pp. 471-496. doi.org/10.7202/705317ar.

Amogu, O., Esteves, M., Vandervaere, J.-P., Malam Abdou, M., Panthou, G., Rajot, J-L., Souley Yéro, K. et al. (2015). Runoff evolution due to land-use change in a small sahelian catchment. *Hydrological Sciences Journal* 60 (1) : 78-95. doi.org/10.1080/02626667.2014.885654.

Amogu, O. (2009). *Sahelian land-cover degradation and its effects on the silting-up of the middle Niger River*. Thesis, Hydrology. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 445 p.

Anisia, M. (2011). « *Utilisation de la conductivité électrique pour l'analyse des propriétés hydrodynamiques des sols* ». Mémoire de Master 2. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris, 50 p.

Archie, G.E. (1942). « The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics ». *Transactions of the AIME* 146 (01) : 54-62. doi.org/10.2118/942054-G.

Armand, R. (2009). « *Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement* ». Thèse de l'Université de Strasbourg, discipline : Géographie, 210 p.

Aronson, J., Floret C., LE Floch E. et Pontanier R. (1995). Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides : le vocabulaire et les concepts. *John Libbey Eurotext*, Paris ©, pp. 11-29.

Assoumane, G., (2014). Evolution comparée du couvert végétal en zone de brousse et en zone agricole de 1992 à 2014 dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Niamey (Niger). Systèmes d'informations localisées pour l'aménagement des territoires (SILAT), *AgroParisTech & CIRAD*, 50 p.

Atta, S., Achard F. et Mohamedou S. (2010). Evolution récente de la population, de l'occupation des sols et de la diversité floristique sur un terroir agricole du Sud-Ouest du Niger. *Sciences & Nature Vol.7 N°2* : 119 - 129. doi.org/10.4314/scinat. V7i2.59948.

Avakoudjo, J., Kindomihou V., Akponikpe P. I., Thiombiano A. et Sinsin B. (2013). Essences végétales et techniques de restauration des zones d'érosion (dongas) du Parc W et de sa périphérie à Karimama (Nord-Bénin). *Journal of Applied Biosciences* 69 (0) : 5496. https://doi.org/10.4314/jab.v69i0.95075.

Bahari Ibrahim, M., Malam Abdou, M., Mamadou I., Abba B., Kadaoure I., Faran Maiga, O. et Bouzou Moussa I. (2019). Tendances du reverdissement et de la dégradation du sol dans l'Ouest du Niger. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence Env. Wat. Sci. pub. H. Ter. Int. J.* 3 (2) : 96-103. http://revues.imist.ma/?journal=ewash-ti.

- Barrios, J. L. G. et Descroix L. (2012). *Stratégie de lutte antiérosive dans la Sierra Madre Occidentale (Mexique)*. In : *Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles* [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2012 (généré le 07 février 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/14369>>. doi : 10.4000/books.irdeditions.14369.
- Beck, Y.-L., Palma-Lopez, S., Ferber, V., Fauchard, C., Froumentin, M., Jacqueline, D. et Cote, P. (2007). « Evaluation de l'état hydrique et de la masse volumique d'un sol argileux par des méthodes géophysique combinées. » *6^e colloque GEOFCAN – 25-26/09/2007 – Bondy, France*, pp. 131-134.
- Beck, Y. L. (2008). « *Evaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique* ». Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 303 p.
- Benech, C. (2000). *Interprétation conjointe de cartographies magnétique et électromagnétique des propriétés magnétiques des sols anthropisés*. Thèse, Université de Paris 6, 132 p.
- Bergaoui, M. et Camus, H. (1955). Impact des travaux antiérosifs sur les crues et le transport solide en Tunisie centrale, *John Libbey Eurotext*, Paris, pp. 362-81.
- Berkal, I. (2016). *Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride. Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA, Alger), 169 p.
- Bertuzzi, P., Bruckler L. et Gros, C. (1987). Régression linéaire avec erreur sur les variables : application à l'étalonnage d'un gammadensimètre à transmission et d'un humidimètre à neutrons. *Agronomie* 7 (7) : 507-15. <https://doi.org/10.1051/agro:19870706>.
- Besson, A., Cousin, I., Nicoullaud, B., Bourennane, H., Pasquier, C., Dorigny, A., Dabas, M. et King, D. (2007). « Caractérisation de la structuration spatio-temporelle des teneurs en eau des sols à l'échelle parcellaire par résistivité électrique », *6^{ième} colloque GEOFCAN - 25-26/09/2007 – Bondy, France*, pp. 79-81.
- Bezis, S. (2003). *Détermination et évolution de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau appliquées aux profils d'altération latéritiques du massif de Tiebaghi, Nouvelle Calédonie*, mémoire de DEA, 34 p.
- Bisone, S., Clément R. et Forquet N. (2017). Une méthodologie couplant les mesures géophysiques et ponctuelles afin d'estimer la perméabilité d'un site destiné à l'infiltration d'eau usée traitée. *Déchets, sciences et techniques*, n° 74, 11 p. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3602>.
- Botoni, E. et Larwanou M. (2010). La régénération naturelle assistée (RNA) : Une opportunité pour reverdir le Sahel et réduire la vulnérabilité des populations rurales. 14 p.
- Botoni, E. et Reij C. (2009). La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel : Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles. *CIS & CILSS*, 63 p.
- Bottraud, J. C., Bornand, M. et Servat, E. (2010). « Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie ». *Association Française pour l'Etude du Sol*, pp. 279-294.

- Boubacar Na-Allah, A., Malam Abdou, M., Ingatan Warzagan, A., Mamadou, I., Faran Maiga, O. et Bouzou Moussa, I. (2017). Efficacité du sous-solage dans la restauration des sols sahéliens dégradés. Étude expérimentale sur le site de Tondi Kiboro, Niger. *Afrique SCIENCE* 13(6), pp. 189 - 201.
- Boudol, B. (2004). « Circulation souterraine de l'eau dans un bassin-versant », cours circul 10 juin 04, 27 p.
- Bourgeois, B., Tabbagh A., Cavoit, C. et Cousin I. (2007). Développement d'un appareil de sondage électromagnétique aux fréquences intermédiaires (100 kHz - 10 MHz) pour la mesure de l'humidité dans les terrains superficiels, *6^{ième} colloque GEOFCAN* : 31-34.
- Boutaleb, K. (2007). Problématique de la détermination des coûts et des prix dans un système de gestion durable et intégrée de l'eau, *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, p. 9.
- Bouzou Moussa, I. et Dan Lamso. N. (2004). Le « Tassa » : une technique de conservation des eaux et des sols bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glaciers des régions semi-arides (Niger). *Revue de géographie alpine* 92 (1) : 61-70. <https://doi.org/10.3406/rga.2004.2278>.
- Bouzou Moussa, I., Descroix, L., Faran Maiga, O., Gautier, E., Moustapha Adamou, M., Esteves, M., Souley Yéro, K. et al. (2011). Land use changes and their hydro-geomorphologic effects in a Sahelian endoreic catchment basin. *Sécheresse* 22 (1) : 13-24. <https://doi.org/10.1684/sec.2011.0297>.
- Bouzou Moussa, I., Bahari Ibrahim, M., Faran Maiga O., Hamadou, I. Abdou Alou A., Lona I., Bontianti, A. et al. (2017). Changement climatique, géomorphologie et inondabilité de la plaine alluviale du fleuve Niger à Niamey (Niger). *Revue du C.A.M.E.S.*, 7, pp. 299-314.
- Bouzou Moussa, I., Bahari Ibrahim, M., Malam Abdou, M., Faran Maiga, O., Ingatan Warzagan, A. et Boubacar Na'allah, A. (2019). Dégradation des terres et inertie paysanne dans le Fakara (Niger-Ouest). *Revue Environnement et Dynamique des Sociétés*, n° 001 : 329-40.
- Brabant, P. (2008). *Activités humaines et dégradation des terres*. Planète Terre, édition IRD, 369 p.
- Brossier, R. (2014). *Prospection Géophysique : Méthode Electromagnétique*. L3P PPRS 2013-2014, ISTERre, Université Joseph Fourier Grenoble, 65 p.
- Bruand, A., et Coquet, Y. (2005). « Les sols et le cycle de l'eau ». *Science du Sol et Environnement*, Dunod, pp. 345-363.
- Brunet, P., Bouvier, C., Perrin, J., L. et Robain, H. (2003). Suivi annuel des variations de l'humidité du sol à l'aide de sondages Schlumberger, pp. 1-5.
- Brunet, P., Clément, R., et Bouvier, C. (2007). Caractérisation des déficits hydriques des formations superficielles par mesure des résistivités électriques. *6^{ième} colloque GEOFCAN*, pp. 123-126.
- Busselen, T. (2018). *Cartographie de la conductivité électrique de la zone racinaire du sol par géoradar aéroporté opérant à basses fréquences*. Université Catholique de Louvain, Mémoire de fin d'études, Sciences et technologies de l'environnement. 95 p.

Buvat, S. (2012). *Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique. Application à la cartographie des sols en contexte agricole* ». Thèse, Université Pierre et Marie Curie. 174 p.

Camus, H. (1974). Homogénéisation des mesures d'humidité du sol faites avec diverses sondes à neutrons et à partir d'étalonnages différents, *Cah. ORSTOM, sér, Hydrol.*, vol. XI, n°1, pp. 3-33.

Caniaux, G., Giordani, H. Redelsperger, J L., Wade, M. Bourlès, B., Bourras, D. Gaëlle de Coëtlogon, et al. (2012). Les avancées d'AMMA sur les interactions océan-atmosphère. *La Météorologie* 8 (Special-AMMA) : 17 p. doi.org/10.4267/2042/48128.

Casenave, A. (1991). Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. *Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext*. Paris, ORSTOM, pp. 77-86.

Casenave, A., et Valentin. C. (1991). Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne. *Soil Water Balance in the Sudano-sahelian Zone. IAHS*, Publ. n° 199, pp. 99-108.

Casenave, A., et Valentin, C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration*. Paris : ORSTOM, 231 p.

Casse, C. (2015). *Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey : Etude à partir de données satellitaires et in-situ*. Hydrologie, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 269 p.

Centre Technique Forestier Tropical (CTFT). (1979). « *Collection Techniques rurales en Afrique. Conservation des sols au sud du Sahara* ». Deuxième édition, France, ministère de la coopération, 295 p.

Charbonneau, J. E, Gosselin, A. et Trudel, M., J. (1988). Influence de la conductivité électrique de la solution nutritive sur la croissance et le développement de la tomate de serre cultivée avec ou sans éclairage d'appoint. *Canadian Journal of Plant Science* 68 (1) : 267-76. doi.org/10.4141/cjps88-033.

Chouteau, M. et Giroux, B. (2005). « Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques ». Notes de cours, Géophysique appliquée II, école polytechnique, 148 p. [site Web du cours GLQ 3205] <<https://cours-examens.org>>

Chouteau, M. et Giroux, B. (2006). « Méthodes électriques », Notes de cours, Géophysique appliquée II, école polytechnique [site Web du cours GLQ 3202] < <https://elearn.univ-ouargla.dz> >.

Coelho, V. L., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Wallace do Boaventura, C. et Osvaldo S. J. Paulino. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research* 118 : 76-82. doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027.

Corwin, D. L. et Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, pp. 11-43. doi : 10.1016/j.compag.2004.10.005.

- Cosandey, C. (1990). L'origine des crues dans les bassins-versants élémentaires : du ruissellement sur les versants à l'écoulement de crue. *Annales de Géographie* 99 (556) : 641-59. doi.org/10.3406/geo.1990.21002.
- Cosandey, C-M. (1975). Le bilan d'eau des sols. Une méthode d'étude de la réserve agricole par humidimètre à neutrons. *Revue Géographique de l'Est* 15 (1) : 47-62. doi.org/10.3406/rgest.1975.1309.
- Courault, D., D'Herbes, J-M. et Valentin, C. (1990). Le bassin versant de Sama Dey : premières observations pédologiques et phytoécologiques. *ORSTOM*, 46 p.
- Cousin, I., Besson, A., Bourennane, H., Pasquier, C., Nicoulaud, B., King, D. et Richard, G. (2009). « From spatial-continuous electrical resistivity measurements to the soil hydraulic functioning at the field scale ». *Comptes Rendus Geoscience* 341 (10-11) : 859-67. https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.011.
- Cousin, I., Besson, A., Seger, M., Giot, G., Richard, G. et King, D. (2012). L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols. *Innovations Agronomiques* 21, pp. 13-29.
- Cristofoli, S. et Mahy, G. (2010). Restauration écologique : contexte, contraintes et indicateurs de suivi. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 16 p.
- Da, D C E. (2008). Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur le rendement du sorgho au centre-nord du Burkina Faso. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 61 (241-242) : 99-110. doi.org/10.4000/com.3512.
- Dabas, M., Duval, O., Bruand, A. et Verbèque, B. (1995). Cartographie électrique en continu : Apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 4, pp. 257-268.
- Dakak, H., Soudi, B., Mohammadi, A. B., Douaik, A., Badraoui, M. et Moussadek, R. (2011). Soil salinity survey using electromagnetic induction in the Tadla Plain (Morocco) : Optimization attempt using geostatistical analysis. *Sécheresse* 22 (3) : 178-185. Doi.org/10.1684/sec.2011.0312.
- Dardel, C. (2014). *Entre désertification et reverdissement du Sahel : Diagnostic des observations spatiales et in situ. Geophysics*. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 200 p.
- Debaeke, P., Willaume, M., Casadebaig, P. et Nolot, J-M. (2008). Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. *Innovations Agronomiques* 2, pp. 19-36.
- Delabre, E. (1998). *Caractérisation et évolution d'écosystèmes anthropisés sahéliens : Milieux post-cultureux du sud-ouest Niger*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 265 p.
- Delalande, M., Gavaland, A. et Mistou, M. N. (2017). Mesure de l'eau du sol : questions, méthodes et outils. Exemples d'application sur deux plateformes champs du réseau « PHENOME ». *Le Cahier des Techniques de l'INRA* (90), 32 p.
- Descloîtres, M., Ribolze, O. et Le Troquer, V. (2001). Variations saisonnières de la résistivité des sols d'une ravine sur un versant sahélien : 1. Etude cartographique par traîné Wenner. *3^{ème} Colloque GEOFCAN à Orléans*, 5 p.

- Desconnets, J C., Galle, S. Leduc, C. et Peugeot, C. (1996). Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne : l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel. *ORSTOM*, n° 238 : 125-37.
- Desconnets, J C., Taupin, J-D., Estèves, M., Gréard, M., Gualde, R., Kong, J. et Lebel, T. (1991). Etude des zones endoréiques en milieu sahélien : rapport de campagne 1991 et premiers résultats. 36 p.
- Desconnets, J-C. (1994). *Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu shélien (Niger-degré carré de Niamey)*. Université Montpellier II. 305 p.
- Descroix, L., Diedhiou, A., Vischel, T., Dessay, N., Malam Abdou, M., Souley Yéro, K. et Hiernaux, P. (2012). Scénarios de changements climatiques et de leur impact sur l'hydrosystème et la végétation. Rapport de GIEC ; *ANR ECLIS*, 50 p.
- Descroix, L., Mamadou, I., Malam Abdou, M., Bachir, A., Bouzou Moussa, I., Le Breton, E. et Souley Yéro, K. (2012). Etat des lieux et proposition de restauration des sols sur le bassin versant de Tondi Kiboro (Niger). *In* : Roose, E. (ED.), Duchaufour, H. (ed.), De Noni Georges (ED.). Lutte antiérosive : réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. Marseille, *IRD*, 10 p. (Colloques et Séminaires). ISBN 978-2-7099-1728-5.
- Descroix, L., Niang, A. D., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G. et Diedhiou, A. (2013). Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel). *Climatologie, AIC*, volume 10, pp. 37-49. <https://doi.org/10.4267/climatologie.78>.
- Descroix, L., Bouzou Moussa, I., Genthon, P., Sighomnou, D., Mahe, G., Mamadou, I., Vandervaere, J-P. et al. (2013). Impact of drought and land-use changes on surface-water quality and quantity : the sahelian paradox ». In : Bradley, P. M. (ed.) *Current perspectives in contaminant hydrology and Water Resources Sustainability*. Rijeka : Intech, 243-271. ISBN 978-953-51-1046-0. <https://doi.org/10.5772/54536>.
- Descroix, L., Niang, A. D., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Honoré Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J-P. et Quantin, G. (2015). Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le Bassin du Niger Moyen. *Association internationale de climatologie*, volume 12, pp. 25-43. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1105>.
- Descroix, L., Genthon, P., Peugeot, C., Mahé, G., Malam Abdou, M., Mamadou, I., Tanimoun, B. et al. (2015). Paradoxes et contrastes en Afrique de l'Ouest : Impacts climatiques et anthropiques sur les écoulements. *Géologues*, 187 : 47-52.
- Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L., Panthou, G., Mahé, G., Gal, L. et al. (2018). Evolution of surface hydrology in the sahelo-sudanian strip : An updated review ». *Water* 10 (6) : 748. <https://doi.org/10.3390/w10060748>. Disponible sur www.mdpi.com/journal/water.
- Descroix, L. (2018). Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'ouest soudano-sahélienne. *Paris : EAC*, 320 p. ISBN 978-2-8130. <https://doi.org/10.17184/eac.9782813003140>.
- Dezetter, A. (1996). Les enjeux de la gestion des ressources en eau en milieu semi-aride. *XII^e journées hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, 10-11 octobre, 25 p.

- D'Herbès, J-M. (1997). La brousse tigrée au Niger : synthèse des connaissances acquises. Hypothèses sur la genèse et les facteurs déterminants les différentes structures contractées. In : *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. D'Herbès, J-M., Ambouta, J. M. K. et Peltier, R. John Libbey Eurotext, Paris, 1997. P. 274.
- D'Herbès, J-M., Ambouta, J. M. K. et Peltier, R. (1997). *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. Ed. John Libbey Eurotext. Paris, 274 p.
- D'Herbès, J-M., Ehrmann, M., Galle, S., Peugeot, C., Seghieri, J. et Valentin, C. (1997). Modèles de paysage et modèles de ruissellement pour une brousse tigrée Nigérienne. *ORSTOM*, pp. 557-563.
- Doamba, S. M. F., Nacro, H. B., Sanon, A. et Sedogo, M. (2011). Effet des cordons pierreux sur l'activité biologique d'un sol ferrugineux tropical lessivé (Province du Kouritenga au Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5 (1) : 304-313, ISSN 1991-8631. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v5i1.68106>.
- Doolittle, J. A. et Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Elsevier, Geoderma* 223–225, pp. 33-45. doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027.
- Douzals, J-P. (2000). « Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision ». *Comagref et l'Enesad, Ingénieries - EAT - n° 24*, pp. 45-52.
- Dugué, P., Nana, P. D., Faure, G. et Le Gal, P-Y. (2015). Dynamics of adopting conservation agriculture in family farms : from technique to innovative process. *Cahiers Agricultures* 24 (2) : 60-68. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0748>.
- El Oumri, M. et Vieillefon, J. (1983). Etude Expérimentale d la Conductivité Electrique Globale des Sols. Application à l'Estimation de Leur Salinité. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol* 10 (2) : 91–108.
- Loireau, M. (1998). *Espaces - Ressources - Usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*. 1998. Thèse de doctorat, Université Paul Valéry-Montpellier III, 411 p. doi.org/10.4000/books.irdeditions.8658.
- Estèves, M. et Lenoir, F. (1994). Un exemple de fonctionnement hydrologique dans la région de Niamey : le bassin de Sama Dey. *X^e journées hydrologiques - Orstom*, 225-39.
- Esteves, M. et Rajot, J. L. (1999). Un exemple de cartographie de l'aptitude au ruissellement en région sahélienne : Sama Dey, Niger. *Hydrological Sciences Journal* 44 (2) : 297-312. doi.org/10.1080/02626669909492223.
- Esteves, M. (2003). *Le ruissellement : de l'observation à la modélisation*. HDR, Science de la planète, Université Joseph Fourier-Grenoble I, 198 p.
- Esteves, M. et Lapetite, J. (2003). A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment : A case study in Niger. In : Poesen, J. (ed.), Valentin, C. (ED.). Gully erosion and global change. *Catena*, 50 (2-4), 255-271. Symposium on Gully Erosion and Global Change, Louvain (BEL), 2000/04/16-19. ISSN 0341-8162. [doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00136-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00136-4).

FAO (2015). Les sols sont une ressource non renouvelable. Leur préservation est essentielle pour garantir la sécurité alimentaire et un avenir durable, 4 p.

Favreau, G. (2000). *Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger)*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 258 p.

Flaounas, E. (2012). *Analyse du mécanisme de la mise en place de la mousson Africaine : dynamique régionale ou forçage de grande échelle ?* Océan, Atmosphère. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 199 p.

Fontaine, B., Roucou, P., Camara, M., Vigaud, N., Konaré, A., Ibrah Sanda, S., Diedhiou, A. et Janicot, S. (2012). Variabilité pluviométrique, changement climatique et régionalisation en région de mousson africaine. *La Météorologie* 8 (Special-AMMA) : 41 p. <https://doi.org/10.4267/2042/48131>.

Frédéric, B., Hakizimana, P. et Bogaert, J. (2012). De la conservation à la restauration écologique : Démarche méthodologique. *Centre d'Echange d'Informations en matière de Diversité Biologique, CHM (Clearing House Mechanism)*. *Bull. sci. Inst. natl. environ. Conserv. nat.* 10 : 20-24.

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H. et Taya, N. (1999). « The micro-structures of clay given by resistivity measurements ». *Engineering Geology* 54 (1) : 43-53. [doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00060-5).

Gal, L. (2016). *Modélisation de l'évolution paradoxale de l'hydrologie sahélienne.* » Thèse de doctorat, Université de Toulouse. 225 p.

Galle, S. (1991). Premier rapport de campagne 1991 : fonctionnement hydrodynamique du bassin versant de Sama Dey. *Hapex-Sahel*, 26 p.

Galle, S. Seghier, J. et Mounkaila, H. (1997). *Fonctionnement hydrologique et biologique à l'échelle locale : cas d'une brousse tigrée au Niger.* pp. 105-118. In : *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. D'Herbès, J. M., Ambouta, J. M. K., Peltier, R. John Libbey Eurotext, Paris © 1997, 274 p.

Ganaba, S. (2005). Impact des aménagements de conservation des eaux et des sols sur la régénération des ressources ligneuses en zone sahélienne et nord soudanienne du Burkina Faso. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, volume 6 numéro 2, 17 p. doi.org/10.4000/vertigo.4314. [En ligne sur <http://journals.openedition.org/vertigo/4314>]

Garenne, M. et Ferdi, S. (2016). La pression de la population dans les pays sahéliens francophones : Analyse des estimations et projections de population 1950-2100. *Ferdi Working paper n°168*, 28 p.

Gasser, M-O., Belzile, L., Martel, S., Perron, M-H., Grondines, H. et Grenier, M. (2015). Améliorer la productivité des sols par le sous-solage pour réduire les émissions de GES. Rapport final déposé au MAPAQ en vertu du programme Prime-Vert, sous-volet 8.4. Institut de recherche et développement en agroenvironnement, Québec. 28 p.

Gasser, M-O., Perron, M-H. et Grenier, M. (2012). Effets bénéfiques combinés du sous-solage et des cultures à racines profondes pour décompacter le sol et améliorer la productivité des

cultures. Rapport final. Projet CDAQ 6309 Défi-solution financé dans le cadre du PASCAA d'AAC. Québec. 60 p.

Gaudin, R. et Brouwers, M. (2003). « L'eau utile et les caractéristiques hydrodynamiques des sols sous culture de canne à sucre ». *Littérature grise. Agriculture et développement*, n° 24 : pp. 30-38.

Gavaud, M. (1975). *Sols et pédogenèse au Niger méridional*. Paris, ORSTOM, Tome1, 1146 p.

Gemenne, F., Blocher, J., De Longueville, F., Vigil Diaz, S., Zickgraf, C., Gharbaoui, D. et Ozer, P. (2017). Changement climatique, catastrophes naturelles et déplacements de populations en Afrique de l'Ouest. *Géo-Eco-Trop : Revue Internationale de géologie, de Géographie et d'Ecologie Tropicales*, Université de Liège. AIPA. Vol./Tome 41, 22 p.

Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., Naessens, F., Rénié, S., Dubéarnes, B., Bégassat, P. et Naudet, V. (2011). « Suivi par tomographie de résistivité électrique d'une couverture de centres de stockage de déchets à l'échelle d'un site expérimental ». *Journées scientifiques GFHN-GEOFCAN 2011 "Milieux poreux et Géophysique"*, Orléans, France. pp. 1-4.

Giot, G. et Cousin, I. (2012). Méthode d'étalonnage des réflectomètres de teneur en eau CS616 pour la mesure et le suivi de l'humidité du sol sur le site atelier OS². *Le cahier des techniques de l'INRA (77)*, n° 3 : 17.

Givone, P. (2005). Détermination des risques d'inondation, effets de l'aménagement de l'espace. *Comptes Rendus Géoscience* 337 (1-2) : 229-41. doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.007.

GIZ (2015). 25 ans de réhabilitation et de conservation des sols au Sahel. Soutien aux efforts des populations rurales du Niger. 40 p.

Glättli, S. (2005). Méthodes et outils pour faciliter l'échange de savoir entre spécialistes de conservation des eaux et sols et agriculteurs sur la gestion durable des sols au Niger, Afrique de l'Ouest. *Center for Development and Environment (CDE)*, 179 p.

Goulet, E. et Barbeau, G. (2006). Contribution of soil electric resistivity measurements to the studies on soil/grapevine water relations. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 40, n°2, 57-69. <https://doi.org/10.20870/oenone.2006.40.2.875>.

Gratton, Y. (2002). Le krigeage : la méthode optimale de l'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, 4 p.

Gray, D. M., Norum, D. I. et Migham, J. M. (1972). « Infiltration et physique de l'écoulement de l'eau en milieux poreux ». In : D. M. Gray (ed.), *Manuel des principes d'hydrologie : portant une attention spéciale aux conditions canadiennes dans les discussions, les applications, présentation des données*, Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale (chapitre V), Ottawa, Canada.

Greigert, J. (1961). *République du Niger. Carte géologique de reconnaissance du bassin des Iullemeden*. BRGM, Paris-Niamey, 523 p.

Greigert, J. (1966). *Description des formations crétaées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale)*. BRGM-Direction des mines et de la géologie-Paris-Niamey ; vol. 2, n°2, 234 p.

- Gresillon, J. M. (1996). Le bassin versant. Echelles d'analyse et compréhension des processus. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2 (3) : 3-15. doi.org/10.3406/morfo.1996.881.
- Gruhier, C. (2010). « *L'humidité du sol par télédétection micro-ondes en région Sahélienne* ». Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, 122 p.
- Guérif, M. et King, D. (2007). *Agriculture de précision*. Editions Quae, Collection Updates sciences et technologies, 276 p.
- Guerin, R. (2007). Profondeur d'investigation en imagerie de résistivité électrique. *6^{ème} colloque Geofcan-25-26-Bondy*, France, pp. 27-30.
- Guerrero, O., Marache, A., Lataste, J-F. et Breysse, D. (2012). « Combinaison géostatistique de méthodes géophysique pour la reconnaissance optimisée des sols. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012-Bordeaux 4-6 juillet*, pp. 753-760.
- Guerrero, O. (2014). *Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain*. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, p. 253.
- Guyomard, H., Huyghe, C., Peyraud, J-L., Boiffin, J., Coudurier, B., Jeuland, F. et Urruty, N. (2013). Vers des agricultures à hautes performances. Evaluation des performances de pratiques innovantes en agriculture conventionnelle. Volume 3, *INRA*, Paris 3 (version 16) : 342.
- Hamza, A, et Mamou, H. (1995). Rôle des ouvrages de conservation des eaux et du sol dans la lutte contre les inondations. In : Zekri S. (ed.), Laajimi A. (ed.). *Agriculture, durabilité et environnement*. Zaragoza : *CIHEAM*, 1995. p. 87-96 (*Cahiers options Méditerranéennes* ; n° 9). Article disponible en ligne à l'adresse : <http://om.cih.eam.org/article.php> ?
- Heil, K. et Schmidhalter, U. (2012). Characterisation of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site. *Computers & Geosciences* 39, 98-110.
- Heil, K. et Schmidhalter, U. (2017). The Application of EM38 : determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. *Sensors*, 17, 2540, 1-44. Doi :10.3390/s17112540 44.
- Hénin, S., Bouchet, R. J., Hallaire, M., Féodoroff, A., Turc, L. et Darves-Bornoz, R. (1965). « Les échanges hydriques à l'interface sol-atmosphère et les problèmes de mesure de l'évapotranspiration et de l'infiltration ». *La Houille Blanche*, n° 3 : 275-94. <https://doi.org/10.1051/lhb/1965025>.
- Heusch, B. (1986). Cinquante ans de banquettes de D.R.S.C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol*, vol. XXII, n° 2, 153-16.
- [Http : //www.sols-mesures.com](http://www.sols-mesures.com). s. d. « Accueil - Sols mesures ». Consulté le 2 février 2019.
- Hudson, N. W., Roose, E. (1990). « *Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides*. Bulletin pédologique de la Fao 57, 202 p.
- Ichaou, A., et D'Herbès, J.-M. (1997). Productivité comparée des formations structurées et non structurées dans le Sahel nigérien : Conséquences pour la gestion forestière. pp. 119-130. In :

fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens/sous la direction de J. M. d'Herbès. John Libbey Eurotext, Paris, 1997. P. 274.

Ichaou, A. (2000). *Dynamique et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'Ouest nigérien*. Thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse III, 231 p.

Ichaou, A. (2004). *Aménagement Participatif et Gestion Décentralisée des Forêts Naturelles pour la production de bois-énergie : Capitalisation de l'expérience nigérienne*. Programme régional de promotion des énergies domestiques et alternatives au Sahel (PREDAS), 53 p.

Ingatan Warzagan, A., Bouzou Moussa, I., Jean-Pierre Vandervaere, J.-V., Malam Abdou, M. & Faran Maiga, O. (2019). Réduction de ruissellement par augmentation des surfaces aménagées. *EWASH & TI Journal*, 2019 Volume 3 Issue 1, Page 36-46. *Env. Wat. Sci. Pub. H. Ter. Int. J.* ISSN Electronic Edition : 2509 - 1069. Accès on line : <http://revues.imist.ma/?journal=ewash-ti/>

Initiative pour l'Irrigation au Sahel (2iS) (2016). *Cadre Stratégique pour l'Eau Agricole au Sahel*. 58 p.

Jasechko, S. et Taylor, R. G. (2015). Intensive rainfall recharges tropical groundwaters. *Environmental Research Letters* 10 (12) : 124015, 7 p. [Doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015).

Job, J.-O., Loyer, J.-Y. et Ailoul, M. (1987). « Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols ». *Cah. ORSTOM, ser. Pédol.*, vol. XXIII, n° 2, pp. 123-131.

Job, J. O., Hachicha, M. et Loyer, J.-Y. (1990). « Conductivimétrie électromagnétique et cartographie de la salinité des sols ». *ORSTOM*, n° 31 : 33 p.

Job, J. O., Tabbagh, A. et Loyer, J. Y. (1992). Réalisation d'un conductivimètre électromagnétique à faible pénétration. *ORSTOM*, 17 p.

Job, J. O., Tabbagh, A. et Hachicha, M. (1995). Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué. *Canadian Journal of Soil Science* 75 (4) : 463-69. [Doi.org/10.4141/cjss95-067](https://doi.org/10.4141/cjss95-067).

Job, J. O., Barrios, J. L. G. et Gonzales, M. R. (1997). Détermination précise de la salinité des sols par conductivimétrie électromagnétique », pp. 143-145. In : *Géophysique des sols et des formations superficielles. Colloque geofcan* (suivi du fonctionnement et du comportement (pollution, risque...), 11-12 septembre 1997, Bondy, France.

Jodry, C. (2016). « *Développements méthodologiques pour l'imagerie et le suivi temporel par méthodes géoélectriques des structures de protection contre les inondations fluviales ou les submersions marines* ». Géophysique [physics. géo-ph]. Thèse, Université de Nantes, 259 p.

Jouve, P. (2004). La croissance démographique, frein ou opportunité pour une intensification agricole durable en Afrique subsaharienne ? Transition agraire et résilience des sociétés rurales ». *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n°52, pp. 101-106.

Kachanoski, R. G., Van Wesenbeeck, I. J. et De Jong, E. (1990). Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electric conductivity. *Can. J. Soil Sci.* 70, 537-41. [En ligne sur : <http://www.nrcresearchpress.com>]. [Doi/10.4141/cjss90-056](https://doi.org/10.4141/cjss90-056).

- Kagambega, F. W., Traore, S., Thiombiano, A. et Boussim, J. I. (2011). Impact de trois techniques de restauration des sols sur la survie et la croissance de trois espèces ligneuses sur les « zipellés » au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5 (3) : 900-914. Doi.org/10.4314/ijbcs. V5i3.72174.
- Karimata, S. (2001). *Guide technique de la conservation des terres agricoles. Redonner au sol sa productivité dans une perspective durable*. Documentation technique de la JGRC Générer l'abondance dans le Sahel par la lutte contre la désertification, vol. 5. 77 p.
- Keddar, A., Touaibia, B. et Arabi, M. (2011). Degré d'impact des aménagements hydrauliques sur le ruissellement et le transport solide dans une région semi-aride : cas des micro-bassins dans le haut Isser, Algérie. *Afrique SCIENCE* 07(3), 55-62.
- Keller, G. V. et Frischknecht, F. C. (1966). « *Electrical methods in geophysical prospecting* ». Oxford : Pergamon Press Inc., collection international series in electromagnetic waves, 538 p.
- Kergreis, A. et Claude, J. (1991). *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride*. Universités francophones. Paris : John Libbey Eurotext. 342 p.
- Khlifi, S. (2008). Effet d'un ancien aménagement antiérosif de banquettes sur la production d'orge dans la région de Siliana (Tunisie centrale). *Agrosolutions* 19 (2) : 34-44.
- King, D., Bruand, A., Cousin, I. et Hollis, J. (2003). Rôle des propriétés physiques des sols et de leur variabilité sur les flux d'eau. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 10, 4, pp. 287-297.
- Koussa, M. (2018). Étude comparative entre les méthodes d'interpolation pour la cartographie des Nitrates : cas d'application les eaux souterraines de Djelfa, Algérie. *Agriculture and Forestry Journal*, Vol. 2, Issue 1, pp. 18-25.
- Labrecque, K. (2011). *Cartographie numérique de l'humidité de surface des sols à l'échelle de la parcelle agricole à l'aide de la télédétection et de la prospection électrique*. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec, INRS Eau Terre Environnement, 82 p.
- Labreuche, LE Souder, J. C., Castillon, P., Ouvry, J. F., Real, B., Germon, J. C. et Tourdonnet, S. (2007). Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France. *Perspectives Agricoles - N°397* : 19-21.
- Lafore, J-P., Asencio, N., Bouniol, D., Couvreur, F., Flamant, C., Guichard, F., Hall, N. et al. (2012). Évolution de notre compréhension du système de mousson ouest-africain. *La Météorologie* 8 (Special-AMMA) : 11. Doi.org/10.4267/2042/48127.
- Lagacé, R. (2016). *Infiltration et Drainage*, [Notes de cours, GAA-703], Université de Laval, faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, 191 p.
- Lamachère, J-M. et Serpantié, G. (1991). Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi, pp. 165-178. In : *Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride*. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, 1991.
- Laperrousaz, C. et Barbiéro, L. (1999). Influence de la variabilité du faciès chimique sur la conductivité électromagnétique. 2^{ième} colloque GEOFCAN, BRGM, Orléans, France, pp. 63-66.

- Larwanou, M. et Mahamane, S. (2012). Impacts des activités de restauration des terres sur la végétation au Niger. *Journal des Sciences de l'Environnement*, 1, 7-13, 15 p.
- Lasserre, F. et Brun, A. (2007). La gestion par bassin versant : un outil de résolution des conflits ? *Lex Electronica*, vol. 12 n°2, 19 p.
- Lawan, K. G., Bacci, M. et Mouhaimini, M. (2014). Projet adaptation au changement climatique, prévention des catastrophes et développement agricole pour la sécurité alimentaire. Caractérisation climatique de la région de Tillabéry : Projet ANADIA, rapport n°1, 34 p.
- Lebel, T. et Vischel, T. (2005). Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle. *Comptes Rendus Géoscience* 337 (1-2) : 29-38. Doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.011.
- Leduc-Leballeur, M. (2012). *Influence océanique du golfe de Guinée sur la mousson en Afrique de l'Ouest*. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 153 p.
- Léonard, J. (2000). *Interaction entre le ruissellement et les macropores créés par les termites dans le cas d'un sol encroûté au Sahel. Etude expérimentale et modélisation*. Thèse, Université Paris VI, 161 p.
- Leprun, J-C., Rodrigues, B. et Silva, E. (1995). Les dégradations des sols en régions semi-arides au Brésil et en Afrique de l'Ouest : Comparaison et conséquences, suggestions sur leurs réhabilitations respectives, pp. 267-291. *In* : *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?* R. Pontanier, A. M'Hiri, N. Akrimi, J. Aronson, E. Le Floch, John Libbey Eurotext, Paris © 1995, 455 pages.
- Lesaignoux, A. (2010). *Estimation de l'humidité de surface des sols nus à partir de l'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale sur le domaine optique 0,4-14 µm*. Thèse, Université de Toulouse, 226 p.
- Lilin, C. (1986). Evolution des pratiques de conservation des sols dans les pays en développement », pp. 79-82. *In* : *Actes du III^{ème} Séminaire, Montpellier 16 - 19 décembre 1986, Tome I*, 8. Collection Documents Systèmes Agraires, CIRAD, n°6.
- Loireau, M., D'Herbès, J.-M. et Delabre, E. (2000). Evolution et place de la jachère à travers une analyse spatiale des interactions ressources-usages au Sahel agro-pastoral nigérien. *John Libbey Eurotext*, Paris © 2000, pp. 32-42.
- Maazou, R., Rabiou, H., Issiaka, Y., Abdou, L., Idi Saidou, S. et Mahamane, A. (2017). Influence de l'occupation des terres sur la dynamique des communautés végétales en zone Sahélienne : cas de la commune rurale de Dantchandou (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 11 (1) : 79. Doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.7.
- Mahamane, A. et Ada, L. (1999). Les ressources forestières naturelles et les plantations forestières au Niger. Programme de partenariat CE-FAO (1998-2002), Rapport FAO. 51 p.
- Mahe, G. Diello, P., Paturel, J.-E., Barbier, B., Karambiri, H., Dezetter, A., Dieulin, C. et Rouche, N. (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. *Sécheresse* ; 21 (4) : 330-221 : 3.

- Mahé, G. et Paturel, J.-E. (2009). 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of sahelian rivers ». *Surface geosciences (Hydrology - Hydrogeology)*, Elsevier Masson SAS, C. R. *Geoscience* 341 : 538-546. Doi.org/10.1016/j.crte.2009.05.002.
- Malagnoux, M. (2004). Restauration des terres arides dégradées pour la production agricole, forestière et pastorale grâce à une nouvelle technique mécanisée de récolte des eaux pluviales. *FAO*, 12 p.
- Malam Abdou, M. (2014). *Etats de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire*. Thèse de doctorat, Thèse en cotutelle entre l'Université de Grenoble-Alpes et l'Université de Niamey. 268 p.
- Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Descroix, L., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Abdou, S., Seyni, B., Laouali, M. et Daouda, O. (2015). Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé du Niger. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 19 (3), 270-280.
- Malam Abdou, M. (2016). Hausse des écoulements sur le bassin versant de Dargol : entre facteurs anthropique et climatique. *Revue de Géographie de l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO* N° 05- Oct. 2016, Vol. 2 : 19-44.
- Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Bouzou Moussa, I., Descroix, L., Mamadou, I., et Faran-Maiga, O. (2016). Genèse des écoulements sur deux petits bassins versants cristallins de l'Ouest du Niger : approche multi-échelles du fonctionnement hydrodynamique. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 22 (4) : 363-75. Doi.org/10.4000/geomorphologie.11537.
- Malam Abdou, M. (2016). Production du ruissellement sur un sol sableux cultivé après sarclage au Sahel. *Etude et Gestion des Sols, Volume 23 - pages 101 à 112*.
- Malam Abdou, M., Ibrahim, M. B., Maiga, O. F., Bello, S. M., Mamadou, I., Abba, B., Bouzou Moussa, I. et Descroix, L. (2018). Variabilité climatique et dynamique interannuelles des mares et ravines en zones cristalline et sédimentaire de l'Ouest du Niger. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 31, 108 - 122, 108-22.
- Mamadou, I. (2012). *La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger*. Thèse, Université de Niamey et Université Paris 1, 290 p.
- Mamadou, I., Gautier, E., Descroix, L., Noma, I., Bouzou Moussa, I., Faran Maiga, O., Genthon, P., Amogu, O., Malam Abdou, M. et Vandervaere, J.-P. (2015). Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel. *Elsevier, Catena* 131 : 130-39. Doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.017.
- Maman, I., Malam Abdou, M. et Bouzou Moussa, I. (2019). Pratiques agricoles et hydrodynamique des sols dans le bassin versant de Ouama, Niger. *Afrique SCIENCE* 15 (3) 302 - 311.
- Martinaud, M. (1997). « La pratique de la méthode électrique par une unité de service en prospection archéologique. [Choix des quadripôles et exemples de résultat] : Choix des quadripôles et exemples de résultat ». *Revue d'Archéométrie* 21 (1) : 5-20. Doi.org/10.3406/arsci.1997.942.

- Martini, E., Werban, U., Zacharias, S., Pohle, M., Dietrich, P. et Wollschläger, U. (2017). « Repeated electromagnetic induction measurements for mapping soil moisture at the field scale : validation with data from a wireless soil moisture monitoring network ». *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 495–513. Doi : 10.5194/hess-21-495-2017
- Massuel, S., Favreau, G., Descloitres, M. et LE Troquer, Y., Abdouy Y. et Cappelaere, B. (2003). Infiltration profonde à travers une zone d'épandage sableuse de versant au Niger semi-aride : évidence par modélisation hydrologique et reconnaissance géophysique. In : Géophysique des sols et des formations superficielles. *Geofcan : actes du 4^{ième} colloque*. Paris (FRA) ; 2003/09/23-24, Paris : Université Pierre et Marie Curie ; IRD, 46-49.
- Massuel, S., Seguis, L., Niel, H., Cappelaere, B., Delclaux, F. et Peugeot, C. (2003). Typologie de bassins versants en préalable à la modélisation hydrologique d'une région sahélienne. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions. IAHS*, pub. n°278. pp. 57-162.
- Massuel, S. (2005). *Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 239 p.
- Massuel, S., Cappelaere, B., Favreau, G., Leduc, C., Lebel, T. et Vischel, T. (2011). Integrated surface water–groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer. *Hydrological Sciences Journal* 56 (7) : 1242-64. Doi.org/10.1080/02626667.2011.609171.
- May, J. F., et Guengant, J.-P. (2014). Les défis démographiques des pays Sahéliens. *Etudes, Cairn.info*, pp. 19-30. [Article disponible sur : <https://www.cairn.info/revue-etudes-2014-6-page-19.htm>].
- Mazzucato, V. et Niemeijer, D. (2001). Le Sahel : une dégradation des terres exagérée, un potentiel paysan sous-estimé. 30 p. [En ligne sur : <https://www.researchgate.net/publication/40138216>].
- McNeil, J. D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. *Technical note TN-6*, 15 p.
- Mélanie, W. (2005). *Caractérisation des propriétés hydrodynamiques et étude de la possibilité d'agrégation de trois types de sols au Fakara, Niger*. Mémoire de fin d'étude, Université catholique de Louvain, 102 p.
- Mermet, L. et Treyer, S. (2001). Quelle unité territoriale pour la gestion durable de la ressource en eau ? Bassin versant, approche géographique la plus évidente. La plus pertinente ? *Annales des mines*, pp. 67-79.
- Mermoud, A. (2006). « *Etat de l'eau du sol* », Cours de physique du sol, école polytechnique Fédérale de Lausanne, [site Web du cours de physique du sol] < <https://www.epfl.ch> >.
- Michel-Guillou, (2011). La construction sociale de la ressource en eau. *Pratiques Psychologiques* 17 (3) : 219-36. Doi.org/10.1016/j.prps.2010.04.001.
- Michot, D., Dorigny, A. et Benderitter, Y. (2001). Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un CALCISOL de Beauce

irrigué. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes/Earth and Planetary Sciences* 332, 29-36.

Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D. et Tabbagh, A. (2003). « Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography : soil water study using electrical resistivity ». *Water Resources Research*, Vol. 39, N° 5, 1138 : 1-20. Doi.org/10.1029/2002WR001581.

Michot, D., Nicoullaud, B., Dorigny, A. et King, D. (2003). Analyse de la variabilité spatiale intra-parcellaire des sols par télédétection et prospections géophysiques. *INRA Orléans, Unité de Science du Sol BP 20619, 45166 Olivet cedex, France*, 4 p.

Michot, D., King, D., Nicoullaud, B., Dorigny, A., Bourennane, H., Cousin, I., Courtemanche, P. et al. (2007). Apport des méthodes géophysiques à la connaissance de la variabilité spatiale et du fonctionnement hydrique des sols, pp. 43-58. In : Guérif, M. et King, D. *Agriculture de précision, Versailles : éditions Quae*, pp. 59-77, 2007, Update sciences & technologies, ISSN 1773-7923.

Mietton, M. (1986). Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. *Cah. ORSTOM. Sér. Pedol.*, XXII (2) : 181-96.

Milot, N., Létourneau, A. et Lepage, L. (2015). La gestion de l'eau par bassin versant au Québec : d'une théorie à sa pratique par les acteurs locaux. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement* [mis en ligne le 31 mars 2015, consulté le 25 février 2016]. URL : <http://tem.revues.org/2803> ; Doi : 10.4000/tem.2803.

Moeys, J, B Nicoullaud, A Dorigny, et Y Coquet. (2006). « Cartographie des sols à grande échelle : Intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique ». *Etude et Gestion des Sols, volume 13, 4*, pp. 269-286.

Monfort, M. (1997). *Etude des relations entre les aquifères du Continental Terminal au Nord de Niamey (Niger) : Approche géologique, géochimique et hydrodynamique*. Mémoire de DEA, Université Paris Sud, 121 p.

Montoroi, J P. (1997). Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol. *Étude et Gestion des Sols*, 4, 4, pp. 279-298.

Montoroi, J-P., Bellier, G. et Delarivière, J. L. (1997). Détermination de la relation résistivité électrique - teneur en eau au laboratoire : application aux sols de Tunisie centrale. *Colloque GEOFCAN, géophysique des sols et des formations superficielles*, Bondy, France, 8 p.

Mounirou, L. A., Yacouba, H., Karambiri, H., Paturel, J E., et Mahé, G. (2012). Measuring runoff by plots at different scales : understanding and analysing the sources of variation. *Comptes Rendus Géoscience* 344 (9) : 441-48. Doi.org/10.1016/j.crte.2012.08.004.

Moustapha, A. M. (2010). Rapport sur les techniques de captage de l'eau des pluies au Niger. 29 pages.

Musy, A. et Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Edition PPUR presses polytechniques, volume 6, 335 pages.

Musy, A. et Higy, C. (1998). « *Hydrologie appliquée* ». Editions H*G*A, Bucarest. 365 p.

- Musy, A., Higy, C. et Reynard, E. (2014). « *Hydrologie 1 - Une science de la nature - Une gestion sociétale* ». Collection Science et ingénierie de l'environnement, 2^e édition, 500 p.
- Nasri, S., Lamachère, J. M. et Albergel, J. (2004). Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Revue des sciences de l'eau*, 17 (2), pp. 265-289. <http://doi.org/10.7202/705534ar>.
- Nasri, S. (2007). Caractéristiques et impacts hydrologiques de banquettes en cascade sur un versant semi-aride en Tunisie centrale. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (6), pp. 1134-1145. [Doi.org/10.1623/hysj.52.6.1134](https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1134).
- Nazoumou, Y., Favreau, G., Mahaman M. A., et Maïnassara, I. (2016). La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger ? *Cahiers Agricultures* 25 (1) : 1500. Pp. 1-10. [Doi.org/10.1051/cagri/2016005](https://doi.org/10.1051/cagri/2016005).
- Nesbitt, S. W., et Zipser, E. J. (2003). The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements. *Journal of Climate* 16 (10) : pp. 1456-1475. [Doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<1456](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1456).
- Nicolas, M. (2010). « *Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais* ». Thèse de l'Université de Grenoble, 217 p.
- Ousseini, I. (2002). Erosion et conservation des sols dans la vallée du moyen Niger (République du Niger) : Interprétations préliminaires de mesures en parcelles et d'observations à l'échelle des petits et moyens bassins versants. *Department of Geography Tokyo Metropolitan University I-1 Minami-Ohsawa, Hachioji Tokyo 192-0397, Japon*, pp. 39-70.
- Oussible, M. et Bourarach, E. (2009). Impact de l'intensification agricole sous irrigation sur la qualité physique du sol ». *Symposium international « Agriculture durable en région Méditerranéenne (Agdumed)*, Rabat, Maroc, pp. 241-248.
- Ozer, A. et Ozer, P. (2005). Désertification au Sahel : crise climatique ou anthropique ? *Bull. Séanc. Acad. R. Sci. Outre-Mer Meded. Zitt. K. Acad. Overzeese Wet.* 51, pp 395-423.
- Ozer, P., Manzo, L. O., Didier Tidjani, A., Djaby, B. et Longueville, F. (2017). Evolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014). *Géo-Eco-Trop.*, 2017, 41, 3, n.s., pp 375-383.
- Panthou, G., Lebel, T., Vischel, T., Quantin, G., Sane, Y., Ba, A., Ndiaye, O., Diongue-Niang, A. et Diopkane, M. (2018). Rainfall intensification in tropical semi-arid regions : The sahelian case. *Environmental Research Letters*, 13 (6) : 064013, 9 p. [Doi.org/10.1088/1748-9326/aac334](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334).
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., Quantin, G. et Molinié, G. (2014). Characterising the space–time structure of rainfall in the Sahel with a view to estimating IDAF Curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (12) : pp. 5093-5107. [Doi.org/10.5194/hess-18-5093-2014](https://doi.org/10.5194/hess-18-5093-2014).
- Panthou, G. (2013). *Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années*. Thèse, Université de Grenoble Alpes, 270 p.

- Papy, F. et Torre, A. (2002). Quelles organisations territoriales pour concilier production agricole et gestion des ressources naturelles ? *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, INRA, 33, pp.151-169.
- Parate, H. R. (2016). *Fied investigations and modeling of flow in vadose zone in a forested watershed*. A thesis, Department of Civil Engineering_Indian Institute of Science, p. 269.
- Perez, P., Todoroff, P., Touma, J. et Fortier, M. (1999). Caractérisation hydrodynamique d'un sol encroûté en zone sahélienne. 1. Approche expérimentale in situ. *Agronomie*, 19 (5), pp. 331-40. Doi.org/10.1051/agro :19990501.
- Peugeot, C. (1995). *Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant sahélien. - Expérimentations in-situ et modélisation*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I. 305 p.
- Peugeot, C., Esteves, M., Galle, S. Rajot, J.-L. et Vandervaere, J.-P. (1997). Runoff generation processes : results and analysis of field data collected at the east central supersite of the HAPEX-Sahel Experiment. *Journal of Hydrology*, 188-189 : pp. 179-202. Doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03159-9.
- Peugeot, C., Cappelaere, B., Vieux, B. E., Séguis, L. et Maia, A. (2003). Hydrologic process simulation of a semi-arid, endoreic catchment in Sahelian West Niger. 1. Model-Aided Data Analysis and Screening. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4) : pp. 224-43. Doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00181-1.
- Poncet, Y. (1986). *Images spatiales et paysages sahéliens : une étude régionale des milieux naturels par télédétection, Azawagh, République du Niger*. Collection Travaux et documents, n° 200. Paris : ORSTOM, 255 p.
- Pouvaud, B., Albergel, J., Camus, H., Chevallier, P. et Lamachère, J.-M. (1995). La réhabilitation des régimes hydriques et hydrologiques des terres semi-arides dégradées. *John Libbey Eurotext*, Paris © 1995, pp. 49-64.
- Rebai, H., Raclot, D. et Ben Oueddou, H. (2013). Efficacité des aménagements de lutte contre le ravinement : cas du bassin versant d'El Hnach (Tunisie) ». *Hydrological Sciences Journal* 58 (7) : 1532-41. Doi.org/10.1080/02626667.2013.824087.
- Redelsperger, J-L., Diedhiou, A., Flamant, C., Janicot, S., Lafore, J.-P., Lebel, T., Polcher, J. et al. (2006). AMMA, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine ». *La Météorologie* 8 (54) : 22-32. Doi.org/10.4267/2042/20098.
- Reedy, R. C., et Scanlon, B. R. (2003). Soil water content monitoring using electromagnetic induction ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129 (11) : 1028-39. Doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129 :11(1028).
- Rey, E. (2005). *Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques*. Thèse, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 247 p.
- Reynolds, J. M. (2011). An introduction to Applied and environmental geophysics. *Second Edition*, Wiley-Blackwell, Chichester. 696 p._

- Rhoades, J. D. et Corwin, D. L. (1981). Determining soil electrical conductivity depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 45, pp. 255-260*. Doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020006x.
- Richard, G., Cosenza, P. et Aboubacar, A. 2014. « Etude des variations de résistivité électrique d'un sol limoneux en fonction de sa teneur en eau et de sa porosité ». Pp. 5-8.
- Rodriguez, F., Augris, P., Flahaut, B., Jankowsky, S., Lebouc, L., Mosset, A., Pineau, L., Rouaud, J., M. et Yilmaz, D. (2013). Apport des observations hydrologiques à différentes échelles en milieu urbain. *IFSTAR, GERS, Laboratoire Eau et Environnement*, 10 p.
- Roose, E. (1992). Diversité des stratégies traditionnelles et modernes de conservation de l'eau et des sols. Influence du milieu physique et humain en région soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. *ORSTOM*, pp. 481-506.
- Roose, E., Albergel, A., De Noni, G., Laouina, A. et Sabir, M. (2008). Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. *AUF, EAC et IRD éditeurs*, Paris : 425 pages.
- Roose, E. (2004). Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive : vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Synthèse Sécheresse ; 15 (1) : 9-18*.
- Roose, E., Duchaufour, H. et De Noni, G. (2012). *Lutte antiérosive : réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. IRD Éditions, Marseille, 758 p. Doi.org/10.4000/books.irdeditions.12419.
- Roose, E., Kabore, V. et Guenat, C. (1995). Le zaï, une technique traditionnelle africaine de réhabilitation des terres dégradées de la région soudano-sahélienne (Burkina-Faso). *Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, n°2, pp. 159-173*.
- Roose, E., Zougmore, R., Stroosnijder, L., Dugué, P. et Bouzou-Moussa, I. (2015). Techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols dégradés en régions semi-arides d'Afrique occidentale. In : Roose, E., (ED.). *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie*. Montpellier : IRD, p. 399-420.
- Royer, J. M. et Vachaud, G. (1974). Détermination directe de l'évaporation et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des succions. *Hydrological Sciences, Bulletin 19 (3) : 319-36*. Doi.org/10.1080/02626667409493919.
- Samandougou, Y., Kabore-Zoungana, C., Zoundi, S. J. et Sohero, A. (2010). Contribution de la récupération des parcours dégradés par les cordons pierreux associés sous-solage à l'amélioration de la production du fourrage naturel. *Rev. Ivoir. Sci. Technol., 16 : 227-241*.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, et G. Richard. (2005). « Electrical resistivity survey in soil science : A review ». *Soil and Tillage Research 83 (2) : 173-93*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>.
- Sanches, G. M., Magalhães, P. S. G., Remacre, A. Z. et H. C. Franco, C. J. (2018). Potential of apparent soil electrical conductivity to describe soil spatial variability in Brazilian sugarcane fields. *Proceedings of the 14 th International Conference on Precision Agriculture*, Montreal, Quebec, Canada, pp. 1-15.

- Sanda, R. A. et Mamadou, I. (2019). Impacts des aménagements antiérosifs sur les ravinements issus de deux plateaux du bassin versant de Boubon au Niger. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 34 : 421 - 436.
- Saoud, M. (2014). *Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chéouf*. Mémoire de Magister en sciences agronomiques, école nationale supérieure agronomique El-Harrach – Alger, 96 p.
- Sarr, A. B., et Camara, M. (2017). Evolution des indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de modèles climatiques régionaux du programme CORDEX : Les projections climatiques sur le Sénégal. *European scientific journal* 13 (17). Pp. 206-222. Doi.org/10.19044/esj.2017.v13n17p206.
- Sawadogo, H., Bock, L., Lacroix, D. et Zombré, N. P. (2008). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12 (3), 279-290.
- Sawadogo, H. et Janvier, K. (2011). Revue de littérature sur les techniques de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso. *I.N.E.R.A, Burkina Faso. Revue des technologies au Burkina Faso*, 19 P.
- Scarwell, H.-J. et Laganier, R. (2004). *Risque d'inondation et aménagement durable du territoire*. Presses universitaires du Septentrion, collection : environnement et société. Villeneuve d'Ascq, 240 pages. Doi : 10.4000/books.septentrion.15670.
- Schneider, S. (2010). *Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique*. Thèse, Sciences de la Terre. Université Paris Sud - Paris XI, 143 p._
- Seghieri, J. (1996). Rythmes saisonniers d'une savane soudano-sahélienne en relation avec l'hydrodynamique du sol. *Ecologie*, t. 27 (2) : 67-78.
- Seghieri, J., Galle, S. et Rajot, J.-L. (1996). La brousse tigrée dans le Sahel nigérien : étude de la co-fluctuation du stock hydrique et de la végétation annuelle. *Xe journées hydrologiques-Orstom*, pp. 123-141.
- Seguis, L., Cappelaere, B., Peugeot, C., Leduc, C. et Milesi, G. (2003). Influences de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin sahélien ». *IAHS*, publ. n° 278 : 429-34.
- Seladji, S., Cosenza, P., Richard, G. et Tabbagh, A. (2007). « Mesure et modélisation des variations de résistivité électrique d'un sol limoneux liées au tassement ». *6^e colloque GEOFCAN-25-26/09/2007-Bondy, France*, pp. 75-78.
- Seladji, S. (2010). *Caractérisation et suivi par méthodes géoélectriques de la dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement*. Géophysique Appliquée, Université Pierre et Marie Curie, 220 p._
- Sheets, K. R. et Hendrickx, J. M. H. (1995). Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resources Research*, 31 (10) : 2401-9.

Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Mamadou, I. et al. (2013). The Niger River Niamey flood of 2012 : The paroxysm of the Sahelian paradox ? *Sécheresse*, n° 1 : 3-13. Doi.org/10.1684/sec.2013.0370.

Simon, F-X. (2012). « *L'apport de l'outil géophysique pour la reconnaissance et la caractérisation des sites en archéologie préventive, méthodes et perspectives : exemples en Alsace* ». Thèse, spécialité : géophysique appliquée, Université Pierre et Marie Curie, 312 p.

Souley Yero, K. (2012). *Evolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger : Influence sur le cycle de l'eau*. Université de Grenoble, 231 pages.

Soumana, D., Soumana, I., Mahamane, A., Mahamane, S., Ambouta, J.-M. K. et Ichaou, A. (2011). Restauration de plages nues d'une brousse tachetée au Niger. *Afrique SCIENCE* 07 (1), pp. 77-92.

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R. K. S. et Drummond, S. T. (1999). Soil conductivity sensing on claypan soils : comparison of electromagnetic induction and direct methods. *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture. Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, pp. 979-990.* Doi.org/doi.org/10.2134/1999.precisionagproc4.c1b.

Sultan, B. (2011). *L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales*. HDR, Université Pierre et Marie Curie, 137 p.

Sultan, B., Baron, C., Dingkuhn, M., Sarr, B. et Janicot, S. (2005). La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. II : applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel. *Sécheresse*, vol. 16, n° 1, pp. 23-33.

Sultan, B. et Janicot, S. (2004). La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. I : mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse*, n° 4, vol. 15, pp. 321-30.

Taupin, J D, A Amani, et T Lebel. 1998. « Variabilité spatiale des pluies au Sahel : une question d'échelles. Approche expérimentale ». *IAHS*, Pub. n°. 252, pp 143-158.

Taylor, C. M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D. J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P. P., Janicot, S., Klein, C. et Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature* 544 (7651) : 475-78. Doi.org/10.1038/nature22069.

Telford, W. M., Geldart, L. P. et Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. 2 nd éd. *Cambridge University press*, 790 pages. Doi.org/10.1017/CBO9781139167932.

Toé, G. (2004). *Apport de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères de socle. Application au Burkina Faso*. Thèse de l'Université Paris 6, 282 p.

Torrekens, P., Brouwer, J. et Hiernaux, P. (1997). Evolution de la végétation spontanée sur plateaux latéritiques traités par des travaux antiérosifs dans le département de Dosso (Niger). pp. 235-246. *In* : fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens/sous la direction de J. M. d'Herbès. John Libbey Eurotext, Paris, 1997. P. 274.

Toure, A. A. (2011). *Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : dynamique actuelle et passée en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne. 224 p.

- Travelletti, J., Sailhac, P., Malet, J.-P., Grandjean, G. et Ponton, J. (2012). Hydrological response of weathered clay-shale slopes : Water infiltration monitoring with time-lapse electrical resistivity tomography. *Hydrological Processes* 26 (14) : 2106-19. Doi.org/10.1002/hyp.7983.
- Trichon, V., Hiernaux, P., Walcker, R. et Mougin, E. (2018). The persistent decline of patterned woody vegetation : The tiger bush in the context of the regional Sahel greening trend. *Glob Change Biol.* Pp. 1-16. 16. Doi.org/10.1111/gcb.14059.
- Trouche, G. (2017). « Sous-solage » Les Mots de l'agronomie. Sciences de la Terre. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2014. [Article mis en ligne le 13 mai 2017. Disponible sur <https://loexplor.istex.fr>].
- USAID (2006). Etude de la régénération naturelle assistée (RNA) dans la région de Zinder (Niger). 56 p.
- Valentin, C. (1994). Sécheresse et érosion au Sahel. *Sécheresse*, n°3, vol. 5. pp. 191-8.
- Valet, S. et Sarr, P. S. (2004). Le report hydrique comme principal critère de prédiction du rendement en zone soudano-sahélienne. *INSS Zone*, pp.174-195.
- Vandervaere, J-P., Jaramilo, A., Peugeot, C. et Vauclin, M. (1994). Caractérisation hydrodynamique in situ de sols encroûtés. *X^e journées hydrologiques-Orstom*, pp. 63-78.
- Vandervaere, J-P. (1995). *Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques : analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés*. Thèse, Hydrologie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 321 p.
- Vandervaere, J.-P., Peugeot, C., Vauclin, M., Angulo Jaramillo, R. et Lebel, T. (1997). Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrimeters and minitensiometers ». *Journal of Hydrology* 188-189 : 203-23. Doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03160-5.
- Vandervaere, J-P., Vauclin, M., Haverkamp, R., Peugeot, C., Thony, J-L. et Gilfedder, M. (1998). Prediction of crust-induced surface runoff with disc infiltrimeter data. *Soil Science* 163 : 9-21. Doi.org/10.1097/00010694-199801000-00003.
- Velluet, C. (2014). *Modélisation et analyse pluriannuelles du fonctionnement hydrologique et énergétique de deux écosystèmes dominants au Sahel agropastoral (Sud-Ouest Niger)*. Sciences de la Terre. Thèse de doctorat, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 310 p.
- Vieillard-Coffre, S. (2001). Gestion de l'eau et bassin versant : De l'évidente simplicité d'un découpage naturel à sa complexe mise en pratique. *Hérodote* 2001/3 (N°102), pp. 139-156. Doi.org/10.3917/her.102.0139. [Disponible sur <http://www.cairn.info/revue-herodote-2001-3-page-139.htm>].
- Vlaar, J. C. J. (1992). *Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel*. Rapport d'une étude effectuée dans le cadre de la collaboration entre le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Ouagadougou, Burkina Faso et Université Agronomique Wageningen (UAW), Wageningen, les Pays-Bas, 99 p.

- Vlotman, W. F. (2000). « *EM38 workshop proceedings* ». ILRI, The Netherlands, EM38 Workshoo, New Delhi, India. 94 p.
- Weill, A. (2014). Comprendre et réussir le sous-solage. CETAB+, Victoriaville, 45 p. Disponible sur : www.cetab.org/publications
- Willems, L. (2000). *Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale*. PhD Thesis, Université de Liège, Belgique. 116 p.
- Wubda, M. (2017). *Contribution de la méthode de suivi temporel de résistivité à l'étude des processus d'infiltration en zone de socle sahélienne et soudanienne d'Afrique de l'ouest*. Thèse, Université d'Abomey-Calavi, 187 p.
- Yadji, G. et Nomaou, D. L. (2006). Les projets de restauration des ressources naturelles et la fertilité des sols. *CRESA de Niamey*, 34 p.
- Yaméogo, J. T. (2012). *Réhabilitation d'écosystème forestier dégradé en zone soudanienne du Burkina Faso : impacts des dispositifs CES/DRS*. Université Polytechnique de Bobi-Dioulasso. 160 p.
- Yaméogo, J. T., Somé, A. N., Lykke, A. M., Hien, M. et Nacro, H. B. (2013). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et des cordons pierreux à l'Ouest du Burkina Faso. *Tropicultura* 31 (4) : 224-30.
- Yameogo, J. T., Hien, M., Mette Lykke, A., Some, A. et Thiombiano, A. (2011). Effet des techniques de conservation des eaux et des sols, Zaï forestier et cordons pierreux, sur la réhabilitation de la végétation herbacée à l'Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5 (1) : 56-71. Doi.org/10.4314/ijbcs. V5i1.68085.
- Yao, R. et Yang, J. (2010). Quantitative evaluation of soil salinity and its spatial distribution using electromagnetic induction method. *Science direct, Agricultural Water Management*, vol. 97, Issue 12, pp 1961-1970. Doi.org/10.1016/j.agwat.2010.
- Yao, R., Yang, J., Wu, D., Xie, W., Gao, P. et Jin, W. (2016). Digital mapping of soil salinity and crop yield across a coastal agricultural landscape using repeated electromagnetic induction (EMI) surveys. *PLOS ONE* 11(5) : E0153377., pp. 1-20. Doi.org/10.1371/journal.Pone.0153377.
- Zouré, C. O., Koïta, M., Niang, D., Baba, I. I., Roland, O., Dara, A. E., Fowé, T., Queloz, P. et Karambiri, H. (2017). Relationship between soil water content and crop yield under sahelian climate conditions : Case study of Tougou Experimental Site in Burkina Faso. *Journal of Advances in Physics* 13 (10) : 5177-84. www.ciworld.com.
- Zouré, C. O., Queloz, P., Koïta, M., Niang, D., Fowé, T., Yonaba, R., Consuegra, D., Yacouba, H. et Karambiri, H. (2019). Modelling the water balance on farming practices at plot scale : Case Study of Tougou Watershed in Northern Burkina Faso ». *Catena*, pp 59-70. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816218304296>.
- Zouré, C. O. (2019). *Etude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina Faso*. Thèse, Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 193 p.

Liste des Tableaux

Tableau 2.1. Evolution de l'occupation des sols entre 2009 et 2016 sur le bassin versant de Sama Dey	45
Tableau 2.2. Caractéristiques morphométriques des bassins versants de Tondi Kiboro.....	53
Tableau 3.1. Caractéristiques des trois banquettes expérimentales suivies.....	64
Tableau 3.2. Récapitulatif du dispositif de mesure de l'humidité et caractéristiques des sites.	66
Tableau 3.3. Expressions des estimateurs « non biaisés » de la régression linéaire.....	73
Tableau 3.4. Caractéristiques (dimensions et superficies) des parcelles des mesures de la conductivité électrique apparente.....	78
Tableau 3.5. Les caractéristiques du matériel de mesure (EM38).....	80
Tableau 3.6. Nombre des points de mesure de la conductivité apparente par parcelle.	87
Tableau 4.1. Cumul pluviométrique et nombre d'averses enregistrées durant les saisons des mesures.	113
Tableau 4.2. Pourcentage volumique de la texture des sols prélevés du témoin.....	114
Tableau 4.3. Pourcentage volumique de la texture des sols prélevés en fonction de la profondeur dans les banquettes.	114
Tableau 4.4. Pourcentage volumique de la texture des sols des surfaces de sous-solage.	115
Tableau 4.5. Paramètres statistiques de l'étalonnage de la sonde à neutrons.....	119
Tableau 4.6. Valeurs moyennes de stock hydrique, variance, incertitude moyenne et écart-type (débiaisé) obtenus par parcelle.	135
Tableau 5.1. Récapitulatif des régressions linéaires entre les rapports de conductivité électrique apparente (RCEav) et les variations du stock (ΔS) estimées entre 0-135 cm de profondeur pour les banquettes.....	165
Tableau 5.2. Récapitulatif des régressions linéaires entre les rapports de conductivité électrique apparente RCEav et les variations du stock (ΔS) estimées entre 0-135 cm de profondeur pour le sous-solage.....	168
Tableau 5.3. Résumé des coefficients des corrélations linéaires R2 entre le rapport moyen de la conductivité électrique apparente de la parcelle entière et les variations de stock (ΔS).	169
Tableau 5.4. Valeurs des coefficients (pente a et ordonnée à l'origine b) et leurs incertitudes pour la parcelle témoin.	171
Tableau 5.5. Résultats des estimations d'erreurs liées à l'étalonnage sur le témoin.	172
Tableau 5.6. Coefficients de la droite d'étalonnage moyen réalisé sur le témoin.	172
Tableau 5.7. Caractéristiques des régressions linéaires effectuées entre la conductivité apparente (CEav) et le stock hydrique et leurs incertitudes associées. a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine des droites.	173
Tableau 5.8. Résultats des calculs d'erreurs liées à l'étalonnage sur les banquettes.....	175
Tableau 5.9. Coefficients des droites d'étalonnage moyen valable par parcelle.....	176
Tableau 5.10. Caractéristiques des régressions linéaires effectuées entre la conductivité apparente (CEav) et le stock hydrique et leurs incertitudes associées. a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine des droites.	177
Tableau 5.11. Valeurs des différents termes d'erreurs permettant d'évaluer la qualité des régressions linéaires effectuées sur les surfaces de sous-solage.	179
Tableau 5.12. Coefficients des droites d'étalonnage moyennes élaborées sur le sous-solage. Intérieur ("in", tubes T2, T3 et T4) et extérieur ("out", tubes T1 et T5) de la zone travaillée.	180
Tableau 5.13. Principaux résultats des calculs des indicateurs de pluie.....	201

Tableau 6.1. Récapitulatif des relations pluie-lame écoulee avant et après aménagement sur le sous bassin TK amont Nord.	211
Tableau 6.2. Récapitulatif des relations pluie-lame écoulee avant (2013) et après (2014-2016) aménagement par sous-solage du sol sur TK amont Sud.	220

Liste des Figures

Figure 2.1. Contexte géologique (d'après Greigert, 1961, modifié) et localisation du site d'étude de Tondi Kiboro.....	23
Figure 2.2. Unités géomorphologiques du bassin sédimentaire, secteur de Banizoumbou.....	25
Figure 2.3. Vue d'un plateau à brousse tigrée dégradée dans le secteur de Tondi kiboro (Image Google Earth de 2009).	27
Figure 2.4. Processus hydrologiques majeurs à l'échelle d'une toposéquence typique de la brousse tigrée (d'après Peugeot et al., 2003).	30
Figure 2.5. Illustration du processus de morcellement de mares par des cônes d'épandage sableux dans le lit du kori Ouallam en zone sédimentaire (Malam Abdou et al., 2018).	31
Figure 2.6. Localisation des zones de rupture d'endoréique observée et supposée se produire au cours des dernières décennies dans la région de Niamey (d'après Mamadou et al., 2015).	32
Figure 2.7. Evolution de l'indice standardisé de la pluie (IPS) et de la moyenne mobile de la station de Niamey aéroport.	35
Figure 2.8. Evolution des pluies extrêmes et contribution de la part des pluies supérieures à 30 mm (P30) dans le cumul total annuel (d'après Panthou et al., 2014).	36
Figure 2.9. Températures moyennes minima et maxima pour la période 1990-2016	37
Figure 2.10. Evapotranspiration potentielle (ETP) à Niamey pour la période 1977-2005	37
Figure 2.11. Evolution de la population de la commune rurale de Dantiandou de 1977 à 2016. La population de 2016 est obtenue sur la base de projection (source : INS).	38
Figure 2.12. Distribution spatiale de la population dans l'espace (villages environnant le site d'étude) en 2018. Les villages écrits en rouge indiquent le secteur d'étude.	39
Figure 2.13. Progression des espaces agricoles (source : Gesforcom, Niger).	41
Figure 2.14. Cartes de la dynamique d'occupation des sols dans le bassin versant de Sama Dey entre 2009 et 2016 (secteur d'étude).	44
Figure 2.15. Défrichement et mise en culture des zones de plateau de Tondi Kiboro. Situations en septembre (à gauche) et en Novembre (à droite) 2019.	45
Figure 2. 16. Processus de dégradation de la végétation de plateau et ses conséquences.	47
Figure 2.17. Conséquences de l'augmentation de ruissellement sur le fonctionnement hydro-géomorphologique des unités en aval (secteur de Tondi Kiboro).	48
Figure 2.18. Les bassins versants étudiés et les instruments de mesure disponibles.....	49
Figure 2.19. Types d'activités pratiquées sur les unités géomorphologiques.	51
Figure 2.20. Quelques états de surface dominants rencontrés sur le plateau à brousse tigrée.	52
Figure 2.21. Principes de réalisation de la banquette et les outils utilisés.....	55
Figure 2.22. Pratique du sous-solage avec un tracteur ordinaire sur le sol nu du plateau.	57
Figure 3.1. Mesure de l'humidité du sol avec la sonde à neutrons.....	62
Figure 3.2. Installation des tubes d'humidité à l'aide d'une tarière motorisée.....	65
Figure 3.3. Emplacements des tubes de suivi de l'humidité du sol pour les parcelles de sous-solage et le témoin.....	67
Figure 3.4. Emplacement des tubes de suivi de l'humidité du sol pour une banquette.....	67
Figure 3.5. Sonde à neutrons et réflecteur en cours d'utilisation sur une parcelle de sous-solage (à gauche) et dans une banquette (à droite).	68
Figure 3.6. Principe de prospection électromagnétique (Chouteau et Giroux, 2008).	79
Figure 3.7. Profondeur d'investigation en fonction de la disposition des bobines (verticale ou horizontale) d'un système de mesure de résistivité électrique apparente du sol par induction électromagnétique	81
Figure 3.8. EM38, fiches de terrain et fil utilisés pour les mesures de la conductivité électrique par induction électromagnétique.	82

Figure 3.9. Protocole de suivi temporel de la conductivité électrique couplé à l'humidité du sol (sur les parcelles de sous-solage).....	85
Figure 3.10. Protocole de mesure de la conductivité électrique apparente (CEa) dans une banquette (B2).	86
Figure 3.11. Protocole de mesure de la conductivité électrique apparente sur la parcelle témoin.	87
Figure 3.12. EM38 en cours d'utilisation en mode vertical (a) et en mode horizontal (b) dans une parcelle de sous-solage.	88
Figure 3.13. Approche métrologique d'étalonnage en cascade mise en œuvre à l'échelle locale pour étalonner EM38.	93
Figure 3.14. Positions de l'EM38 autour du tube d'humidité neutronique.	94
Figure 3.15. Principe des quatre points plus proches voisins possibles des tubes mis en application sur une parcelle de sous-solage (exemple de la parcelle SL1).	95
Figure 3.16. Principe de détermination par régression linéaire des droites d'étalonnage de l'EM38 sur les parcelles du sous-solage.....	100
Figure 3.17. Principe de détermination des droites de régressions linéaires (étalonnage EM38) dans les banquettes (exemple de B1 & B2).	101
Figure 3.18. Principe de détermination par régression linéaire des droites d'étalonnage EM38 sur le témoin.....	102
Figure 3.19. Exemple d'une station de mesures de l'écoulement (BV TK amont Sud). La flèche montre le sens de l'écoulement.	105
Figure 3.20. Courbe de tarage de la station hydrométrique TK amont Nord (établie sur la base des mesures de jaugeage de 2006).....	108
Figure 3.21. Courbe de tarage de la station hydrométrique TK amont Sud.	109
Figure 4.1. Distribution des particules en fonction des profondeurs de mesures sur le témoin (a), les banquettes (b et d) et le sous-solage (c).....	115
Figure 4.2. Densité apparente en fonction de la profondeur de mesure sur les sites étudiés.	116
Figure 4. 3. Droites d'étalonnage de la sonde à neutrons à différentes profondeurs.....	118
Figure 4.4. Evolution de l'infiltration sur le sol nu pendant la saison 2017.....	120
Figure 4.5. Evolution de la dynamique du stock hydrique dans la parcelle témoin.	121
Figure 4.6. Valeurs moyennes (des trois tubes) des variations de stock hydrique à l'échelle locale de la parcelle témoin.	121
Figure 4.7. Stockage d'eau de ruissellement par des banquettes situées en aval d'une bande boisée dégradée (a), d'une bande en dégradation (b) et au milieu d'une surface de sol nu du plateau (b). ...	122
Figure 4.8. Rétention d'eau d'une banquette sur la zone dégradée en aval d'une bande boisée régulière.	123
Figure 4.9. Comparaison des profils de teneur en eau et du front d'infiltration mesurés dans trois zones distinctes de la banquette B1 en 2016 (a) et en 2017 (b).....	125
Figure 4.10. Représentation schématique et profils de teneur en eau volumique mesurés en 2017 selon les compartiments (faciès) d'une banquette (ici banquette B2).	126
Figure 4.11. Evolution de la teneur en eau volumique et du front l'infiltration sur les banquettes (B1 et B2).....	129
Figure 4.12. Evolution de la teneur en eau et du front l'infiltration sur la parcelle témoin.	129
Figure 4.13. Dynamique événementielle du profil hydrique dans une surface en banquette (B3) et sur le témoin.....	130
Figure 4.14. Pluies et évolution du stock d'eau (mm) dans la tranche 0-135 cm au cours du temps en amont des banquettes (B1, B2 & B3). Tube T1 (a) et Tube T2 (b).....	132
Figure 4.15. Pluies et évolution du stock d'eau (mm) dans la tranche de sol 0-135 cm au cours du temps en aval (tube T3) des banquettes.	133

Figure 4.16. Comparaison entre stock moyen \pm incertitude moyenne (a) et stock \pm écart-type débiaisé (b) des trois stocks moyennés des trois tubes de la banquette (B1) en fonction de temps (jour de mesure).	134
Figure 4.17. Comparaison entre stock moyen \pm incertitude moyenne (a) et stock \pm écart-type débiaisé (b) des trois stocks moyennés des trois tubes de la banquette (B3) en fonction de temps (jour de mesure).	135
Figure 4.18. Dynamique du stock et intervalle de confiance à 80 %, pour le tube T2 de la parcelle B1.	136
Figure 4.19. Variations de stock hydrique à l'échelle locale des banquettes et dans une surface témoin. Sont représentées sur cette figure les valeurs moyennes de ΔS des trois tubes.....	137
Figure 4.20. Effet d'une banquette sur l'évolution du couvert végétal	138
Figure 4.21. Effet d'une banquette sur la régénération du couvert végétal sur une zone dégradée en aval d'une bande boisée en dégradation.	139
Figure 4.22. Rétention d'eau en surface de la banquette corrélée au développement de la végétation sur le bourrelet.....	139
Figure 4.23. Comportement hydrique des surfaces dégradées sous l'effet du sous-solage.....	141
Figure 4.24. Processus de ré-encroûtement et apparition de ruissellement (photos de gauche et de droite) à l'échelle de parcelle sous-solée.	142
Figure 4.25. Effet du sous-solage sur l'amélioration des conditions d'humidité volumique de surface (0-5 cm) par rapport au témoin.	142
Figure 4.26. Evolution des profils de teneur en eau volumique (θ) et du front d'infiltration du sol sous parcelles de sous-solage (SL2) au cours du temps (saison 2016).....	144
Figure 4.27. Evolution des profils de teneur en eau volumique (θ) et du front d'infiltration sous parcelles de sous-solage (SL2) au cours du temps (saison 2017).....	144
Figure 4.28. Dynamique mensuelle des profils de teneur en eau obtenus sur quatre des six tubes installés dans les zones remaniées par sous-solage du sol en 2016.....	146
Figure 4.29. Dynamique saisonnière de la teneur en eau dans les parcelles du sous-solage (saison 2017).	147
Figure 4.30. Impact du sous-solage sur l'infiltrabilité du sol en amont (tube T1) et en aval (tube T5) pour les parcelles SL1 et SL2.	148
Figure 4. 31. Evolution du stock d'eau dans les parcelles de sous-solage au cours du temps.	150
Figure 4.32. Evolution au cours du temps du stock d'eau immédiatement en amont (tubes T1, en noir) et en aval (tubes T5, en rouge) des parcelles expérimentales (SL1 & SL2).....	151
Figure 4.33. Evolution du stock hydrique pour le sous-solage en fonction du temps (cas de la parcelle SL1).....	152
Figure 4.34. Evolution du stock hydrique pour le sous-solage en fonction du temps (cas de la parcelle SL2).....	152
Figure 4.35. Evolution du stock hydrique du sous-solage SL1 avec \pm écart-type spatial (débiaisé). .	153
Figure 4.36. Tube 2 de la parcelle de sous-solage SL1. Limites droite et gauche de l'intervalle de confiance IC à 80 % sur le stock.	154
Figure 4.37. Variation événementielle de stock hydrique en fonction de la pluie sur les parcelles de sous-solage SL1 et SL2 en comparaison avec le témoin	155
Figure 4.38. Impact du sous-solage sur la régénération du couvert végétal, parcelle SL1 en août 2016.	156
Figure 5.1. Variations de la conductivité électrique apparente verticale des profils (mesures prises en mode vertical) mesurés dans le sous-solage (SL1), dans les banquettes 1 & 2 et sur le témoin.	160
Figure 5.2. Exemple des cartes d'iso-contours de CEav obtenues à l'aide de la grille d'interpolation régulière dans une parcelle du sous-solage (carte de gauche) et dans une banquette (carte de droite).	161

Figure 5.3. Cartographie des deltas de conductivité électrique dans les banquettes (a et c), sur la parcelle de sous-solage 1 (b) et sur le témoin (d). Les mesures de conductivité spatialisées ici comme exemple ne sont pas effectuées à la même date.	162
Figure 5.4. Cartographie des rapports de conductivité électrique apparente dans les banquettes (a et b), sur la parcelle de sous-solage 1 (c) et sur le témoin (d). Les mesures de conductivité spatialisées ici comme exemple ne sont pas effectuées à la même date.	163
Figure 5.5. Relations entre les rapports de conductivité électrique des quatre voisins et la variation du stock hydrique ΔS (cas des banquettes B1 et B2).	166
Figure 5.6. Exemple des relations entre rapport de conductivité apparente et variation de stock hydrique (ΔS) obtenues sur les tubes de la parcelle SL1.	167
Figure 5.7. Relations entre rapport de conductivité électrique apparente (CEav des quatre plus proches possibles voisins) et variation de stock (ΔS) obtenues sur le témoin.	168
Figure 5.8. Distribution des nuages de points et détermination d'un étalonnage moyen (droite en pointillés) sur le témoin. Les droites en rouge indiquent les régressions linéaires déterminées par tube de mesure neutronique.	171
Figure 5.9. Distribution des nuages de points et détermination des droites d'étalonnage sur les banquettes. Les droites en pointillés représentent la droite d'étalonnage moyen des trois tubes.	175
Figure 5.10. Distribution des nuages de points autour des droites d'étalonnage sur les parcelles du sous-solage.	178
Figure 5.11. Relation entre l'humidité pondérale des sols de trois parcelles et leur résistivité électrique. D'après Goulet et Barbeau (2006).	179
Figure 5.12. Banquette B1 : cartes du stock hydrique avant et après trois événements pluvieux choisis sur la saison 2016. Les points noirs et les ronds bleus indiquent respectivement les points de suivi de CEa et les tubes neutroniques. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.	182
Figure 5.13. Banquette B1 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.	183
Figure 5.14. Banquette B2 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs et les ronds bleus indiquent respectivement les points de suivi EM38 et les tubes neutroniques. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.	184
Figure 5.15. Banquette B3 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.	186
Figure 5.16. Sous-solage SL1 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017.	189
Figure 5.17. Sous-solage SL2 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017.	191
Figure 5.18. Parcelle témoin : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017.	193
Figure 5.19. Variations de stock hydrique en fonction de la pluie (mesures de 2016 et 2017) dans les différentes parcelles aménagées et le témoin.	195
Figure 5.20. Facteur de gain en stockage hydrique apporté par l'aménagement par rapport au témoin.	196
Figure 5.21. Relations pluie- ΔS (triangle) et ajustements sur les nuages de points (courbes) effectués sur les différentes banquettes expérimentales.	199
Figure 5.22. Relations pluie- ΔS (triangle) et ajustements sur les nuages de points (courbes) effectués sur les parcelles de sous-solage.	200
Figure 5.23. Relations pluie- ΔS (rond) et ajustements sur les nuages de points (courbes) effectués sur la parcelle témoin.	200

Figure 5.24. Corrélation entre le coefficient de variation (CV) et le ratio intensité maximale/cumul de pluie.....	202
Figure 6.1. Répartition des pluies moyennes annuelles et des événements pluvieux de 2004 à 2018. P = période et NEP signifie nombre d'événements pluvieux	206
Figure 6.2. Résultats de la cartographie d'occupation des sols en 2019	207
Figure 6.3. Proportion des différentes unités d'occupation des sols en 2019 à l'échelle des bassins versants de Tondi Kiboro.	208
Figure 6.4. Pluies et lames écoulées événementielles avant (2004-2008) et après (2009-2018) aménagement en banquettes sur le bassin versant TK amont Nord.	210
Figure 6.5. Quelques hydrogrammes des crues avant et après aménagement du bassin TK amont Nord.	212
Figure 6.6. Evolutions concomitantes du coefficient d'écoulement et des surfaces aménagées sur le bassin TK amont Nord.	213
Figure 6.7. Evolution du coefficient d'écoulement (courbe bleue et rouge) en fonction de la pluie annuelle (histogramme).....	214
Figure 6.8. Evolution du coefficient d'écoulement en fonction du cumul annuel des pluies.....	215
Figure 6.9. Ajustement par exponentielle décroissante de la relation entre surface aménagée et coefficient d'écoulement sur le bassin TK amont Nord.	216
Figure 6.10. Corrélation entre pluie et résidus d'estimations du CE calculé à partir de l'équation ajustée.	217
Figure 6.11. Comparaison des relations pluie-lame écoulée avant (noir) et après (bleu, vert et rouge) sous-solage du sol du bassin versant TK amont Sud. SL signifie sous-solage.....	220
Figure 6.12. Réponse hydrologique initiale (sans sous-solage) du bassin TK amont Sud.....	221
Figure 6.13. Réponse hydrologique après sous-solage du bassin TK amont Sud pour 25 % de sa surface.	221
Figure 6.14. Evolutions concomitantes du coefficient d'écoulement et de la surface aménagée (sous-solage) sur le sous bassin TK amont Sud.	223
Figure 6.15. Relation ajustée de l'évolution du coefficient d'écoulement en fonction de la proportion aménagée sur le bassin TK amont Sud.....	224
Figure 6.16. Relation pluie-coefficient d'écoulement sur le sous bassin versant TK amont Sud.	225
Figure 6.17. Relation pluie et résidus calculés à partir de l'équation ajustée.....	225
Figure 6.18. Comparaison des coefficients d'écoulement mesurés durant la période sans aménagements des bassins versants.	227
Figure 6.19. Analyse comparée des coefficients d'écoulement des bassins versants aménagés selon la surface aménagée. Valeurs mesurées (points) et ajustements par exponentielle (courbes).	228

Annexes

Annexe A1 : rappel théorique sur l'eau du sol

1. Bases théoriques

Le **sol** se définit comme étant la pellicule superficielle de l'écorce terrestre. Il résulte de l'altération de la roche mère, au moyen des mécanismes physiques et chimiques, à laquelle s'ajoute une fraction minérale, de la matière organique (humus), d'air et de l'eau (Gruhier, 2010). Les paramètres fondamentaux sur lesquels repose la description générale d'un sol relèvent des relations de masse et de volume caractérisant sa constitution (Lagacé, 2016).

Par ailleurs, l'eau dans le sol, qui ne représente qu'une infime part de l'eau douce (0,1% de l'eau sur terre), est soumise à plusieurs forces qui la mettent en mouvement. La dynamique de l'eau dans le sol résulte en effet de l'action combinée des forces gravitaires qui attirent l'eau de façon verticale vers le bas et des forces capillaires qui attirent l'eau des gros pores vers les pores capillaires de taille plus petite mais en plus grand nombre (Gray et al., 1972). Cela aboutit à la distinction fondamentale des deux zones, il s'agit de la zone non saturée, où seule une partie des espaces lacunaires est remplie d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol d'où l'appellation système à trois phases (solide, liquide, gazeuse) et la zone saturée, système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau (Boudol, 2004 ; Musy et al., 2014). Dans la présente thèse, nous nous intéresserons à la zone non saturée du sol où ces trois phases coexistent et plus, spécifiquement, à l'infiltration, terme qui désigne le processus à la fois gravitaire et capillaire par lequel l'eau entre dans le sol depuis la surface.

Sur le plan agronomique, l'eau du sol représente un réservoir et un vecteur d'éléments nutritifs pour la croissance et le développement des végétaux dont la composition se renouvelle sous l'effet des interactions physico-chimiques entre les particules du sol, l'eau et les gaz (Hénin et al., 1965 ; Alaoui, 2007). Elle joue, en outre, un rôle essentiel dans le processus d'évolution et de la conservation des sols. Dans nos milieux semi-arides, les précipitations constituent la principale source d'eau dans le sol. Cependant, lors de la pluie, toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol, car une partie est directement évaporée. Celle qui atteint la surface, ruisselle, s'infiltré (si le sol présente un caractère suffisant de perméabilité) et humidifie le sol. Cette dernière conditionne les transferts hydriques (Gaudin et Brouwers, 2003).

2. Caractérisation de l'état de l'eau dans le sol

Comme on l'a vu, lors de la pluie, l'eau précipitée se répartit en trois catégories selon les phénomènes auxquels elle est soumise, qui sont le ruissellement, l'évaporation et l'infiltration.

L'eau qui s'infiltré dans la matrice poreuse du sol remplit les pores vides en remplaçant l'air. Elle se trouve alors dans différents états énergétiques qui sont l'eau gravitaire, facilement mobilisée par la gravité, l'eau capillaire, retenue entre les particules de sol par des forces de capillarité, et l'eau hygroscopique, absorbée sur des parois des grains constitutifs du sol (Musy et al., 2014). Les variations d'état énergétique de l'eau dans le sol sont le moteur des transferts d'eau, mais l'importance de ceux-ci est dépendante de sa capacité à se laisser traverser par l'eau (Bruand et Coquet, 2005). L'absence de la saturation d'une couche pédologique donnée fait varier le stock d'eau à la fois dans l'espace et dans le temps. Ces variations sont déterminées par les conditions externes de la surface du sol (apport de la pluie, départ par évapotranspiration) et les conditions limites inférieures.

La description quantitative de l'eau du sol repose sur la notion de teneur en eau volumique ou humidité volumique du sol considérée comme étant une grandeur variable en fonction de la structure du sol, de la texture et de sa porosité (Musy et al., 2014). Bien entendu, elle dépend surtout du temps. Son évaluation est un élément important dans plusieurs domaines notamment pour l'hydrologie afin d'améliorer les modèles hydrologiques pour mieux définir par exemple une bonne gestion des ressources en eau, ou les risques liés aux inondations (Lesaignoux, 2010).

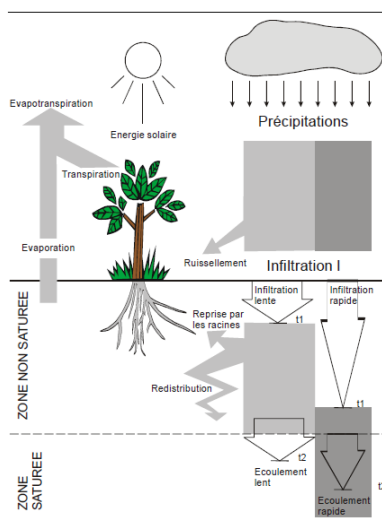
3. Dynamique de l'eau dans le sol

L'infiltration de l'eau dans le sol correspond aux transferts d'eau verticaux descendants dans les couches superficielles du sol à la suite de précipitations (Nicolas, 2010) ou d'irrigation, ou même de ruissellements venus de l'amont. Pour quantifier les flux qui se propagent depuis la surface vers la profondeur dans le sol, on se base sur les variables telles que l'humidité volumique et le potentiel hydrique matriciel qui caractérise l'énergie avec laquelle cette eau est retenue dans les pores du sol (Delalande et al., 2017). L'aptitude du sol à se laisser traverser par l'eau s'exprime à l'aide de la conductivité hydraulique K , qui est pour la circulation de l'eau dans un sol ce qu'est la conductivité électrique pour la circulation des électrons dans un corps conducteur. La conductivité hydraulique du sol varie très fortement et de façon non linéaire en fonction de l'humidité volumique (Vandervaere, 1995). Le transfert de l'eau dans un milieu poreux est décrit par la loi de Darcy, en reliant les caractéristiques hydrodynamiques du milieu aux flux d'eau qui le traversent (Peugeot, 1995). De nombreux modèles ont été mis au point afin de prédire l'infiltration de l'eau dans les sols dont Musy et Gigy (2004) ont présenté le résumé des principales fonctions utilisées dans le modèle physique d'hydrologie de surface.

4. Bilan hydrique

Le cycle de l'eau représente un aspect fondamental du système sol-plante-atmosphère. Analyser le cycle de l'eau revient à déterminer les termes du bilan hydrique (Fig. A1) impliqués dans les échanges entre les divers composants du système et de leurs interactions (Alaoui, 2007). En effet, le bilan hydrique consiste à comparer les apports et les pertes en eau, pour un lieu et une période donnés (Lesaignoux, 2010). Ainsi, la part de l'eau stockée dans le sol et éventuellement disponible pour les plantes durant un temps donné, est déterminée par simple soustraction entre les apports et les pertes en eau durant cette même période. Les apports d'eau sont obtenus par la part des précipitations qui s'infiltrate et les pertes sont dues à la combinaison des phénomènes de l'évaporation et de la transpiration des plantes (évapotranspiration) et au drainage profond. Notons par ailleurs que le suivi dans le temps et dans l'espace du bilan hydrique des sols est une tâche complexe car elle nécessite d'effectuer des mesures de teneur en eau du sol et de potentiel matriciel de façon régulière sur le terrain.

Fig. A1. Schéma conceptuel des principaux termes du bilan hydrique. D'après Alaoui, (2007).



Annexe A2. Théorie sur les mesures électromagnétiques de l'humidité du sol

1. Généralités

Il existe de nombreuses méthodes indirectes pour déterminer l'humidité du sol. On peut citer entre autres, le sondage neutronique, vu au chapitre précédent, qui est une méthode fiable, précise à $\sim 0,01-0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ environ (Delalande et al., 2017) et intégrative. Bien que non destructive, hormis lors de l'installation des tubes, son utilisation est en déclin dans certains pays à cause des réglementations liées à la présence d'une source radioactive. De nouvelles approches électromagnétiques (TDR, sondes capacitatives), constituent aujourd'hui des méthodes

indirectes moins contraignantes mais également moins intégratrices en termes de volume de sol échantillonné.

Les méthodes indirectes géophysiques de mesure des paramètres hydriques du sol ont connu un développement remarquable ces dernières décennies. Elles permettent de généraliser et de spatialiser les mesures qui sont, pour la plupart des cas, « ponctuelles », au regard de l'immensité des espaces à gérer (King et al., 2003). Ces méthodes géophysiques sont exhaustives, non destructives et spatialement intégratrices (acquisition d'imagerie en 1D, 2D ou 3D). Elles offrent la possibilité d'acquérir un jeu des données considérable en temps réel et à moindre coût sur des échelles variables dans le temps et dans l'espace (Michot et al., 2001 ; Besson et al., 2007). La répétition des mesures est rendue facile grâce au développement et à la disponibilité des instruments de mesure permettant d'étudier de grandes surfaces, et surtout, de façon quasi-continue dans l'espace (King et al., 2003). Utilisées en science du sol ou à des fins agronomiques, notamment l'étude de la salinité des sols (Douzals, 2000 ; Michot et al., 2007), les méthodes géophysiques permettent de suivre des phénomènes évolutifs (Bottraud et al., 2010). Dans le passé, elles ont été testées comme moyen d'aide à la prospection minière, archéologique (Martinaud, 1997 ; Simon, 2012) et à la cartographie des sols (Dabas et al., 1995 ; Moeys et al., 2006 ; Bottraud et al., 2010). Actuellement, elles sont utilisées comme outil de caractérisation des hétérogénéités du sol et du sous-sol. Leurs principes de base largement décrits dans la littérature reposent sur l'analyse d'une onde électrique ou électromagnétique réfléchie ou émise par le sol de façon naturelle ou à partir d'une source (King et al., 2003). Parmi ces méthodes, celles couramment utilisées sont les mesures électriques (Dabas et al., 1995 ; Bottraud et al., 2010) et les méthodes électromagnétiques (Job et al., 1987 ; Job et al., 1990 ; Job et al., 1995). Les mesures à base électrique du potentiel hydrique sont basées sur la mise en équilibre hydrique d'un corps poreux avec le sol (Delalande et al., 2017). Pour ces mêmes auteurs, une mesure électrique, résistive ou capacitive, est faite dans ce corps, qui est liée à sa teneur en eau.

2. Domaines d'application

Initialement, la conductivité électrique a été utilisée pour caractériser et cartographier la variation de la salinité des sols (El Oumri et Vieillefon, 1983 ; Job et al., 1990 ; Job et al., 1995 ; Laperrousaz et Barbiéro, 1999 ; Dakak et al., 2011). A l'heure actuelle, elle facilite la reconnaissance à haute résolution spatiale de certaines caractéristiques de sub-surface. C'est en effet une méthode indirecte utilisée dans divers domaines relatifs à l'étude des sols. Son développement est dû, d'une part, aux progrès informatiques considérables réalisés en matière

de traitement des mesures (Goulet et Barbeau, 2006) et, d'autre part, à sa facilité de mise en application, son coût très bas ainsi que la possibilité d'établir des relations directes avec certaines propriétés du sol telles que la teneur en eau, la teneur en sel et d'autres dont elle dépend fortement (Labrecque, 2011). Elle est appliquée en agriculture de précision (Guérif et King, 2007 ; Buvat, 2012 ; Martini et al., 2017 ; Sanches et al., 2018), en hydrologie et hydrogéologie (Toé, 2004 ; Travelletti et al., 2012) dans le but de caractériser les variations spatiales et temporelles de l'état hydrique des sols (Bottraud et al., 2010 ; Michot et al., 2003). Ainsi, l'interprétation des cartes de teneur en eau (issues des mesures ponctuelles combinées aux mesures de résistivité) et de potentiel matriciel permettent de mettre en évidence certains processus hydrodynamiques des sols (Cousin et al., 2009).

Annexe A3 : Paramètres influençant la conductivité électrique

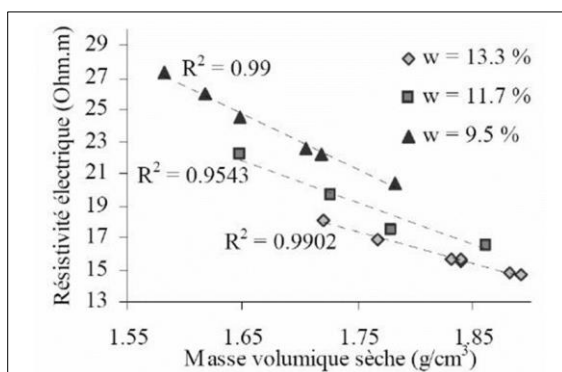
La conductivité électrique dépend de nombreux facteurs pouvant être classés entre : i) les variables intrinsèques pérennes (texture, structure, la porosité, la teneur en argile, pierrosité, carbonatation du sol, profondeur et type du substrat géologique) et ii) les variables pédologiques dynamiques comme la teneur en eau, la température et la concentration de la solution du sol (McNeil, 1980 ; Michot et al., 2003). Ces dernières sont considérées comme étant les seules variables susceptibles d'évoluer dans le temps et dans l'espace, et donc d'influencer la mesure de la conductivité électrique (Besson et al., 2007).

1. Influence des variables intrinsèques pérennes

L'accroissement des variables intrinsèques pérennes, est suffisamment lente pour influencer la conductivité électrique à court et moyen terme (Berkal, 2016). Bien qu'elles n'évoluent pas dans le temps (puisque elles sont pérennes justement !), ces variables affectent la conductivité électrique mais leur influence est moindre en comparaison avec les variables d'états diachroniques (Goulet et Barbeau, 2006 ; Guérif et King, 2007 ; Beck, 2008 ; Schneider, 2010). La nature des éléments constitutifs du sol et leur structure (mode d'arrangement des particules du sol) peuvent influencer la résistivité électrique d'un sol (Job et al., 1992 ; Cousin et al., 2012). Celle-ci diminue avec la taille des grains et, avant tout, avec l'accroissement de teneur en argile (Michot et al., 2007). Seladji et al. (2007) soulignent par ailleurs, sur un sol limoneux, une forte sensibilité de la résistivité électrique aux variations de masse volumique sèche sur une large gamme de teneur en eau. Des relations entre la résistivité électrique et la texture (Fukue et al., 1999), la structure, le degré de compactage du sol (Besson et al., 2007) ou encore la profondeur et le type de substrat géologique (Dabas et al., 1995) ont été établies. Ainsi, à teneur

en eau constante, le tassement en modifiant la structure et la macroporosité des sols induit une diminution de la résistivité électrique (Seladji, 2010 ; Richard et al., 2014) i.e. une augmentation de la conductivité électrique. Par des méthodes géophysiques combinées, électriques et électromagnétiques, Beck et al. (2007) ont eux aussi observé, pour une même teneur en eau, que la résistivité électrique diminue avec le degré de compactage (Fig. A3.1). Et cette évolution de la résistivité en fonction du compactage paraît linéaire.

Fig. A3.1. Influence de la masse volumique sèche sur la résistivité électrique mesurée en laboratoire sur des échantillons de limons reconstitués à différentes teneurs en eau. D'après Beck et al. (2007).



A ceux-ci s'ajoute l'influence de la porosité. En effet, la porosité d'un sol contrôle sa résistivité électrique mais dans une moindre mesure que la teneur en eau et la concentration des minéraux dissous. Elle est définie par le volume des vides sur le volume total de l'échantillon. L'influence de la porosité sur la conductivité électrique du sol est décrite de façon détaillée dans de nombreux travaux notamment ceux de Job et al. (1987) et Job et al. (1992).

2. Influence des variables pédologiques dynamiques

L'influence de ces paramètres est largement discutée dans la littérature. Nous ne développerons dans ce paragraphe que ceux dont l'influence sur la conductivité électrique s'est avérée significative.

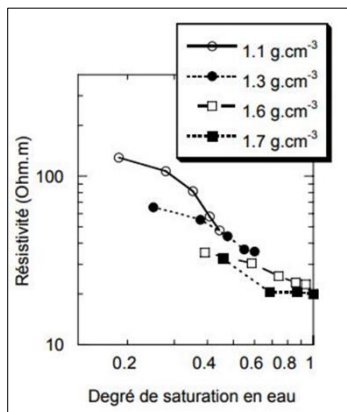
➤ Influence de la teneur en eau volumique

Parmi les paramètres dont dépend la conductivité électrique du sol, la teneur en eau θ est celui ayant le plus d'influence. Ainsi, selon (Bourgeois et al., 2007), l'eau joue un rôle majeur dans les propriétés diélectriques (conductivité σ , permittivité diélectrique ϵ_r) des formations poreuses superficielles. La conductivité électrique des sols est principalement de nature électrolytique c'est-à-dire basée sur le déplacement d'ions comme vous l'avons vu précédemment. Ces cations

peuvent se déplacer soit dans le volume d'eau interstitielle présente dans les pores, soit à la surface des grains. La conductivité de surface, quant à elle, n'est observable que si la surface spécifique est importante (sols argileux) (Job et al., 1992).

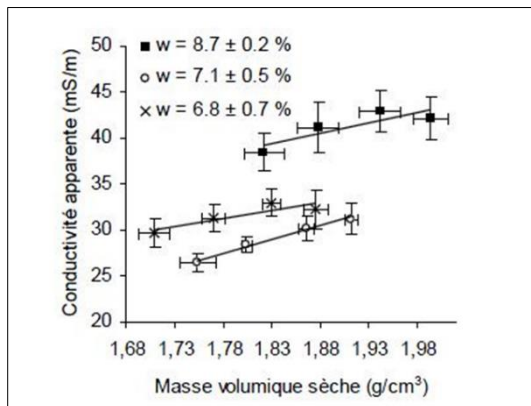
En règle générale, la conductivité électrique des sols dépend de la conductivité propre du sol. Une augmentation de teneur en eau a pour effet une augmentation de la conductivité électrique. De nombreuses mesures en laboratoire ont montré la dépendance entre θ et ρ ou σ (Michot et al., 2001 ; Michot et al. 2003 ; Besson et al., 2007 ; Bottraud et al., 2010 ; Buvat, 2012 ; Beck, 2008 ; Cousin et al., 2012). L'évolution de la résistivité en fonction de la saturation S_w (grandeur qui exprime le volume des pores occupé par l'eau) est illustrée par la Fig. A3.2. La relation entre ces grandeurs n'apparaît linéaire que pour une gamme de teneur en eau supérieure à un certain seuil de degré de saturation. En effet, la résistivité diminue lorsque le degré de saturation augmente jusqu'à un seuil d'environ 60 % où la résistivité n'évoluerait plus quel que soit la masse volumique (Richard et al., 2014). Et inversement, on observe sur la Fig. A3.3 que la conductivité électrique apparente du sol augmente linéairement lorsque la masse volumique sèche et la teneur en eau massique augmentent (Beck, 2008).

Fig. A3.2. Evolution de la résistivité électrique en fonction du degré de saturation pour différentes masses volumiques (d'après Richard et al., 2014).



L'existence de la propriété liant la résistivité (ou la conductivité) à la teneur en eau permet de réaliser des études de suivi hydrique temporel à l'échelle annuelle (Brunet et al., 2003) ou de la saison (Descloitres et al., 2001 ; Besson et al., 2007) pour visualiser (à l'aide des mesures TDR) les variations d'humidité d'un sol engendrées par une pluie et par le prélèvement de l'activité racinaire en 2D ou en 3D (Michot et al., 2003 ; Goulet et Barbeau, 2006). Ce qui permet, par exemple, de suivre la progression du front d'infiltration et localiser les zones d'écoulements préférentiels (Michot et al., 2001).

Fig. A3.3. Influence de la masse volumique sèche et de la teneur en eau massique sur la conductivité apparente moyenne mesurée par EM38 en mode horizontal (HD). D'après Beck (2008).



➤ Lien entre conductivité électrique et teneur en eau

Malgré la dépendance entre la conductivité électrique et beaucoup d'autres facteurs, et pour pouvoir être en mesure d'utiliser la conductivité électrique mesurée sur le terrain comme mesure indirecte de teneur en eau, il est nécessaire de considérer certains paramètres comme invariants. Il existe cependant plusieurs lois établissant le lien entre la conductivité électrique et la teneur en eau. On peut citer, parmi celles-ci, la loi d'Archie (1942). Cette loi montre que la conductivité de la roche est très sensible à la teneur en eau. Les informations présentées ici sur cette loi sont tirées de Bourgeois et al. (2007). La forme généralisée de la loi d'Archie, valable en milieu non saturé, relie la conductivité σ de la roche à sa porosité Φ et à la saturation en eau S_w (fraction volumique d'eau dans les pores) par le biais d'exposants m et n , dits de cimentation et de saturation, généralement proches de 2 :

$$\sigma \approx \sigma_w \Phi^m S_w^n \quad (\text{où } m \in [1.5 ; 3] \text{ et } n \approx 2) \quad (1)$$

En faisant intervenir la teneur en eau volumique ($\theta = \Phi \cdot S_w$), elle peut s'écrire :

$$\sigma = \sigma_w \theta^m S_w^{n-m} \quad (2)$$

où $n-m$ est généralement beaucoup plus petit que m .

Cette formulation montre que le terme le plus influent dans la conductivité globale est la teneur en eau volumique θ_w , mais affectée par un exposant voisin de 2, alors que S_w est affectée par un exposant proche de 0. En pratique, le terme S_w^{n-m} est compris entre 0.5 et 1 parfois assimilé à 1.

La loi d'Archie simplifiée s'écrit :

$$\sigma = \sigma_w \theta_v^m \quad (3)$$

Cependant, dans la plupart des cas, la conductivité donnée par cette expression (équation 3) est exacte à mieux qu'un facteur 2 (Bourgeois et al. 2007), ce qui permet d'estimer θ_v à moins de 40 % d'erreur, ce qui est néanmoins loin d'être négligeable. Cependant, la loi d'Archie montre aussi que la conductivité de la roche dépend linéairement de la conductivité σ_w de l'eau interstitielle.

➤ **Influence de la salinité**

Lorsque le transport de charges électriques est essentiellement de nature électrolytique volumique, la concentration de la solution du sol peut jouer un rôle non négligeable sur la mesure de la résistivité électrique (Cousin et al., 2012). Il est donc largement établi dans la littérature que la conductivité électrique est influencée par la concentration en ions du fluide continu dans les pores mais aussi par le type de fluide et les ions présents dans ce fluide. La résistivité varie ainsi dans une large gamme, de l'ordre de 1 Ohm.m pour les sols très salés à 105 Ohm.m pour les sols très secs (Samouëlian et al., 2005). En effet, l'accroissement de la concentration en sels dissous augmente la densité de charges présentes, et favorise donc la conductivité électrolytique de la solution (Anisia, 2011). La relation entre la conductivité électrique et la salinité des sols a fait l'objet de nombreuses études sur divers types de sols.

➤ **Effet de la température**

La température peut agir d'une part sur la résistivité du liquide interstitiel (et donc modifier la conductivité électrolytique) et d'autre part sur la mobilité des cations (Seladji, 2010). La température du sol est donc un facteur de variation de la résistivité électrique et/ou de conductivité électrique (Goulet et Barbeau, 2006b), agissant principalement sur la viscosité de la solution du sol. En effet, la viscosité d'un milieu diminue avec l'augmentation de la température, ce qui rend les ions contenus dans l'eau plus mobiles provoquant une diminution de la résistivité électrique ρ (Fig. A3.4).

De nombreuses lois décrivant le comportement électrique d'un matériau en fonction de la température ont été proposées. Elles permettent d'exprimer la résistivité électrique apparente (ρ) et/ou la conductivité électrique apparente (σ) à une température de référence standard. Parmi celles-ci, Keller et Frischknecht (1966) ont proposé l'expression suivante :

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T-18)} \quad (4)$$

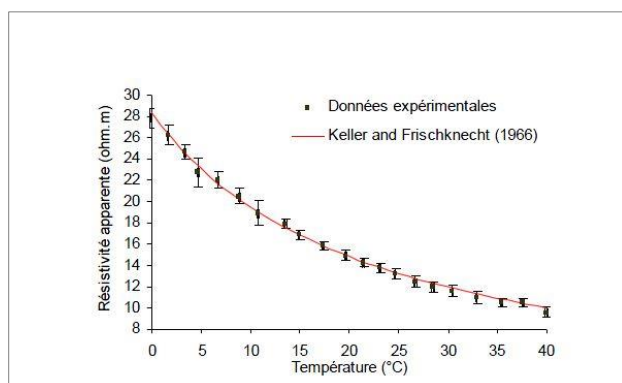
Cette loi permet de modifier la résistivité d'un sol mesurée à une température de référence (ici 18 ° C) vers une température désirée (T), où ρ_T est la résistivité électrique à la température T, ρ_{18} la résistivité du sol à une température de 18°C et α est un paramètre empirique variant entre 0.02 et 0.03°C⁻¹ selon ces auteurs.

D'après Schneider (2010), la conductivité électrique mesurée à diverses températures peut être ajustée à une température de référence standard à 25 ° C par la relation :

$$\sigma_{25^\circ\text{C}} = f_T \sigma_T \quad (5)$$

où $\sigma_{25^\circ\text{C}}$ est la conductivité électrique à la référence 25°C, f_T le facteur de conversion développé de façon empirique, et σ_T est la conductivité mesurée à la température T (°C).

Fig. A3.4. Influence de la température du sol sur la mesure de résistivité électrique sur un échantillon reconstitué de sol limoneux-confrontation avec la loi de Keller et Frischknecht (1966). D'après Beck (2008).



Annexe A4 : Méthodes de mesure de la conductivité électrique

Les méthodes électriques et électromagnétiques sont couramment utilisées pour la mesure de la conductivité électrique d'un sol. Ces méthodes géophysiques sont d'une aide précieuse pour suivre les flux d'eau dans le sol.

Les propriétés géophysiques peuvent être en effet mesurées par polarisation spontanée (liée à l'activité électrochimique du sol), par méthodes à conduction de courant continu (injection d'un courant continu) et par polarisation provoquée i.e. mesure du potentiel de courant injecté (Beck, 2008).

La méthode électrique est considérée comme fiable, robuste et non destructive mais très sensible à la teneur en argile. Elle présente l'avantage d'être moins influencée par les éléments extérieurs, contrairement à la méthode électromagnétique, et son application s'appuie sur le choix d'un dispositif et d'une configuration géométrique (Buvat, 2012). Parmi ces méthodes, celles couramment utilisées sont : les mesures de type sondage ou tomographie électrique (DC) et les méthodes électromagnétiques (EM). Les premières sont basées sur la loi d'Ohm et les secondes sur les équations de Maxwell. Les méthodes TDR (mesures de temps en relation avec la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol) sont aussi souvent utilisées. Les principes fondamentaux de ces méthodes ont été décrits dans de nombreux travaux (Telford et al., 1990 ; Job et al., 1990 ; Rey, 2005 ; Chouteau et Giroux, 2008).

Dans le cadre de ce travail, seulement la méthode électromagnétique a été utilisée afin de suivre l'évolution de l'humidité des sites aménagés et non aménagés. Cependant aucun développement n'a été prévu pour les méthodes électriques. Mais il nous paraît intéressant de passer en revue quelques techniques courantes de mesure de conductivité électrique.

1. Théorie sur la mesure de la résistivité électrique

Cette méthode consiste à mesurer le potentiel induit par l'injection dans le sol d'un courant à l'aide d'électrodes métalliques plantées en surface. Les mesures s'effectuent généralement en courant continu, éventuellement à basse fréquence (Telford et al., 1990 cités par Rey, 2005). Au départ, la méthode consistait à déplacer un couple d'électrodes (appelées électrodes de potentiel MN) de mesure par rapport à un dipôle d'injection fixe (électrode de courant AB) pour localiser de façon qualitative les anomalies conductrices (Guerrero, 2014). Dans un milieu homogène, les lignes de courant pénètrent le milieu de façon régulière, et la résistivité peut se définir par la loi d'Ohm (Cousin et al., 2012). La mesure de la résistivité apparente est obtenue par des mesures de résistance en tenant compte de la géométrie du dispositif de mesure (équation 6) :

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)} \right] = K \times \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

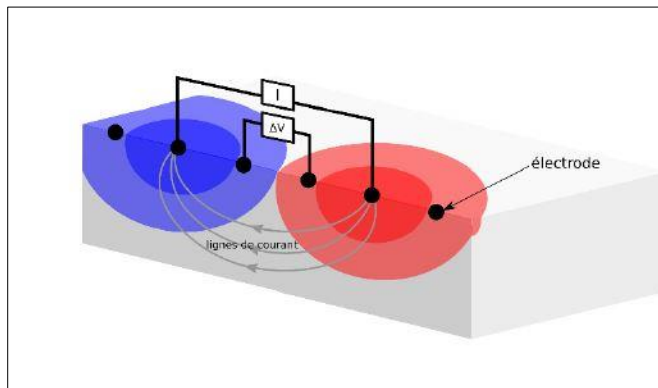
où I représente l'intensité du courant injecté (A), ΔV est la différence de potentiel mesurée entre M et N (V), AM , AN , BM et BN sont les distances entre les différentes électrodes (m) et K représente un facteur dit facteur géométrique, dont la valeur dépend de la configuration

géométrique des électrodes A , B , M , N c'est-à-dire de leur positionnement respectif dans l'espace.

Ces méthodes ont été développées simultanément dans les années 1920 aux Etats-Unis et en France (Burger, 1992). Les mesures de résistivité électrique peuvent être effectuées en laboratoire ainsi que sur le terrain. En combinant les positions des électrodes d'injection et des électrodes de mesure du potentiel électrique, il est possible de sonder la caractéristique de résistivité électrique à différentes profondeurs (Schneider, 2010). Il existe cependant toute une panoplie de dispositifs pour mesurer la résistivité électrique apparente du sol. Le principe de mesure, l'intérêt et la mise en œuvre des dispositifs sont largement discutés dans la bibliographie (Chouteau et Giroux, 2005 ; Bottraud et al., 2010 ; Jodry, 2016). Nous pouvons citer entre autres le dispositif de Wenner avec un espacement inter-électrodes fixe. Ce dispositif est déplacé d'un point de mesure à un autre le long du profil. Le dispositif de Schlumberger, le dispositif dipôle-dipôle (très sensible aux modifications horizontales de la résistivité) et le dispositif MUCEP (Multi Continuous Electrical Profiling) permettant une mesure quasi-continue de la résistivité apparente du sol (Moeys et al., 2006).

Par ailleurs, la tomographie électrique consiste à imager la résistivité du sol selon un plan vertical (2D) ou dans un volume de sol (3D). Elle permet de réaliser une série de mesures individuelles grâce à des électrodes enfoncées dans le sol, généralement le long d'un profil. La Fig. A4 illustre le principe de tomographie électrique. On mesure selon une séquence prédéfinie la résistivité électrique apparente pour chacun des quadripôles et l'on rapporte les valeurs dans un plan vertical appelé pseudo-section (Rey, 2005 ; Genelle et al., 2011). La tomographie de résistivité électrique (TRE) est une méthode de prospection non destructrice, permettant d'imager en deux ou trois dimensions les variations de résistivité du sous-sol. Elle se base sur un système quadripôle. L'inversion des combinaisons des mesures par un modèle inverse de transfert électrique permet de retrouver une distribution spatiale des résistivités réelles compatible avec la réalité (Anisia, 2011). La propriété liant la résistivité à la teneur en eau a permis, lors des études par tomographie électrique, de cartographier la distribution de la teneur en eau du sol afin d'en comprendre à plus long terme le fonctionnement hydrodynamique (Besson et al., 2007 ; Cousin et al., 2009 ; Buvat, 2012).

Fig. A4. Tomographie de résistivité électrique (TRE). D'après Bisone et al. (2017)



Annexe A5 : Bassin versant et rappel sur les processus de production de l'écoulement

- Définition du bassin versant

Par définition le **bassin versant** est une unité géographique définie à partir d'une section droite d'un cours d'eau et qui comprend toute la surface en amont de cette section de telle sorte que toute l'eau qui arrive sur cette surface transite, du moins en théorie, par cette section Musy et al. (2014). Le bassin versant peut donc être vu comme un « lieu géographique des points de l'espace où les précipitations sont susceptibles de contribuer au débit observé dans cette section » (Hubert & Reménérias, 2013). La section droite est appelée **exutoire** du bassin versant. Le bassin versant est ainsi caractérisé par son exutoire, à partir duquel il est possible de tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite.

- Processus de production d'écoulement

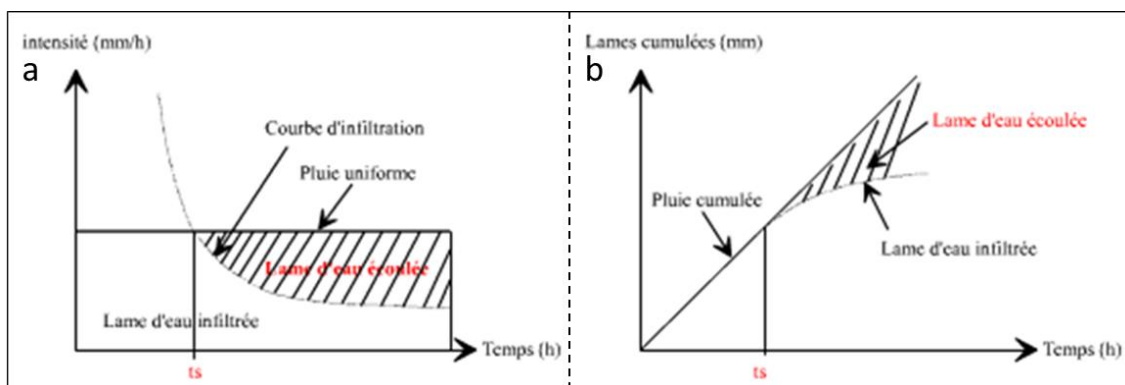
L'écoulement hortonien ou "par excès d'infiltration" est un écoulement de surface (ou ruissellement de surface) qui apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité instantanée du sol à absorber l'eau. Cette capacité, caractérisée par l'infiltrabilité du sol, est supposée décroissante dans le temps jusqu'à atteindre une valeur constante. Ainsi, l'écoulement de surface se produit donc lorsque cette capacité d'infiltration⁷ devient inférieure à l'intensité des précipitations. Les auteurs comme Ambroise (1998) ; Musy et Higy (1998) et Musy et al. (2014) notent qu'il y a deux origines possibles à l'écoulement de surface (Fig. A5) : l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration ou ruissellement hortonien (*Excess infiltration overland flow*, *Horton overland flow*), déjà évoqué, et l'écoulement par saturation

⁷ La capacité d'infiltration ou infiltrabilité d'un sol est sa capacité d'absorption en eau instantanée. Autrement dit, elle est définie comme le flux maximum que le sol est en mesure d'absorber à travers sa surface (Alaoui 2007).

du sol par le bas (*Excess saturation overland flow*). Ce dernier est constitué par l'écoulement des pluies tombées directement sur des surfaces déjà saturées (Armand, 2009). Lors de la pluie, le processus d'écoulement se développe en deux phases décrites par Musy et Higy (1998) :

- a) Au début de la pluie, la capacité d'infiltration est en principe supérieure à l'intensité de la pluie et cette dernière s'infiltré intégralement dans le sol. La teneur en eau et la charge hydraulique en surface croissent jusqu'à ce que la teneur en eau à saturation et la pression atmosphérique soient atteintes. On définit alors le temps de submersion (t_s) comme la durée entre le début de la pluie et le moment où la surface du sol est saturée. Le temps de submersion marque ainsi le début de l'écoulement. Pour un sol donné, le temps de submersion est d'autant plus court que l'intensité de la pluie est grande et que l'humidité initiale du sol est importante.
- b) Par la suite, l'intensité de la pluie devient plus importante que l'infiltrabilité. Dans ce cas, l'écoulement de surface est constitué par la différence entre les deux (Fig. A5).

Fig. A5. Taux d'infiltration (a) et infiltration cumulée (b) pour une pluie uniforme, visualisation du temps de submersion et de la lame écoulée (d'après Musy et al., (2014)).



Quant à l'écoulement sur des surfaces saturées, il se produit dans le cas où le sol est déjà saturé jusqu'en surface (Ambroise, 1998). Du coup, l'écoulement se produit lorsqu'il y a épuisement de la capacité du sol à stocker l'eau et lorsque la capacité à transmettre latéralement le flux d'eau est aussi dépassée (Musy et Higy, 1998). Par conséquent, lors d'une pluie tombant sur des surfaces saturées, l'eau ne pourra plus s'infiltrer et va s'écouler en surface en totalité. Ce phénomène ne s'observe pas sur notre site d'étude.

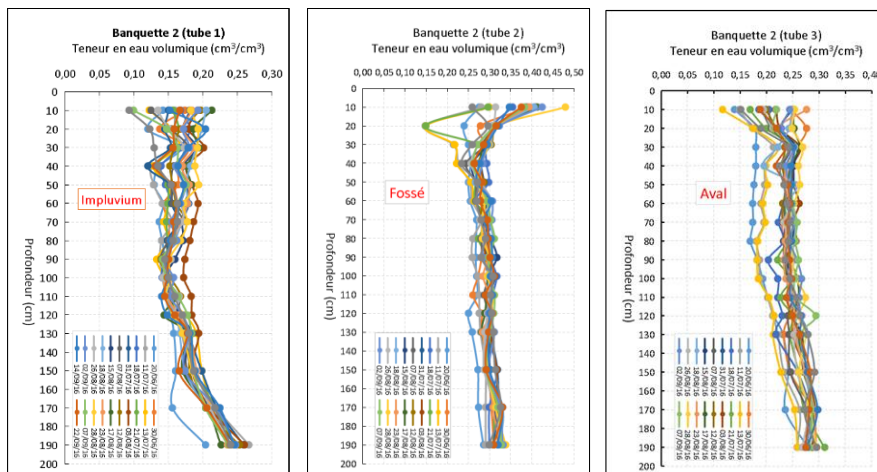
On retient en résumé que l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration résulte de la saturation qui se fait par le haut tandis que le processus d'écoulement sur surfaces saturées est dû à une saturation par le bas.

Au Sahel, la faible infiltrabilité des sols en surface corrélée aux fortes intensités des pluies induit un ruissellement type hortonien. Ce comportement est fréquent en milieux semi-arides où les sols sont de plus en plus encroûtés et les pluies sont intenses (Casse, 2015). En effet, si l'infiltration est réduite par l'encroûtement des sols (Casenave et Valentin, 1991), le ruissellement, quant à lui, prend de l'ampleur.

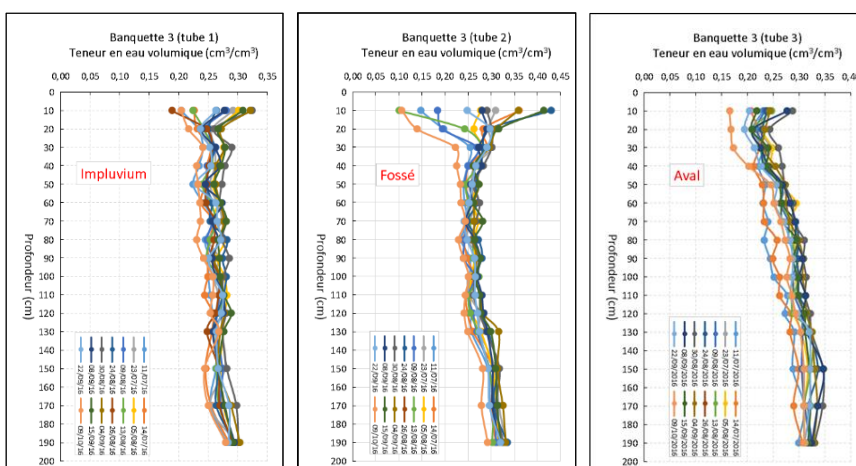
Lors d'une pluie, après le temps de submersion et après avoir rempli la détention superficielle sous forme de flaques, le ruissellement se déclenche. Ces eaux de ruissellement s'organisent sur les versants pour rejoindre les drains élémentaires du réseau des ravines. A ce niveau, la transformation de la pluie en écoulement de surface est réalisée.

Annexe B. Impact des banquettes sur le comportement hydrologique du sol

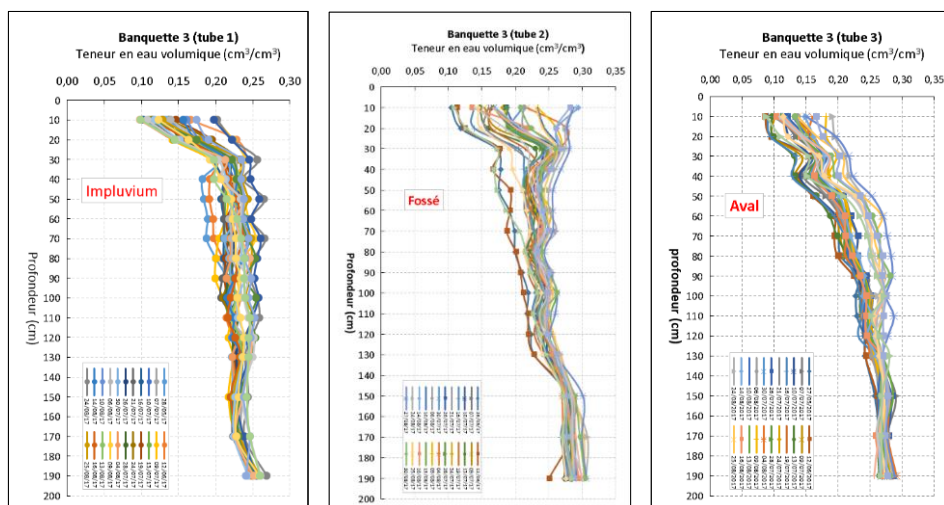
B1. Dynamique de teneur en eau volumique et du front d'infiltration mesurés dans les trois tubes de la banquette 2 en 2016.



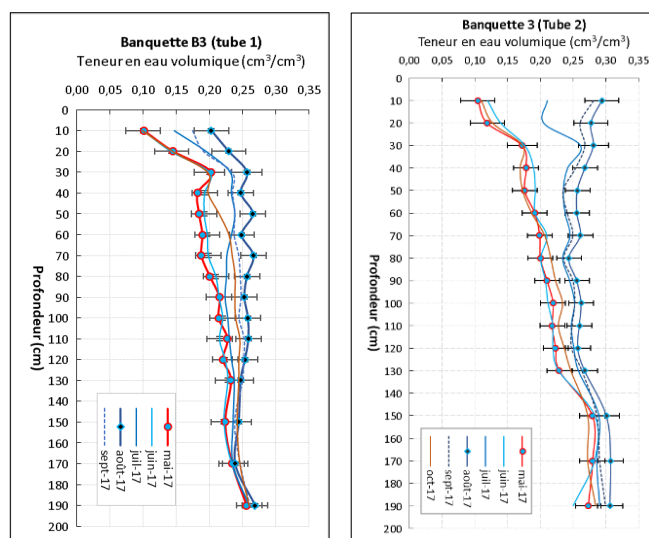
B2. Dynamique de teneur en eau volumique et du front d'infiltration mesurés dans les trois tubes de la banquette 3 (mesures de 2016)



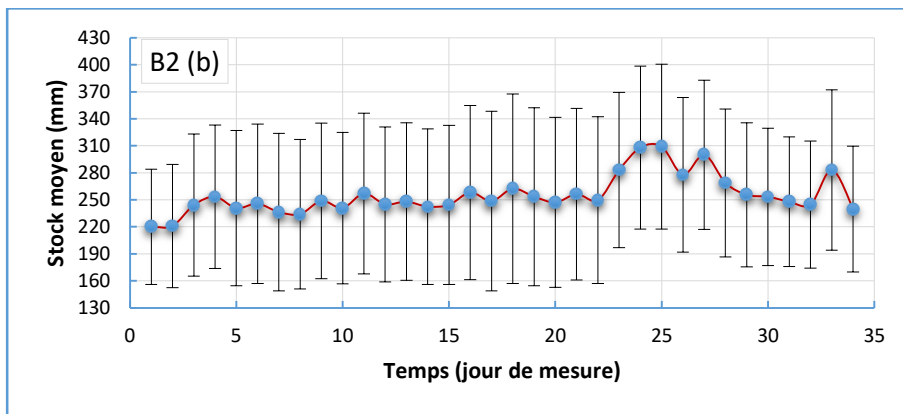
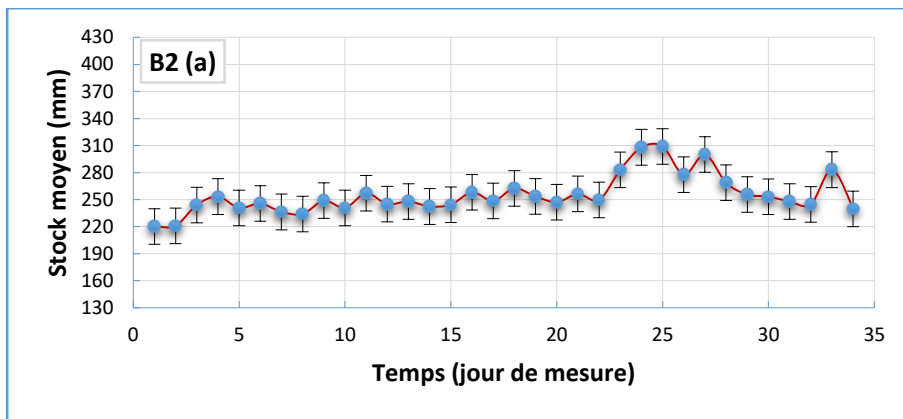
B3. Dynamique de teneur en eau volumique et du front d'infiltration mesurés dans les trois tubes de la banquette 3 (mesures de 2017)



B4. Evolution de la teneur en eau volumique et du front l'infiltration sur les tubes T1 et T2 de la banquette (B3) pour la saison 2017.

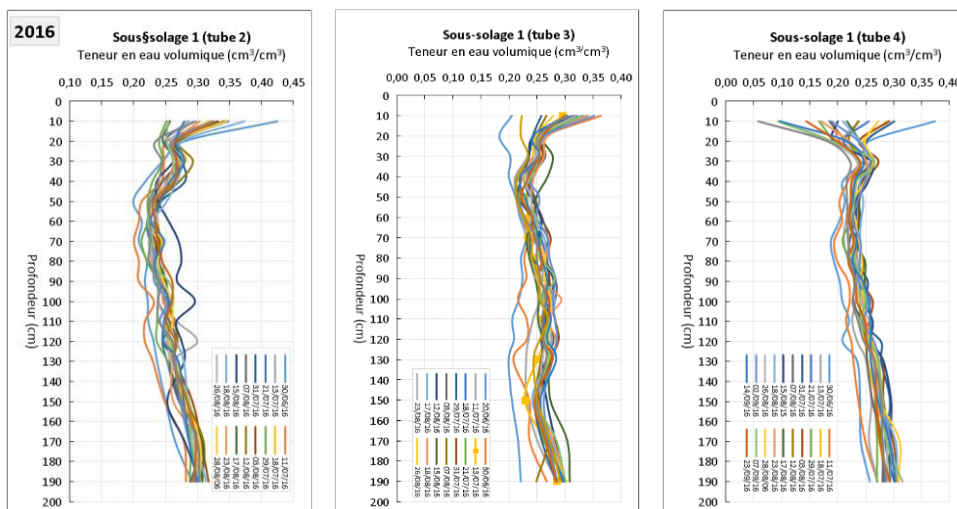


B5. Comparaison entre le stock moyen \pm incertitude moyenne (a) et stock \pm écart-type débiaisé (b) des trois stocks moyennés des trois tubes de la banquette (B2) en fonction de temps (jour de mesure). L'incertitude moyenne est calculée en faisant la moyenne arithmétique des incertitudes obtenues sur les stocks des trois tubes de ladite banquette.

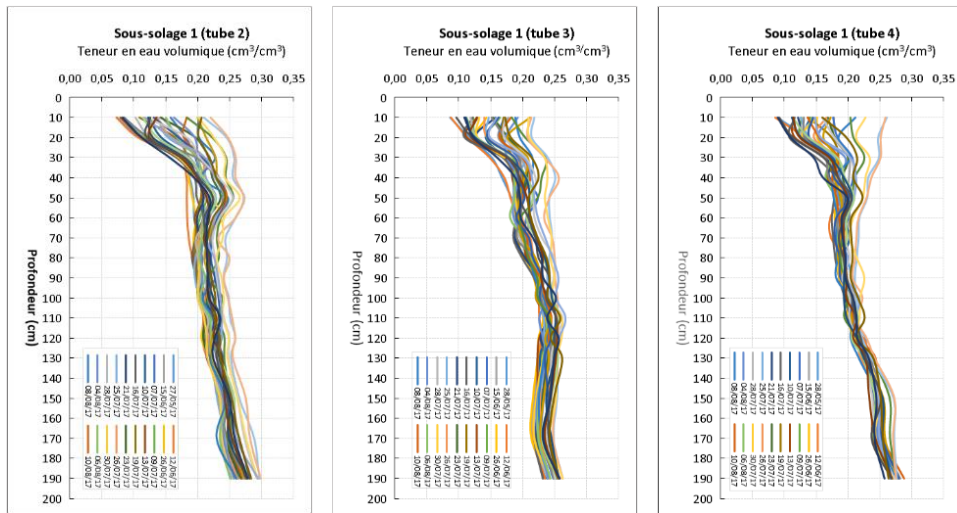


Annexe C. Impact de la technique de sous-solage sur l'amélioration de comportement hydrologique du sol

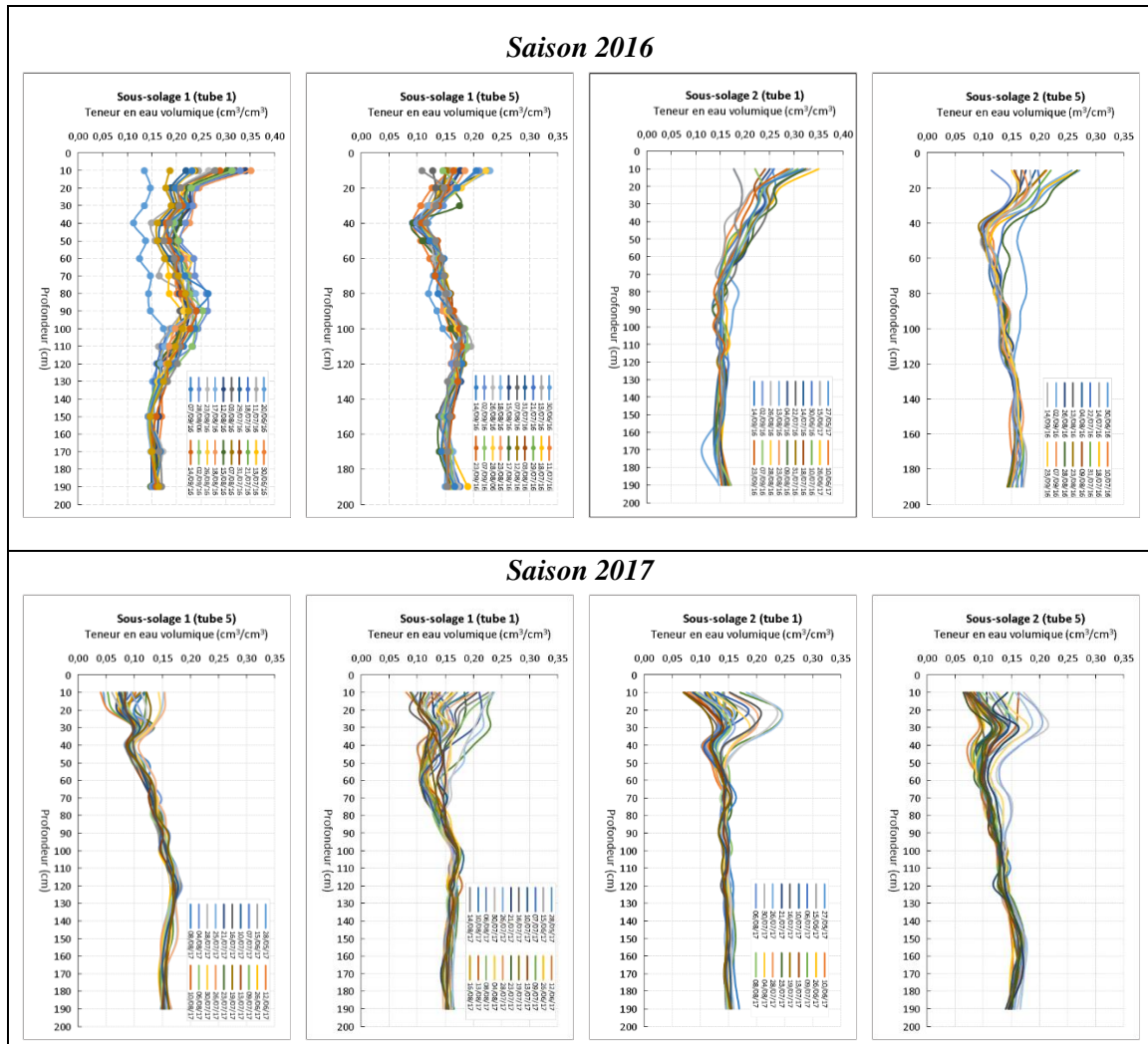
C1. Evolution des profils de teneur en eau volumique (θ) et du front d'infiltration du sol sous parcelles de sous-solage (SL1) au cours du temps (saison 2016).



C2. Evolution des profils de teneur en eau volumique (θ) et du front d'infiltration du sol sous parcelles de sous-solage (SL1) au cours du temps (saison 2017).

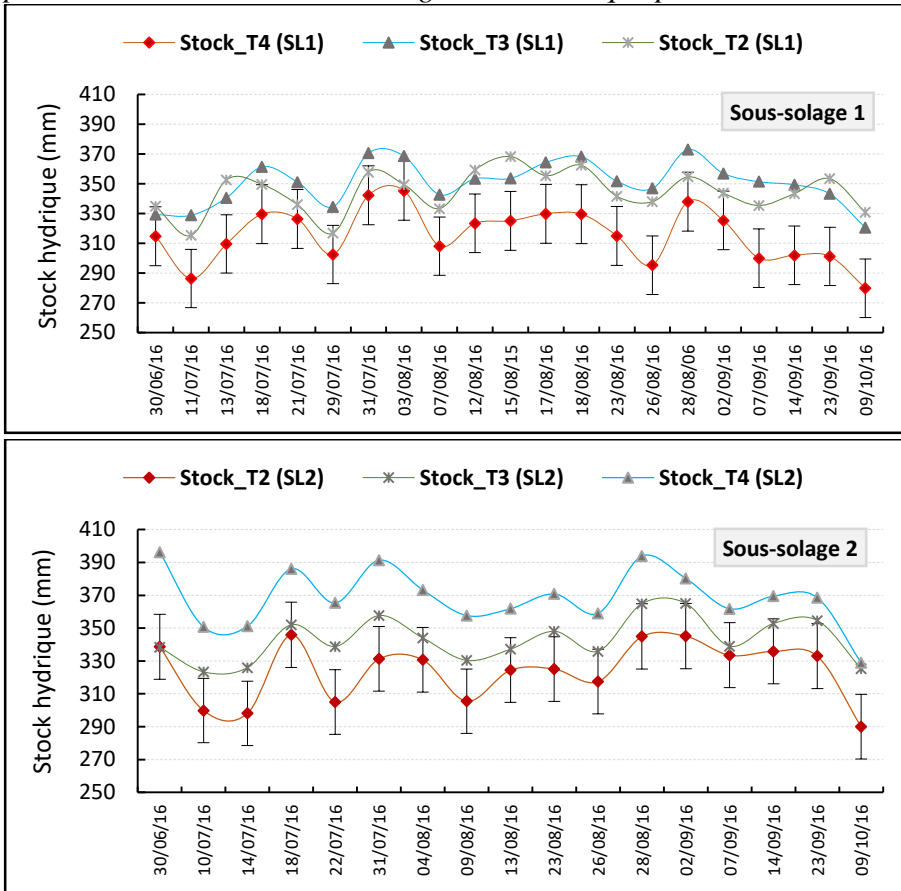


C3. Evolution de la teneur en eau volumique et de l'infiltration en amont (tubes T1) et en aval (tubes T5) des surfaces de sous-solage 1 (SL1) et de sous-solage 2 (SL2) pour 2016 et 2017.

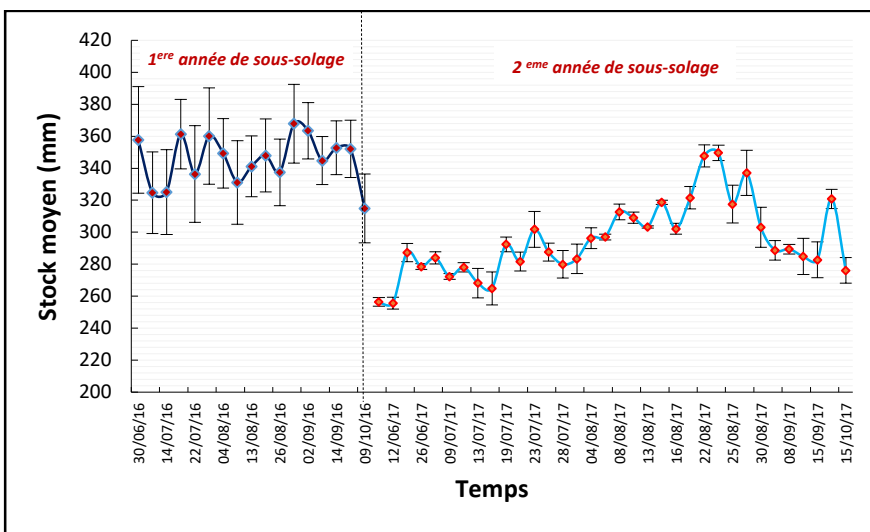


C4. Evolution du stock dans les parcelles de sous-solage au cours du temps en 2016.

Les barres verticales correspondent aux incertitudes $s(\hat{s})$ sur l'estimation du stock représentée pour le tube T2 de SL2. Leur largeur est identique pour tous les autres tubes.

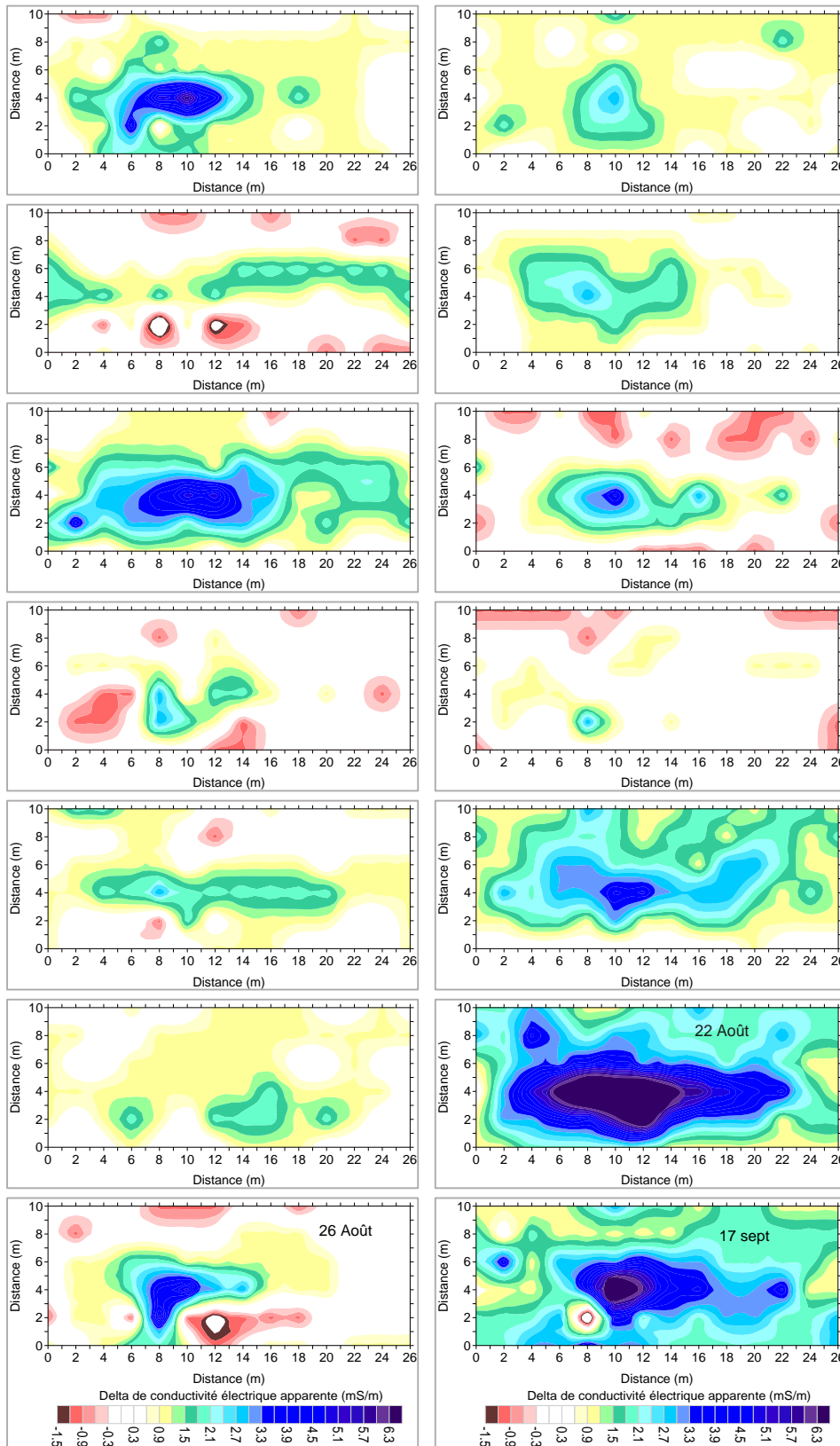


C5. Comparaison de l'évolution du stock hydrique du sous-solage SL2 avec \pm écart-type spatial (débiaisé). Chaque barre d'erreur sur ce graphique correspond à l'écart-type entre les trois valeurs des tubes de la parcelle.

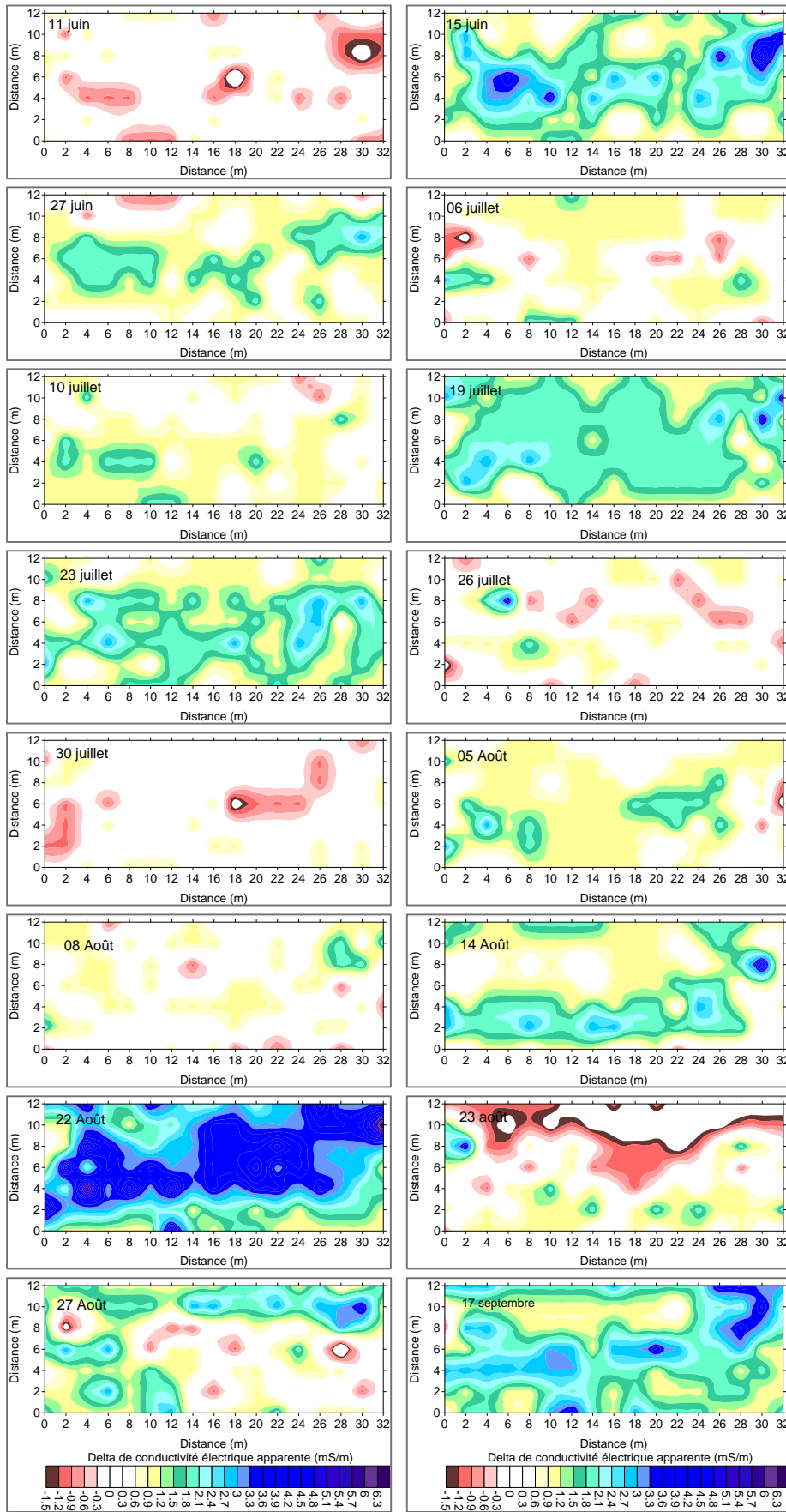


Annexe D : Cartographie des écarts de conductivité électrique apparente à l'échelle des surfaces aménagées et le témoin.

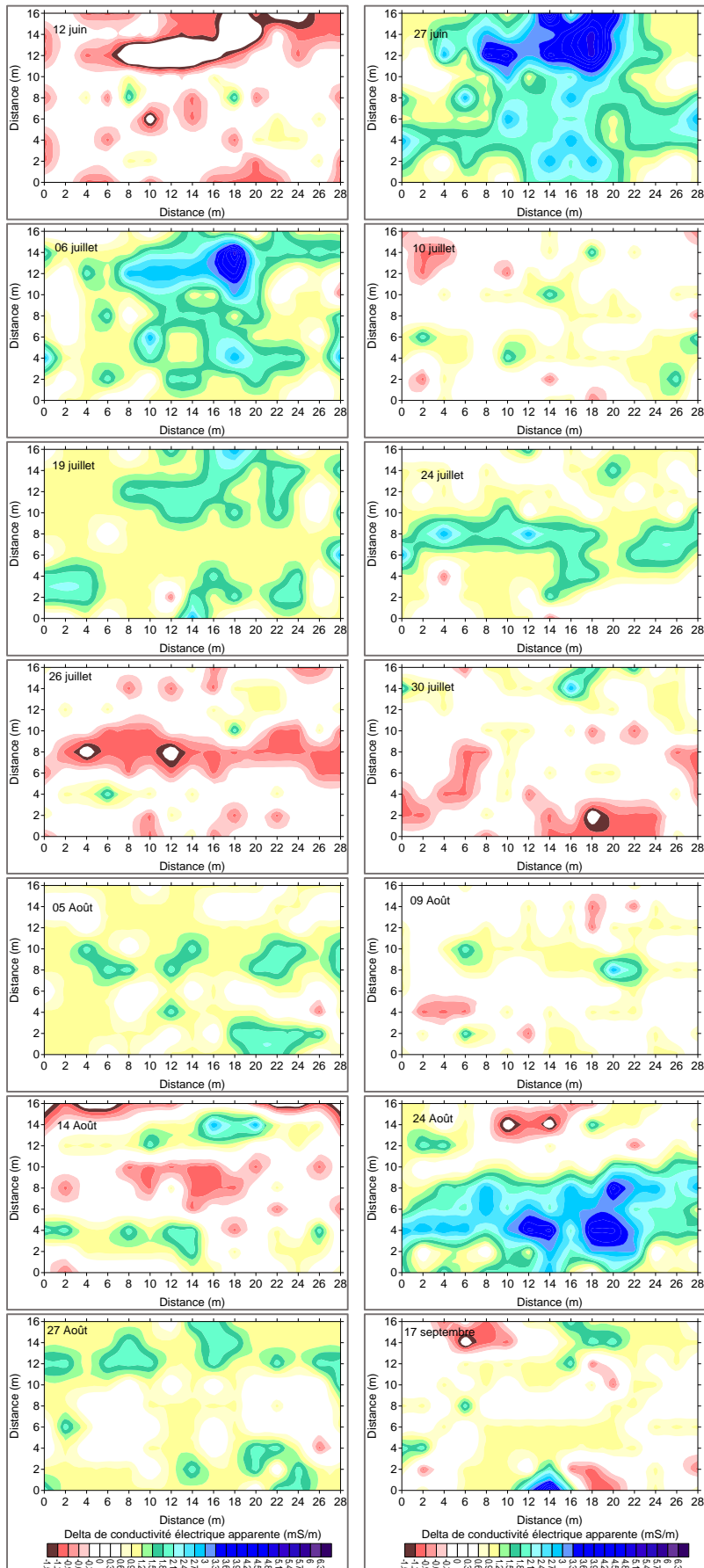
DI. Cartes des écarts de conductivité électrique apparente (mS/m^{-1}) dans la banquette 1 (B1).



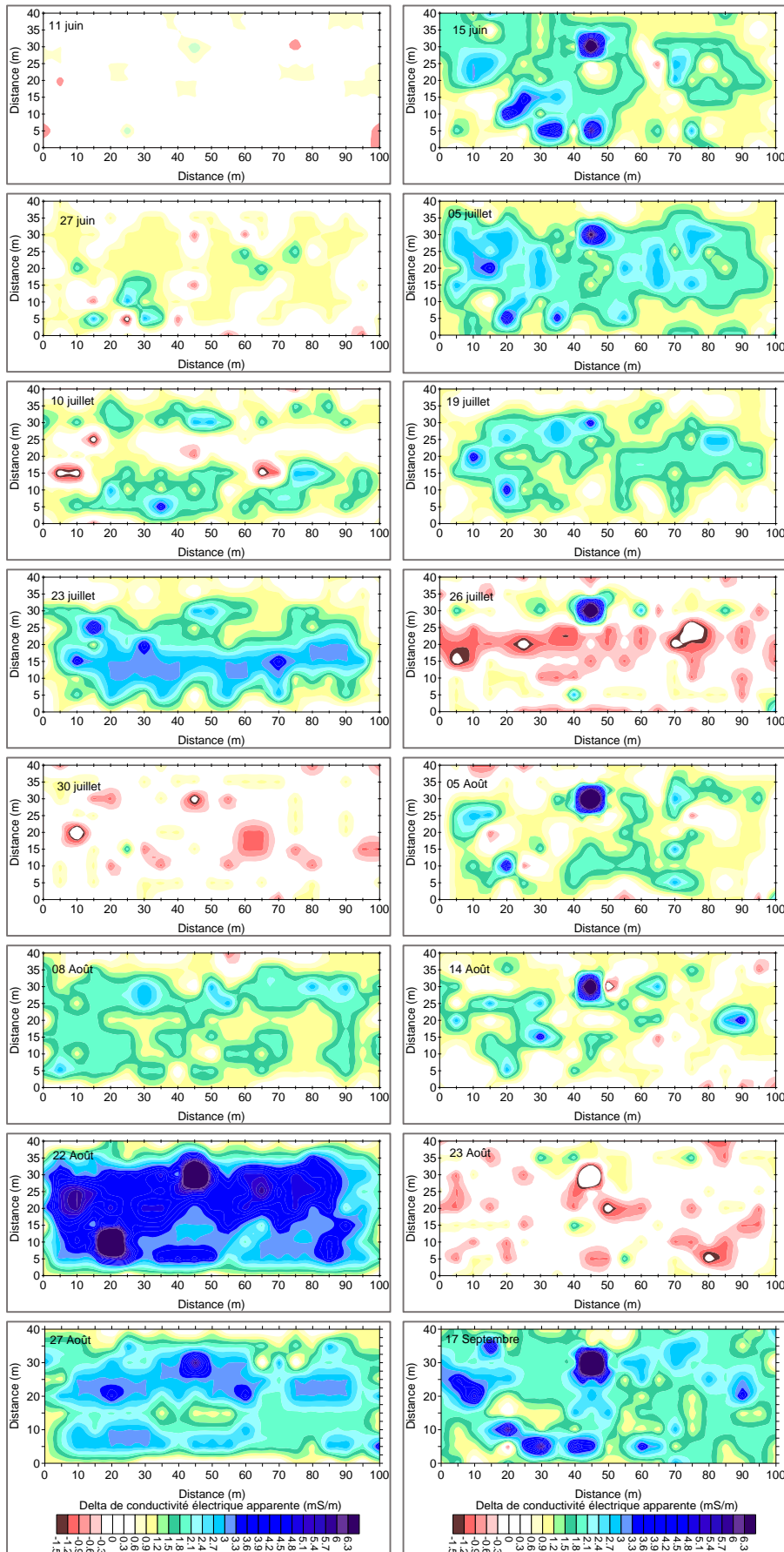
D2. Cartes des écarts de conductivité électrique apparente (mS/m^{-1}) dans la banquette 2 (B2).



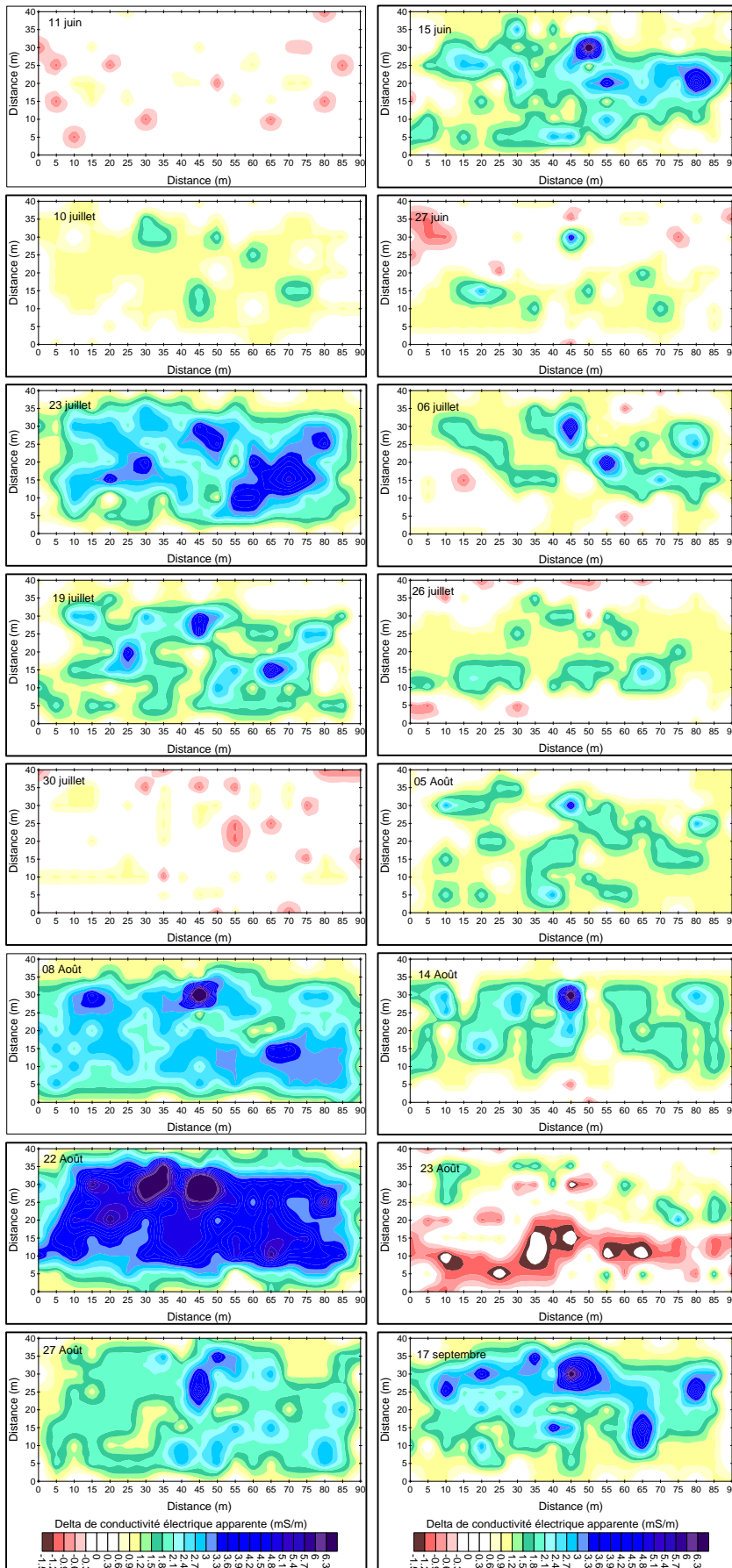
D3. Cartes des écarts de conductivité électrique apparente (mS/m^{-1}) dans la banquette 3 (B3).



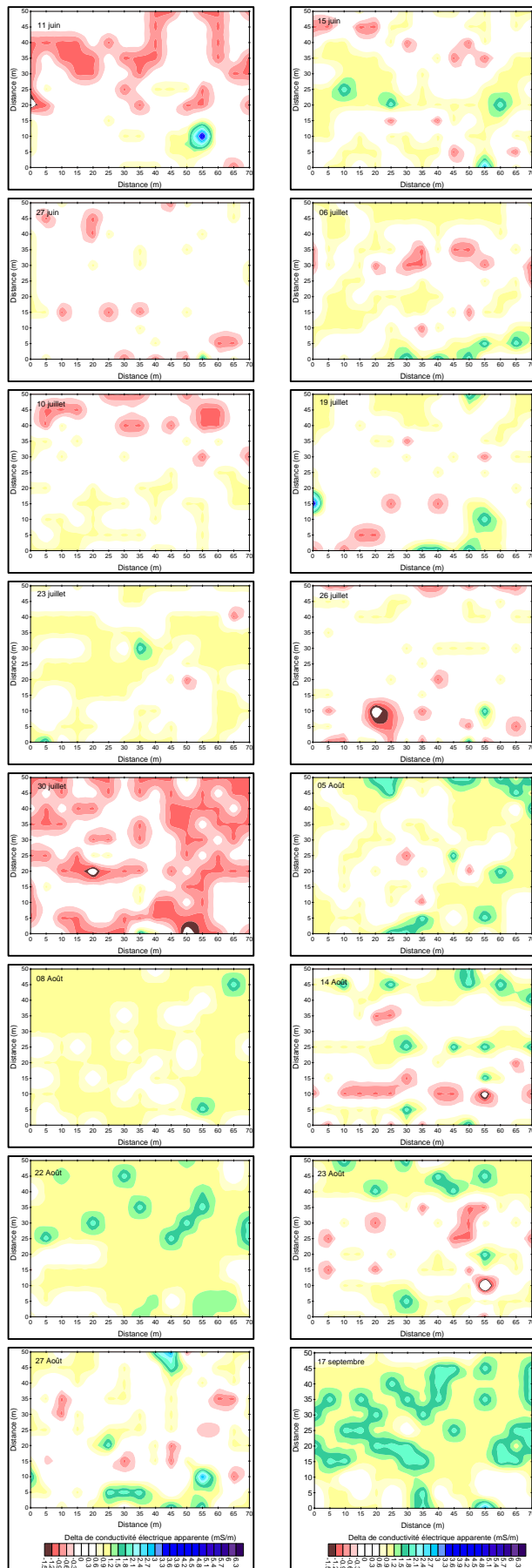
D4. Cartes des écarts de conductivité électrique apparente (mS/m^{-1}) dans le sous-solage 1.



D5. Cartes des écarts de conductivité électrique apparente dans le sous-solage 2 (SL2)

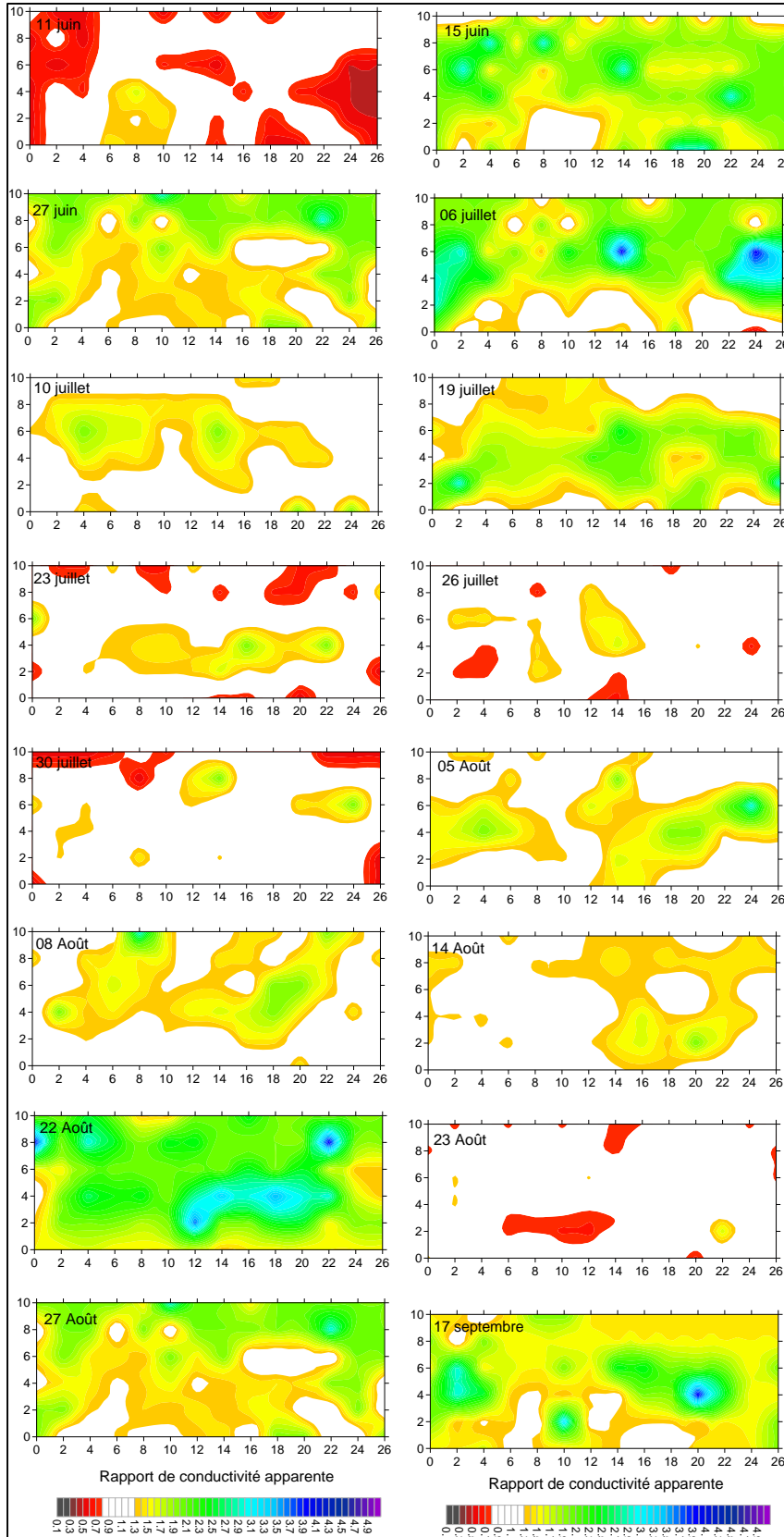


D6. Cartes des écarts de conductivité électrique à l'échelle de la surface témoin

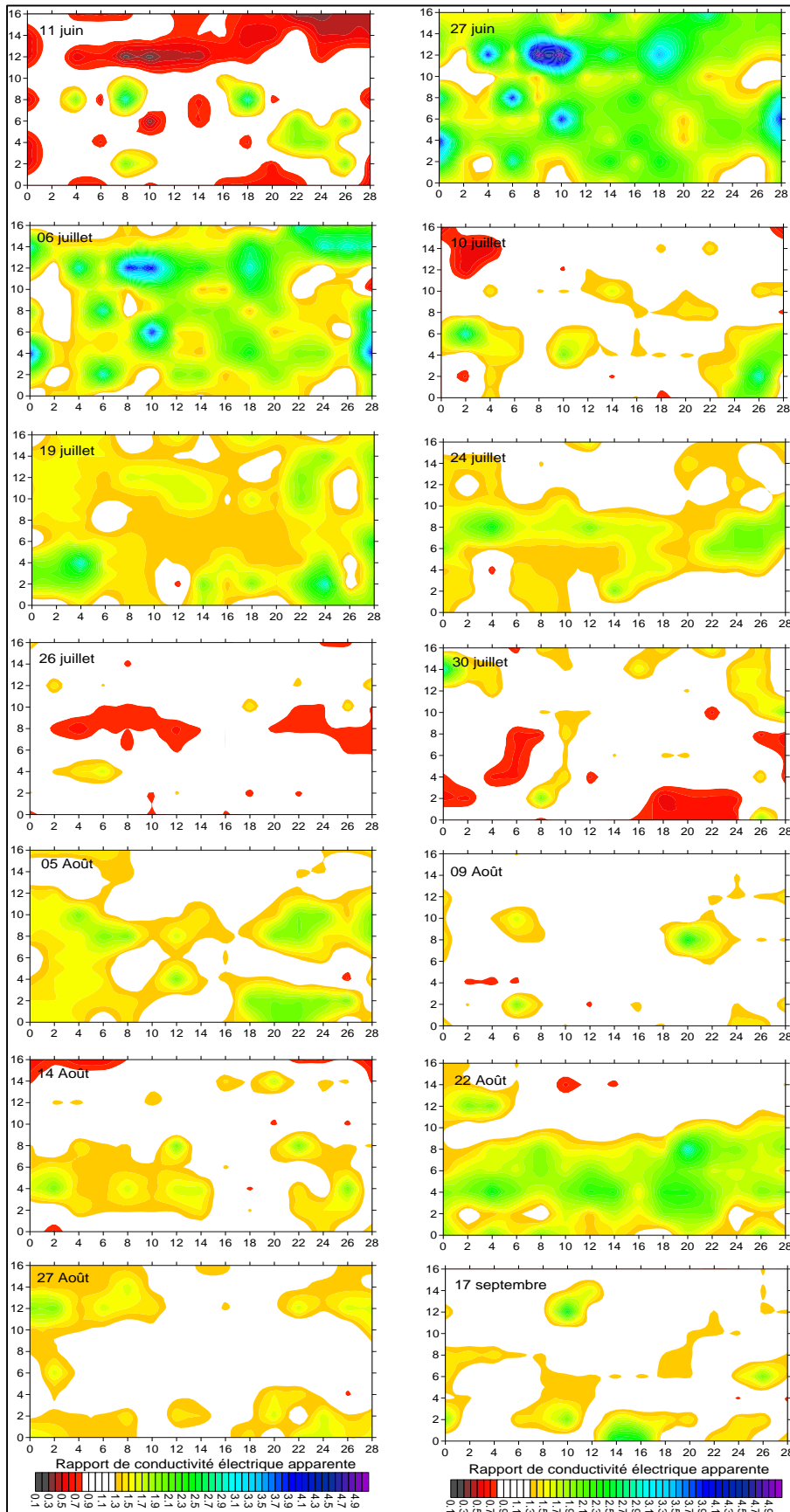


Annexe E. Cartographie des rapports de conductivité électrique ($RCEav = \sigma_{\text{après}} / \sigma_{\text{avant}}$) dans les zones aménagées et témoin

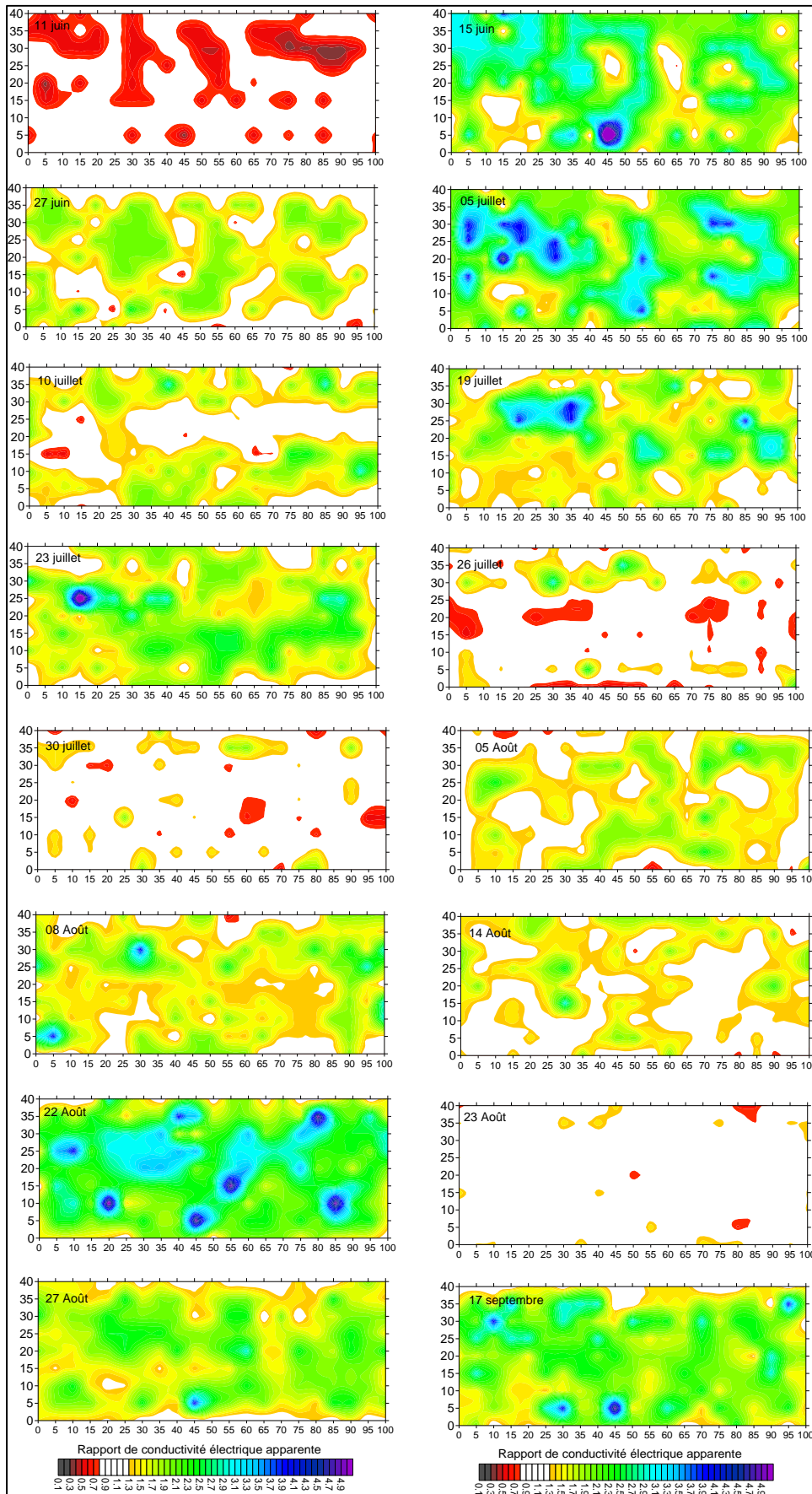
E1. Cartes des rapports de conductivité électrique apparente dans la banquette 1 (B1)



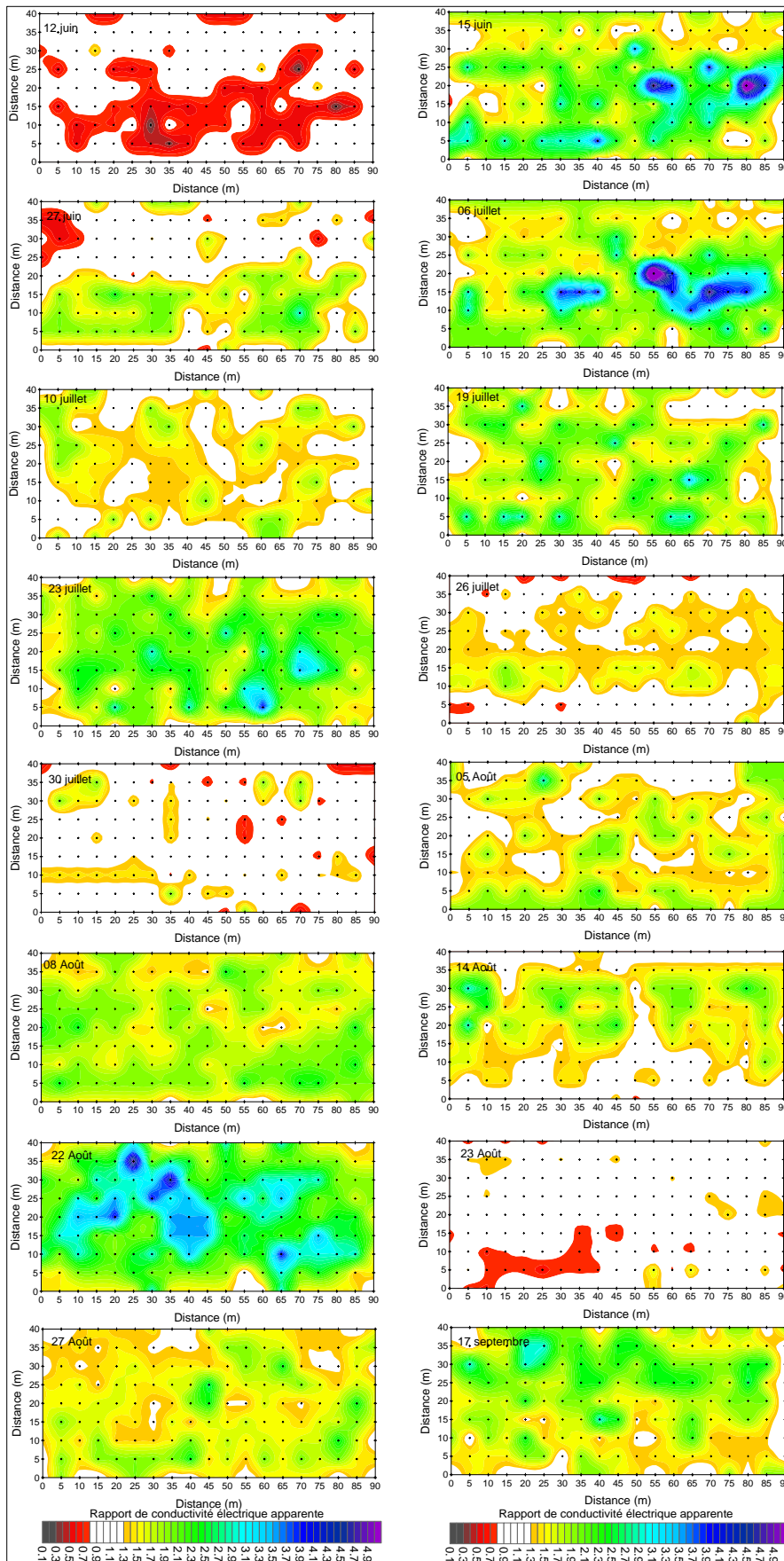
E2. Cartes des rapports de conductivité électrique apparente dans la banquette 3 (B3)



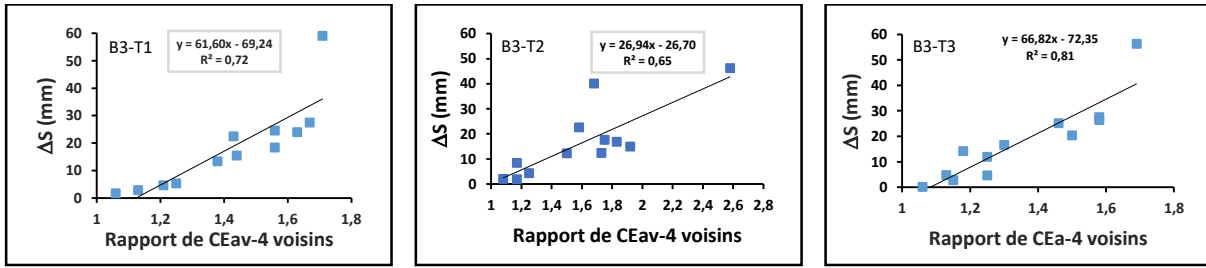
E3. Cartes des rapports de conductivité électrique apparente dans le sous-solage 1 (SL1)



E4. Cartes des rapports de conductivité électrique apparente dans le sous-solage 2 (SL2)

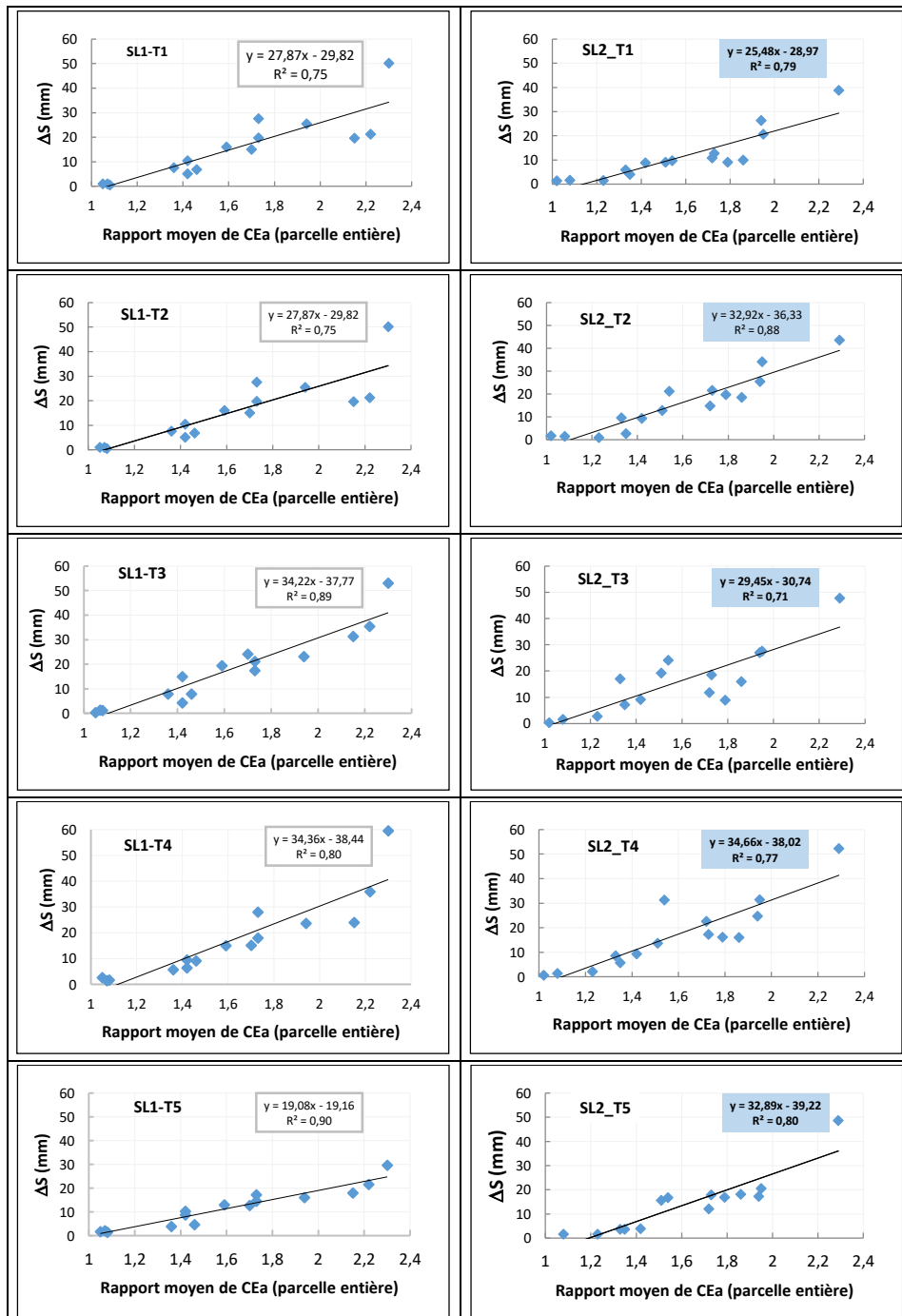


Annexe F : Corrélation entre ΔS et rapport CEa (v) des quatre voisins sur la banquette 3

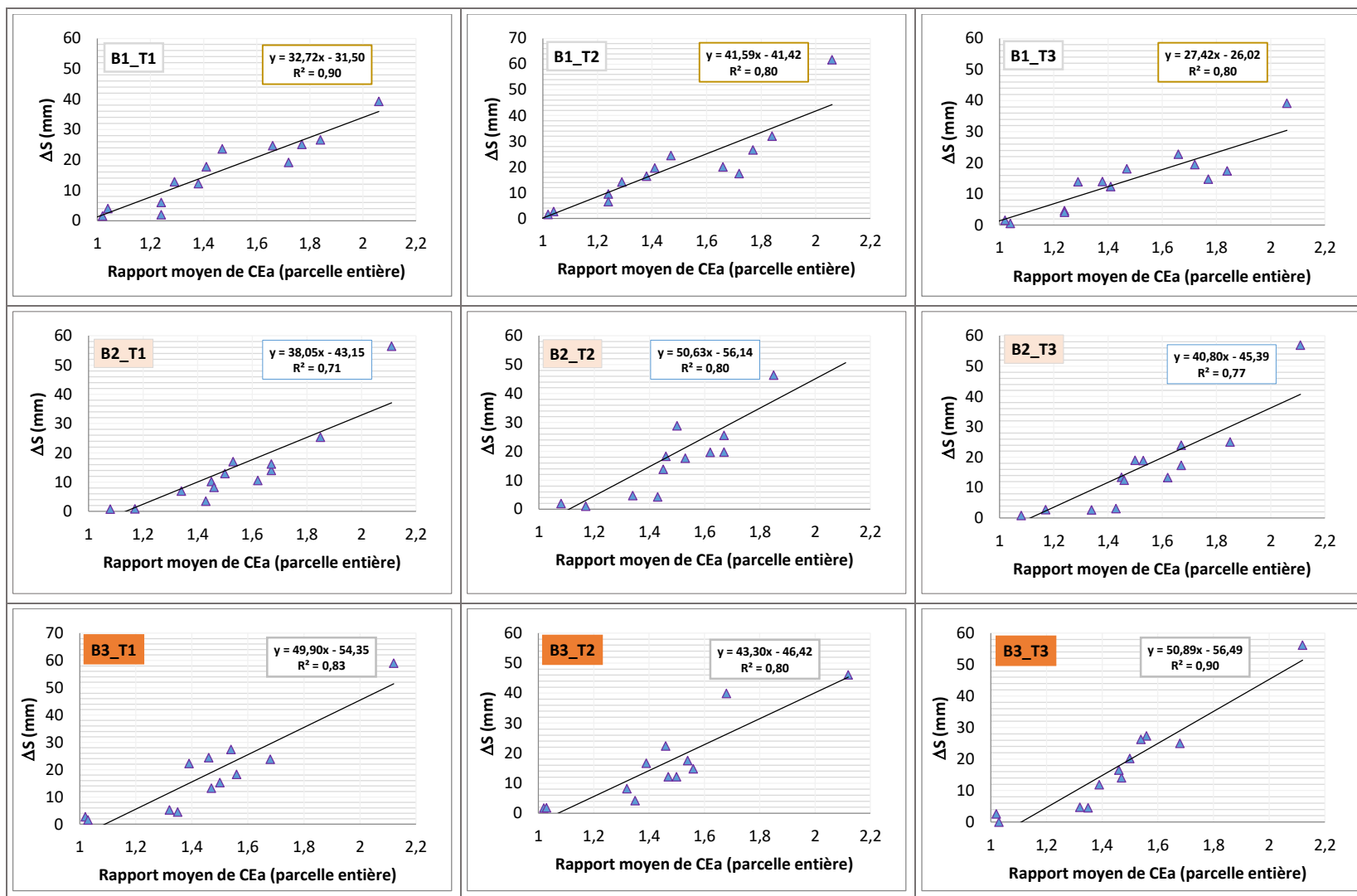


Annexe G : Corrélation entre ΔS et rapport moyen de la CEa (v) de la parcelle entière

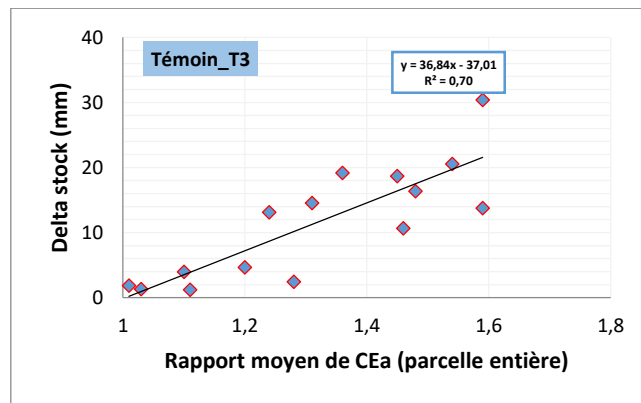
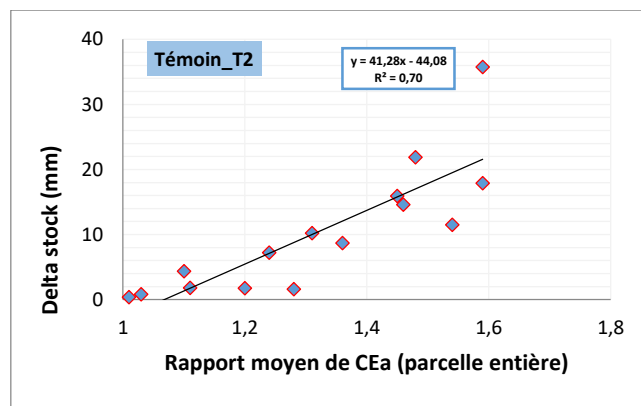
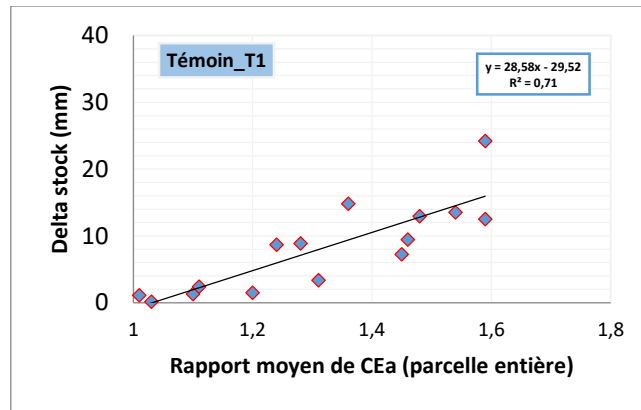
G1. Droites de régression linéaire entre ΔS et RCEa (v) moyen des parcelles SL1 et SL2



G2. Relations linéaires entre le rapport moyen de la CEa (v) et la variation du stock hydrique obtenues sur les banquettes

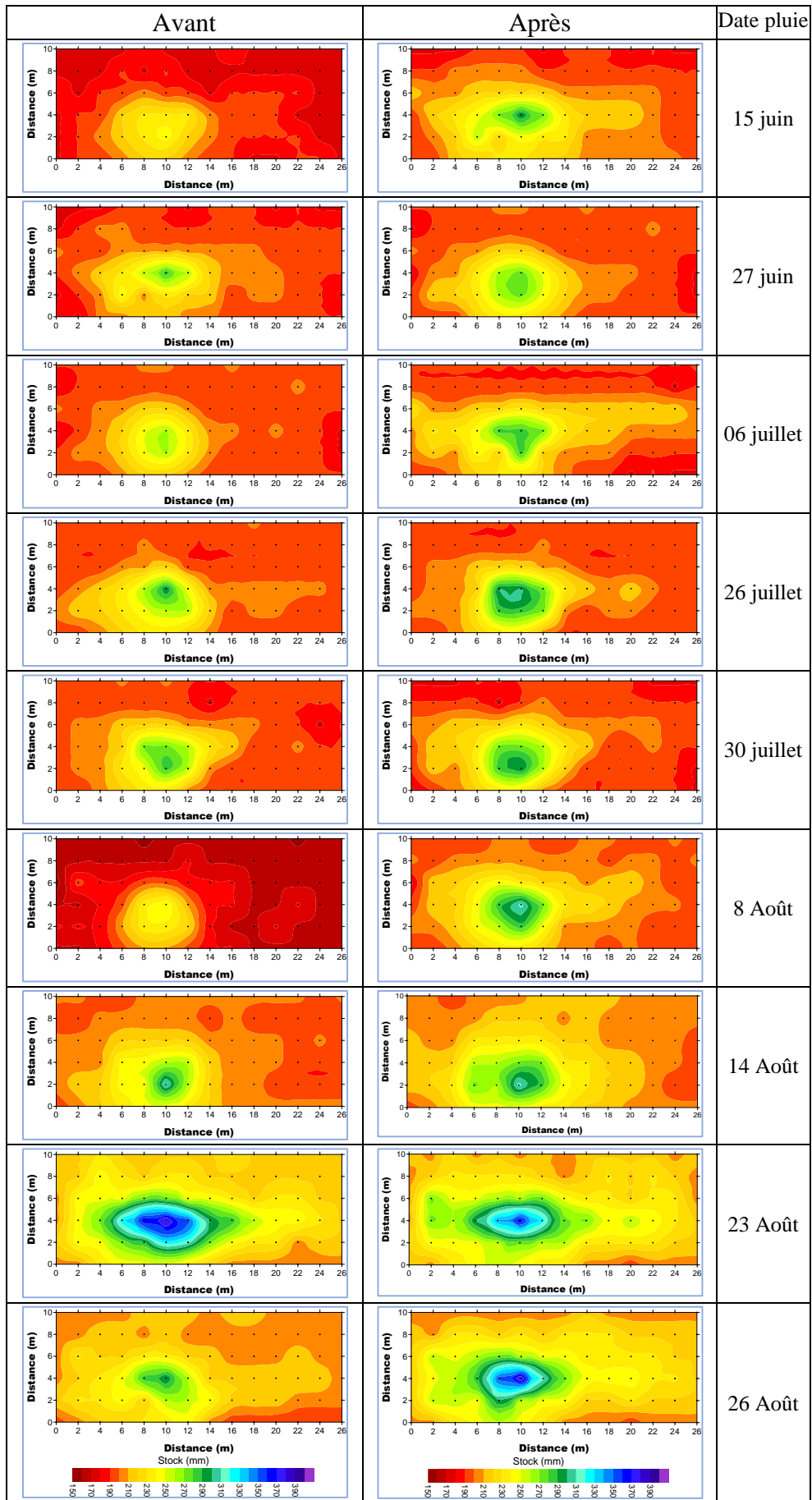


G3. Relation entre la variation du stock et le rapport moyen de la CEa (v) calculé à l'échelle de la parcelle témoin

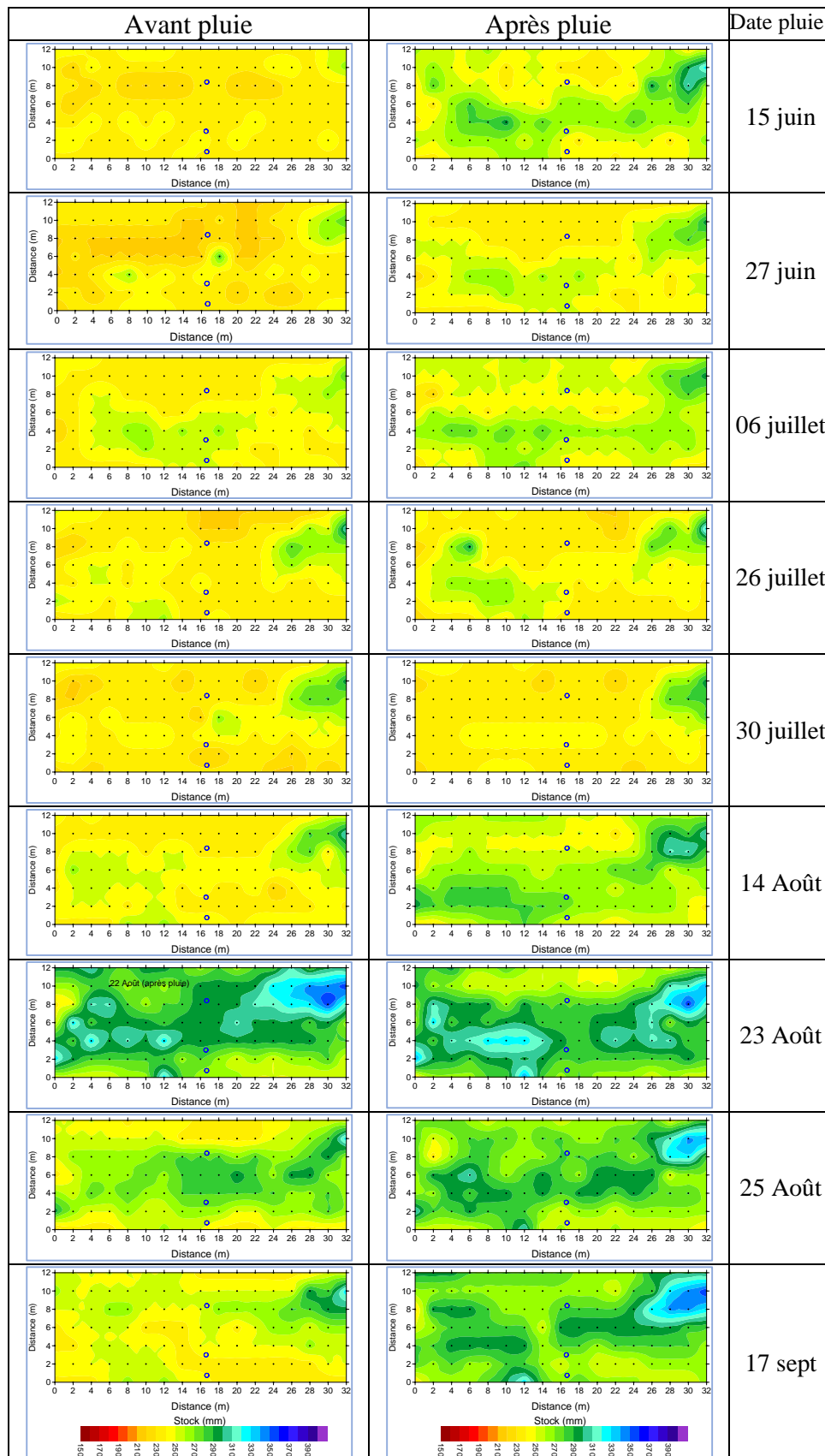


Annexe H : Cartographie du stock hydrique à partir des mesures de conductivité électrique apparente effectuées par EM38

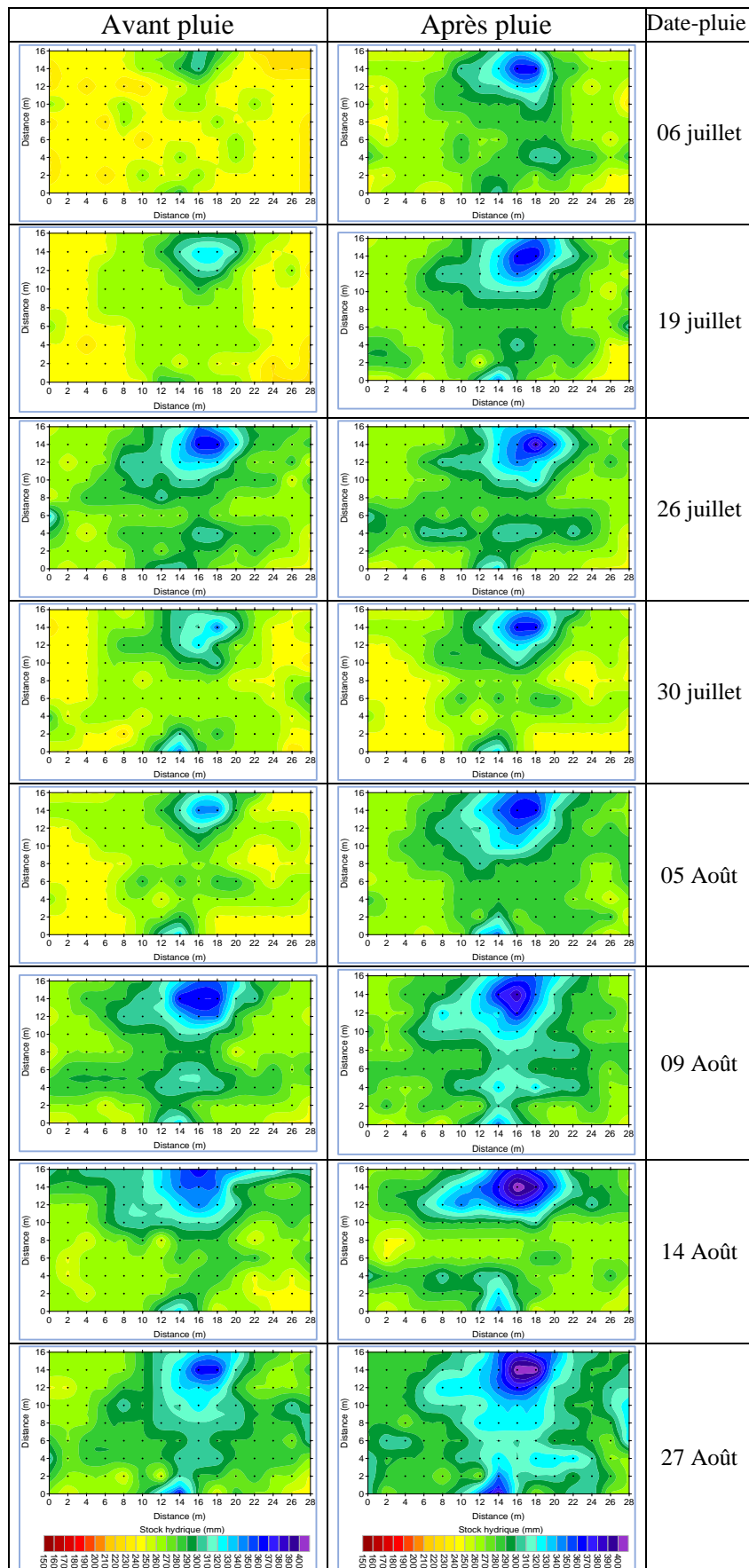
H1. Banquette B1 : cartes du stock hydrique avant et après les événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.



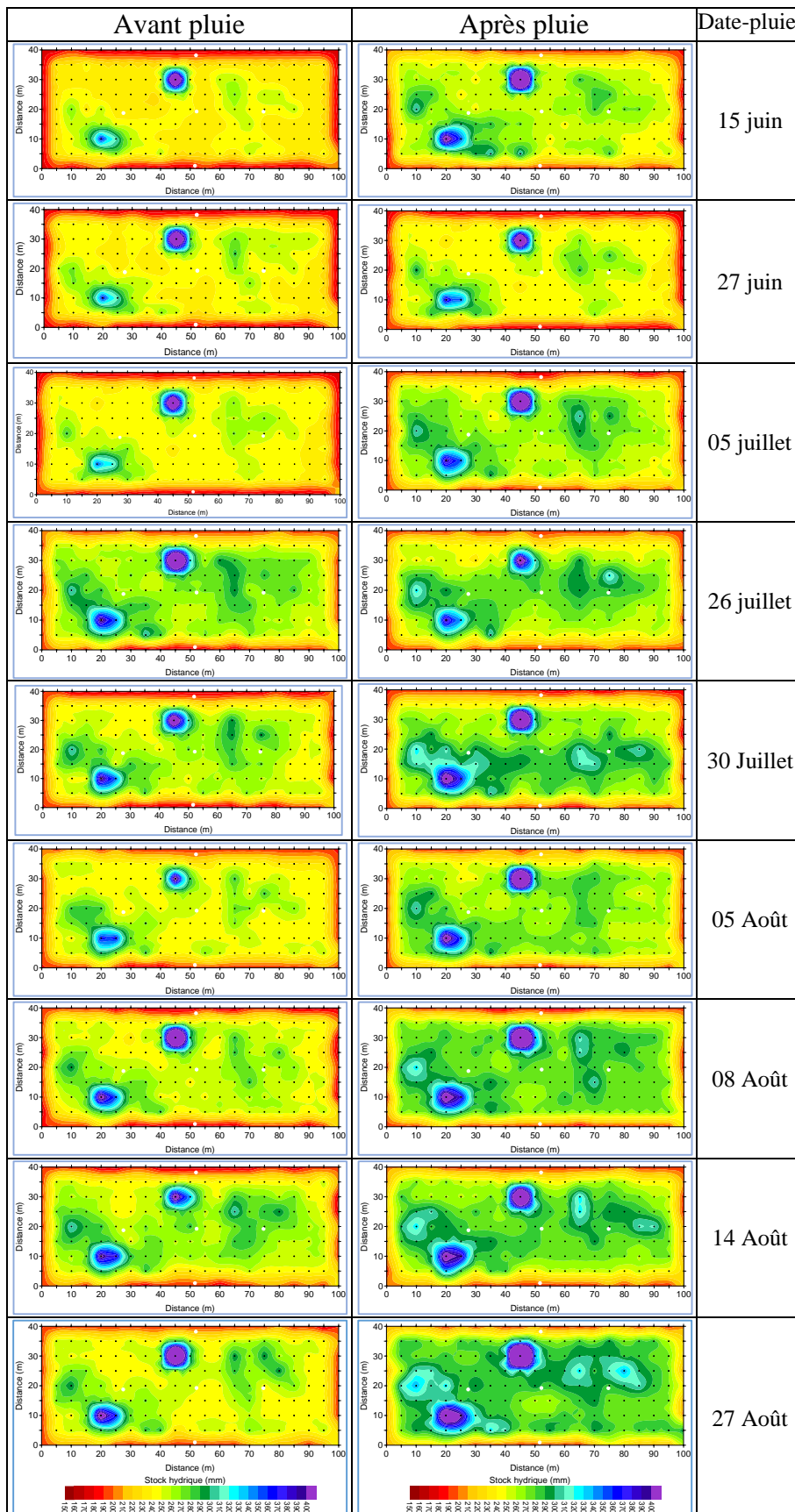
H2. Banquette B2 : cartes du stock hydrique avant et après les événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38.



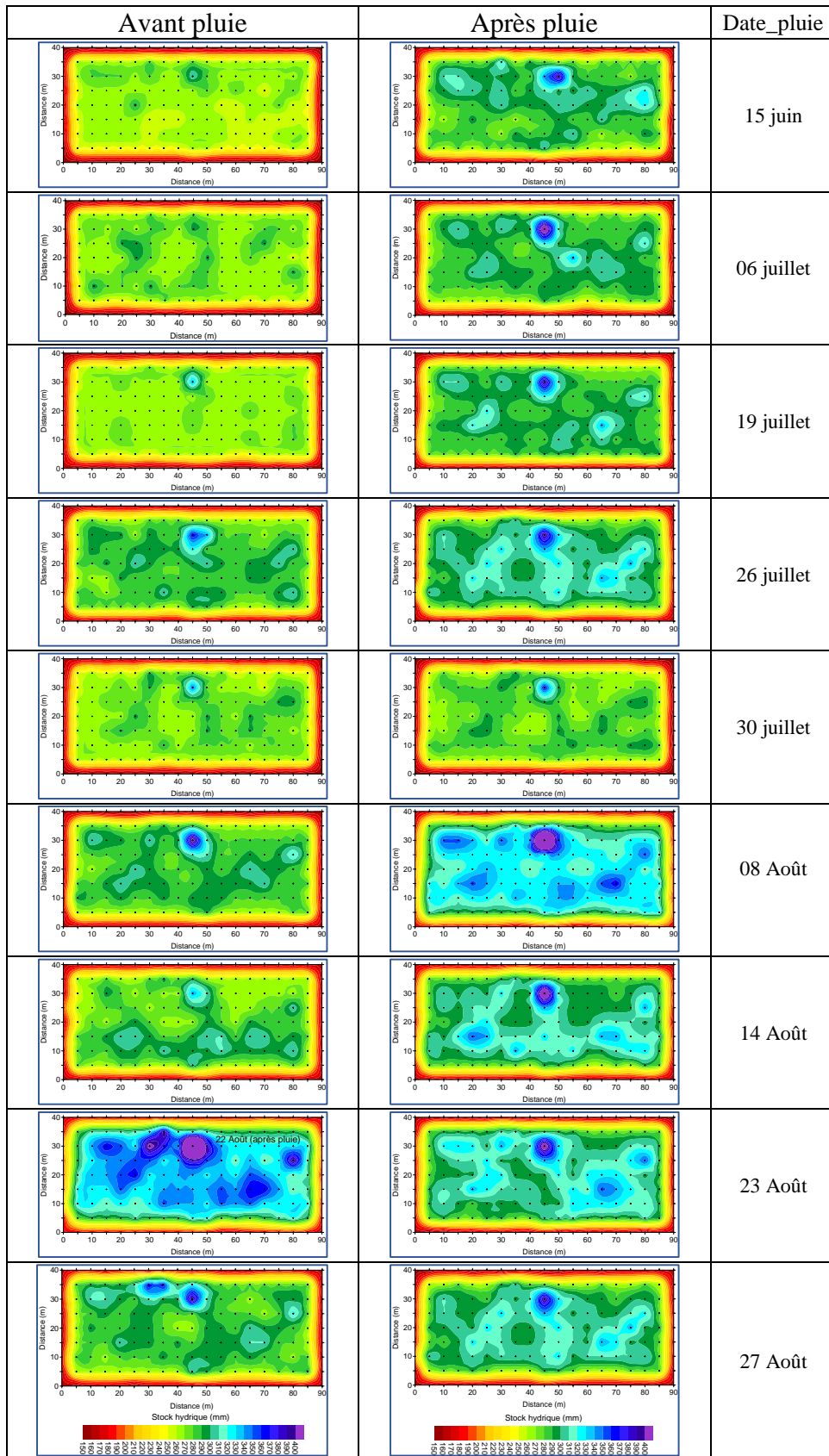
H3. Banquette B3 : cartes du stock hydrique avant et après les événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38.



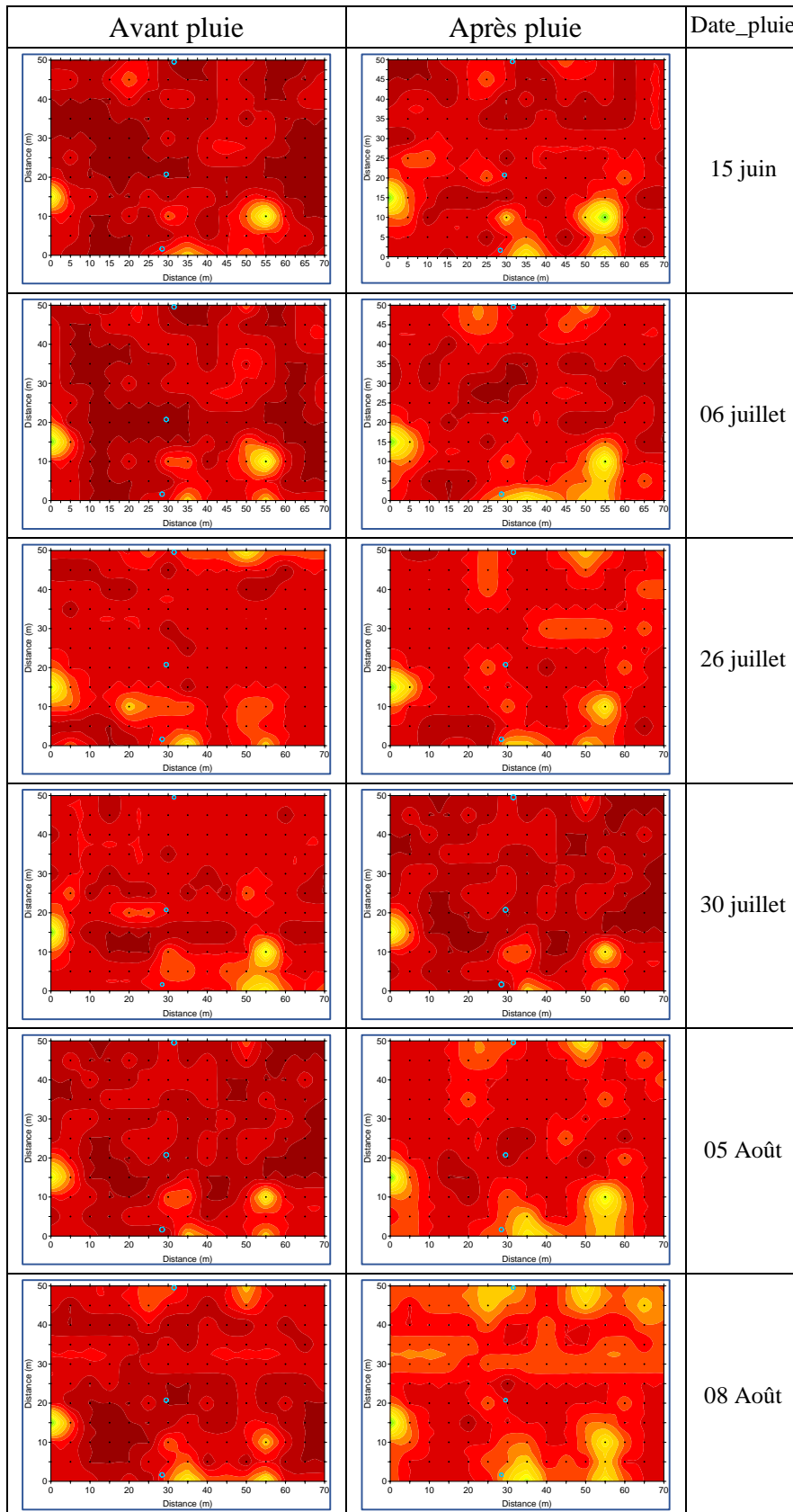
H4. Sous-solage 1 : cartes du stock hydrique avant et après les événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38. A gauche, avant pluie ; à droite, après pluie.

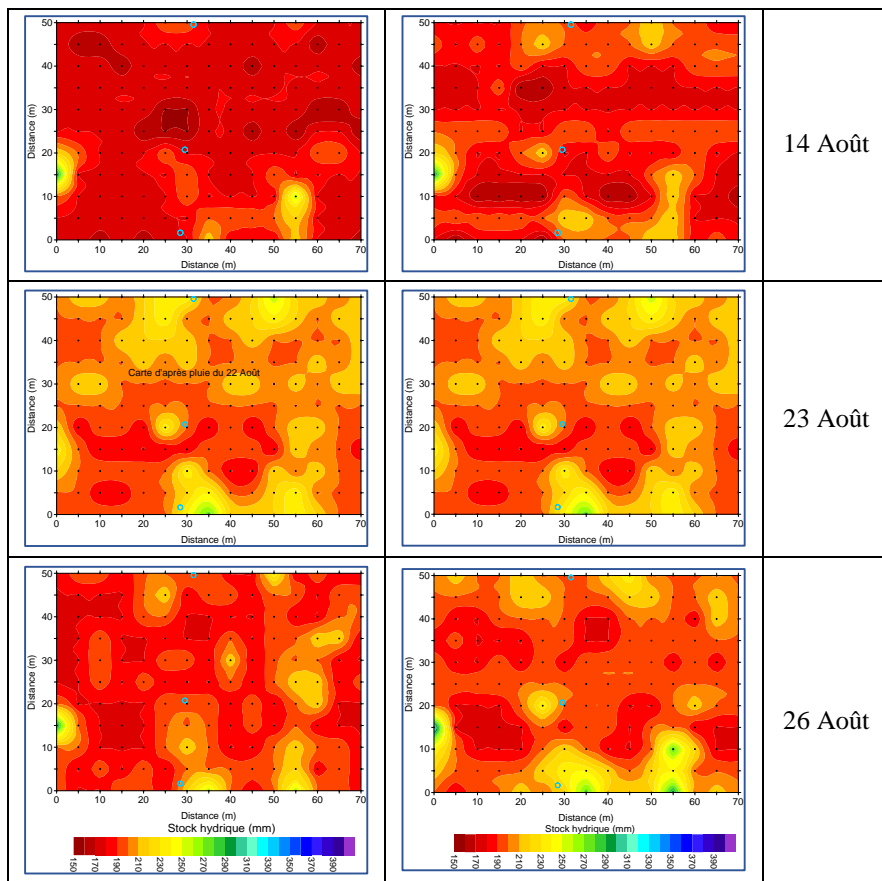


H5. Sous-solage 2 : cartes du stock hydrique avant et après cinq événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38.



H6. Témoin : cartes du stock hydrique avant et après les événements pluvieux choisis sur la saison 2017. Les points noirs indiquent les points de suivi EM38.





Annexe I. Fosse creusée pour la vérification de l'endroit à forte amplitude de conductivité électrique apparente dans le sous-solage 1 (SL1).



Annexe J. résolution de problème du point le plus conducteur de la parcelle SL2, il s'agit d'une ancienne termitière.



Annexe K.

Article publié

Réduction de ruissellement par augmentation des surfaces aménagées

Aghali Ingatan Warzagan^{1,2}, Ibrahim Bouzou Moussa¹, Jean-Pierre Vandervaere², Moussa Malam Abdou³ & Oumarou Faran Maiga¹

(1) Département de Géographie / Université Abdou Moumouni de Niamey BP 418, Niger

(2) Université de Grenoble Alpes / CNRS, IRD Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble France

(3) Département de Géographie / Université de Zinder BP 656, Zinder Niger

Résumé

Au Sahel, de nombreuses techniques de conservation des eaux et des sols ont été mises en œuvre sur des sols dégradés afin de réduire leur aptitude au ruissellement. Mais peu ou prou sont les travaux qui ont analysé les relations entre les dimensions des aires aménagées et l'importance de la baisse des ruissellements engendrée. Ce travail s'inscrit dans cette perspective. Il est effectué sur le bassin versant expérimental de Tondi Kiboro (17,7 ha) qui est un bassin représentatif des conditions hydro-environnementales de l'Ouest du Niger. En 2007 et 2008, le coefficient d'écoulement initial du bassin (sans aménagement) a été déterminé à l'aide d'une station hydrométrique. En 2010, 3 % de la zone contributive du bassin (plateau latéritique) a été aménagée par des banquettes. Cette proportion a, ensuite, été progressivement augmentée pour atteindre 9 % en 2016. Cette approche a ainsi permis de suivre les évolutions concomitantes des surfaces aménagées et du coefficient de ruissellement. Les résultats montrent que les banquettes jouent un rôle important sur la rétention d'eau et la limitation des écoulements. Entre 2010 et 2016, le coefficient de ruissellement est passé de 43 % à 10 % pour une surface totale aménagée de moins de 10 %. Depuis 2012, le coefficient du ruissellement s'est plus ou moins stabilisé autour de 10 % (± 2 %). Il est ainsi remarquable que la baisse du ruissellement soit non proportionnelle à la dimension de l'aire aménagée. Grâce à ce travail, il est ainsi possible de déterminer une aire optimale d'aménagement pouvant permettre de réduire significativement les ruissellements.

Mots clés : Ecoulement, banquettes, Economie de l'eau, Aménagements, Brousse tigrée, Niger.

Article soumis :

Efficacité des aménagements en banquettes face à l'intensification hydro-climatique au Sahel

Ingatan, W. A.¹, Vandervaere, J.-P.², Bouzou Moussa, I.¹, Descloitres, M.² et Malam Abdou, M.³, Faran Maiga, O.¹, Boubacar Na'allah, A.¹, Bouda, I.¹.

¹ *Département de Géographie, Univ. Abdou Moumouni, Niamey, Niger.*

² *Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), UMR 5001 (UGA, IRD, CNRS, G-INP).*

³ *Département de Géographie, Univ. de Zinder, Niger.*

Résumé (soumis)

Entre 2009 et 2016, des aménagements en banquettes ont été progressivement mis en place sur un plateau de brousse tigrée au SW du Niger. Ce type d'aménagement est très répandu mais une évaluation précise de ses bénéfices en termes quantitatifs fait encore défaut. Pendant cette étude, plusieurs banquettes ont été suivies pendant chaque événement pluvieux au cours des saisons 2016 et 2017. La variation de contenu en eau du sol, mesurée par sondage neutronique et par suivi électromagnétique, est comparée à celle du site témoin montrant un gain hydrique très net et qui dépend de la hauteur précipitée. Les profils d'humidité, obtenus grâce à la sonde à neutrons, permettent de chiffrer le gain en profondeur d'infiltration tandis que la méthode électromagnétique fournit une cartographie du stock hydrique. Les mesures offrent suffisamment de précision pour permettre d'établir des prévisions pour l'avenir pour une hauteur et une intensité d'événement données.

A l'échelle du petit bassin (18 ha), les débits mesurés à l'exutoire permettent de calculer la hauteur d'eau ruisselée lors de chaque pluie. On voit qu'au cours de l'aménagement progressif du bassin, entre 2009 et 2016, le coefficient d'écoulement annuel a été divisé par deux et ce, bien que la surface aménagée ne dépasse pas 10 % de celle du bassin. Ce type d'étude permettra aux décideurs d'affiner des politiques d'aménagements efficaces en dosant les surfaces couvertes de manière optimale.

Il serait maintenant très souhaitable de mener des études analogues en zone exoréique afin de lutter pour la conservation des eaux et des sols, à l'échelle locale, et contre les crues et inondations, à l'échelle des grands bassins.

Mots clés : écoulement, banquettes, aménagements, économie de l'eau, bassin versant, brousse tigrée, Niger.