

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

présentée à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

pour obtenir le DIPLOME DE DOCTORAT

en SCIENCES AGRONOMIQUES

**GENESE DU RUISSELLEMENT SUR LES SOLS CULTIVES DU SUD SALOUM
(SENEGAL).**

Du diagnostic à l'aménagement de parcelle.

par

PEREZ , Pascal

Soutenue le 09 Mai 1994 devant le Jury composé de :

**MOINEREAU Jacques
MANICHON Hubert
VALENTIN Christian
LUC Jean Paul
ALBERGEL Jean
FOREST Francis**

**Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de Thèse
Examineur
Examineur**

AVANT-PROPOS

. Ce travail a été mené dans le cadre du programme Gestion des Ressources Naturelles (Sine Saloum) élaboré conjointement par l'ISRA, le CIRAD et l'ORSTOM. Il constitue la synthèse des résultats obtenus de 1987 à 1992 concernant la genèse du ruissellement depuis la surface élémentaire jusqu'à la parcelle agricole. L'interprétation des données et la rédaction ont été réalisées au laboratoire de Machinisme Agricole et de Génie Rural de l'ENSA de Montpellier.

. Cet ouvrage est le fruit d'un travail collectif et pluridisciplinaire, aussi mes premières pensées sont consacrées à tous les collègues qui m'ont soutenus tout au long de mon entreprise. P.RUELLE est l'initiateur, trop ignoré, de ce projet. M.SENE et M. DIATTA ont su créer une complicité scientifique qui trouve aujourd'hui son aboutissement. A.BERNARD a dû conjuguer, avec un caractère égal, hydrologie et agronomie. J.TOUMA m'a initié à la fois à la modélisation et au bricolage !

. Je dois également beaucoup à J.ALBERGEL, Directeur de Recherche à l'ORSTOM. Parce que les maternités font, parfois, bien les choses, le hasard a permis la naissance d'une grande amitié et d'une collaboration scientifique sans faille. Je suis heureux qu'il participe au jury de cette thèse.

. Je tiens à remercier F.FOREST, responsable de l'Unité de Recherche Gestion de l'Eau au CIRAD. Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans son accord et son soutien constant. Sa participation au jury marque l'intérêt qu'il porte aux thèmes développés dans cette étude.

. J.P.LUC, Professeur à l'ENSA de Montpellier, a été un Directeur de Thèse attentif et discret. Attentif au maintien de la démarche scientifique adoptée et à la concision des développements écrits. Discret quand au choix des collaborations extérieures et de l'organisation du travail. Je le remercie d'avoir su conférer à cette thèse rigueur et pragmatisme qui sont les qualités essentielles d'une agronomie ouverte sur la réalité du milieu agricole.

. Je remercie J.MOINEREAU, Professeur à l'ENSA de Montpellier, d'avoir bien voulu utiliser ses grandes compétences pour juger ce travail. Sa présence bienveillante aura jalonné mon parcours depuis la plaine de Crau jusqu'aux glaciers africains.

. H.MANICHON, Chargé de Mission au CIRAD, a accepté d'être rapporteur de cette thèse et de participer au jury. Je tiens à le remercier d'être resté à l'écoute de mes interrogations et de m'avoir consacré une partie de son temps, malgré ses nombreuses tâches.

. Les travaux de C.VALENTIN, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, ont servi de référence dans le cadre de cette thèse. Lors de nos entrevues, il a toujours manifesté de l'intérêt et de l'indulgence pour mes recherches. Son analyse critique a été prépondérante pendant la phase de rédaction. Je le remercie d'avoir accepté de juger cette thèse alors même que ses séjours en France sont comptés.

. Je voudrais également assurer de ma gratitude J.BOIFFIN et J.GUERIF, Directeurs de Recherche à l'INRA, dont la disponibilité m'a profondément touché. F. BARTOLI, Directeur de Recherche au CNRS, a accepté de collaborer sur certains aspects de mes travaux, qu'il en soit remercié. F.N.REYNIERS, chercheur au CIRAD, a su entretenir le débat scientifique lors de nos nombreuses discussions.

. Je tiens à rendre hommage aux membres de l'équipe technique de l'ISRA, en particulier P.S.SARR, qui n'ont ménagé ni leur peine, ni leur temps pour obtenir des données expérimentales de qualité, dans un contexte souvent difficile.

. H.FONTA et M.FORTIER, techniciens au Laboratoire de Gestion Physique des Sols (ENSAM/CIRAD), m'ont fait profiter de leur expérience avec une bonne humeur et une modestie qui les honorent.

. Que serais-je devenu sans la frappe magique de N.BONFIGLIO...? En un mot comme en cent, merci.

. Enfin, pour les heures volées, les nuits blanches, les périodes d'éloignement...je demande pardon à Véronique, Antoine, Marion et Sabine.

Cet ouvrage est dédié à la mémoire de Niokhor Ngom.

RESUME

. L'analyse des différents facteurs de dégradation du milieu naturel dans le sud Saloum (Senegal) met en évidence le rôle majeur du ruissellement dans les processus actuels. Des études, menées en mode synchronique ou diachronique, permettent de quantifier les flux en présence à l'échelle de la surface élémentaire ou de la parcelle de culture.

. La variabilité spatiale des états de surface le long d'une toposéquence représentative explique, en grande partie, les différentes conditions de genèse du ruissellement rencontrées. Cependant, l'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent l'aptitude du sol au ruissellement. Les observations sous pluies naturelles confirment les résultats des expérimentations sous pluies simulées. Un modèle empirique de détermination des lames ruisselées est élaboré mais son utilisation est limitée par la forte variabilité spatiale des caractéristiques des croûtes sableuses superficielles. Leur comportement physique et hydraulique est décrit à l'aide de quelques exemples.

. Ces éléments de diagnostic permettent d'établir les principaux objectifs dévolus à une gestion du ruissellement à l'échelle de la parcelle agricole. Des techniques d'aménagement sont mises en place sur deux bassins versants élémentaires (2,5 ha). Leur influence est étudiée grâce à une analyse comparative des paramètres hydrologiques et agronomiques avant et après aménagement.

MOTS CLEFS : aptitude au ruissellement ; bassin versant élémentaire ; état de surface ; gestion agricole de l'eau ; Senegal ; simulateur de pluie ; terres agricoles.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION GENERALE 11

PREMIERE PARTIE : UN MILIEU NATUREL DEGRADE 17

1 PRESENTATION DU MILIEU 19

1.1 Situation géographique 19

1.2 Eléments de géomorphologie 19

1.3 Eléments de morphopédologie 19

1.3.1 Les plateaux

1.3.2 Les versants

1.3.3 Les bas-fonds

1.4 Aspects du climat 23

1.4.1 Aspects généraux

1.4.2 Pluviométrie

1.4.3 Pluviographie

1.5 L'occupation des sols 26

1.6 Structures sociales et systèmes de culture 28

1.6.1 Structures sociales et conséquences agraires

1.6.2 Systèmes de culture

1.7 Une dégradation généralisée de l'écosystème 31

1.7.1 Approche synthétique

1.7.2 Approche spatiale

DEUXIEME PARTIE : BILAN DES CONNAISSANCES DISPONIBLES	35
2 BASES CONCEPTUELLES ET ACQUIS DE LA RECHERCHE	37
2.1 Aspects généraux	37
2.2 Mécanismes de dégradation de la surface	37
2.2.1 Les différents mécanismes	
2.2.2 Méthodes d'étude	
2.3 Apports des études sur le ruissellement	41
2.3.1 La genèse du ruissellement	
2.3.2 Entretien du ruissellement	
2.4 Apports des études sur l'érosion	47
2.5 Les facteurs de sensibilité des sols tropicaux	48
2.5.1 Facteurs intrinsèques	
2.5.2 Facteurs contingents	
2.5.3 Les facteurs topographiques	
2.5.4 Les facteurs externes	
TROISIEME PARTIE : METHODES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	61
3 METHODOLOGIE ET SITES EXPERIMENTAUX	63
3.1 Conséquences méthodologiques des acquis	63
3.1.1 Rappel des objectifs	
3.1.2 Des contingences déterminantes	
3.2 Des outils scientifiques privilégiés	65
3.2.1 Mesures hydrométriques	
3.2.2 Mesure de l'humidité du sol	
3.2.3 Mesure du potentiel de l'eau du sol	
3.2.4 Mesure de la rugosité du sol	
3.3 Dispositifs expérimentaux	77
3.3.1 Le bassin versant S2 (0,58 km ²)	
3.3.2 Le bassin versant S3 (0,90 km ²)	
3.3.3 Le bassin versant S4 (2,5 ha)	
3.3.4 Le bassin versant S5 (2,5 ha)	
3.3.5 Le milieu contrôlé	

QUATRIEME PARTIE : APPORTS DU SIMULATEUR DE PLUIE DANS L'ANALYSE DES FACTEURS DE RUISSELLEMENT	95
4 ETUDE DE LA VARIABILITE DU RUISSELLEMENT LE LONG DE LA TOPOSEQUENCE	97
4.1 Protocole d'étude	97
4.2 Etude des lames ruisselées et infiltrées	99
4.2.1 Analyse globale	
4.2.2 Analyse des corrélations	
4.3 Etude de la pluie d'imbibition	101
4.4 Etude de l'intensité limite de ruissellement	103
4.4.1 Remarques préliminaires	
4.4.2 Résultats	
4.5 Etude des cinétiques d'infiltration	107
4.5.1 Analyse à l'échelle de l'averse	
4.5.2 Analyse à l'échelle du protocole complet	
4.6 Modélisation des lames ruisselées	111
4.7 Caractérisation des état de surface finaux	115
4.8 Discussion	115
5 ETUDE DE L'EVOLUTION D'UN COUVERT CULTIVE ET DE SON INFLUENCE SUR LE RUISSELLEMENT	
5.1 Objectifs	117
5.2 Protocoles de mesures	117
5.2.1 Le taux de recouvrement	
5.2.2 L'état hydrique du sol	
5.2.3 La rugosité du sol	
5.3 Description des parcelles	121
5.4 Etude des lames ruisselées et des coefficients de ruissellement	123
5.5 Etude de la pluie d'imbibition	127
5.6 Etude de l'intensité limite de ruissellement	127
5.7 Modélisation des lames ruisselées	132
5.7.1 L'approche séquentielle	
5.7.2 L'approche univoque	
5.8 Discussion	136

CINQUIEME PARTIE : GENESE DU RUISSELLEMENT SOUS PLUIES NATURELLES	139
6 ETUDE DU RUISSELLEMENT SOUS PLUIES NATURELLES	141
6.1 Collecte des données	141
6.2 Les données pluviométriques	141
6.3 Les données agronomiques	143
6.4 Les données hydrologiques	146
6.4.1 Les parcelles situées sur la terrasse (S4)	
6.4.2 Les parcelles situées sur le glacis (S5)	
6.5 Influence des interventions culturales	154
6.6 Modélisation des lames ruisselées	158
6.6.1 Toutes cultures confondues	
6.6.2 Les parcelles cultivées en arachide	
6.6.3 Prise en compte du ruissellement dans un modèle de bilan hydrique	
6.7 Discussion	169
7 CARACTERISATION DES CROÛTES SUPERFICIELLES	173
7.1 Caractérisation du matériau sableux superficiel	173
7.1.1 Analyse granulométrique	
7.1.2 Analyse du retrait	
7.1.3 Test de compactage dynamique	
7.2 Caractérisation physique des croûtes sableuses	175
7.2.1 Influence de l'intensité pluviométrique	
7.2.2 Influence de l'état structural initial	
7.3 Caractérisation hydrodynamique d'une croûte sableuse	179
7.3.1 Influence du mode d'apport d'eau	
7.3.2 Détermination de la conductivité hydraulique d'une croûte sableuse	
7.4 Discussion	180

SIXIEME PARTIE : LUTTE CONTRE LE RUISSELLEMENT A L'ECHELLE DE LA PARCELLE	183
8 GESTION DU RUISSELLEMENT A L'ECHELLE DE LA PARCELLE AGRICOLE	185
8.1 Conséquences techniques des études ponctuelles sur le ruissellement	185
8.2 Influence sur l'infiltration du décompactage du sol en condition sèche	187
8.3 Etude de la réponse hydrologique globale des bassins versants S4 et S5	189
8.3.1 Le bassin versant S4	
8.3.2 Le bassin versant S5	
8.3.3 Conclusion partielle	
8.4 Analyse de la redistribution de l'eau à l'intérieur du bassin versant	199
8.4.1 Relation entre les variabilités spatiales des stocks hydriques et des états de surface	
8.4.2 Relation entre les zones krigées et leur aptitude au ruissellement	
8.5 Influence de l'aménagement sur la redistribution de l'eau au sein du bassin versant	203
8.5.1 Variabilité spatiale des stocks hydriques après aménagement	
8.5.2 Influence de la haie vive sur l'infiltration	
8.5.3 Influence des seuils filtrants sur le ruissellement et les atterrissements	
8.5.4 Discussion	
CONCLUSION GENERALE	213
Références bibliographiques	219
Liste des figures	233
Liste des tableaux	239
Annexes	245

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

. En Afrique soudano-sahélienne, la dégradation du milieu naturel prend des proportions alarmantes depuis la fin des années soixante. Si la désertification et les famines restent le triste apanage des régions sahéliennes, certaines zones plus méridionales connaissent une situation guère plus enviable. La conjonction de facteurs climatiques et pédologiques entraîne d'importants processus érosifs qui menacent de vastes superficies agricoles. **De toutes les crises climatiques survenues dans la région, la période actuelle est la plus grave car elle frappe des écosystèmes fortement anthropisés (Rognon, 1991).** Principal accusé, défricheur infatigable, consommateur d'espace et de fertilité, l'agriculteur africain, n'en déplaît à certains, est également une victime. Cette vérité première a souvent été oubliée dans les projets de Défense et Restauration des Sols, puis de Conservation des Eaux et des Sols qui ont fleuri en Afrique de l'Ouest (Rochette, 1989). La stabilisation des terroirs villageois et le maintien d'une productivité durable nécessitent une démarche participative qui implique réellement les populations locales et s'inscrive dans la durée.

. Cette approche sociale ne doit pas se faire au détriment des études techniques et scientifiques. Elle doit s'appuyer sur un diagnostic opérationnel efficace et un référentiel technique adapté. Car la principale difficulté, s'agissant de gestion des ressources naturelles, est d'appréhender la diversité du milieu naturel, les différentes échelles de paysage et la complexité des processus. Trop souvent, faute de mieux, les sempiternels "ONSAIKEU" et "YAKA" servent de guides spirituels à l'aménagiste. Pourtant, de nombreux acquis scientifiques ne demandent qu'à être valorisés, en particulier dans le domaine des écoulements de surface.

. Depuis le début des années soixante les hydrologues sahéliens se sont attachés à modéliser les crues décennales de bassins versants de dimensions variées mais toujours conséquentes pour un agronome. Ces louables efforts ont permis de mettre au point une méthode prédictive d'estimation des écoulements (Rodier et Auvray, 1965), sans cesse améliorée depuis sa création. Dans le même temps, l'approche empirique développée aux Etats-Unis d'étude de l'érosion a été importée en Afrique de l'Ouest. Les résultats issus des parcelles d'érosion disséminées sur l'ensemble du continent démontrent que l'agressivité climatique est le principal facteur érosif et qu'il existe une forte variabilité de l'érodabilité des sols tropicaux (Roose, 1977).

. Durant de longues années, l'étude de cette variabilité et sa liaison avec les processus de genèse du ruissellement est demeurée un axe de recherche important. **L'influence prépondérante des états de surface et de leur agencement au sein des unités de paysage a été démontrée.** Elle a permis de développer une approche descriptive des croûtes superficielles et d'élaborer un modèle empirique de genèse du ruissellement en zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989). Cependant, cette méthode demeure incomplète dans le cas des sols cultivés. En effet, les croûtes superficielles sont alors temporaires et les façons culturales modifient plus ou moins les caractéristiques des états de surface. Cette variabilité est renforcée par le rôle du couvert végétal (Lal, 1988).

. Les résultats concernant l'impact des techniques d'aménagement sont rares et fragmentaires. Dans la plupart des cas, ils sont limités à une technique et une échelle spatiale données. En revanche, les facteurs de blocage socio-économiques qui font obstacle à leur mise en place, sont largement décrits (Marchal, 1987). Souvent, le rejet de l'innovation par les populations locales découle du faible impact de l'aménagement sur le milieu ou de l'apparition d'effets pervers. **En fait, il faut resituer la lutte contre le ruissellement dans son contexte agricole et tendre vers une véritable gestion agricole de l'eau sur les versants (Reyniers et Forest, 1990).**

. Le programme de recherche élaboré conjointement, à partir de 1983, par l'ISRA, le CIRAD et l'ORSTOM s'inscrit dans cette logique. Il est fondé sur le constat d'échec relatif de l'intensification dans la région du sud Saloum. Une enquête exploratoire a montré que la dégradation du milieu naturel est un corollaire à cette intensification et qu'elle conditionne la stagnation de la production agricole (Benoît-Cattin, 1986). Dans un premier temps, une approche morpho-pédologique a permis de dresser une esquisse des phénomènes en présence (Angé, 1991) et de mettre en place une série

de bassins versants expérimentaux. A partir de 1988, certains bassins versants sont aménagés, avec pour objectif de stabiliser les terres agricoles et de maintenir le potentiel de production. Les études hydrologiques et agronomiques tentent de quantifier l'impact de ces aménagements à plusieurs échelles. Conjointement, les équipes scientifiques développent un référentiel technique transférable en milieu paysan (Ruelle et al., 1990).

. Notre étude s'inscrit dans cette démarche, à la fois pluridisciplinaire et opérationnelle. Nous allons essayer de décrire les différentes étapes qui conduisent du diagnostic à l'aménagement, en ne considérant qu'un seul facteur d'entrée : le ruissellement. Cette approche, volontairement restrictive par rapport à la réalité de terrain, permet de jeter les bases d'une réflexion plus vaste qui intégrera la fertilité, les ressources biologiques et humaines.

. La première étape consiste à analyser les différents facteurs qui interviennent dans le processus de dégradation hydrique du milieu, puis à établir un diagnostic synthétique et spatialisé. La seconde étape met en oeuvre des méthodes d'étude rapides aptes à hiérarchiser les différents facteurs de genèse du ruissellement. Elle est fondée sur une approche descriptive des états de surface et fait appel aux études synchroniques sous pluies simulées. La troisième étape correspond aux propositions de techniques de gestion agricole de l'eau qui puissent être adoptées par les exploitants agricoles. L'étape finale doit permettre de quantifier l'impact d'un aménagement à l'échelle de la parcelle de culture, puis du versant.

. La première partie décrit le milieu naturel du sud Saloum sous ses différents aspects. Le rôle majeur du ruissellement dans les principaux processus de dégradation des écosystèmes est mis en évidence.

. La seconde partie est consacrée aux principaux acquis de la recherche concernant les mécanismes de genèse du ruissellement et leurs principaux facteurs en région tropicale.

. La troisième partie aborde les spécificités méthodologiques de l'étude et présente le dispositif expérimental.

. La quatrième partie concerne les résultats d'essais sous pluies simulées. On caractérise, dans un premier temps, la variabilité du ruissellement le long d'un versant. Ensuite, on étudie la variabilité du ruissellement au sein d'un itinéraire technique.

. La cinquième partie regroupe les résultats acquis sous pluies naturelles qui permettront de valider ceux obtenus en mode synchronique. Nous abordons alors le déterminisme de formation des croûtes superficielles.

. La sixième partie est consacrée à l'analyse comparative des réponses hydrologiques et agronomiques des bassins versants, avant (période noire), puis après aménagement (période blanche).

. La conclusion contient les principaux enseignements méthodologiques de l'étude ainsi qu'une réflexion sur les possibilités de transfert de ces acquis, au delà d'une simple action de recherche-développement.

PREMIERE PARTIE :
UN MILIEU NATUREL DEGRADE

1 PRESENTATION DU MILIEU :

1.1 Situation géographique :

. La zone d'étude, qui s'étend sur environ 2000 km², est située dans le sud du Sine Saloum. Elle est limitée à l'ouest et au nord par le Bao Bolon, affluent du fleuve Gambie, à l'est par le réseau hydrographique du Nianiji Bolon et au sud par la frontière avec la Gambie. Le Bao Bolon constitue un axe de drainage fonctionnel en partie envahi par les eaux marines ; il collecte les eaux d'affluents situés surtout en rive gauche qui ont des régimes d'écoulement intermittents en saison pluvieuse. Le modelé général de la région est un ensemble de vastes plateaux tabulaires de 30 à 60 mètres d'altitude, entaillé par un réseau de larges vallées à faible pente. Au quaternaire, les pédogenèses successives se sont imprimées sur les facettes de ce modelé (Figure 1).

1.2 Eléments de géomorphologie :

. La région appartient à la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Le substratum géologique homogène est constitué par les formations sédimentaires du Continental Terminal mis en place au pliocène. Le faciès dominant de ces formations détritiques est un grès hétérométrique, argileux, bariolé et azoïque. Les sédiments contiennent localement des lentilles de sable, des bancs d'argile kaolinique et des passées de gravillons ferrugineux. Ces dépôts reposent sur les calcaires et marnes de l'éocène (Michel, 1973).

. Les fluctuations climatiques du quaternaire ancien ont déterminé les principales phases de la morphogenèse. Lors des périodes subarides, les lits des cours d'eau se sont creusés et de vastes glacis se sont mis en place. Leurs matériaux ont été altérés pendant les périodes plus humides. Des plateaux sub-horizontaux actuellement coiffés de cuirasses ferrugineuses semblent avoir été générés par au moins une phase d'aplanissement (Bertrand, 1972 ; Angé, 1991).

. Au quaternaire récent, de grandes variations du niveau marin ont entraîné l'incision du modelé d'aplanissement par un réseau hydrographique peu dense et peu hiérarchisé ; le long du Bao Bolon, une partie des marigots est commandée par un réseau de failles. De nouveaux glacis en faible pente se sont créés, certains étant affectés par les fluctuations de nappes. Sur les plateaux, les formations ferrugineuses indurées se sont altérées. En bordure des plateaux, des pseudo-cuestas se sont formées par suite du recul des versants dominés par les cuirasses affleurantes. Enfin, un erg s'est établi pendant l'inchirien à l'ouest du Bao Bolon, tandis que des placages éoliens ont recouvert les glacis (Bertrand, 1972 ; Angé, 1991).

. En résumé, la succession des périodes de biostasie et de rhexistasie ont façonné peu à peu un matériau sablo-argileux d'origine continentale. Les toposéquences existantes traduisent cet héritage paléoclimatique complexe; les unités morphopédologiques en place influencent à la fois la circulation des eaux superficielles et l'occupation actuelle des sols.

1.3 Eléments de morphopédologie :

. Le sud du Sine Saloum a fait l'objet d'analyses morphopédologiques réalisées à des échelles différentes. Ceci a permis de définir des unités de territoires homogènes par leur nature, leur genèse et leur dynamique d'évolution (Bertrand, 1972; Brouwers, 1987; Angé, 1991). Les différents types de sols rencontrés sont répartis selon les unités morphopédologiques de la toposéquence : plateaux, versants et bas-fonds (Figure 2).

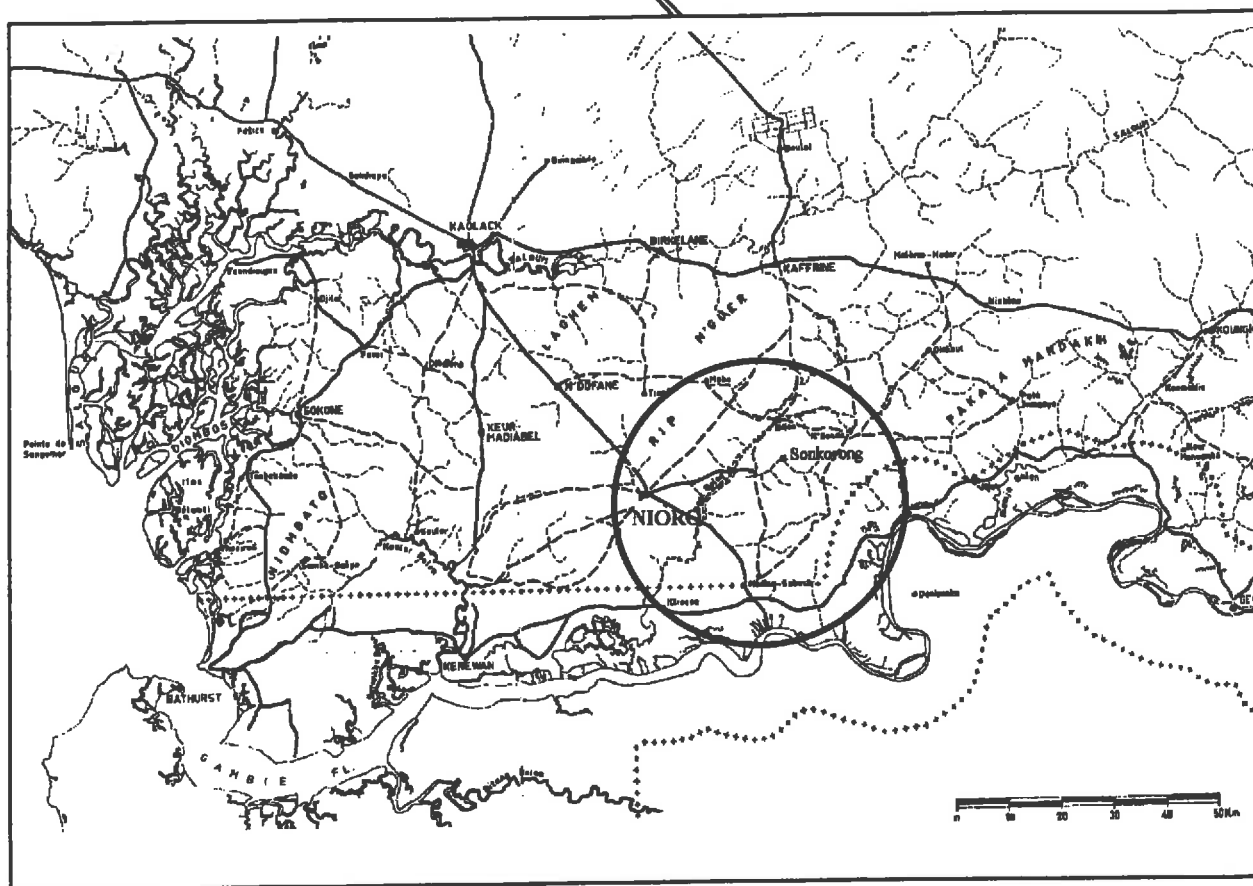
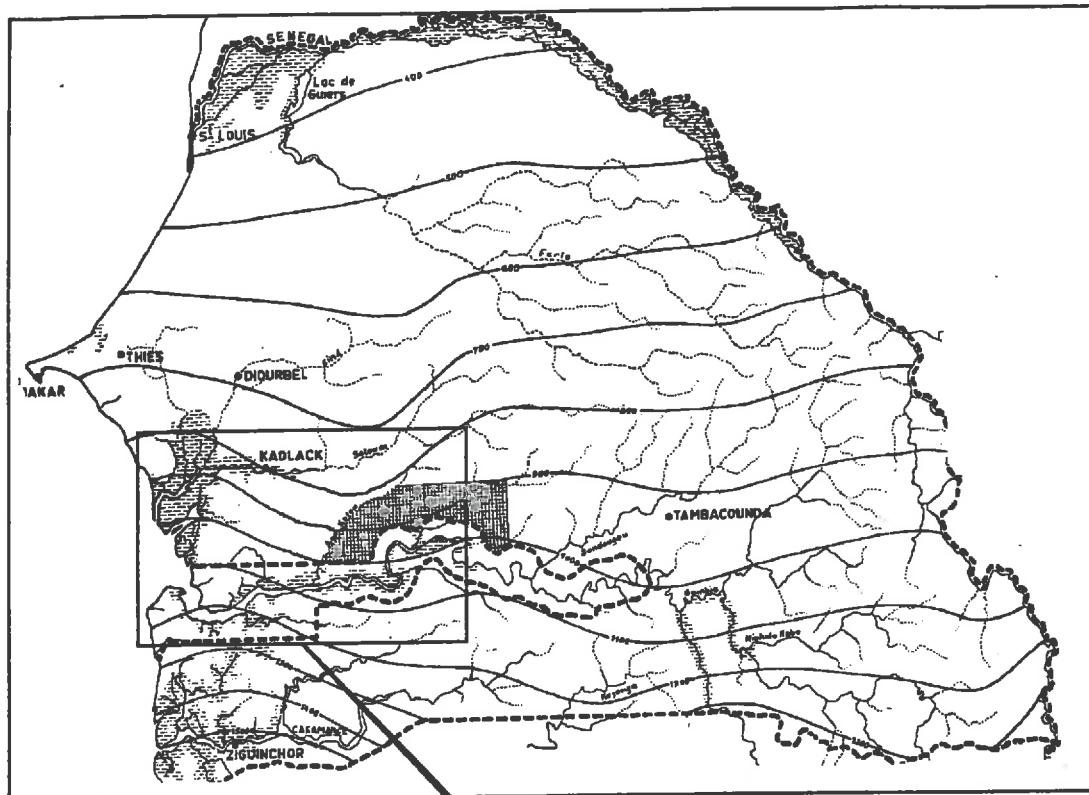


Figure 1 : cartes de situation du sud Saloum. (Source : Bertrand, 1972).

1.3.1 Les plateaux :

. Les plateaux culminent vers 40 mètres d'altitude. Ils ont 15 à 20 kilomètres de large. Ils se composent d'une zone interne presque dépourvue de cuirasse. La bordure, indurée à faible profondeur, est limitée par un talus discontinu. Ce talus, recouvert d'éboulis de blocs de cuirasse, passe latéralement à un glacis versant en pente nette vers la vallée (Bertrand, 1992).

. Les zones centrales des plateaux présentent des sols ferrugineux tropicaux lessivés, plus ou moins hydromorphes, à faciès tronqué, appelés aussi sols beiges. Ces sols beiges de plateau possèdent un horizon humifère gris d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur, à texture sablo-limoneuse (10 % d'argile), à structure massive. L'horizon suivant, de couleur brun clair est enrichi en argile (20 à 30 %) ; il présente des nodules d'oxyde de fer qui prennent l'aspect de gravillons très durs. Un horizon très clair et très argileux apparaît à 1,50 mètres de profondeur ; il se prolonge jusqu'au matériau bariolé du Continental Terminal ou repose sur une cuirasse indurée.

. Les courbes granulométriques illustrent la discordance des horizons supérieurs dans le profil en place et le degré d'évolution différent par rapport aux sols de versant. Les teneurs en matière organique (0,5 %) et en phosphore sont faibles dès la surface. Dans les horizons minéraux, la capacité d'échange cationique (CEC) augmente avec la profondeur (3,5 à 4,5 meq/100 g) mais le taux de saturation diminue (77 à 55 %). Ces terres sont soumises à des défrichements massifs sous la pression démographique et foncière. La prise en masse est un problème majeur pour la mise en culture mais la bonne capacité de rétention d'eau est favorable à la culture du sorgho et du coton.

. Localement les grès argileux du Continental Terminal affleurent sur le talus en dessous de la cuirasse. Les sols y sont peu évolués et possèdent une forte charge en éléments grossiers dès la surface. Cette zone, impropre à la culture, est couverte d'une brousse arbustive plus ou moins dégradée.

1.3.2 Les versants :

. Les versants se composent d'un glacis amont et d'un glacis-terrasse très étendu, que nous appellerons plus simplement terrasse. Le glacis, gravillonnaire, s'est développé au pied du talus par suite du démantèlement partiel de la cuirasse; sa pente atteint 1 %. A une vingtaine de mètres d'altitude, se raccorde la terrasse (pente de 0,5 %), issue du remblaiement colluvio-alluvial des vallées (Bertrand, 1972; Brouwers, 1987).

. Le glacis est caractérisé par la présence de sols peu évolués, d'apport colluvial, sur gravillons et cuirasse ferrique. Les matériaux sont rouges à brun-rouges, sableux en surface ; l'horizon inférieur renferme 25 à 50 % d'argile. La profondeur utile de sol limite leur fertilité potentielle, mais dans certains cas - zones à topographie concave -, l'épaisseur de terre arable devient plus importante. La profondeur d'apparition de l'horizon gravillonnaire peut varier de 30 à 60 centimètres; il repose sur la cuirasse plus ou moins indurée qui passe localement à une carapace. Ces sols, de défriche récente, se dégradent très rapidement dès la mise en culture.

. La terrasse présente des sols ferrugineux tropicaux, lessivés, remaniés, sur colluvio- alluvions. L'horizon sableux superficiel de couleur brun rougeâtre à structure massive, est pauvre en matière organique (0,5 %). En dessous de 20 centimètres, l'horizon devient rouge et nettement plus argileux (15 à 30 %) ; des tâches beiges ou rouilles apparaissent. En profondeur - à 1,50 mètres environ -, on passe à un horizon très clair contenant de nombreuses tâches plus ou moins indurées (Brouwers, 1987). Dans cette région, ces sols constituent "les terres agricoles par excellence" malgré leur pauvreté en phosphore (Bertrand, 1972). Le pH est peu acide, voisin de 6, et la capacité d'échange cationique (2 à 3 meq/100 g) assez bien saturée (60 à 80 %). Ces sols ont une capacité de stockage de l'eau assez faible mais compensée par une profondeur exploitable par les racines très importante. Depuis quelques années, l'absence chronique de fumure, le désouchage intensif et la mise en culture continue provoquent une baisse rapide de la fertilité (Sene et Perez, 1994).

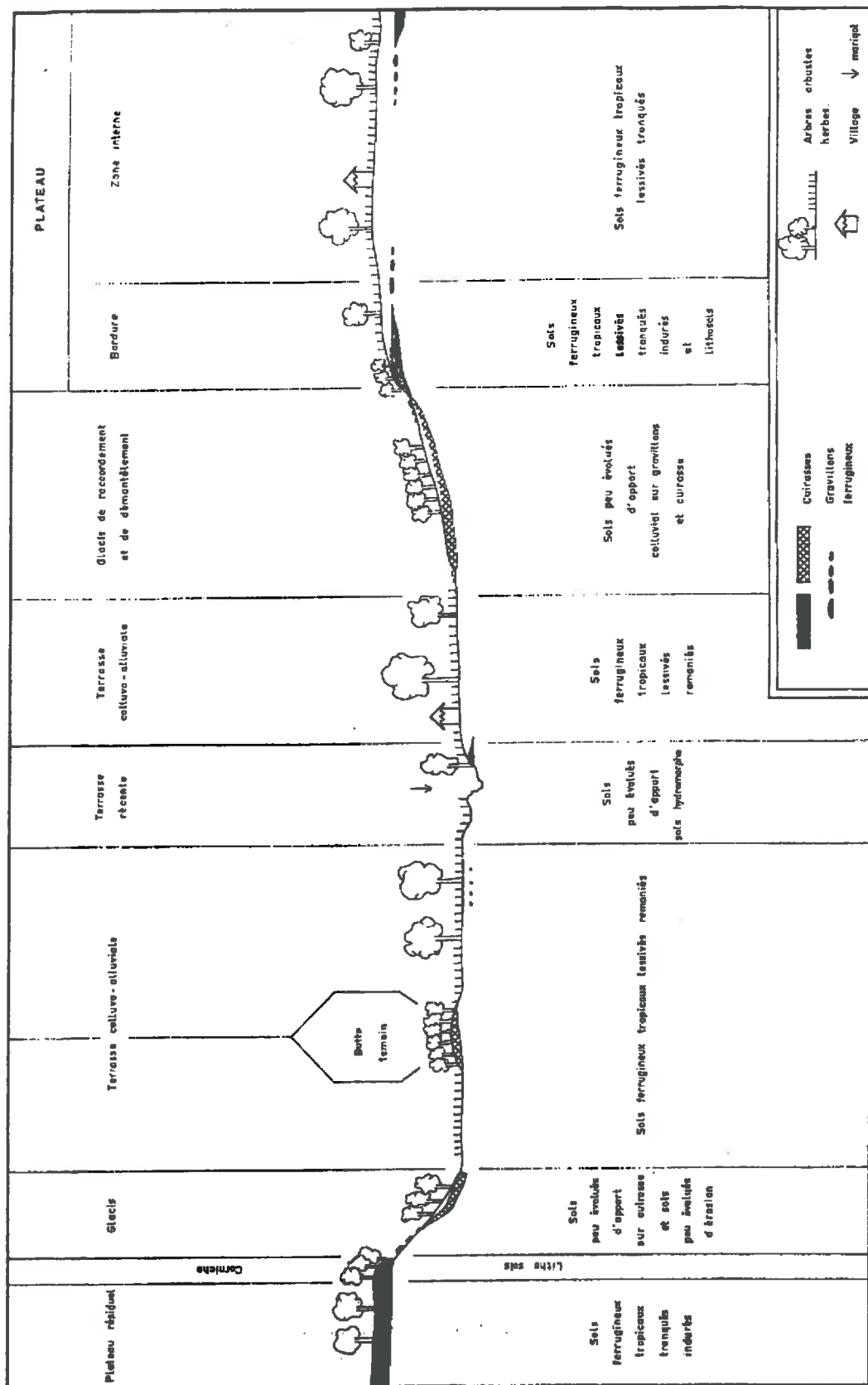


Figure 2 : Esquisse morphopédologique d'une toposéquence dans le sud Saloum. (Source : Bertrand, 1972).

1.3.3 Les bas-fonds :

. Les bas-fonds sont constitués par un bourrelet de berge et le bas-fond proprement dit. **La berge** qui relie le bas-fond à la terrasse a une pente qui varie de 3 à 4 %. Les sols de berge ont une texture uniformément sableuse : ce sont des sols peu évolués, d'apport alluvial, sur alluvions récentes. L'horizon superficiel est peu humifère ($MO = 0,3 \%$), sableux et non structuré. Jusqu'à un mètre de profondeur on rencontre un horizon de couleur claire, sableux et à structure massive. Au delà, apparaissent des marbrures peu contrastées. L'observation des courbes granulométriques indique la forte prédominance des sables fins.

. Ces sols sont pauvres chimiquement (CEC de 2 meq/100 g et saturation inférieure à 20 %), leur fertilité potentielle est limitée par leur faible capacité de stockage de l'eau. Leur situation topographique est favorable à l'érosion régressive. Cependant, la mise en culture est généralisée sur ces sols profonds, faciles à travailler et qui offrent de bonnes possibilités d'enracinement pour les cultures.

. Dans le **bas-fond** proprement dit, les sols ont un profil granulométrique inversé (alluvionnement d'argiles et de limons fins). Ils sont peu évolués, d'apport alluvial, hydromorphes, sur alluvions récentes. L'horizon superficiel, d'épaisseur variable (30 à 100 centimètres) a une couleur foncée. Il présente des tâches d'hydromorphie en nombre variable, une texture limoneuse à argilo-limoneuse et une structure fragmentaire polyédrique. Au dessous de cet horizon, la texture devient sableuse ; dans cette couche de sol de teinte claire on constate la présence systématique de tâches d'hydromorphie. Ces sols alternent localement avec des plages d'atterrissements sableux polyphasés.

. En surface, la teneur en matière organique (1,6 %) et le complexe absorbant ont des valeurs élevées pour la région (CEC = 9,4 meq/100 g et saturation supérieure à 60 %). En profondeur, dans l'horizon sableux, ces valeurs chutent brutalement. Malgré des superficies restreintes, ces sols sont les plus fertiles de la région et sont utilisés pour la culture des céréales (sorgho, riz) et le maraîchage de contre-saison. Les principales contraintes agricoles reposent sur les crues violentes qui balayent les bas-fonds et les apports colluvio-alluviaux générés par l'érosion intense des versants (Albergel et Perez, 1993).

. **En conclusion, la plupart des sols présentés possèdent un horizon superficiel appauvri en argile et constitué de sables hétérométriques où dominent les sables fins. Ces caractéristiques entraînent un faible pouvoir d'aggrégation (Chauvel, 1966), une tendance à la prise en masse à l'état sec (Charreau et Nicou, 1971) et une forte aptitude à l'érosion (Roose, 1977). Par ailleurs, l'étagement des différentes unités morphopédologiques facilite la circulation superficielle latérale des eaux de pluie (Brouwers, 1987).**

1.4 Aspects du climat :

1.4.1 Aspects généraux :

. Le sud Saloum est sous la dépendance d'un climat soudano-sahélien caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche (7 à 9 mois) et d'une saison pluvieuse courte (3 à 5 mois). La moyenne annuelle des précipitations est de 820 mm. Les températures moyennes annuelles avoisinent 28 °C; les amplitudes journalières atteignant 20 °C. L'évaporation potentielle (ETP Penman) est maximale en fin de saison sèche (avril : 9 mm/jour) et minimale en hiver (décembre : 4 mm/jour), pendant la saison pluvieuse les valeurs se stabilisent très vite autour de 5 mm/jour.

. Le régime des vents est sous la dominance des alizés. En saison sèche les vents secs continentaux viennent du nord-est, pendant la saison des pluies les vents humides du sud-ouest amènent un régime de mousson. Les transitions sont assurées par les mouvement latitudinaux du Front Inter Tropical (FIT) gouvernés par les fluctuations des masses d'air tropicales. Les vitesses moyennes de vent croissent régulièrement entre les mois de novembre et d'avril (2 à 3 m s⁻¹). La saison des pluies s'installe aux mois de juin ou juillet pour s'achever en octobre.

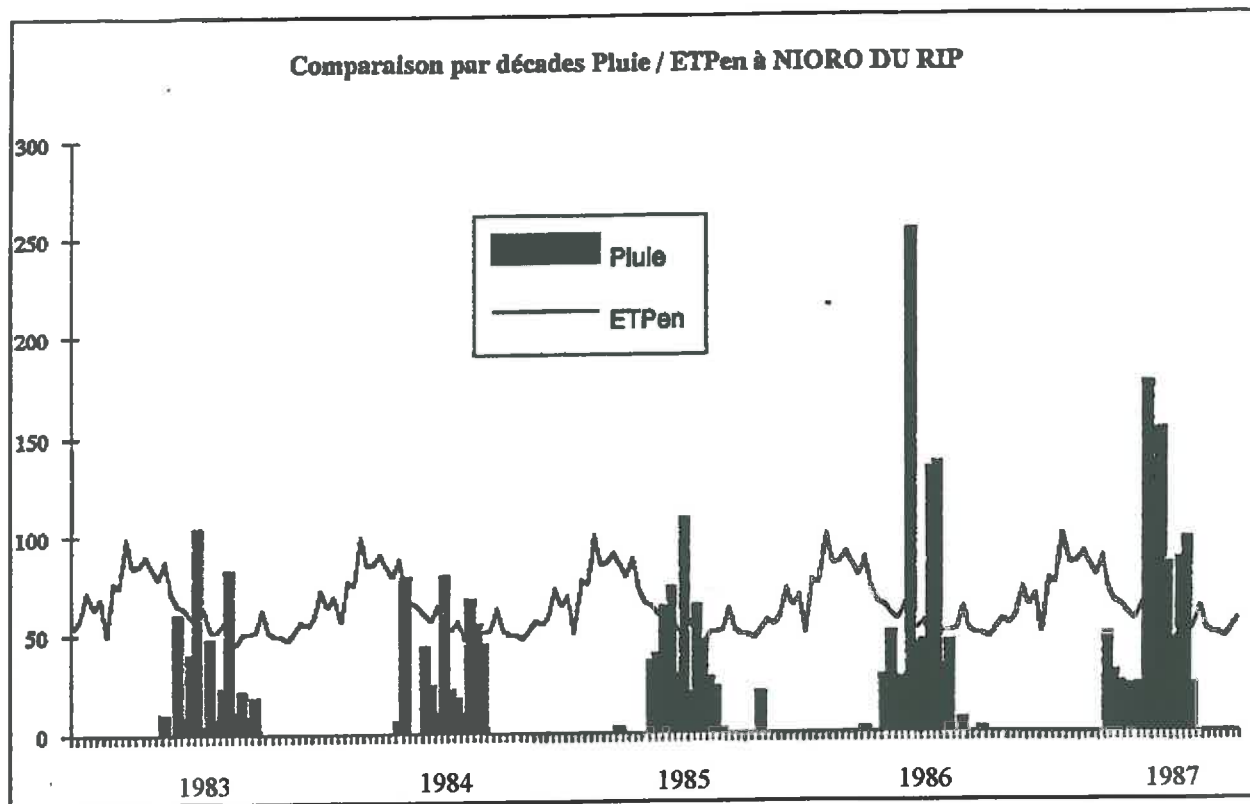


Figure 3 : Comparaison entre les pluies et la demande climatique (ETPen) décadaires. Nioro du Rip 1983-1987.
(Source: Dacosta, 1992)

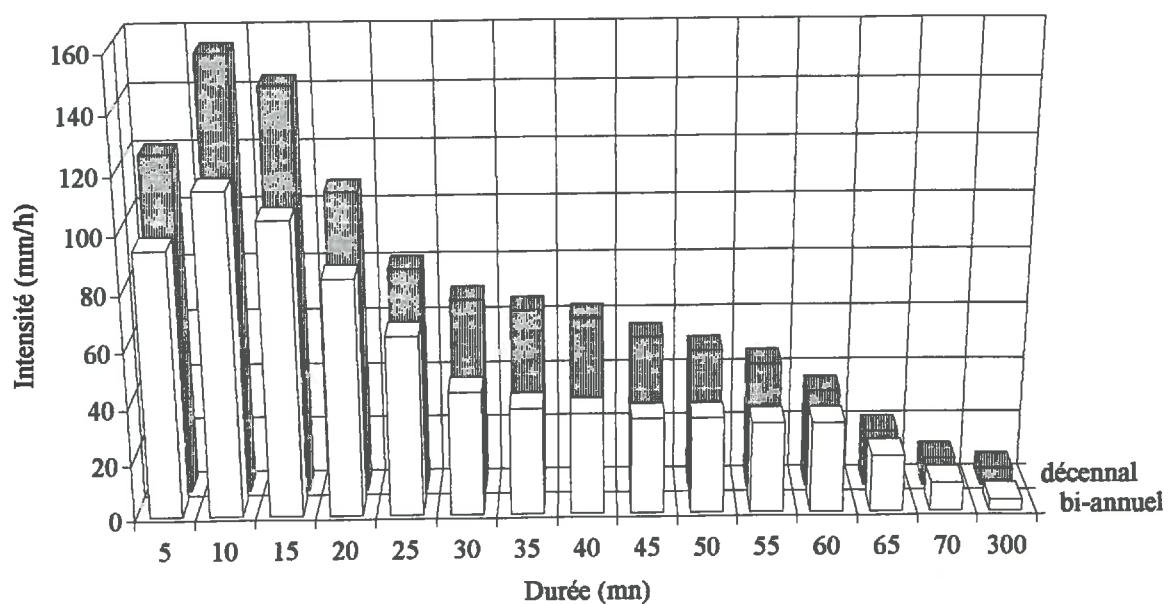


Figure 4 : Hyétogrammes des pluies de récurrence biennale ou décennale. Ndierguene 1983-1988.
(Source: Dacosta, 1992).

1.4.2 Pluviométrie :

. L'étude des pluies annuelles du poste de Nioro du Rip de 1932 à 1992 montre une nette rupture du régime pluviométrique à la fin des années soixante. Le phénomène est décrit à la même période, en d'autres points de la zone sahélienne (Dancette, 1984 ; Albergel et al., 1984). L'étude statistique de la série pluviométrique à laquelle on ajuste la loi de distribution de Goodrich permet de calculer les hauteurs de pluie annuelles de différentes périodes de retour (Tableau 1).

Récurrence (an)	Période déficitaire				Période excédentaire			
	100	20	10	2	2	10	20	100
Hauteur (mm)	423	494	527	813	836	1057	1128	1321

Tableau 1 : Hauteurs pluviométriques annuelles de récurrences remarquables. Analyse fréquentielle 1932-1992. Station climatologique de Nioro du Rip.

Durant les 2 dernière décennies (70-90) la valeur de la décennale sèche est atteinte sept fois, la moyenne pluviométrique est de 664 mm contre 863 mm pour la première période. La saison des pluies est centrée sur le mois d'août (37 %) avec une répartition symétrique sur les autres mois (juillet et septembre 22 à 25 %, juin et octobre 7 à 9 %). La période de sécheresse actuelle tend à rompre cette symétrie, la saison des pluies débutant plus tard et de manière irrégulière.

. L'analyse statistique des pluies journalières (32-92) auxquelles a été ajustée la loi Gamma incomplète de Pearson III tronquée ($L_p > 0,5$ mm), permet d'obtenir les hauteurs de pluie journalière de différentes périodes de retour (Tableau 2).

Période	Récurrence (an)	2	5	10	50	100
1932-1992	Hauteur (mm)	84.2	103.3	117.9	152.1	167
1932-1968	Hauteur (mm)	85.3	103.4	117.2	149.3	163.2
1969-1992	Hauteur (mm)	81.9	102.8	119	157.5	174.4

Tableau 2 : Hauteurs pluviométriques journalières de récurrences remarquables. Analyse fréquentielle 1932-1992. Station climatologique de Nioro du Rip.

. Ces hauteurs de pluies peuvent être considérées comme des événements exceptionnels qui jouent un rôle majeur dans les processus érosifs. Les analyses séparées des séries (32-68) et (69-92) permet de constater que les hauteurs calculées restent les mêmes pour une fréquence de retour donnée, quelque soit la période considérée. **Ces résultats permettent de conclure que la période de sécheresse actuelle s'accompagne d'un maintien de l'agressivité climatique, les fortes pluies étant des événements erratiques indépendants du régime pluviométrique.** Albergel (1987), au Burkina Faso, ainsi que Yu et Nail (1993), en Australie, aboutissent aux mêmes conclusions.

Les fréquences cumulées de hauteurs de pluie, groupées par classes de 10 mm, permettent d'établir que la période actuelle se caractérise par une diminution relative du nombre de pluies entre 20 et 50 mm, au profit de pluies inférieures à 10 mm. Compte-tenu de la demande évaporative et des diverses interceptions possibles, ces pluies sont d'une efficacité assez faible au sein du bilan hydrique des cultures. Cet état de fait est d'autant plus dommageable que l'offre en eau pour un cycle cultural est de plus en plus souvent déficitaire, comme le montre la comparaison pluie/ETP Penman à Nioro du Rip, de 1983 à 1987 (Figure 3).

1.4.3 Pluviographie :

Afin de pouvoir déterminer des averses types, représentatives de la zone d'étude, Dacosta (1992) analyse les pluviogrammes enregistrés de 1983 à 1988 sur des bassins versants de référence. Dans la plupart des cas, les hyétogrammes décrivent des averses simples avec une pointe unique en début d'averse. A partir des événements pluvieux de hauteur supérieure à 5 mm, cet auteur définit deux averses types de récurrences biennale et décennale (Figure 4).

L'agressivité d'uneaverse est liée à l'énergie cinétique des gouttes de pluie lors de l'impact au sol. En utilisant l'indice d'érosivité (R) proposé par Wischmeier et Smith (1958), on montre que la moyenne annuelle de l'indice R varie, pour la période 1983-1988, de 256 à 311 selon les postes pluviographiques. Le rapport entre l'indice annuel moyen et la pluie annuelle moyenne avoisine 0,43. Il est représentatif des conditions d'agressivité climatique moyenne prévalant en zone soudano-sahélienne (Roose, 1977). Cependant ces valeurs moyennes masquent de fortes variabilités interannuelles et ne rendent pas compte de l'effet ponctuel des pluies exceptionnelles. Charreau et Nicou (1971), évaluant l'agressivité du climat à Bambey pour la période 1960-1968, démontrent que près de la moitié des pluies présentent une intensité maximale en 30 minutes (I_{30} en mm/h) supérieure à 27 mm/h et que la proportion des pluies les plus agressives est la plus forte en début d'hivernage. Utilisant l'indice d'érosivité (R) ils aboutissent à une valeur moyenne annuelle de 281, pour une pluie moyenne annuelle de 590 mm, soit un rapport de 0,48.

En conclusion, il semble que les conditions climatiques qui prévalent actuellement dans le sud Saloum sont celles qui caractérisent le centre nord du bassin arachidier vingt ans plus tôt (Forest, 1983). Les conséquences sont d'autant plus graves que la végétation naturelle ne peut s'adapter aussi vite à de tels changements et qu'elle doit supporter une dégradation sans cesse croissante due à la surexploitation et à la pression foncière.

1.5 L'occupation des sols :

Jusqu'en 1930, les formes climaciques de végétation naturelle dominent le paysage. Trochain (1940) décrit de vastes forêts claires ou savanes arborées couvrant les plateaux et les versants, constituées d'espèces soudano-sahéliennes (*Lannea acida*, *Anogeisus leiocarpus*, *Cordyla pinata*...) et d'espèces plus hydrophiles (*Daniella oliveri*, *Mitraghina inermis*, *Bombax costatum*...). Les formations latéritiques supportent des maquis de combrétacées. A partir de 1940, le processus de dégradation des couverts naturels s'accélère progressivement avec le développement des cultures. A l'aspect quantitatif représenté par les importantes surfaces défrichées, s'ajoute une modification de la nature des formations végétales en place : les forêts claires sont transformées en savanes de dégradation anthropique où le recouvrement arboré est inférieur à 10 %. La diminution du nombre d'arbres est due, dans un premier temps, au charbonnage mais à partir de 1970 deux facteurs se conjuguent (Fontanel, 1986) :

- augmentation de la pression de pâturage et des prélèvements de bois à usage domestique liée à la baisse des superficies de parcours,

- réduction de la productivité des parcours, en mauvais état, liée à l'occurrence de la période de sécheresse.

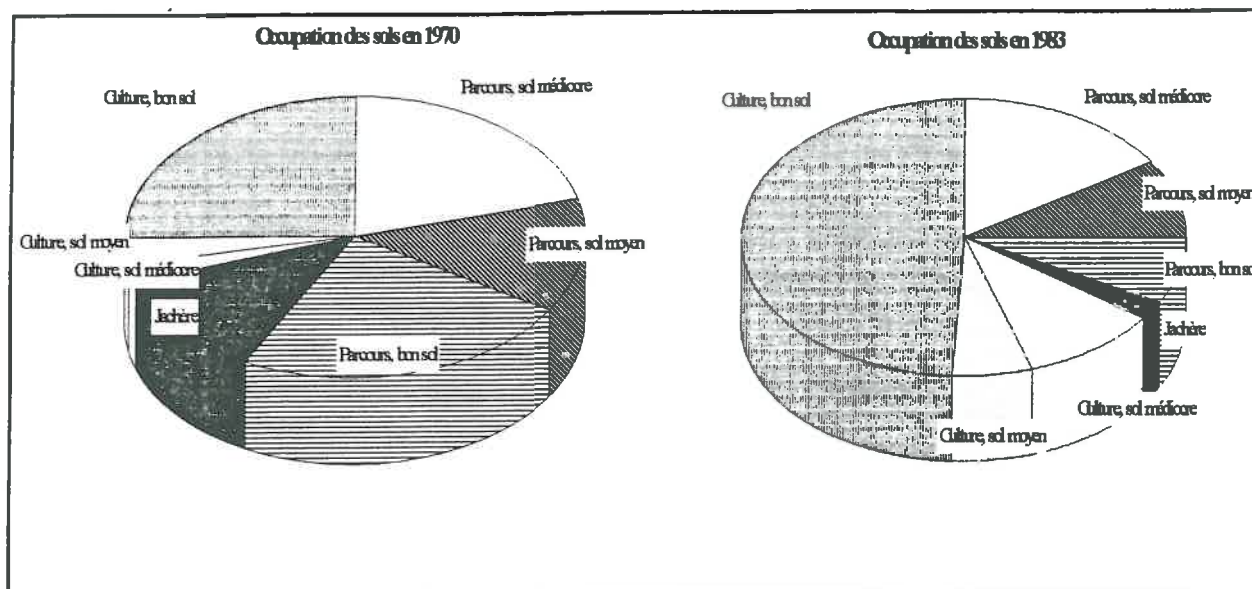


Figure 5 : Comparaison des différents modes d'occupation du sol entre 1970 et 1983, en fonction de la qualité agronomique des terres. (Source: Valet, 1985)

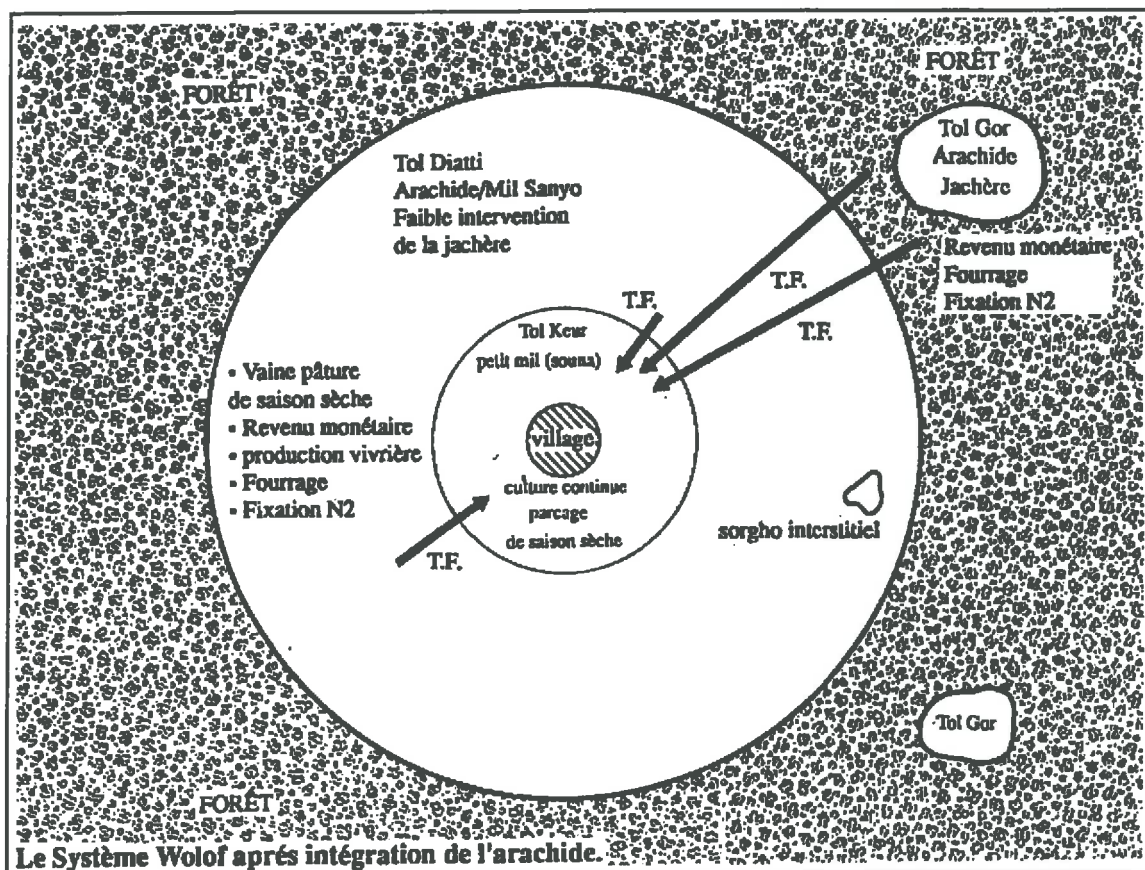


Figure 6 : Le système agricole wolof traditionnel. T.F : transferts de fertilité. (Source : Angé, 1990; d'après Pelissier, 1966).

. Les surfaces mises en culture augmentent d'autant plus vite à partir de 1970 qu'une partie de la zone d'étude bénéficie de l'appui d'un projet de recherche/développement visant à intensifier les systèmes de production (Benoît-Cattin, 1986). L'introduction de la culture attelée entraîne, de fait, une extensification des systèmes de culture compte-tenu de la forte pression foncière entretenue par un taux de croissance démographique galopant (6 % par an).

. Valet (1985) établit une carte d'occupation comparative des sols entre 1970 et 1983. En 1970, les surfaces correspondant aux parcours, jachères, cultures représentent respectivement 62 %, 10 %, 28 % de la superficie totale ; en 1983, on obtient 34 % de forêts, 2 % de jachères et 64 % de cultures. Les surfaces cultivées ont plus que doublé en 13 ans, les jachères ont pratiquement disparu, la moitié des zones de parcours ont été supprimées. En 1970, près de 40 % des zones de parcours occupaient des sols à bon potentiel agricole, soit jachères incluses, une réserve foncière agricole de 32 % par rapport à l'ensemble des superficies. En 1983, les zones de parcours sont confinées à 76 % sur des sols impropres à la culture et 25 % des terres agricoles sont implantées sur des sols médiocres. La réserve foncière agricole représente alors 10 % de la superficie. De manière prémonitoire, Richard, cité par Valet conclua à l'époque : *"on doit aboutir à une utilisation totale du terroir vers 1990, sans jachère..."*, en effet de nombreux travaux sont venus confirmer cette prédiction (Monimeau, 1992; Castanier, 1993) (Figure 5).

. **Face à la disparition de la réserve foncière, les agriculteurs mettent en culture des zones de plus en plus marginales (Sene et Perez, 1994). L'évolution de l'occupation des sols entraîne une diminution et une forte dégradation des formations végétales naturelles. Hormis quelques forêts reliques appauvries, les savanes arbustives qui subsistent se caractérisent par une faible productivité et une régénération arborée inexistante (Fontanel, 1986). La mise en culture se traduit par l'installation de couvertures végétales peu protectrices vis à vis du ruissellement (Roose, 1977).**

1.6 Structures sociales et systèmes de culture :

1.6.1 Structures sociales et conséquences agraires :

. Lors du recensement de 1983, la communauté rurale de Kaymor présentait une densité de population de 61 hab./km². En dix ans la population a presque doublé. Elle est composée en majorité de Wolofs (90 %), de Toucouleurs (7 %) et de Peulhs (2 %), les ethnies sont séparées en hameaux (Faye et al., 1985).

. La société Wolof est très structurée et hiérarchisée, il existe des castes (nobles, hommes libres, anciens captifs, forgerons, artisans) qui se rassemblent par quartiers au sein des villages. Cette division de l'habitat se retrouve dans le partage des terres au sein du territoire agricole. Les quartiers sont constitués de concessions, espaces clos réunissant un groupe familial étendu, membres d'un même lignage. Tous les ménages d'une concession sont sous l'autorité d'un patriarche, qui distribue les terres et gère les ressources communes. Certains ménages peuvent constituer une unité de consommation autonome à l'intérieur de la concession, c'est à ce niveau que la sociologie rurale définit l'exploitation agricole (Benoît-Cattin, 1986).

. Le système agraire Wolof traditionnel découpe le finage villageois en trois secteurs concentriques autour du village. La première auréole (*Tol Keur*) est constituée de champs de case, fortement fumés par parcage ou épandage, cultivés en céréales de manière continue (mil, maïs). La seconde (*Tol Diatti*) correspond aux champs de brousse, autrefois cultivés selon une rotation mil/arachide/jachère mais actuellement soumis à une culture continue mil/arachide, la fumure est peu importante. La troisième auréole (*Tol Gor*), plus diffuse, regroupe les parcelles de défriche dans le domaine pastoral périphérique ; la pression foncière tend à réunir cette auréole à la précédente. Ce système est caractérisé par un paysage ouvert et des transferts de fertilité centripètes (Pelissier, 1966) (Figure 6).

. Cependant, ce schéma traditionnel d'occupation de l'espace agraire est fortement modifié depuis quelques années :

- L'accroissement démographique tend à augmenter le nombre de conflits lors des émancipations de ménages dans une concession. Cette situation entraîne un souci d'appropriation des terres par anticipation et accélère la mise en culture des zones pastorales périphériques (Fontanel, 1989).

- La juxtaposition du droit traditionnel et des lois sur le domaine national promulguées après l'indépendance a favorisé la disparition de la jachère et perturbé les transactions coutumières (Busacker, 1990).

- L'introduction de la culture attelée a profondément transformé le paysage par destruction du parc arboré et augmentation des vitesses d'intervention, donc des surfaces mises en culture (Garin, 1989).

. De manière traditionnelle, les troupeaux extensifs sont gérés par le chef de concession. Le parcage nocturne sur les champs de case, en saison sèche, assure une fumure directe importante (10 à 20 t/ha) et sécurise la production céréalière sur ces parcelles. Les chefs d'exploitations utilisent le fumier des animaux de trait et des petits ruminants (5 à 10 t/ha) selon leurs possibilités. Ces apports n'intéressent qu'un petit nombre d'exploitants et de faibles surfaces, 2 à 3 % des terres agricoles par an (Ange, 1987).

1.6.2 Systèmes de culture :

. Actuellement, le système de culture repose sur une rotation mil/arachide continue. Les apports d'engrais, depuis l'arrêt des subventions accordées par l'état, sont quasi inexistants, seuls quelques parcelles profitent des formulations proposées: 6-20-10 à 150 kg/ha pour l'arachide et 14-7-7 à 150 kg/ha pour le mil. La généralisation de la culture attelée a entraîné une homogénéisation de l'itinéraire technique. Les activités agricoles commencent à la fin de la saison sèche (mai) avec le nettoyage des parcelles : les résidus de récolte et les adventices non consommées par les animaux en vaine pâture sont ratissés et brûlés sur la parcelle. Cette opération laisse la surface dénudée à l'arrivée des premières pluies, souvent agressives.

. Le mil est semé en priorité, sur les premières pluies utiles (juin), en traction équine ; les variétés utilisées sont de cycle court (90 jours, type SOUNA III). Lorsque l'hivernage est tardif, le mil peut être semé en sec. Les parcelles semées le plus tôt sont celles qui possèdent le meilleur potentiel agricole. Leur taille permet un semis dans la journée qui suit la pluie utile, détail important puisque les conditions d'humectation du sol deviennent défavorables dès le troisième jour (Tableau 3).

Calendrier	juin			juillet			août			sept			oct		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
(a) mil	N	Se		Sa	De	Sa	Sa				Re				
arachide	N		Se		Sa	Sa	Sa						Re		
pluies		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑						...
(b) mil	N		Se		Sa	De	Sa					Re			
arachide	N				Se	Sa	Sa	Sa							Re
pluies					↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	...

Tableau 3 : Calendriers culturels observés lors d'un hivernage précoce (a) ou d'un hivernage tardif (b).

N: nettoyage; Se: semis; Sa: sarclage; De: désherbage; Re: récolte.

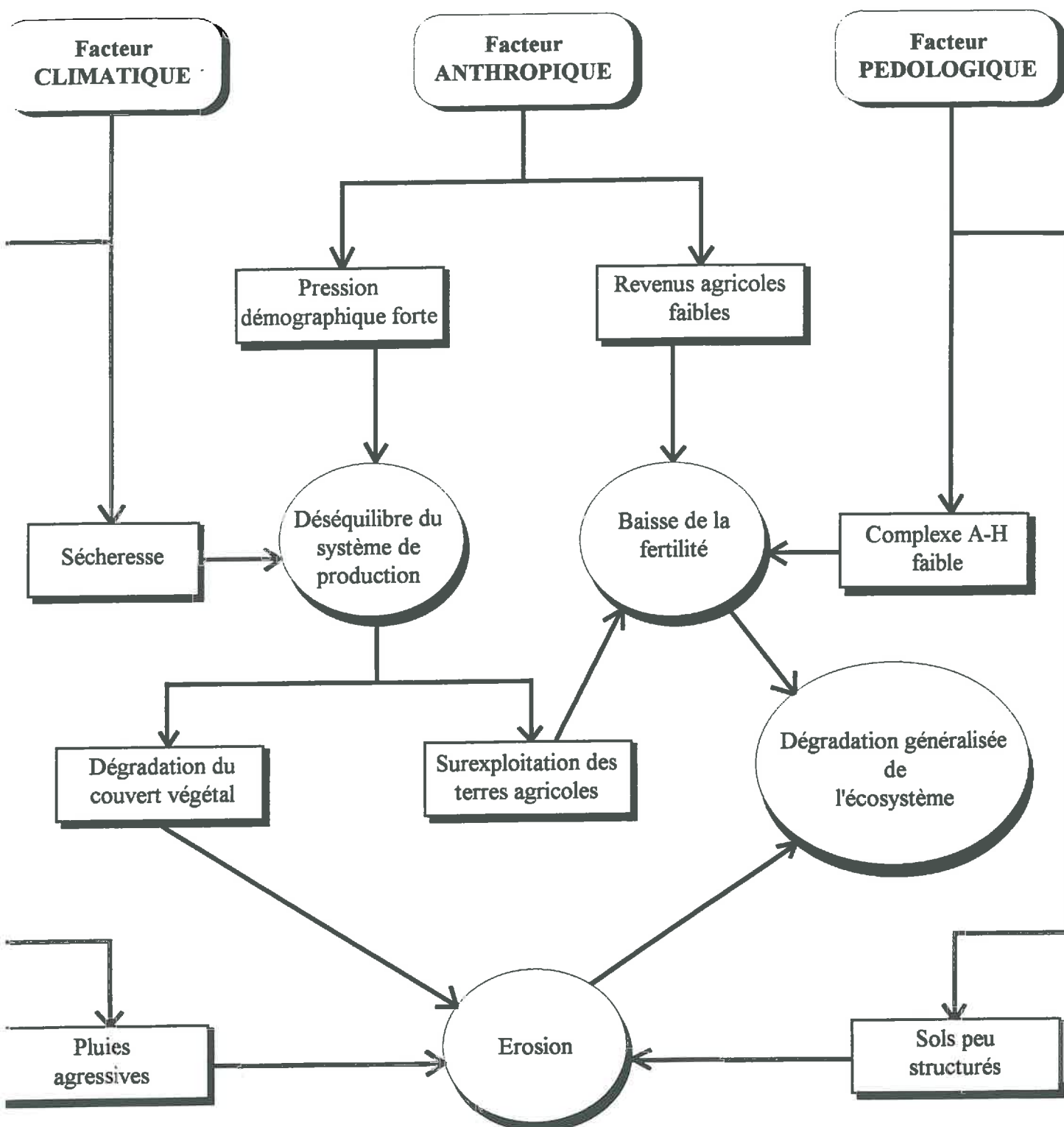


Figure 7 : Schéma général de dégradation de l'écosystème du sud Saloum. (Source: Sene et Perez, 1994).

. L'arachide est semée sur les pluies utiles suivantes, la variété utilisée possède un cycle végétatif intermédiaire de 110 jours (var 73-33). Un sarclage mécanisé de prélevée est effectué immédiatement derrière le semis, ou le lendemain, si l'équipement et la main d'oeuvre le permettent. Cette opération garantit une levée optimale des graines dont le coût interdit tout resemis et permet de retarder le second sarclage (Garin, 1989).

. Le mil et l'arachide sont sarclés, en moyenne, deux fois mécaniquement et une fois manuellement sur le rang. Cette dernière opération correspondant également, pour le mil, au démarriage manuel des poquets. Les sarclages mécaniques, ou sarclobinages, sont effectués à l'aide de bâtis "houe Sine" équipés de trois rasettes, permettant d'obtenir une surface travaillée de 50 cm de large sur 5 cm de profondeur.

. La récolte du mil (septembre) est manuelle, les tiges sont couchées, les épis coupés et mis en bottes. La récolte de l'arachide (octobre) s'effectue en traction bovine, de préférence, grâce à une lame souleveuse montée sur le bâti traditionnel ("houe Sine"). Cette opération laisse un horizon sableux particulière en surface, de 5 à 10 cm d'épaisseur, sensible à l'érosion éolienne et hydrique. Les pieds sont séchés et battus sur la parcelle.

. Le calendrier précis d'intervention dépend du taux d'équipement de l'exploitation en semoirs, houes sine et des disponibilités en animaux de trait et main d'oeuvre. Tous ces facteurs sont sous la dépendance du chef de concession qui accorde les priorités de travail et règle les problèmes de prêt de matériel. La spéculation affectée à une parcelle, une année donnée, est fonction de la taille de l'exploitation, de l'état des stocks vivriers, de la stratégie agricole de la concession et des disponibilités en semences. De même la gestion de la fertilité est beaucoup plus diffuse que le modèle proposé (Ange, 1990).

. **Compte-tenu des carences intrinsèques des sols de culture, de l'absence de restitutions sur la majeure partie du territoire agricole et d'une mise en culture continue dont l'arbre est exclu, il est permis de douter de la stabilité à moyen terme de ce système de culture. Certaines interventions culturales (nettoyage, soulevage) sensibilisent les parcelles agricoles à l'érosion éolienne ou hydrique (Ruelle et al, 1990).**

1.7 Une dégradation généralisée de l'écosystème :

1.7.1 Approche synthétique :

. D'une situation métastable qui prévalait il y a cinquante ans, le milieu naturel du sud Saloum a évolué vers une situation dont l'instabilité ne cesse de croître. Certains facteurs entretiennent les processus de dégradation généralisée, interdisant tout nouvel état de stabilité de l'écosystème si aucune action n'est entreprise.

. Le schéma général de dégradation de l'écosystème peut être résumé par la figure 7. Le facteur climatique est caractérisé par la sécheresse et l'agressivité des pluies. **La sécheresse fragilise et diminue la productivité des milieux naturels et cultivés. L'agressivité des pluies entraîne des ruissellements importants et une érosion intense à la faveur des zones de concentration.** Le facteur pédologique présente deux aspects déterminants interdépendants : **les faibles fertilités physique et chimique des horizons superficiels** de la plupart des sols. L'étalement du squelette sableux et le faible taux de matière organique entraînent la formation de croûtes superficielles plus ou moins indurées et une forte susceptibilité à l'érosion. La pauvreté du complexe argilo-humique nécessite une restitution rapide des prélèvements nutritionnels par la biocénose (Pieri, 1989).

. Toutefois ces deux facteurs ne peuvent expliquer à eux seuls la situation de crise actuelle. En effet, parmi les trois sécheresses rencontrées au cours de ce siècle, celle relative au vingt dernières années a eu les effets les plus pervers sur le plan écologique (Rognon, 91). Cette période est caractérisée par une évolution du système de production, mettant en évidence **une surexploitation du milieu**. L'accroissement démographique et la mécanisation de l'agriculture

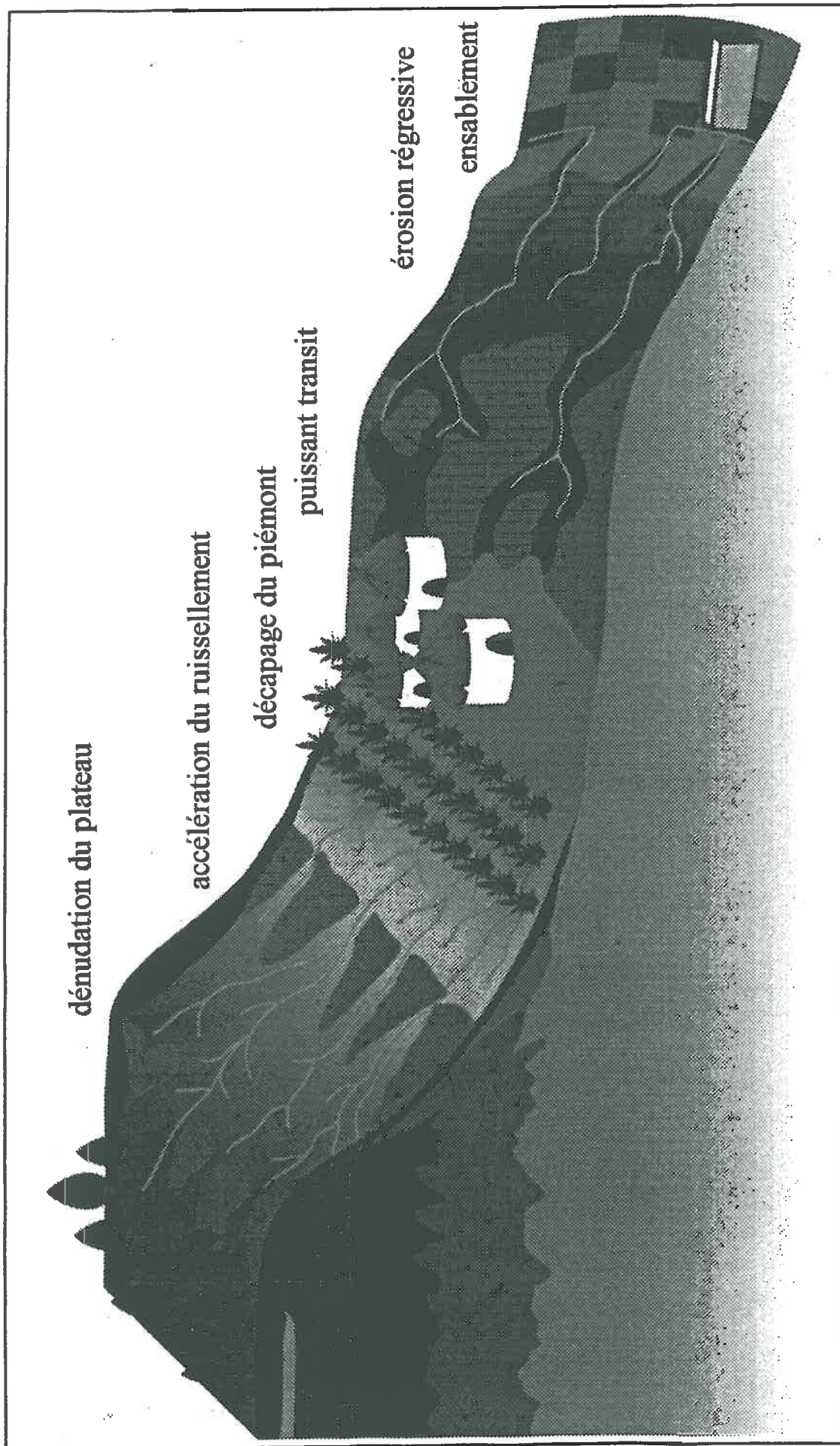


Figure 8 : Processus hydrodynamiques superficiels le long de la toposéquence (sud Saloum, Senegal). (d'après Angé, 1991).

entraînent une extension des surfaces cultivées au détriment des zones de parcours et des jachères, provoquant un déséquilibre que la sécheresse est venue exacerber.

. Malgré une baisse sensible du cheptel bovin depuis 1974, la pression du pâturage avoisine 1 UBT/ha. Supportable pendant l'hivernage cette charge, située bien au-delà du seuil de tolérance de 0,3 UBT/ha, devient désastreuse en saison sèche (Guerin et al., 1986). Compte-tenu du mode de gestion de la fumure organique, cette surcharge animale ne se traduit pas par un potentiel de fertilité suffisant. Cependant, des études ont montré qu'une gestion optimale des disponibles d'origine animale ne peut espérer amener les surfaces fumées à plus de 6 % du terroir agricole (Ange, 1987).

. L'abandon conjoncturel de la fertilisation minérale et l'exportation croissante des résidus de récolte entraînent donc une absence totale de restitution. Nous sommes en présence d'une agriculture minière en terme de superficies exploitées et de fertilité consommée.

1.7.2 Approche spatiale :

. Sur le plateau, les sols sont sensibles à l'engorgement temporaire. Les défrichements récents, le surpâturage et la surexploitation des ligneux entraînent une généralisation des croûtes superficielles et du ruissellement en nappe. Le matériau meuble de surface est exporté. Les nappes de gravillons se généralisent. Le talus accélère la vitesse des eaux de ruissellement venant du plateau. L'érosion régressive progresse à la faveur de la déforestation et le piémont subit un décapage intense (Figure 8).

. Le glacis cultivé se couvre de croûtes superficielles. Le ruissellement se concentre le long des lignes de semis, des chemins, des pistes d'exploitation. Cette unité comprend un grand nombre de termitières plus ou moins érodées qui représentent près de 8 % de la surface dans certains secteurs et qui constituent un réseau d'impluviums espacés d'une quinzaine de mètres.

. La terrasse, plane à l'origine, évolue vers un modelé en croupes, individualisées par la circulation des eaux superficielles (Ange, 1991). La mise en culture est ancienne. On observe une emprise plus faible (4 %) et un arrasement prononcé des termitières. Néanmoins, leur rôle demeure essentiel dans la hiérarchisation des chenaux de ruissellement. Les pistes, si elles servent d'exutoire naturel aux écoulements, s'approfondissent en ravines.

. Le bas-fond et ses berges subissent une déforestation importante depuis une vingtaine d'années. Des ravines d'érosion régressive entaillent les berges et entraînent un colluvionnement sableux catastrophique (Albergel et Perez, 1993). Valet (1985) considère que l'érosion linéaire régressive a pratiquement doublé entre 1970 et 1983 et que la moitié des ravines déjà existantes ont fait l'objet de surcreusements importants.

. La dégradation de l'écosystème s'exprime à travers une érosion hydrique résultant d'un ruissellement généralisé. Ce phénomène entretient la chute du statut organique du sol et interdit toute amélioration de la productivité végétale. La réhabilitation du paysage passe obligatoirement par une stabilisation des phénomènes érosifs et une diminution du ruissellement le long des versants, préalables à une exploitation agricole viable et durable. L'ensemble de ces résultats démontre la nécessité d'approfondir notre connaissance des facteurs et des mécanismes qui agissent, dans la zone d'étude, sur la naissance, l'entretien et la compétence du ruissellement.

DEUXIEME PARTIE :
BILAN DES CONNAISSANCES DISPONIBLES

2 BASES CONCEPTUELLES ET ACQUIS DE LA RECHERCHE:

2.1 Aspects généraux :

. En dépit des nombreuses études sur le ruissellement, force est de reconnaître qu'il demeure autant de questions en suspens que de réponses fournies. La revue bibliographique effectuée, loin d'être exhaustive, peut laisser chacun perplexe. Si des lignes de force se dessinent, on est surpris par la variété des objectifs poursuivis, la multiplicité des méthodes envisagées, la faible reproductibilité de la plupart des résultats décrits et la profusion d'échelles spatiales et temporelles utilisées. Cette apparente confusion est liée à l'essence même du sujet, variable de flux et non d'état, dont la complexité s'exprime à travers les milieux sur lesquels elle agit et qui la modifie en retour. Un axe de partage peut être observé dans les choix des échelles spatiales retenues :

- Etudes à l'échelle de la **surface élémentaire** (cm^2 au m^2). Les observations sont effectuées en laboratoire ou *in situ*, généralement sous pluie simulée, rarement en conditions naturelles. Les modifications structurales de surface, les régimes d'infiltration et la détachabilité des particules constituent des thèmes prioritaires d'étude.

- Etudes à l'échelle de la **parcelle agronomique** (100 m^2 à ha). A ce niveau se différencient ruissellement diffus et concentré, érosion en nappe et en rigoles.

- Etudes à l'échelle du **versant** (ha à km^2). La hiérarchisation du réseau hydrographique est complète, l'occupation des sols et l'existence d'unités de production homogènes conditionnent les phénomènes de ruissellement et d'érosion à l'échelle du versant.

. Une seconde source de différenciation découle du choix des échelles de temps :

- **Etudes synchroniques** : elles couvrent l'ensemble des expériences de laboratoire et la majorité des études sous pluies simulées. A un ensemble fixé de conditions initiales du milieu, qu'on appellera un "événement agronomique", est appliqué un ensemble plus ou moins complexe d'épisodes pluvieux, appelé "événement climatique".

- **Etudes diachroniques** : Les études sur versant et la plupart des études sur parcelle imposent, matériellement, d'enregistrer une chronique climatique aussi complète que possible. L'échantillon doit être représentatif de l'ensemble des événements climatiques locaux et assez fourni pour assurer un traitement statistique correct.

. Nous étudierons successivement les acquis de la recherche concernant les mécanismes de dégradation de la surface, du ruissellement, de l'érosion, puis les principaux facteurs qui agissent sur ces trois mécanismes. La séparation des mécanismes permet de mettre en évidence les spécificités des thèmes et des méthodes de descriptions utilisées. Pour éviter toute redondance les facteurs seront étudiés globalement, en insistant sur les spécificités de la zone sahélienne.

2.2 Mécanismes de dégradation de la surface :

2.2.1 Les différents mécanismes :

. Si on considère que la structure du sol est un assemblage de divers constituants organiques et minéraux et que le comportement structural est une modification de l'assemblage de ces constituants caractérisé par la nature de l'agent et le sens d'évolution de l'état structural (Hénin et al., 1969), alors... *"Dans certaines conditions, la pluie provoque une dégradation structurale des couches superficielles du sol, c'est-à-dire un accroissement de la continuité, de la cohésion et de la compacité des assemblages terreux"* (Boiffin, 1989). Cette dégradation regroupe un certain nombre de mécanismes décrits par Casenave et Valentin (1989) dont nous emprunterons la classification.

- Mécanismes liés à l'humectation des agrégats:

* **L'éclatement** : L'humectation brutale d'un agrégat sec provoque une compression de l'air piégé à l'intérieur et une rupture mécanique dépendant de son pouvoir de cohésion (Yoder, 1936; Henin, 1938; Emerson, 1967).

* **La fissuration** : Les agrégats riches en argiles gonflantes subissent une fissuration lors de l'humectation qui persiste même sous vide. Ce phénomène affecte partiellement les agrégats limoneux (Le Bissonais, 1987).

* **La dispersion** : L'humectation diminue les forces de liaison entre particules. Pour les agrégats sableux, faiblement cohérents, ce mécanisme peut conduire à un effondrement structural complet (Valentin, 1981; Chretien, 1986).

- Mécanismes liés à l'impact des gouttes de pluie:

* **Le fractionnement** : Les gouttes de pluie possèdent une certaine énergie cinétique qui est dissipée lors de l'impact et provoque la rupture éventuelle de l'agrégat (Mc Intyre, 1958). Cette dissipation d'énergie favorise également la dispersion de la phase argileuse et sa mise en suspension dans la phase liquide (Le Bissonais, 1987).

* **Le tassement** : La dissipation d'énergie des gouttes de pluie favorise également la compaction de la surface. Ce phénomène est visible sur sol sableux où se forment des cratères d'impact dès les premiers instants de la pluie, sièges d'intenses phénomènes de réorganisation (Valentin, 1981).

* **Le rejaillissement/dépôt** : Dès que la surface ne peut plus dissiper le surplus d'énergie, les gouttes d'eau rebondissent et projettent alentour des particules détachées. La distance de projection dépend de l'énergie cinétique et de la taille des particules (Poesen et Savat, 1981).

- Mécanismes liés au ruissellement:

* **L'arrachement** : La reprise de particules de surface dépend de la vitesse et de la turbulence du ruissellement, liées à l'épaisseur de la lame d'eau (Savat et De Ploey, 1982; Raws et Govers, 1988).

* **Le transport/dépôt** : Selon la taille des particules transportées et la vitesse du courant, le transport s'effectue à distance variable (Hjuström, 1935). Aux dépôts en régimes turbulent, laminaire ou stagnant correspondent des stratifications sédimentaires dépendant de différents modes de triage (Mucher et De Ploey, 1977; Poss et al., 88).

- Mécanismes liés à la dessiccation:

* **L'induration** : Après un événement pluvieux la surface se dessèche et la croûte superficielle formée devient plus cohérente. Les constituants se rapprochent augmentant ainsi les forces de liaison internes (Giffard et Thran, 1974; Nicou, 1974; Valentin, 1986).

* **Le retrait** : La dessiccation d'un fragment terreux s'accompagne d'une diminution de volume liée à la proportion et au type d'argile qu'il contient (Haines, 1923; Bruand, 1986; Grimaldi et Boulet, 1990). Pour un sol sableux tropical ce phénomène semble peu développé compte tenu du faible taux d'argile et de la prédominance de la kaolinite (Charreau et Nicou, 1971; Fies et Zimmer, 1982).

2.2.2 Méthodes d'étude:

. Afin de déterminer la susceptibilité d'un sol à la dégradation structurale, à la réorganisation de surface, un certain nombre de tests ont été développés. La représentativité de la méthode envisagée, en générale, s'appuie sur la prise en compte d'un certain nombre de paramètres intervenant dans les mécanismes décrits précédemment. La plupart des tests doivent se concevoir en fonction d'objectifs précis, de phénomènes ciblés (Dumas, 1965; Lal, 1988):

- *Tests de stabilité structurale* : les mécanismes liés à l'humectation des agrégats sont privilégiés. Les résultats reposent sur la diminution du nombre d'agrégats stables entre l'état initial de l'échantillon et l'état final défini par le protocole expérimental (Combeau et Quantin, 1963; Bryan, 1968; De vleeschauwer et al, 1978). Quelle que soit la méthode utilisée, les sols sableux ferrugineux contiennent très peu d'agrégats stables (Charreau et Nicou, 1971; Chauvel, 1977; Dutartre et al., 1993).

- *Tests de consistance* : à partir du moment où les agrégats sont saturés, les phénomènes d'éclatement deviennent négligeables devant la dispersion et le fractionnement dû à l'impact des gouttes de pluie (Boiffin, 1989). D'où l'intérêt des tests de consistance qui mesurent, dans des conditions d'humidité données, la réponse du matériau à une contrainte énergétique standard :

* **Limite de liquidité** : cette limite correspond à l'humidité pondérale d'un échantillon remanié soumis à 25 chocs standardisés (Atterberg, 1912). Ce test peut être relié aux caractéristiques de ruissellement des surfaces élémentaires (De Ploey et Mucher, 1981; Valentin et Janeau, 1989). Cependant, la sensibilité du test est relativement faible pour des sols ferrugineux lessivés étudiés au Sénégal (Ducieux, 1984).

* **Indice de compactage** : hérité du génie civil, le test Proctor soumet des échantillons remaniés d'humidités croissantes à un compactage dynamique standard (600 Jdm^{-3}). L'établissement des courbes reliant la densité apparente sèche (γ_d) à l'humidité pondérale (w) permet d'isoler deux points particuliers, le seuil de compactage (w_p, γ_{dp}) et l'optimum de compactage (w_m, γ_{dm}), proche de la saturation (Faure, 1978). La pente du segment entre les deux points caractérise l'aptitude au compactage (Guerif et Faure, 1979) (Figure 9). L'importance de l'énergie utilisée s'accorde mal avec certaines conditions culturelles rencontrées en milieu réel, en Afrique notamment, certains auteurs ont donc utilisé des énergies compatibles, beaucoup plus faibles (Manière, 1973; Ducieux, 1984).

- *Tests de terrain* : comme le souligne Boiffin (1984), la plupart des tests de laboratoire sont réalisés en conditions très agressives et suppriment une part importante de la variabilité rencontrée au champ. Quelques tests de terrain permettent de suivre l'évolution morphologique de la surface, en conditions naturelles :

* **Indice de rugosité** : le passage d'un état motteux initial à une surface encroûtée finale, sous l'action de la pluie, s'accompagne d'un lissage plus ou moins accentué du relief d'une parcelle. Les méthodes de mesure sont diverses et donnent naissance à de nombreux indices synthétiques (Kuipers, 1957; Boiffin, 1984; Linden et Van Doren, 1986). qui ont fait l'objet d'études comparatives dont il ressort que l'acuité descriptive dépend du degré d'intégration de la variabilité spatiale (Zobeck et Onstad, 1987; Bertuzzi et al., 1990).

* **Indice de cohésion** : les mesures pénétrométriques ont été rapidement adaptées au terrain, mais les résultats sont complexes car dépendant à la fois de la force de pénétration, de l'humidité du matériau et de sa densité apparente (Maertens, 1964; Nicou, 1974; Valentin, 1981). La texture et la structure des sols ferrugineux tropicaux permettent d'assimiler la force de pénétration à une mesure de cohésion, cependant la forte variabilité des résultats (CV de 25 à 40 %) nécessite un nombre élevé de répétitions (Charreau et Nicou, 1971 ; Ducieux, 1984).

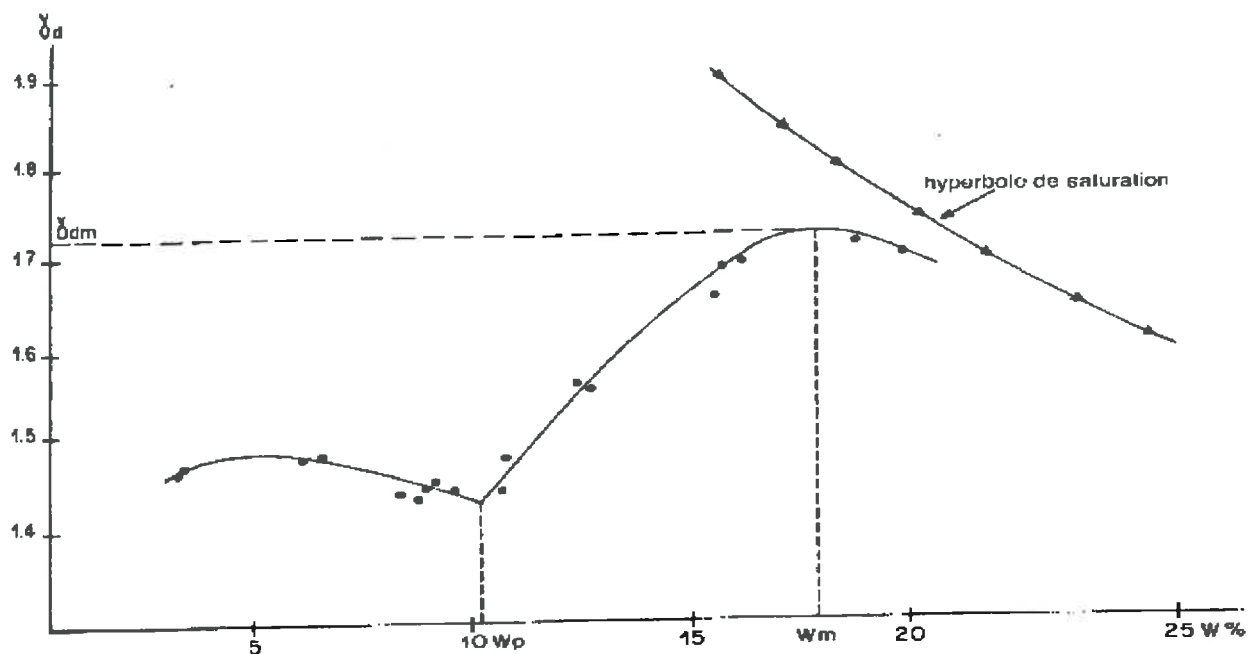


Figure 9 : Influence de l'humidité du sol ($w\%$) sur la densité (γ_d) obtenue par compactage Proctor (600 J dm^{-3}).
(Source: Monnier et al., 1989)

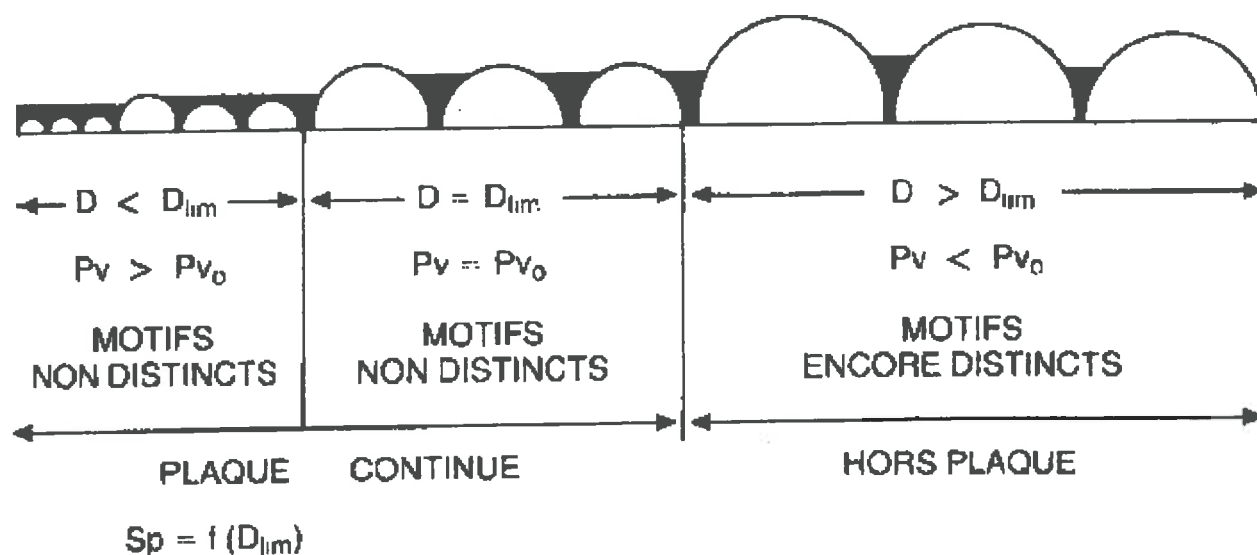


Figure 10 : Modèle de colmatage interstitiel de la surface. P_v : taux de recouvrement des motifs par le matériau interstitiel; P_{v0} : taux limite de recouvrement; D : calibre des motifs; D_{lim} : calibre limite; S_p : surface de plaque continue. (Source: Boiffin, 1989).

* **Indicateur D_{min}** : à partir d'une surface motteuse, caractérisée par sa distribution d'agrégats, la formation de croûtes de battance peut être assimilée à un remplissage interstitiel par du matériau fin (Farres, 1978) (Figure 10). L'observation, à un temps donné, du diamètre du plus petit fragment non incorporé à la croûte (**D_{min}**) fournit une appréciation du niveau de dégradation de la surface (Boiffin, 1984; Eimberck, 1989). Cependant, utilisé sur des sols tropicaux l'indicateur D_{min} se révèle être un prédicteur hydrodynamique peu pertinent (Valentin et Janeau, 1989).

2.3 Apports des études sur le ruissellement :

. "Le ruissellement de surface constitue la part de la pluie qui n'est pas absorbée par le sol et qui ne s'accumule pas à la surface mais qui s'écoule dans le sens de la pente..." (Hillel, 1988). Cette définition reconnaît implicitement la conception "Hortonienne" du bilan hydrique d'un sol, assez bien adaptée aux régions arides, à fortes intensités pluviométriques et à couvert végétal faible ou cultivé (Kirkby, 1988).

. Les acquis de la recherche peuvent se répartir entre les études sur la naissance du ruissellement et celles concernant les écoulements le long des versants. Les premières insistent sur les modifications des caractéristiques d'infiltration, les secondes sur le rôle des facteurs externes dans l'entretien du ruissellement et sur les changements d'échelle.

2.3.1 La genèse du ruissellement :

. Lafforgue (1977), après les travaux de Rubin (1966), différencie quatre phases dans les processus d'infiltration sous pluie d'intensité pluviométrique constante (I) (Figure 11) :

- **Phase d'imbibition** : du début de la pluie jusqu'au temps t_i aucun ruissellement n'apparaît. L'infiltration est d'abord totale, l'intensité d'infiltration étant en tout point supérieure à l'intensité de pluie. Puis l'infiltrabilité diminue et devient en certains points inférieure au régime pluviométrique, l'eau excédentaire se concentre dans les dépressions. Au temps t_i , la capacité de stockage est atteinte, les flaques débordent et l'eau se met en mouvement. Cette phase est caractérisée par la hauteur de pluie, L_{pi} , dite pluie d'imbibition, infiltrée ou stockée en surface.

- **Phase transitoire** : l'intensité d'infiltration diminue, la proportion de la surface qui participe au ruissellement augmente, la hauteur moyenne de la lame d'eau en mouvement également. Ce régime transitoire est caractérisé par un hydrogramme sigmoïde.

- **Phase de régime permanent** : à partir du temps t_m , apparaît un palier de ruissellement caractérisé par une intensité de ruissellement maximale (R_x) et d'infiltration minimale (F_n). La valeur F_n représente le comportement moyen de la parcelle, sa variabilité dépend du degré d'uniformité et d'homogénéité de la surface.

- **Phase de vidange** : lorsque la pluie cesse au temps t_u , le ruissellement diminue jusqu'au temps t_f où il s'annule. La quantité d'eau récupérée correspond à la fraction de la lame d'eau en mouvement qui ne s'est pas infiltrée.

. Dans le cas d'une infiltration sous charge constante (submersion), des expressions empiriques ont été proposées pour modéliser les flux d'infiltration (Kostiakov, 1932; Horton, 1940; Smith, 1972). Malgré leur rusticité ces relations sont utilisées actuellement pour des résolutions d'expérimentations réalisées *in situ* concernant le ruissellement (Morin et Benyamini, 1977; Hoogmoed et Stroosnijder, 1984).

. La présence d'une croûte de battance invalide l'hypothèse d'uniformité du sol communément admise. En effet, la croûte caractérisée par une conductivité plus faible que le sol en place, joue le rôle de barrière hydraulique. Dans le cas du régime permanent, Hillel et Gardner (1970) développent une solution quasi-analytique basée sur une croûte d'épaisseur et de conductivité constante. Nous retiendrons que (Figure 12) :

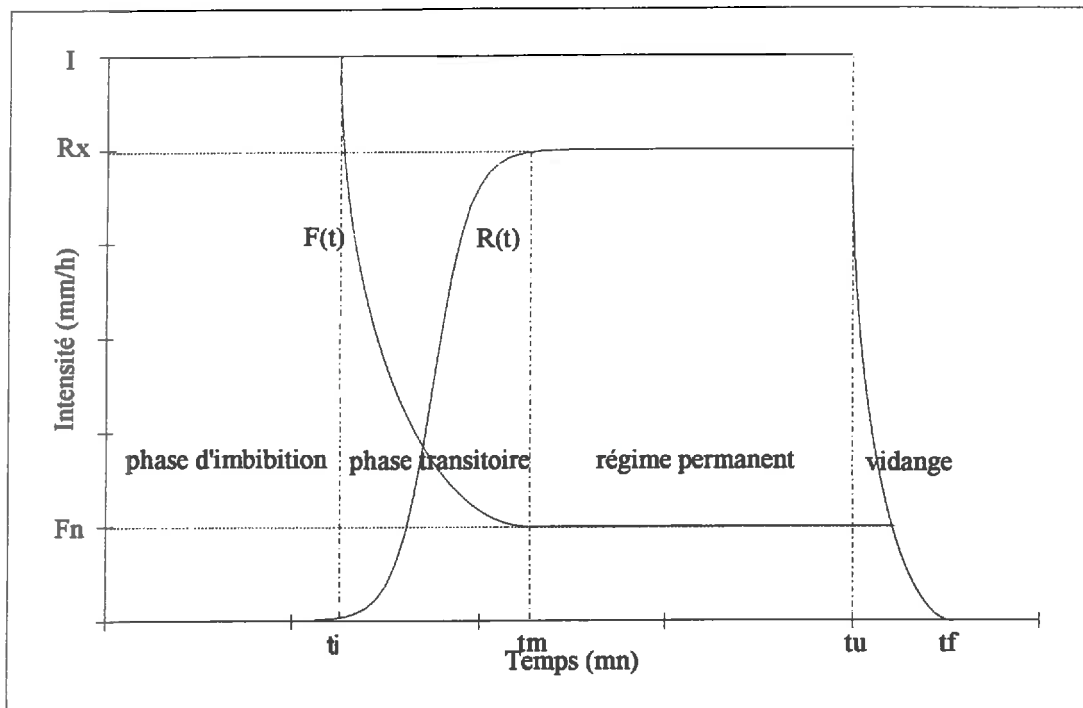


Figure 11 : Hydrogrammes théoriques de ruissellement ($R(t)$) et d'infiltration ($F(t)$) sous averse d'intensité pluviométrique constante (I). (D'après Lafforgue, 1977).

$$q = -K_c [(dh)(dz)^{-1}]_c = -K_u [(dh)(dz)^{-1}]_u$$

si on atteint le régime permanent, alors: $[(dh)(dz)^{-1}]_u \approx -1$

d'où: $K_u = K_c [(H_o + h_u + z_c)(z_c)^{-1}]$

si l'épaisseur de la lame d'eau est négligeable, alors : $H_o \approx 0$

si l'épaisseur de la croûte est négligeable devant h_u , alors: $(h_u + z_c) \approx h_u$

d'où: $q = K_u = K_c [(h_u)(z_c)^{-1}]$

si on pose: $(K_c)(z_c)^{-1} = (R_c)^{-1}$, alors: $q = (h_u)(R_c)^{-1} = K_u$

si on connaît la relation $K = a h^{-n}$ du sol en place, alors :

$$q = (a^{1/(n+1)})(R_c^{n/(n+1)})^{-1} \quad \text{et} \quad h_u = (a R_c)^{1/(n+1)}$$

avec	q	: flux à travers la croûte ($M T^{-1}$)
	K_c	: conductivité hydraulique de la croûte ($M T^{-1}$)
	K_u	: conductivité hydraulique sous la croûte ($M T^{-1}$)
	$[(dh)(dz)^{-1}]_c$: gradient de charge hydraulique de la croûte ($M M^{-1}$)
	$[(dh)(dz)^{-1}]_u$: gradient de charge hydraulique sous la croûte ($M M^{-1}$)
	H_o	: charge hydraulique imposée à la surface (M)
	h_u	: succion imposée à la limite croûte/sol (M)
	z_c	: épaisseur de la croûte (M)
	R_c	: résistance hydraulique de la croûte (T)

. Dans le cas d'une infiltration à régime variable, ces auteurs utilisent un modèle quasi-analytique, sous la croûte, pour résoudre l'équation de transfert. Des modèles numériques ont été développés par la suite pour résoudre ce problème (Ahuja, 1973; Parlange et al., 1984; Aboujaoudé et al., 1991). Touma (1992) simule l'humidification d'une croûte en formation avec l'aide d'un modèle numérique. Les résultats montrent l'influence de la vitesse de formation de la croûte, pour des cinétiques très lentes, sur la vitesse d'infiltration finale et l'humidité sous la croûte (Figure 13).

. De ces études théoriques nous retiendrons que la croûte gouverne le régime d'infiltration ; le gradient de succion qui se développe en son sein impose une charge non nulle à sa base, donc une condition non saturante dans la zone de transmission. Le déficit de saturation est d'autant plus fort que la vitesse de formation et la compacité de la croûte sont élevées. Enfin, l'hypothèse d'homogénéité de la surface peut être acceptée si on définit parfaitement les caractéristiques moyennes de la croûte.

. Des modèles empiriques de prévisions de la hauteur d'eau ruisselée ont été mis au point. Leur facilité d'emploi tend à généraliser leur utilisation, cependant la qualité de la prédiction dépend du faible éloignement du cas traité de l'échantillon de départ et de la définition correcte des paramètres de calcul:

- **Runoff Curve Number** : méthode basée sur l'analyse statistique d'un grand nombre d'écoulements enregistrés sur parcelles de ruissellement aux Etats-Unis (Williams et al., 1984, Steiner et al., 1987). Une série d'abaques fournit les valeurs de CN en fonction du type de sol, de l'humidité initiale et du couvert végétal. L'extension de cette méthode à d'autres zones géographiques nécessite un nouveau calibrage (Sharma, 1987). En zone sahélienne les résultats sont mitigés (Seguis, 1986 ; Lascano, 1991; Guillobez et Zougmore, 1993).

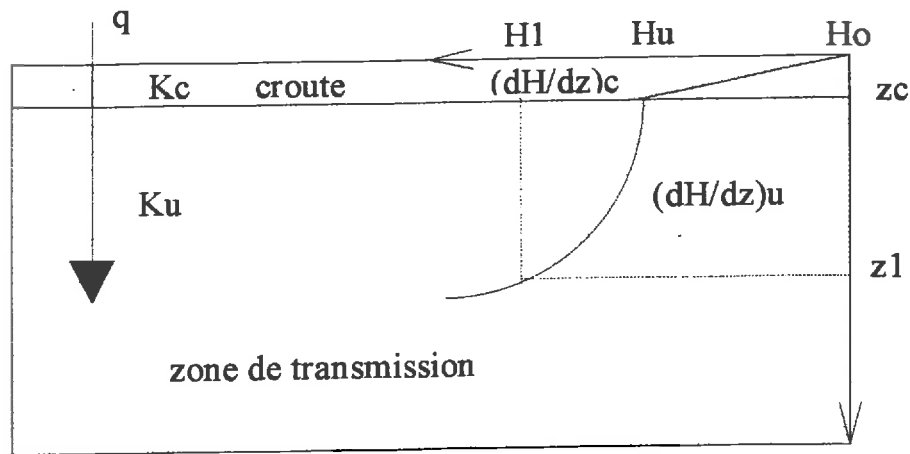


Figure 12 : Modèle d'infiltration en régime permanent à travers une croûte saturée.
(D'après Hillel et Gardner, 1970).

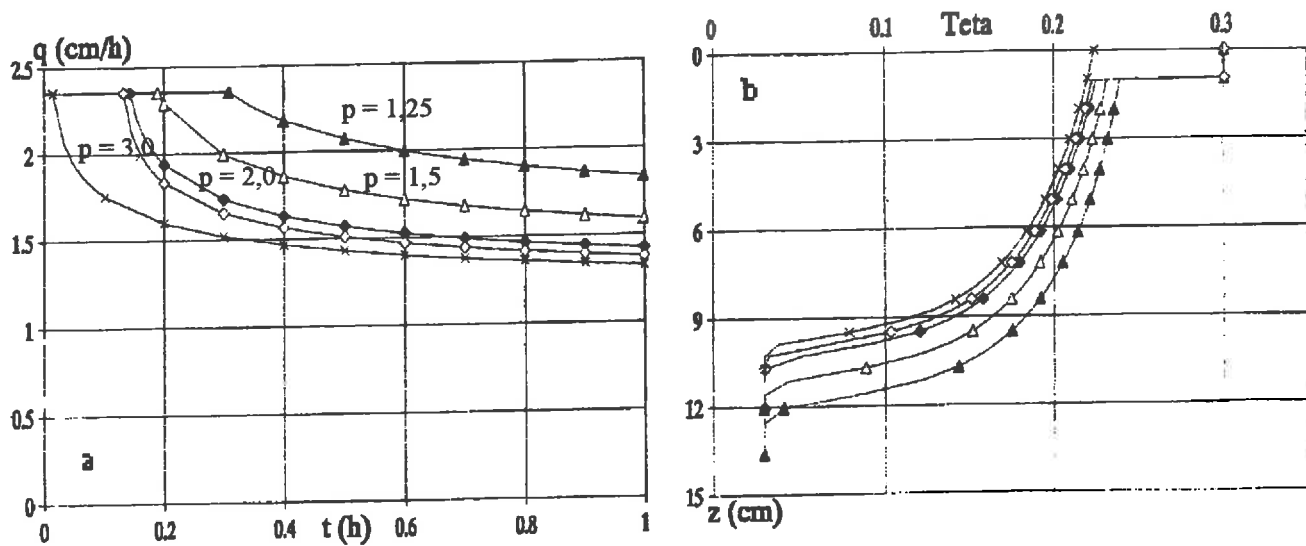


Figure 13 : Intensités d'infiltration (a) et profils hydriques à $t = 1$ heure (b) obtenus pour une infiltration sous flux constant (23,5 mm/h) et différentes hypothèses sur la vitesse de formation de la croûte (p). (Source: Touma, 1992).

- **Méthode ORSTOM** : elle est fondée sur le dépouillement de nombreuses simulations de pluies, effectuées à l'échelle de la surface élémentaire (1 m²), en zone soudano-sahélienne (Casenave et Valentin, 1989). Les protocoles de simulation standardisés permettent de mettre en évidence le rôle de la hauteur de pluie et de l'humidité initiale du sol sur le ruissellement final:

$$L_r = aL_p + b IK + c L_p IK + d$$

avec L_r : lame ruisselée (M)
 L_p : lame précipitée (M)
 IK : indice de pluie antérieure

et
$$IK_n = (IK_{n-1} + L_{p_{n-1}})e^{-\alpha t}$$

avec IK_n : valeur de IK pour la pluie (n)
 $L_{p_{n-1}}$: hauteur précipitée pour la pluie (n-1)
 t : durée de ressuyage entre les pluies (n-1) et (n)
 $\alpha = 0,5$ (Chevallier, 1982)

. L'introduction de l'indice récurrent IK permet de s'affranchir de la mesure de l'humidité du sol avant chaque pluie, ce modèle de vidange exponentielle d'un réservoir s'accorde bien avec les mesures effectuées dans les horizons de surface de plusieurs sols tropicaux (Chevallier, 1982; Thebe, 1987) (Figure 20). les coefficients de l'équation sont liés aux caractéristiques des états de surface présents sur la parcelle (Albergel, 1987). Une typologie des principaux états de surface sahéliens, fondée sur des critères morphologiques simples, permet d'affecter une équation de ruissellement à une parcelle donnée (Casenave et Valentin, 1989).

2.3.2 Entretien du ruissellement:

. La démarche déterministe se heurte rapidement aux phénomènes de collecte et de concentration du ruissellement au sein d'un réseau hydrographique dont les caractéristiques sont déterminées par les critères topographiques et les systèmes cultureux (Eimberck, 1989; Ludwig, 1992). Au prix d'hypothèses simplificatrices parfois drastiques certains auteurs développent des lois d'écoulement le long de plans inclinés (Dunne et Dietrich, 1980; Rose et al., 1983; Guillobez, 1990; Abrahams et al., 1990).

. La démarche additive consiste, après cartographie des principaux facteurs de ruissellement, sur une unité hydrologique individualisée, à affecter à chaque unité de paysage une fonction de ruissellement. La somme, pondérée par les surfaces respectives, donne une fonction de production moyenne de l'aire étudiée. Cette démarche a été appliquée à la méthode ORSTOM de genèse du ruissellement (Chevallier, 1982; Albergel, 1987; Thebe, 1987). La liaison avec les données observées passe par une fonction de calage d'autant plus imprécise que la surface, la perméabilité et la dégradation hydrographique du bassin versant croissent (Rodier, 1992). Planchon et al. (1987) démontre la nécessité d'obtenir des mesures ponctuelles des flux sur un versant végétalisé et perméable de Côte d'Ivoire.

. L'utilisation des modèles à discrétisation spatiale permet de prendre en compte la hiérarchisation de l'espace par le réseau hydrographique. La méthode ORSTOM couplée à différents modèles maillés donne des résultats intéressants (Albergel, 1987) (Figure 15). De même aux Etats-Unis, avec la méthode des Curve Numbers (Knisel et Foster, 1981). L'utilisation de la géostatistique, autorisant le passage entre des données ponctuelles discrétisées et le continuum spatial d'un paramètre, permet d'accéder à la variabilité spatiale des transferts hydriques (Burgess et Webster, 1980; Sharma et al., 1982; Vauclin, 1982; Voltz et Bornand, 1988).

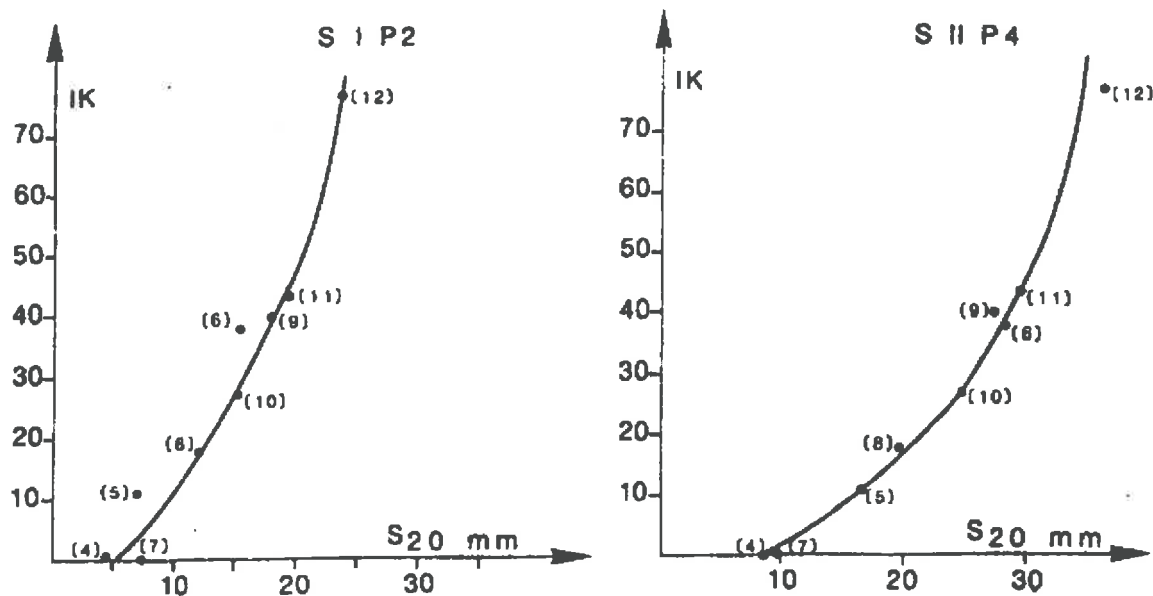
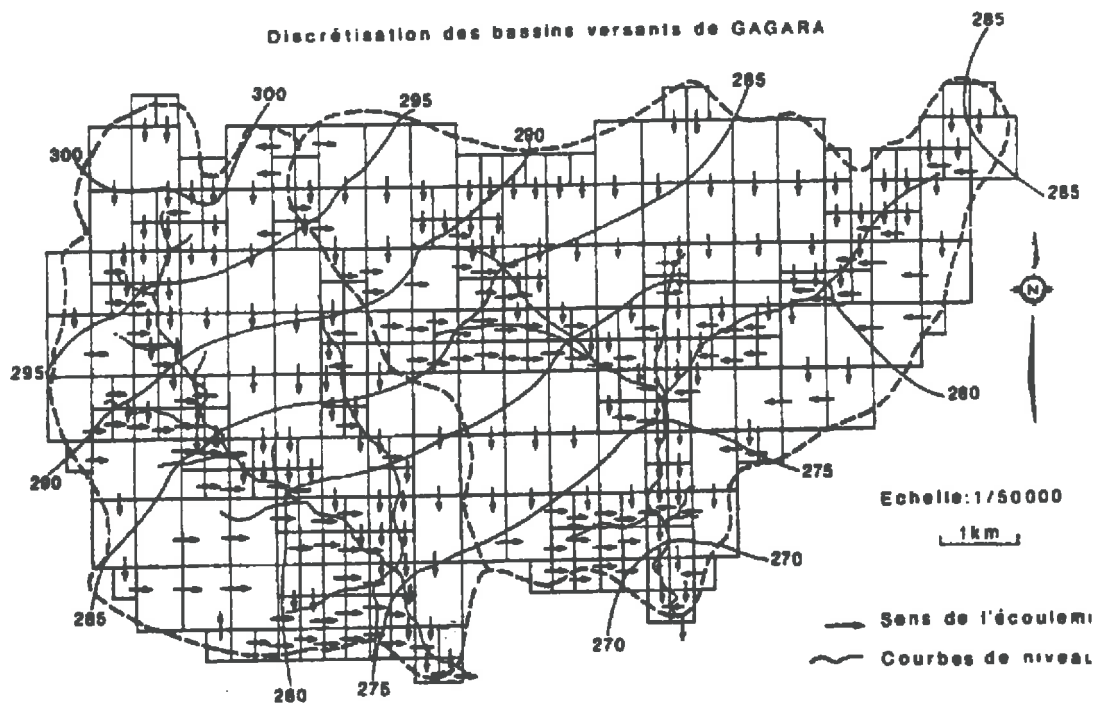


Figure 14 : Relation entre le stock hydrique mesuré dans l'horizon 0-20 cm (S_{20}) et l'indice de pluie (IK).
(Source: Thebe, 1987)



Bassin versant	nb de mailles	superficie réelle km ²	superficie discrétisée km ²	volumes écoulés observés(*)	volumes écoulés calculés(*)
Gagara est	178	35	34.6	1535	1568
Gagara ouest	136	24.4	25.6	1185	1406

(* 10³ m³)

Figure 15 : Application d'un modèle de discrétisation spatiale à deux bassins versants du Burkina Faso et principaux résultats obtenus pour l'année 1985. (Source: Albergel, 1987)

2.4 Apports des études sur l'érosion :

"L'érosion est fonction de l'agressivité climatique et de la résistance du milieu. Celle-ci dépend du sol, de la pente, du couvert végétal, des pratiques culturales et anti-érosives." (Roose, 77). Le phénomène érosif peut être décrit par les différents processus suivants :

- érosion par rejaillissement (splash erosion), le phénomène de détachement prédomine;
- érosion en nappe (sheet erosion), l'arrachement par abrasion prédomine;
- érosion en rigoles et ravines (rill and gully erosion), le cisaillement devient prépondérant.

La détachabilité par les gouttes de pluie a fait l'objet de nombreuses études. Ellison (1945) met en évidence les phases de désagrégation des mottes et de rejaillissement des particules détachées ; les modalités de mobilisation des particules et d'obturation de la surface ont été décrites pour différentes conditions expérimentales (Mc Intyre, 1958; Kinnel, 1974; Savat et Poesen, 1981; Boiffin, 1984). Cependant, la plupart de ces études ne concernent que quelques mètres carrés et sont entachées d'une forte variabilité des résultats pouvant atteindre 25 à 50 % (Bryan, 1981). De plus, elles excluent l'érosion en rigole, déterminante en conditions naturelles (Boiffin et al., 1988; Lal, 1988).

A une échelle plus importante, Wischmeier et Smith (1958) proposent une méthode empirique, standardisée, de détermination de l'érodabilité annuelle moyenne d'un sol donné. L'unité d'observation est une parcelle de 22,6 m de longueur, disposée sur une pente de 9 %, occupée par une jachère nue travaillée. Les auteurs préconisent vingt années de mesures pour obtenir une bonne variabilité des conditions climatiques. On obtient chaque année :

$$E = K R = [(\Sigma SL)(\Sigma EI)^{-1}] (\Sigma EI)$$

avec E : pertes en terre annuelles de la parcelle ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$)
K : facteur d'érodabilité du sol ($t \cdot h \cdot J^{-1} \cdot mm^{-1}$)
R : facteur d'érosivité des pluies ($J \cdot mm \cdot ha \cdot h^{-1} \cdot an^{-1}$)
EI : somme des indices d'érosivité par averse ($J \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$)
SL : somme des pertes en terre par averse ($t \cdot ha^{-1}$)

et $EI = Ec I_{30}$

avec Ec : énergie cinétique globale de l'averse ($J \cdot m^{-2}$)
 I_{30} : intensité pluviométrique maximale en 30 minutes ($mm \cdot h^{-1}$).

Afin d'étudier des sols présents sur des pentes de longueur ou d'inclinaison différentes de celles du protocole standardisé, les auteurs introduisent un facteur topographique correctif (LS). Les comparaisons de parcelles standards et de parcelles soumises à divers traitements culturaux ou pratiques anti-érosives permettent d'introduire des coefficients de culture (C) et d'aménagement (P). Ces divers facteurs ont fait l'objet de nombreux développements (Mutchler et al., 1988). L'équation, connue sous le nom d'équation universelle des pertes en terre (USLE), devient :

$$E = RKLSCP$$

Cette démarche a été appliquée en Afrique de l'Ouest, moyennant quelques adaptations aux conditions locales (Delwaule 1973; Roose et Sarraïlh, 1989). Cependant, de nombreux auteurs soulignent les limites de cette approche (Roose, 1977; Rose, 1988; Collinet, 1988) :

- le ruissellement n'est pas abordé,
- le modèle, empirique, est fortement dépendant de sa base de données,
- les facteurs sont considérés, à tort, comme indépendants,
- l'équation fournit une agression moyenne annuelle sans prise en compte des dynamiques saisonnières et du poids des événements climatiques exceptionnels.

. La capacité de transport des sédiments par le ruissellement a fait l'objet de développements variés selon la formulation de la capacité d'entraînement utilisée (Foster et Meyer, 1972; Rose et al., 1983; Wilson et al., 1984; Govers, 1990). Des études de terrains plus déterministes visent à définir des facteurs préalables favorables à l'érosion linéaire (pente, type de sol, traces d'engins...) et à caractériser l'agencement spatial des principales formes d'incision ainsi que leur degré de fonctionnalité. En zone tempérée, fortement anthropisée, le mode d'occupation de l'espace et le système de culture influencent directement l'évolution du modelé (Monnier et al., 1987; Boiffin et al., 1988 ; Ludwig, 1992). En zone tropicale, l'inclinaison et la longueur de pente ainsi que les capacités d'infiltration et la cohésion des horizons superficiels du sol sont déterminants (Planchon et al., 1987).

. Nous retiendrons de ces études que la mobilisation à faible distance des particules du sol est un phénomène relativement bien décrit. Les mécanismes de désagrégation et de rejaillissement sont gouvernés par les propriétés intrinsèques du sol, son état initial et l'énergie appliquée. En revanche, le transport sur des distances plus importantes est lié aux capacités d'entraînement du ruissellement, donc du régime d'écoulement et de la hiérarchisation du réseau hydrographique.

2.5 Les facteurs de sensibilité des sols tropicaux :

On peut distinguer plusieurs groupes de facteurs selon leur constance et leur dépendance vis à vis des caractéristiques du sol en place (Casenave et Valentin, 1989) :

- Facteurs intrinsèques : texture, nature minéralogique des constituants, statut organique.
- Facteurs contingents : état hydrique, état structural.
- Facteurs topographiques : l'inclinaison, la longueur, la régularité de la pente.
- Facteurs externes : la pluie, le couvert végétal, l'itinéraire technique.

2.5.1 Facteurs intrinsèques :

- *Le type de sol :*

. Les taxonomies pédologiques usuelles rendent peu compte des comportements de surface des sols. En zone tropicale les grandes familles de sols se distinguent par leur texture et leur roche d'origine. Roose et Sarrailh (1989) dans une étude synthétique sur l'utilisation de USLE en zone tropicale, parviennent à distinguer :

- * Les sols ferralitiques, pauvres en limons et riches en fer et alumine libres, relativement stables.
- * Les sols ferrugineux lessivés, pauvres en matière organique, riches en sables fins, sensibles à l'encroustement et à la prise en masse.

* Les sols vertiques, bien structurés, sujets au retrait à l'état sec et à l'engorgement lorsqu'ils sont saturés.

. Cependant, Collinet (1988) analysant les résultats de simulations de pluie (50 m²) réalisées sur un transect latitudinal en Afrique de l'Ouest, n'observe pas d'évolution progressive du coefficient moyen de ruissellement suivant les grands domaines pédologiques. par contre, les convergences enregistrées permettent de définir deux types de comportement:

* Sols à régime de ruissellement devenant rapidement constant, caractéristiques de la zone sahélienne. L'infiltration est contrôlée par les organisations pelliculaires de surface.

* Sols à régime de ruissellement variable, caractéristiques des zones humides. L'infiltration est tributaire des modifications de l'espace poral des horizons profonds.

. Enfin, l'héritage morphogénétique entraîne très souvent une liaison étroite entre organisation pédologique, états de surface et topographie (Mietton, 1988 ; Angé, 1991) qui se retrouve dans les études sur le ruissellement localisé (Thebe, 1987; Valentin et Janeau, 1989).

- La texture :

. Les horizons superficiels de la plupart des sols sahéliens sont sableux à sablo-argileux et considérés comme stables par le test d'instabilité structurale (Monnier et Stengel, 1982). Cependant Poesen (1986), obtient une infiltrabilité minimale pour des mélanges contenant 90 % de sables et 10 % de limons. Casenave et al. (1982) trouvent une liaison faible entre la stabilité des agrégats et les caractéristiques d'infiltration dans des sols sableux équatoriaux. L'éventail granulométrique du squelette influence la géométrie de l'espace poral des sols sableux (Fies, 1984; Chrétien, 1986) et leur comportement mécanique (Fies et Zimmer, 1982; Ducreux, 1984). Collinet (1988) observe que l'enrichissement en argile de l'horizon superficiel entraîne une installation plus rapide du régime de ruissellement. La charge en éléments grossiers joue un rôle ambivalent sur le ruissellement (Casenave et Valentin, 1992) mais favorise la stabilisation de la détachabilité (Dumas, 1965; Collinet, 1988).

- Nature minéralogique des constituants :

. La phase argileuse est essentiellement constituée de kaolinite, peu gonflante et de faible surface spécifique (10 à 20 m²/g), accompagnée de sesquioxydes ferriques. Pour les sols ferrugineux lessivés, pauvres en argiles et sesquioxydes, la cohésion des agrégats est minimale et la sensibilité à la battance élevée. Les sols isohumiques ou ferralitiques faiblement désaturés, à l'inverse, sont relativement bien structurés (Chauvel, 1977). Dutartre et al. (1993) mettent en évidence l'importance des taux d'argile, d'oxydes de fer et de carbone organique sur la structure micromorphologique et la stabilité des agrégats d'horizons superficiels ferrugineux.

- Statut organique :

. La matière organique réduit la mouillabilité des agrégats et diminue les risques d'éclatement lors de l'humectation (Henin et al., 1969). Dans les sols tropicaux, à forte minéralisation, le stock de matière organique diminue rapidement dès la mise en culture (Siband, 1974). Cette diminution s'accompagne, en l'espace d'une dizaine d'années, d'une chute de 15 % de la porosité du sol, d'un doublement voire un triplement de la cohésion et d'une forte réduction de la stabilité structurale (Chauvel, 1966; Charreau et Nicou, 1971; Feller et Milleville, 1977). Pieri (1989) propose un seuil critique de teneur en matière organique pour évaluer le risque de dégradation physique du sol (Figure 16). La teneur en matière organique liée à la fraction argileuse influence la structure micromorphologique des sols sableux (Dutartre et al., 1993; Ouattara et al., 1993), leur comportement mécanique (Guerif, 1979), leur aptitude à la prise en masse (Nicou, 1974).

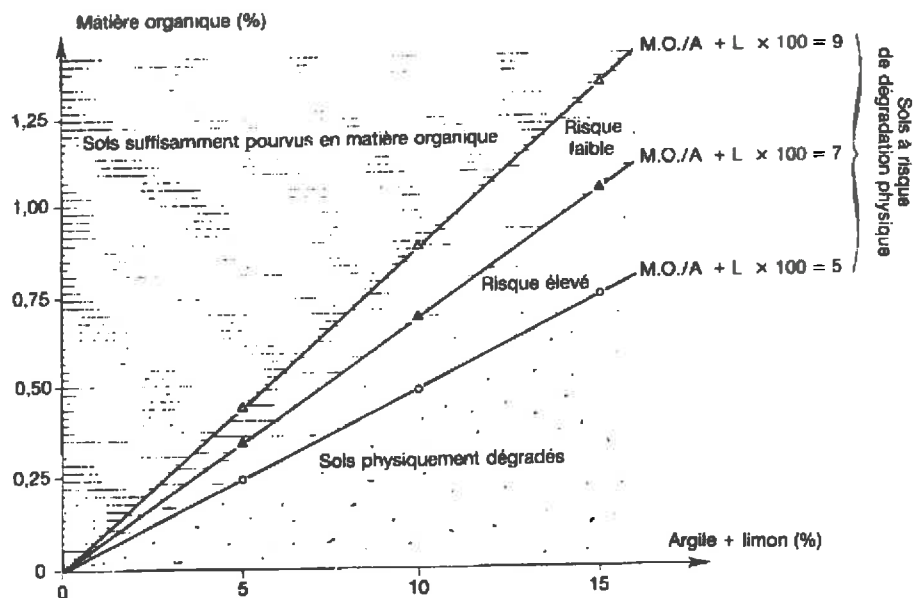


Figure 16 : Niveaux critiques de matière organique pour le maintien des propriétés physiques des sols.
(Source: Pieri, 1989).

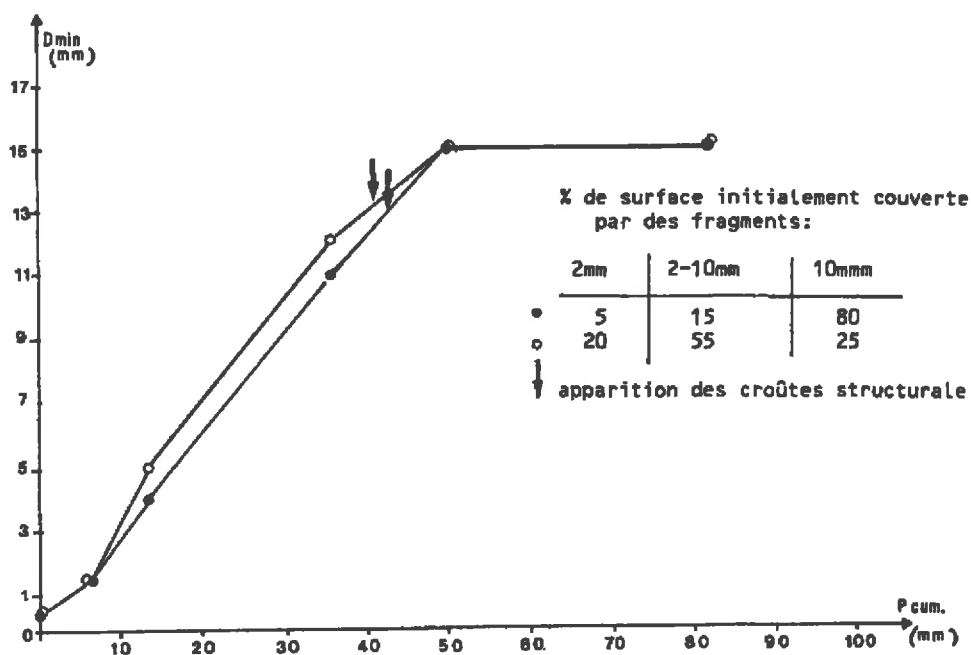


Figure 17 : Evolution du critère D_{min} en fonction du cumul de pluies. Influence du calibre initial des fragments.
(Source: Eimberck, 1989).

2.5.2 Facteurs contingents :

- *L'état hydrique initial:*

Pour un état structural donné, l'état hydrique initial entraîne deux conséquences opposées; plus on tend vers la saturation des agrégats moins les phénomènes d'éclatement sont sensibles mais la cohésion mécanique des constituants diminue également, particulièrement pour les sols sableux. Chrétien (1986) observant des horizons sableux de terrasse fluviatile, constate pour des matériaux très pauvres en argile (5 %) que seule l'eau assure la cohésion des agrégats (peds) qui devient maximale entre pF 2,5 et pF 3,0. L'influence de l'humectation dans le phénomène d'éclatement, prédominant pour de nombreux sols argileux tempérés (Boiffin, 1984; Le Bissonais, 1988; Le Bissonais et al., 1989), semble moins important dans les sols sableux (Truman et al., 1990). En revanche, le fractionnement et la dispersion déterminent la formation de croûtes de battance (Smith et al., 1990). **De nombreuses études de terrain soulignent l'influence d'une humectation croissante du sol sur le raccourcissement de la phase d'imbibition et l'augmentation de l'intensité de ruissellement durant une pluie (Chevallier 1982, Albergel 1987, Collinet, 1988).**

- *L'état structural initial:*

En zone tempérée, il est établi que la distribution dimensionnelle initiale des mottes présentes en surface détermine la vitesse d'extension des plaques structurales formant la croûte de battance. En revanche, la vitesse de désagregation des mottes est indépendante de leur calibre (Farres, 1978 ; Boiffin, 1984) (Figure 17). En conséquence, l'état structural initial influence directement la cinétique d'infiltration (Freebairn et al., 1991). **Cependant, en zone tropicale, compte tenu des conditions pluviométriques et pédologiques, l'état structural initial correspond à une phase très fugace et conditionne très faiblement les caractéristiques hydrodynamiques finales des croûtes de battance (Valentin et Ruiz Figueroa, 1987; Casta et al., 1989; Poss et al., 1988).** Ce résultat peut être attribué à une cohésion relativement faible des gros agrégats sableux qui s'accorde mal avec le modèle de colmatage interstitiel proposé (Valentin et Janeau, 1989). Notons, toutefois, que Rawitz et al. (1981) relie la résistance à la pénétration d'une croûte au calibre des agrégats initiaux sablo-limoneux. En zone sahélienne, la rapidité de formation des pellicules de surface et la liaison étroite entre leurs structures et leurs propriétés explique l'intérêt d'une typologie génétique des croûtes (Valentin, 1981)(Figure 18):

*** Croûte structurale :** édifée par effondrement sur place de la structure. Sur matériau sableux, l'impact des gouttes de pluie entraîne un granulo-classement inversé et la formation d'une pellicule plasmique en profondeur.

*** Croûte de ruissellement :** mise en place par le dépôt de sédiments transportés par le ruissellement. Les changements d'intensité ou la succession de pluies peut entraîner la formation d'une croûte polyphasée.

*** Croûte de décantation :** formée après sédimentation de particules dans une flaque. Le tri granulométrique est conforme à la loi de Stokes.

*** Croûte de dessiccation :** la prise en masse des éléments de surface d'un sol sableux, liée aux cycles d'humectation-dessiccation, suffit à créer une croûte de cohésion assez faible.

. La présence de vésicules incluses dans la croûte est fortement corrélée aux propriétés hydrodynamiques superficielles. Aussi l'analyse descriptive de l'agencement et des caractères particuliers des croûtes a-t-elle débouchée sur une méthode prédictive de détermination du ruissellement (Casenave et Valentin, 1989).

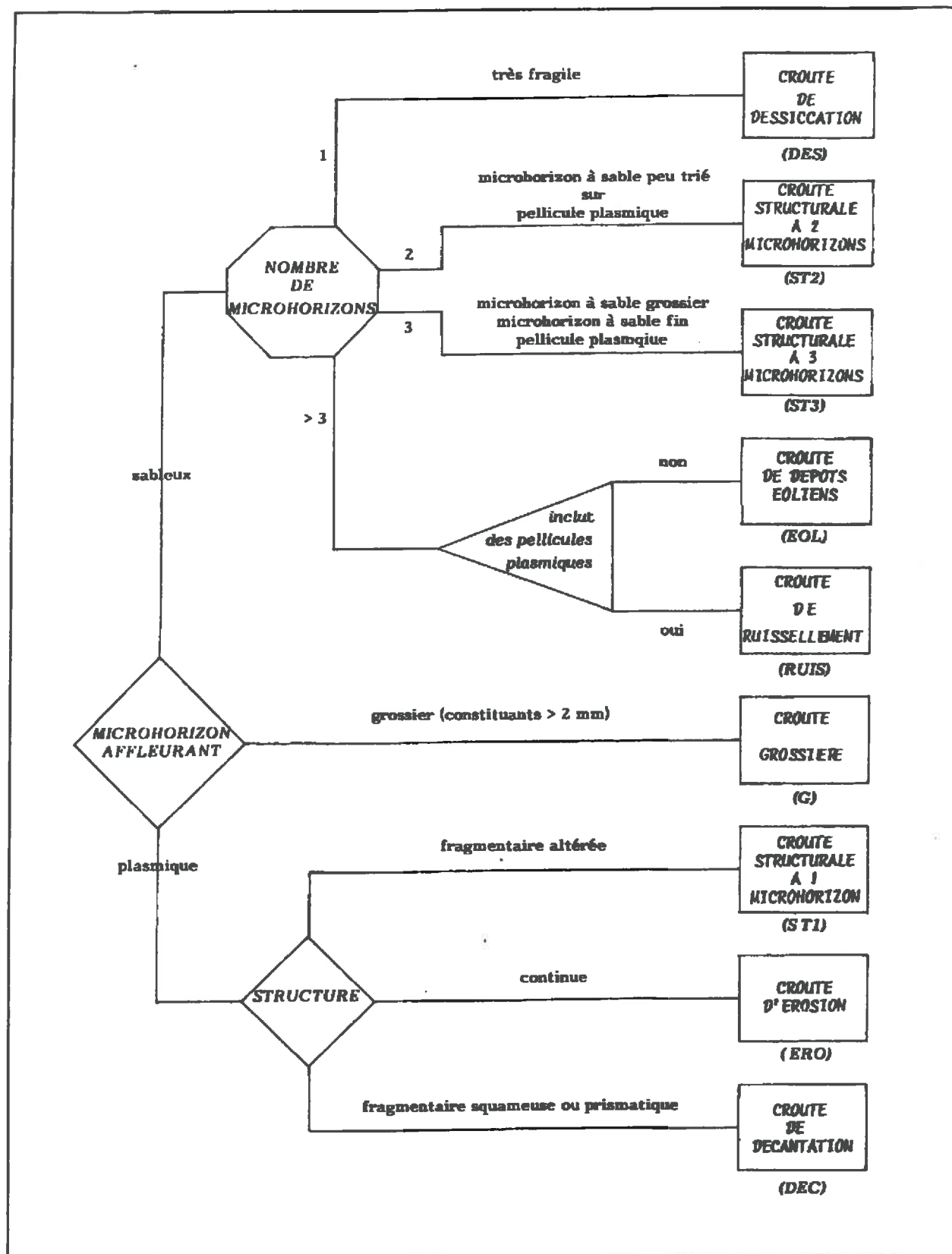


Figure 18 : Clefs de détermination des micro-organisations pelliculaires de surface (croûtes).
(Source: Casenave et Valentin, 1989).

2.5.3 Les facteurs topographiques :

- La pente:

. A partir d'une longueur de pente suffisante, l'inclinaison influence nettement les phénomènes érosifs. Hudson (1973) envisage une liaison exponentielle entre les pertes en terre sous cultures et la pente. Les résultats obtenus au Sénégal, sur des pentes très faibles, ou en Côte d'Ivoire confirment cette influence (Roose, 1977) (Tableau 4).

Site	Période	Sol	Pente (%)	Erosion annuelle sous culture (t /ha)	Ruissellement annuel sous culture (%)
Sefa (Sénégal)	1955-1962	ferrugineux	1,25	5,0	16
			1,50	8,6	22
			2,00	12,0	30
Adiopoudoume (Côte d'Ivoire)	1956-1972	ferralitique	4,50	19,0	16
			7,00	75,0	24
			23,00	295,0	24

Tableau 4 : Influence de l'inclinaison de la pente sur l'érosion et le ruissellement pour deux sites d'Afrique de l'ouest. (Source: Roose, 1977).

. Sur sol nu, en règle générale, pour des pentes inférieures à 7 % l'érosion en nappe opère un tri granulométrique qui dépose les sables le long de la pente ; pour des pentes supérieures le système d'érosion linéaire se hiérarchise, la surface devient accidentée, l'évacuation des sédiments s'opère pour toutes les particules. Cette évolution peut expliquer le rôle plus nuancé de l'inclinaison sur le ruissellement. En effet, selon les états de surface étudiés, le coefficient de ruissellement tend à se stabiliser, voire diminuer, à partir d'un seuil donné (Lal, 1975; Poesen 1986; Abrahams et Parsons, 1991).

- La longueur de pente:

. En zone tropicale, les études réalisées témoignent d'une influence faible et variable de la longueur de pente sur l'érosion (Roose, 1977; Valentin, 1978). En laboratoire, Poesen et Bryan (1989) montrent que le volume de ruissellement par unité de surface d'un matériau limono-sableux varie avec la longueur de pente en fonction des processus d'érosion et de sédimentation. Dans le cas du ruissellement en nappe, des études théoriques montrent que le débit d'écoulement devient constant au delà d'une certaine distance et que la lame ruisselée diminue en fonction de la longueur de pente (Bader, 1990; Guillobez, 1990).

2.5.4 Les facteurs externes :

- La pluie :

. L'énergie globale des gouttes de pluie peut être représentée par la somme des énergies cinétiques de chaque goutte (Laws et Parsons, 1943; Epema et Riezebos, 1983). Les méthodes expérimentales de détermination des énergies cinétiques étant fastidieuses, de nombreuses formulations empiriques ont été proposées :

$$Ec = A + B \log I \quad (\text{Laws et Parsons, 1943})$$

$$Ec = A + Be^{CI} - De^{-EI} \quad (\text{Mc Gregor et Mutchler, 1976})$$

avec Ec : énergie cinétique ($Jm^{-2} mm^{-1}$)
 I : Intensité pluviométrique ($mm h^{-1}$)

L'agressivité de la pluie caractérise le rapport entre l'érosion provoquée et l'énergie dissipée par un événement pluviométrique donnée. Wischmeier et Smith (1958) proposent un indice d'érosivité (R) qu'ils intègrent dans l'équation universelle des pertes en terre (USLE). Pour une averse, on a :

$$R = [(Ec I_{30})/1735.6] 10^{-2}$$

avec R : indice d'érosivité de la pluie (unités US)
 Ec : énergie cinétique globale (J m⁻²)
 I₃₀ : intensité maximale en 30 mn (mm h⁻¹)

L'énergie cinétique globale est calculée à partir de l'équation de Laws et Parsons pour chaque segment de pluie d'intensité constante ; soit Ec_u l'énergie cinétique unitaire, on obtient :

$$Ec_u = 11.9 + 8.73 \log I_u \quad \text{et} \quad Ec = \sum^n (Ec_u H_u)$$

avec Ec_u : énergie cinétique pluviométrique du segment (mm h⁻¹)
 H_u : hauteur pluviométrique du segment (mm)
 I_u : intensité pluviométrique du segment (mm h⁻¹)
 n : nombre de segments

Appliqué en Afrique de l'Ouest, l'indice d'érosivité (R) présente une certaine variabilité pour une hauteur de pluie donnée. Cependant, les valeurs moyennes calculées sur de nombreux événements indiquent une certaine constance régionale et une agressivité climatique élevée (Roose, 1977) (Tableau 5). Ce fait est à rapprocher de l'uniformité des types de pluies mis en évidence dans la zone sahélienne par Brunet-Moret (1963). Compte tenu de la spécificité des averses tropicales par rapport aux précipitations enregistrées aux USA (Casenave et Valentin, 1989), certains auteurs ont proposé d'autres indices d'agressivité (Hudson, 1976; Lal, 1976).

Site	Hauteur pluviométrique (mm)			
	15	30	50	70
Allokoto (Niger)	5	18	50	-
Saria (Burkina Faso)	4,7	18	48	86
Korhogo (Côte d'Ivoire)	5	17	50	83
Abidjan (Côte d'Ivoire)	5	18	44	78

Tableau 5 : Valeurs moyennes de R pour différents sites d'Afrique de l'ouest et plusieurs hauteurs de pluie.
 (Source: Roose, 1977).

Concernant le ruissellement, les sols sableux tropicaux présentent une diminution de leur infiltrabilité d'autant plus rapide que l'intensité pluviométrique est forte. Ce phénomène est lié à une dégradation de la surface plus rapide et s'accompagne d'une diminution équivalente de la hauteur de pluie d'imbibition. Néanmoins certains auteurs n'observent aucune influence de ce mécanisme sur la capacité d'infiltration finale du sol (Morin et Benyamini, 1977; Hoogmoed et Stroosnijder, 1984), d'autres rapportent une augmentation du palier d'infiltration avec l'intensité pluviométrique (Chevallier, 1982; Albergel, 1987; Valentin, 1991). L'approche spatialisée du modèle de Lafforgue (1977) permet de réconcilier ces différents résultats en distinguant deux cas de figure (Figure 19) :

* Le palier d'infiltration, caractéristique d'un état de surface donné, est atteint en tout point du domaine étudié quelle que soit l'intensité pluviométrique. Ce cas intéresse des parcelles homogènes à faible réorganisation, ou des parcelles à l'hétérogénéité diffuse ou couvertes d'une pellicule imperméable continue.

* L'intensité limite du ruissellement n'est atteinte par l'intensité pluviométrique que pour un nombre restreint de points du domaine. L'augmentation de l'intensité de pluie accroît la part de surface contribuant au ruissellement et, de ce fait, l'infiltration au palier moyenne sur le domaine d'étude. Ce schéma s'applique à la plupart des surfaces hétérogènes à fort microrelief.

- *Le couvert végétal :*

. "Un couvert végétal est d'autant plus efficace qu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes les plus agressives de l'année, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et qu'il maintient une bonne porosité" (Roose, 1977).

. On peut distinguer trois groupes de couverts en fonction de leur aptitude à la protection : les couverts complets toute l'année (forêt, jachère naturelle), les couverts incomplets (cultures vivrières et industrielles), les sols nus (Charreau et Nicou, 1971; Roose, 1977) (Tableau 6).

Site	Période	Couvert	Ruissellement moyen (%)	Ruissellement maximum (%)	Erosion moyenne (t /ha/an)
Adiopoudoume	56-72	forêt	0,7	6,0	0,1
		jachère	8,0	64,0	0,6
		arachide	27,0	73,0	82,0
		sol nu	33,0	66,0	138,0
Sefa	54-68	forêt	0,9	2,3	0,1
		jachère	16,6	21,5	4,9
		arachide	20,7	45,5	7,7
		sol nu	39,5	53,1	21,3

Tableau 6 : Influence des divers types de couverture sur le ruissellement et l'érosion annuels pour deux sites d'Afrique de l'ouest. (Sources: Charreau et Nicou, 1971; Roose, 1977).

. Outre l'interception nette d'une fraction de la pluie, le couvert dissipe une partie de l'énergie des gouttes qui le traversent. La densité de peuplement, la dynamique de recouvrement et l'architecture des plantes sont autant de facteurs d'interception ; un couvert végétal dense développé au ras du sol, un paillage épais de résidus constituent la réponse optimale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion (Chorley, 1978; Stocking, 1988; Casenave et Valentin, 1989). Au delà d'un seuil proche de 60 %, les pertes en terre et hydriques sont stables et négligeables (Elwel et Stocking, 1976) (Figure 20). Collinet (1988) en zone de savane humide, note un allongement de la phase d'imbibition sous tapis herbacé et une réduction de l'érosion due à la diminution de l'énergie cinétique des gouttes mais également au ralentissement de la vitesse de ruissellement. Ce dernier aspect peut être attribué au développement d'une rugosité au niveau de la litière et des collets, et d'une macroporosité liée à l'activité racinaire et biologique (Stocking, 1988; Dunne et al., 1991). Pour une culture donnée, la courbe de croissance (recouvrement, hauteur, indice de surface foliaire...) permet d'estimer l'interception du couvert et d'abattre les valeurs d'énergie globale correspondantes (Sharma et al., 1976; Elwel et Stocking, 1982).

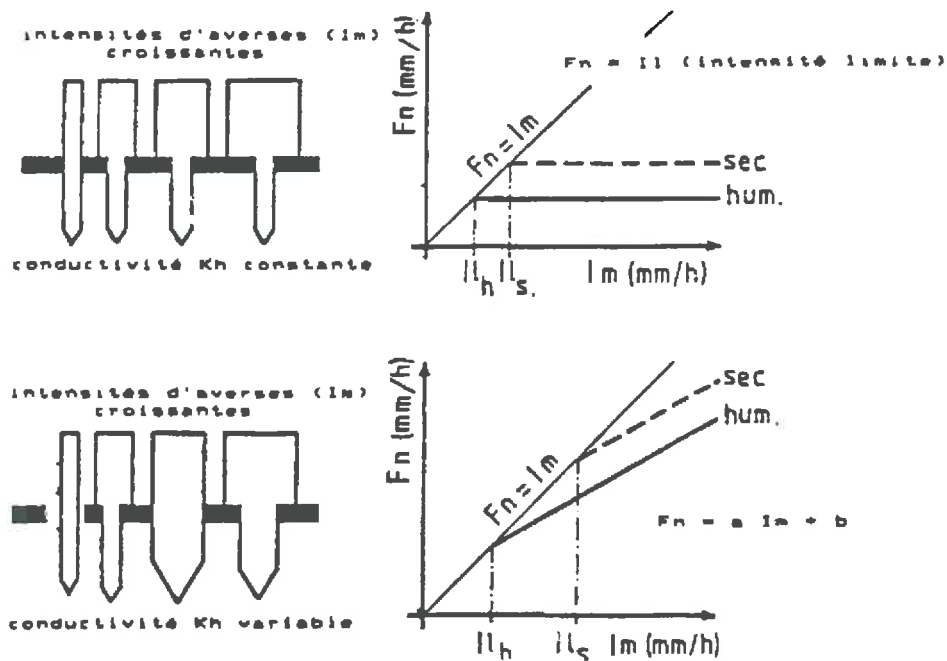


Figure 19 : Influence de l'hétérogénéité du comportement hydrique d'une parcelle (K_h) sur la relation liant l'intensité minimale d'infiltration (F_n) et l'intensité pluviométrique (I_m). (Source: Collinet, 1988).

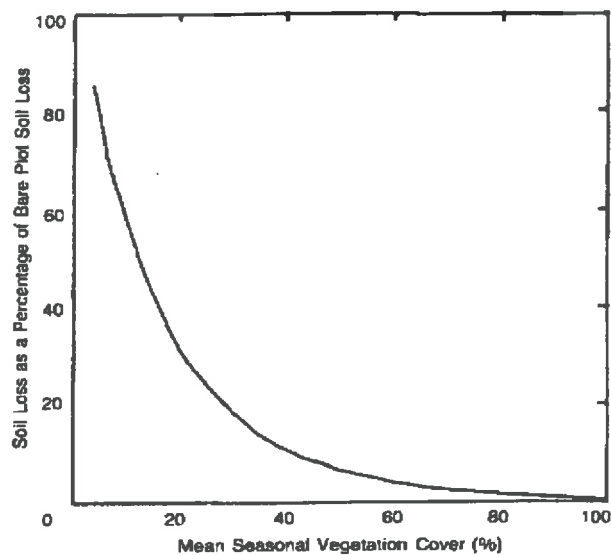


Figure 20 : Relation entre le taux de recouvrement (%) et l'érosion relative (% sol nu). (Source: Stocking, 1988; d'après Elwell et Stocking, 1974).

. Une tentative de liaison directe entre érosion et couvert végétal a amené Wischmeier et Smith (1958) à inclure un facteur cultural (C) dans l'équation universelle des pertes en terre (USLE). Le facteur C exprime le rapport entre l'érosion annuelle mesurée sous une culture et un itinéraire technique donnés et l'érosion mesurée sur un sol nu travaillé. Roose (1977) obtient quelques valeurs caractéristiques pour les principaux couverts d'Afrique de l'Ouest.

. Concernant le ruissellement, Casenave et Valentin (1991) tiennent compte du rôle protecteur du couvert en proposant des variantes aux équations de ruissellement définies pour un état de surface donné (Tableau 7). Cependant, la plupart des couverts sont testés en saison sèche ou après récolte, dans des conditions physiologiques et phénologiques éloignées de la période de croissance.

Type de surface	Variante	Kr0 (%)	Kr20 (%)	Lpis (mm)	Lpih (mm)
Structurale (ST2)	modal	25 à 40	35 à 50	10 à 20	3 à 6
	couvert > 50%	10 à 20	15 à 25	20 à 30	5 à 10
Culturale (C1)	modal	10 à 20	15 à 25	25 à 30	5 à 15
	couvert > 50%	0 à 10	5 à 15	30 à 40	20 à 30

Kr0 = coefficient de ruissellement pour une pluie de 50 mm et IK = 0

Kr20 = coefficient de ruissellement pour une pluie de 50 mm et IK = 20

Lpis = pluie d'imbibition pour un sol sec (IK = 0)

Lpih = pluie d'imbibition pour un sol très humecté (IK > 80)

Tableau 7 : Influence du couvert végétal sur les principales caractéristiques du ruissellement pour deux types de surface définis selon les critères proposés par Casenave et Valentin (1989). (Source: Casenave et Valentin, 1991).

. Thebe (1987), à partir de résultats de simulation de pluie (1 m²), définit par régression multiple progressive une équation du type:

$$Lr = aLp + bIK + cCV + d$$

avec Lr : lame ruisselée (mm)

Lp : lame précipitée (mm)

CV : couvert végétal (%)

IK : indice de pluies antérieures

L'auteur insiste sur la nécessité d'obtenir des plages de variation assez larges pour le paramètre CV et de définir un protocole standardisé de suivi du couvert qui respecte les caractéristiques de développement en conditions naturelles.

- Les techniques culturales :

. Nous limiterons notre analyse aux conséquences de diverses techniques sur la sensibilité du sol à l'érosion et au ruissellement. Néanmoins, il faut souligner dès à présent la distinction qui existe entre, d'une part, les régions tropicales sèches, à climat très contrasté et déficit hydrique chronique où dominant des sols sableux ferrugineux sensibles à l'encroûtement et à la prise en masse ; et, d'autre part, les régions tropicales humides, à climat agressif où de nombreux sols possèdent une structure superficielle suffisante. Dans le premier cas l'infiltration demeure l'objectif prioritaire ; dans le second, la lutte contre l'érosion s'impose (Charreau et Nicou, 1971; Roose, 1977; Rawitz et al., 1981).

. **Le travail profond**, de type labour, a pour objectif de restaurer le profil cultural du sol. De nombreuses études démontrent son rôle bénéfique sur l'infiltration et les caractéristiques structurales des sols ferrugineux (Charreau et Nicou, 1971; Chopart et Nicou, 1989; Sarr, 1981; Rawitz et al., 1981). Cependant, cette amélioration n'est que temporaire (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984). Certains auteurs observent une érosion supérieure après labour (Lal, 1975; Roose, 1977). D'autres, en revanche, n'observent pas d'augmentation significative de la détachabilité après labour (Nicou et al. 1987; Poss et al., 1988). En fait, la principale contrainte au labour réside dans sa faisabilité (Benoît-Cattin, 1986; Vlaar, 1992). Un palliatif, moins consommateur d'énergie, existe avec **le décompactage du sol** en traction bovine, réalisable en conditions sèches. Peu d'études malheureusement font état de son influence sur le ruissellement et l'érosion (Lamachère et Serpantié, 1990; Roose et al., 1992).

. **Le travail superficiel** vise deux objectifs, lutter contre les adventices (sarclage) et briser les croûtes de surface (binage). Réalisé manuellement ou en traction animale, la profondeur d'intervention atteint 5 cm au mieux. L'élimination de la pellicule de surface d'un sol ferrugineux entraîne une augmentation de la hauteur de pluie d'imbibition et une amélioration temporaire de l'infiltrabilité (Valentin et Ruiz-Figueroa, 1987; Poss et al., 1988; Collinet, 1988; Casta et al., 1989). La rapidité de reconstitution de la pellicule dépend des caractéristiques pluviométriques ultérieures (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984; Valentin, 1991). De nombreux auteurs mettent en avant le rôle primordial de la rugosité sur la détention superficielle et la genèse du ruissellement, même pour des reliefs peu prononcés (Lamachère, 1991; Abrahams et al., 1990; Guillobez et Zougmore, 1994).

. **Le buttage et le billonnage** augmentent, théoriquement, la rugosité et la surface d'infiltration. Réalisés dans le sens de la pente ils accroissent également la déclivité moyenne de la parcelle et le risque d'arrachement (Roose, 1977; Poss et al., 1988). Un travail isohypse ou cloisonné réduit fortement les pertes par ruissellement et par érosion. Cependant en cas de rupture l'effet inverse se produit ; le seuil de rupture est fortement dépendant du type de sol et de la pente (Collinet et Valentin, 1985; Poss et al., 1988; Vlaar, 1992).

. La disparition plus ou moins rapide de la structure et de la rugosité, sous l'action de la pluie, peut être limitée par l'épandage d'un **paillage** à la surface du sol. L'énergie des gouttes de pluie est dissipée dans l'épaisseur du mulch et le ruissellement est ralenti par les obstacles rencontrés. Le couplage d'un labour et d'un paillage limite fortement le ruissellement et l'érosion (Chopart et al., 1976 ; Collinet, 1988), cependant les quantités nécessaires pour réaliser un paillage de qualité (5 à 8 t/ha) s'accordent mal avec les disponibilités en biomasse dans la zone sahélienne (Vlaar, 1992).

- La faune:

. En zone semi-aride l'activité faunique concerne principalement les fourmis et les termites. Ces dernières interviennent de manière ambivalente dans les phénomènes de ruissellement :

* création d'une porosité fonctionnelle grâce au réseau de galeries débouchant à la surface et aux tunnels de récolte édifiés sur le sol (Casenave et Valentin, 1989) ;

* délimitation de zones de ruissellement préférentiel autour des termitières; en terrain cultivé, les édifices abandonnés laissent des auréoles qui constituent de véritables impluviums (Janeau et Valentin, 1987 ; Hoogmoed et Klaij, 1991)

Pendant la saison des pluies certaines espèces développent une intense activité terricole et participent à la création d'une macroporosité du sol jusqu'à des profondeurs importantes: iules, vers de terres, crapauds...

TROISIEME PARTIE :
METHODES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

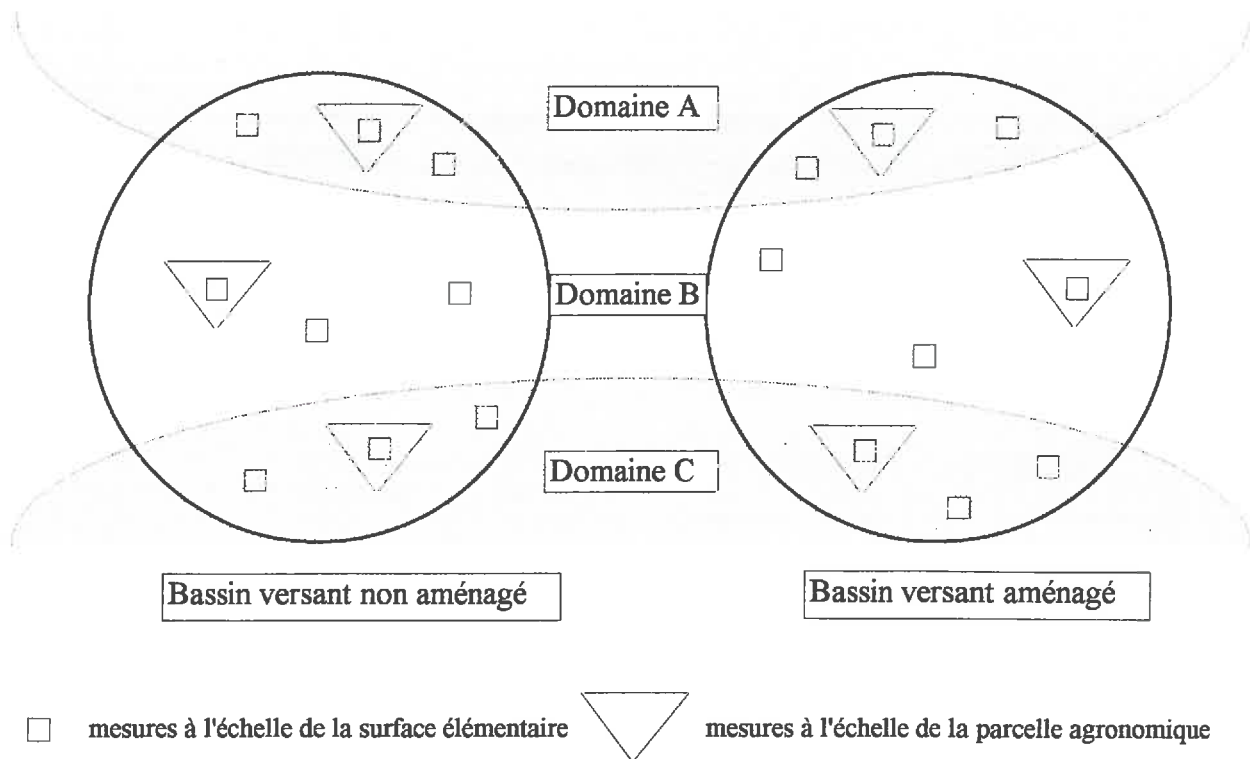


Figure 21 : Schéma d'un dispositif expérimental théorique visant à évaluer l'impact d'un aménagement intégré sur les processus de ruissellement et d'érosion.

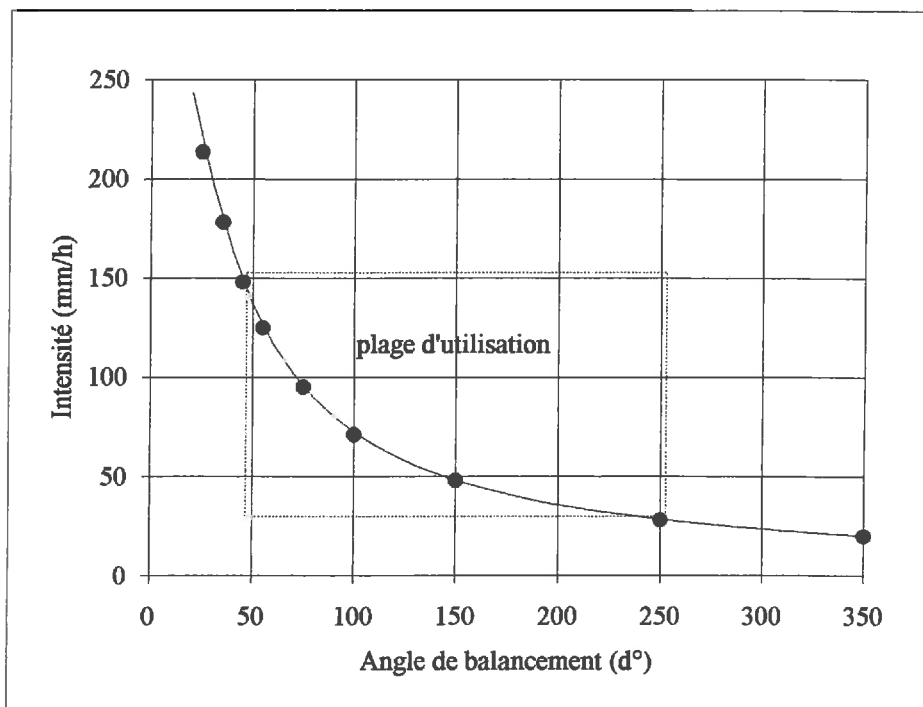


Figure 22 : Courbe d'étalonnage du simulateur de pluie EID 330 (Delta Lab), pour un gicleur installé à quatre mètres de hauteur. (Source: Bernard, 1987).

3 METHODOLOGIE ET SITES EXPERIMENTAUX :

3.1 Conséquences méthodologiques des acquis :

3.1.1 Rappel des objectifs :

. Il a été établi (Chapitre 1.7.1) que le sud Saloum subit une dégradation généralisée de l'écosystème. L'érosion en constitue le symptôme le plus visible et participe de manière décisive à l'instabilité croissante du milieu naturel. Cette érosion résulte d'un ruissellement généré par les pluies tropicales violentes. Maintenir une exploitation agricole viable et durable nécessite, dans un premier temps, de stabiliser le paysage agraire. La démarche adoptée dans le cadre de notre étude intègre quatre étapes successives :

- hiérarchisation des principaux facteurs de ruissellement sur les versants cultivés du sud Saloum ;
- détermination des mécanismes en jeu, pour une situation donnée ;
- propositions de techniques conservatoires adaptées ;
- évaluation de l'impact des solutions proposées.

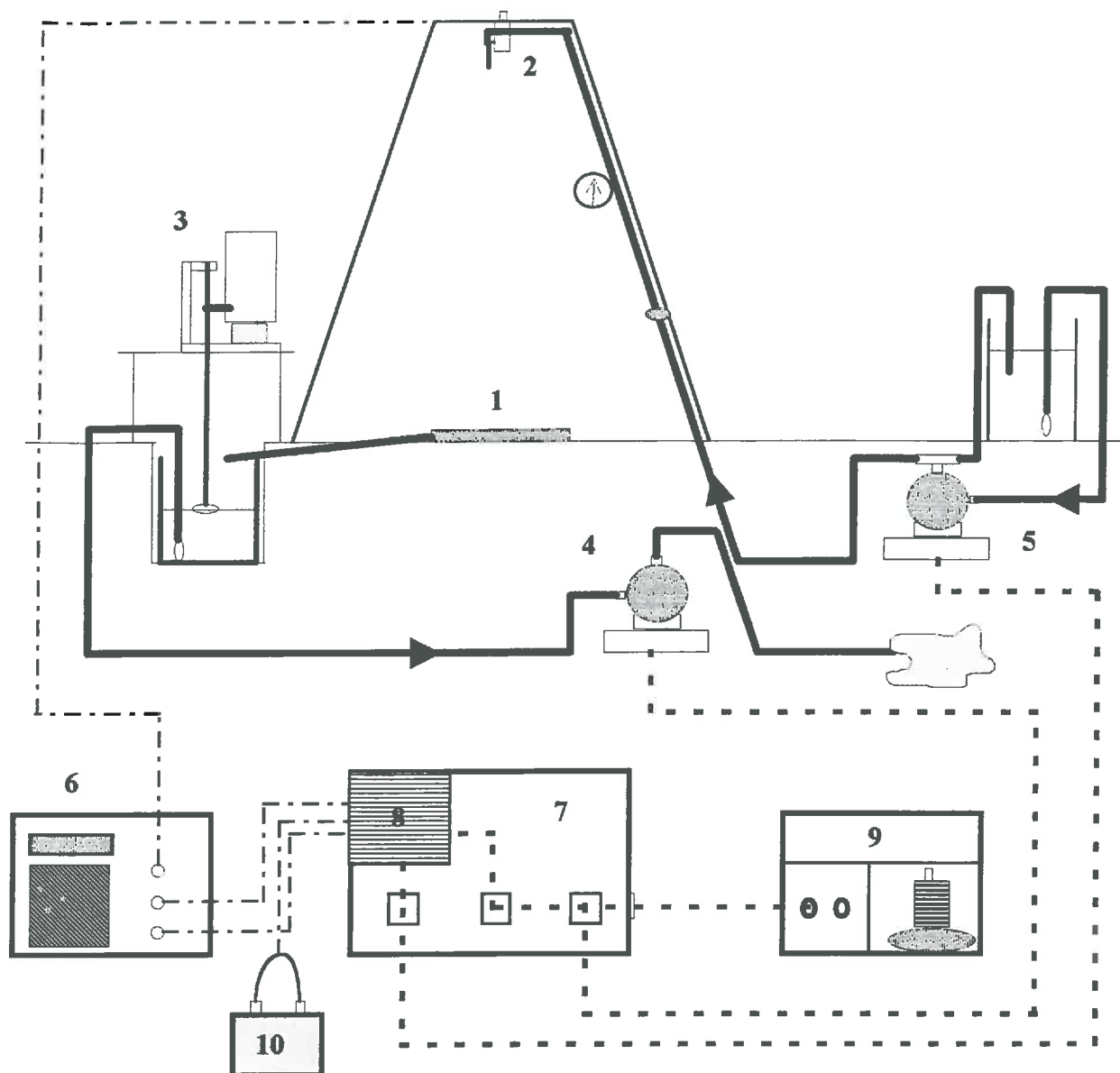
3.1.2 Des contingences déterminantes :

. Les acquis de la recherche permettent d'établir qu'en zone sahélienne **les caractéristiques des états de surface commandent les processus de ruissellement et d'érosion**. On admet que la méthode de détermination proposée par Casenave et Valentin (1989) permet d'établir un diagnostic rapide, clair et reproductible, sur un site donné.

. La variabilité spatiale des états de surface entraîne une variabilité équivalente du ruissellement. Son étude nécessite la mise en oeuvre de protocoles expérimentaux compatibles avec la multiplicité des points de mesure et les contraintes matérielles . **Cette adéquation favorise l'acquisition de données à l'échelle de la surface élémentaire (m²).**

. A une échelle donnée, l'interaction entre variabilités spatiale et temporelle imposent des suivis de longue durée, en conditions naturelles sahéliennes. Actuellement, les moyens matériels disponibles s'accordent mal avec de telles études d'où l'intérêt grandissant des techniques de simulation de pluie qui permettent de mettre en relation "événements climatiques" et "événements agronomiques" avec une rapidité opérationnelle satisfaisante. **Ces études synchroniques, dont les conditions initiales sont fixées et reproductibles, doivent être accompagnées d'études diachroniques afin de prendre en compte l'évolution de certains facteurs difficilement contrôlables (couvert végétal, faune...).**

. Cette approche spatiale s'intéresse principalement aux processus de genèse du ruissellement et de l'érosion. La hiérarchisation du paysage par le réseau hydrographique impose le choix d'échelles d'observations emboîtées incluant des niveaux de complexité croissants. **La méthode des bassins versants de référence** a permis de franchir un certain nombre d'obstacles dans la compréhension des phénomènes de changements d'échelles (Albergel, 1987; Floret et al., 1989). L'introduction de techniques anti-érosives renforce l'intérêt d'une approche multi-échelles pour analyser l'impact des opérations culturales ou des aménagements proposés. Cette analyse repose sur une étude comparative de **bassins versants appariés**, avant et après aménagement (Fritsh, 1990). On peut envisager un dispositif expérimental théorique qui permette de satisfaire les deux phases de diagnostic (Figure 21). Nous verrons dans le chapitre suivant que la réalité peut être fort éloignée de ce dispositif idéal. **Enfin, rappelons ici que l'objectif essentiel de cette étude consiste à fournir des éléments de décision pour une meilleure gestion agricole de l'eau et non à modéliser les écoulements sur les versants. Démarche d'agronome, initié aux arcanes de l'hydrologie...**



- 1 Parcelle de ruissellement (1 m²).
- 2 Dispositif d'aspersion.
- 3 Limnigraphe à mouvement horaire.
- 4 Pompe de vidange de la cuve (800 w)
- 5 Pompe d'alimentation (330 w).
- 6 Boîtier de commande électronique.
- 7 Panneau de contrôle électrique.
- 8 Relais de la pompe d'alimentation, mis sous tension par le boîtier.
- 9 Groupe électrogène (1 800 w).
- 10 Batterie 12 v.

— circuit hydraulique.

- - - - - circuit électrique 220 v.

- . - . - circuit électrique 12 v.

Figure 23 : Schéma de fonctionnement du simulateur de pluie 2^o génération. (Source: Bernard, 1987).

3.2 Des outils scientifiques privilégiés :

3.2.1 Mesures hydrométriques :

. A l'échelle de la surface élémentaire, nous avons privilégié la **parcelle de ruissellement**. La parcelle ($1 \times 1 \text{ m}^2$) est délimitée par un cadre en tôle équipé d'un collecteur. Ce dernier permet de récupérer la lame ruisselée dans une cuve enterrée, via une conduite en PVC. Ce dispositif ne perturbe pas le bilan hydrique local (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984; Ruelle et al., 1989). Utilisée en mode diachronique, la cuve est couverte et contient un réservoir en plastique étanche pour éviter toute contamination par les eaux de surface. Après chaque pluie, les volumes d'eau sont mesurés. La précision de mesure est estimée à $1 \cdot 10^{-1} \text{ l}$ pour un volume ruisselé inférieur à 10 litres (soit une lame de 10 mm) et $5 \cdot 10^{-1} \text{ l}$ au delà, dans le cas de collectes routinières.

. L'utilisation en mode synchronique nécessite l'emploi d'un **simulateur de pluie**. Le matériel utilisé au sud Saloum dérive du modèle mis au point par l'ORSTOM dans les années soixante-dix (Asseline et Valentin, 1978 ; Casenave, 1982). Le simulateur est constitué d'un système d'arrosage fixé au sommet d'une tour pyramidale de 4 mètres de haut et protégé de l'action du vent par une bâche amovible. L'aspersion est assurée par un gicleur calibré monté sur un bras oscillant dont le mouvement est imprimé par un moteur électrique. La variation de l'angle de balancement modifie la surface arrosée au sol, donc l'intensité pluviométrique apportée sur le mètre carré étudié. Les changements d'intensité et les arrêts de pluie sont automatisés grâce à un boîtier de commande électronique couplé au moteur électrique et à la pompe d'alimentation (Bernard, 1987). La pression du service étant maintenue entre 0,4 et 0,5 bars, la gamme d'intensités disponibles varie de 30 à 150 mm/h (Figure 22). La tour est centrée sur la parcelle de ruissellement ($1 \times 1 \text{ m}^2$). Cette dernière est reliée à une cuve de réception dans laquelle 1 cm de hauteur d'eau correspond à 1 mm de lame ruisselée. La cuve est surmontée d'un limnigraphe type ALPNA (SEBA) équipé d'un mouvement d'horlogerie de fréquence 1 rotation/heure. L'enregistrement s'effectuant sans basculement, la vidange périodique de la cuve est assurée par une pompe électrique de 800 watts. La précision de mesure est de l'ordre de 0,1 mm pour les lames ruisselées et 10 secondes pour les temps. L'énergie nécessaire au boîtier électronique et au moteur est fournie par une batterie 12 v, les pompes et le système d'éclairage sont alimentés par un groupe électrogène (1 800 watts, 220 volts, 50 Hz) (Figure 23).

. **La représentativité des pluies simulées dépend dans une large mesure de la possibilité d'obtenir des énergies cinétiques comparables à celles des pluies naturelles de la zone d'étude, donc une distribution de tailles de gouttes équivalente, pour une intensité pluviométrique donnée.** Valentin (1981) montre que le diamètre moyen des gouttes de pluie du premier modèle de simulateur varie en fonction de l'intensité appliquée. L'évolution de l'énergie cinétique correspondante est alors du même ordre de grandeur que celles des pluies naturelles, en Côte d'Ivoire. Cet auteur souligne toutefois la forte variabilité des énergies développées par les pluies naturelles en fonction du site ou de la période étudiés.

. Nous avons repris la même expérience avec le nouveau simulateur, pour quatre intensités: 30, 60, 90 et 120 mm/h. Les gouttes de pluie sont recueillies dans un plateau de 20 x 20 cm rempli de farine tamisée, le temps de prélèvement correspond à une période d'oscillation, soit deux passages du pinceau d'arrosage. On effectue trois répétitions par intensité. Les plateaux sont ensuite passés à l'étuve et les agrégats formés sont tamisés et répartis par classes de diamètres équivalents (tableau 8). La taille des agrégats ne correspond pas exactement à celle des gouttes qui les ont créé, aussi un étalonnage est-il nécessaire. Pour ce faire, nous avons utilisé une pipette de précision ($1 \text{ à } 100 \cdot 10^{-6} \text{ l}$) afin d'obtenir deux types de gouttes de $5 \text{ et } 10 \cdot 10^{-6} \text{ l}$ correspondant, sous hypothèse de sphéricité, à des diamètres de 2,12 et 2,67 mm respectivement. On laisse tomber une centaine de gouttes sur un bac de farine qui est ensuite séché à l'étuve et tamisé. La distribution pondérale des agrégats indique une faible dispersion autour de la médiane. La valeur du rapport du diamètre médian d'agrégat sur le diamètre de goutte théorique est de 0,87 pour les petites gouttes et 0,90 pour les grosses.

Tableau 8 : Répartition pondérale des agrégats de farine par classes de diamètres équivalents, pour différentes intensités pluviométriques. s(%) : écart-type expérimental. 3 répétitions.

Diamètre moyen	30 mm/h		60 mm/h		90 mm/h		120 mm/h	
	%	s(%)	%	s(%)	%	s(%)	%	s(%)
3.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.80	11.5	1.2	10.3	4.2	10.0	4.7	10.9	1.9
2.25	12.6	1.5	11.5	0.8	14.2	1.1	11.0	1.7
1.80	21.0	1.6	21.5	1.8	22.8	1.9	20.8	1.4
1.30	34.3	1.4	35.1	3.3	33.4	2.8	36.4	3.4
0.82	13.8	1.6	14.7	2.2	13.6	0.9	15.7	1.0
0.51	6.7	0.3	6.7	1.0	6.0	0.9	5.3	1.6
0.30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau 9 : Diamètres médians, vitesses de chute et énergies cinétiques unitaires pour différentes intensités pluviométriques testées.

Intensité (mm/h)	Diamètre médian (mm)		Vitesse (m/s)	Energie unitaire (J/mm/m ²)
	agrégat	goutte		
30	1.58	1.76	5.86	16.48
60	1.55	1.72	5.82	16.32
90	1.59	1.77	5.87	16.58
120	1.56	1.73	5.83	16.42

On retient ce dernier chiffre pour calculer le diamètre médian des gouttes de pluies simulées. La vitesse de chute est déduite des travaux de Epema et Riezebos (1983) dont la mise en équation des résultats pour une hauteur de chute de quatre mètres permet d'obtenir :

$$V = 4,998 + 1,521 \ln d$$

$$r^2 = 0,986$$

avec V : vitesse de chute (m s^{-1})
 d : diamètre de goutte (mm)

. En effet, d'après les travaux de Asseline et Valentin (1978), la vitesse initiale au niveau du gicleur peut être négligée pour des gouttes de diamètre inférieur à 2,6 mm. La vitesse d'impact au sol correspond alors à la vitesse limite dans l'air. Le tableau 9 présente les valeurs d'énergie cinétique ($1/2 mv^2$) par unités de surface et de hauteur d'eau. Les valeurs sont relativement constantes. Ces résultats s'accordent avec l'hypothèse d'un pinceau d'arrosage uniforme et homogène. A débit constant, seule l'amplitude d'oscillation influence l'intensité de pluie. Cependant les valeurs aux fortes intensités diffèrent de celles trouvées par Valentin (1981), voisines de 22 J/mm/m^2 . Albergel (1987) a montré que l'arrosage assuré par le premier modèle de simulateur ne pouvait pas être considéré comme uniforme.

. En résumé, le simulateur de pluie permet de créer de manière répétitive des averses d'intensité variable. Pour un hyétoGramme donné, l'énergie développée est du même ordre que celle rencontrée en condition naturelle.

3.2.2 Mesure de l'humidité du sol :

- *La méthode gravimétrique :*

. La méthode de prélèvement gravimétrique à la tarière est utilisée de manière systématique dans les cas suivants :

- Détermination des conditions hydriques initiales et finales pour chaque averse d'un protocole de simulation de pluie. Les prélèvements sont effectués à l'extérieur de la parcelle, à l'exception des mesures réalisées en fin d'expérimentation. On dispose, en règle générale, de deux répétitions.

- Etude de la variabilité spatiale des stocks hydriques par la méthode des transects ou par maillage géostatistique.

. Malgré son aspect destructif et les problèmes rencontrés avec des sols secs pris en masse, la méthode gravimétrique est bien adaptée aux sols ferrugineux tropicaux durant la saison pluvieuse. Cependant, elle doit être couplée à une mesure de densité apparente du sol pour avoir accès à l'humidité volumique d'un horizon donné :

$$w = (M_h - M_s)(M_s)^{-1}$$

et
$$\theta = (\rho_d \rho_w^{-1}) w = \gamma_d \cdot w$$

avec M_s : poids sec de l'échantillon (g),
 M_h : poids humide de l'échantillon (g)
 w : teneur en eau pondérale (g/g)
 θ : teneur en eau volumique (cm^3/cm^3)
 ρ_d : masse volumique apparente sèche de l'horizon (g/cm^3)
 ρ_w : masse volumique de l'eau (g/cm^3)
 γ_d : densité apparente sèche

. Les densités apparentes sèches (γ_d) sont mesurées à l'aide de cylindres de prélèvement de 100 cm³, à raison de 2 à 4 répétitions par horizon, ou à l'aide d'un densitomètre à membrane pour un volume exploré de 900 cm³. Le tableau 10 présente les humidités pondérales moyennes et leurs écarts types moyens calculés à partir des prélèvements effectués dans un essai de travail du sol (Juncker et Sene, 1989). On dispose de trois répétitions par horizon, les profils sont frais à humides (w varie de 9 à 15 %).

Horizon (cm)	n	w (%)	s(w) (%)	CV (%)
0 à 5	28	11.9	0.72	6
5 à 15	30	11.6	0.52	4.5
25 à 55	65	12.4	0.62	5

Tableau 10 : Humidités pondérales (w), écart-types (s(w)) et coefficients de variation (CV) moyens obtenus par prélèvements gravimétriques à différentes profondeurs. 3 répétitions. (Source: Juncker et Sene, 1989).

. Les coefficients de variation sont assez stables et correspondent aux ordres de grandeur trouvés dans la littérature (Maertens et al., 1965 ; Charreau et Nicou, 1971) toutefois il faut mentionner que les prélèvements effectués dans la zone du front d'humectation peuvent être associés à des coefficients de variation beaucoup plus importants (20 à 50 %). Pour les densités apparentes, les coefficients de variation avoisinent 2 % et sont comparables aux valeurs fournies par Charreau et Nicou (1971): 1 à 5 % pour 8 répétitions, ou Poss (1991): 2 % pour 6 répétitions (Tableau 11).

Horizon (cm)	n	γ_d	s(γ_d)	CV (%)
5 à 15	11	1.52	0.029	1.9
25 à 35	11	1.44	0.03	2.1
45 à 55	11	1.51	0.026	1.7
65 à 85	11	1.53	0.032	2.1
95 à 105	11	1.54	0.029	1.9
115 à 125	11	1.54	0.029	1.9
135 à 145	11	1.55	0.03	1.9

Tableau 11 : Densités apparentes sèches (γ_d), écart-types (s(γ_d)) et coefficients de variation (CV) moyens obtenus avec des cylindres de prélèvement (100 cm³). 4 répétitions.

- L'humidimétrie neutronique :

. L'humidimétrie neutronique est utilisée sur les sites d'étude pour suivre l'évolution chronologique du stock hydrique du sol et établir le bilan hydrique des cultures. Nous renvoyons le lecteur à la bibliographie existante concernant les principes de mesure et les lois physiques afférentes (Van Bavel, 1956 ; Maertens et al., 1965). Le matériel utilisé est une sonde Troxler série 3300 équipée d'une source Americium-Beryllium de 10 mCi, la précision instrumentale fournie par le constructeur est de $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pour une humidité de 0,20 cm³/cm³ et un temps de comptage de 30 secondes, durée utilisée lors de nos mesures. Dans la plupart des sols, il existe une dépendance quasi-linéaire entre le nombre d'impulsions émises par le détecteur et la teneur volumique en eau du sol. Cette relation peut s'écrire :

$$\theta = A_1 N/No + A_0 \quad \text{et} \quad n = N/No \quad (1)$$

avec θ : teneur en eau volumique de la tranche de sol considérée (cm³/cm³)
 N : comptage obtenu pour la cote médiane de la tranche de sol
 No : comptage standard obtenu dans l'eau
 n : comptage réduit

En principe, les comptages N et No sont obtenus dans des tubes de mesure en aluminium qui absorbent peu les émissions neutroniques. Les comptages standards respectent cette méthodologie, mais pour des raisons de coût, les sites d'étude sont équipés de tubes en PVC, d'origines diverses, dont les taux d'absorption sont éminemment variables et loin d'être négligeables (Tableau 12). Des résultats analogues sont présentés par Vaksman (1988). Afin d'homogénéiser les mesures entre différents sites, nous réalisons la transformation suivante :

$$N^* = (No / 1540)(No)_{pvc} \quad \text{et} \quad \theta = A_1 (N_{pvc}/N^*) + A_0$$

avec No : comptage standard obtenu le jour j , avec un tube d'accès en aluminium
 $(No)_{pvc}$: comptage de référence du tube PVC, obtenu pour une valeur égale à 1540 dans un tube en aluminium
 N^* : comptage standard équivalent PVC, obtenu le jour j
 N_{pvc} : comptage sol obtenu le jour j , avec un tube d'accès en PVC.

. Dans la suite de l'étude, nous noterons par abus d'écriture: $n = N_{pvc}/N^* = N/No$. Cela afin d'alléger les démonstrations. Les couples de valeurs de comptage neutronique et d'humidité volumique sont obtenus au champ, par étalonnage gravimétrique. Pour les tubes d'accès choisis, trois prélèvements à la tarière sont effectués simultanément à la mesure neutronique (3 comptages de 30 secondes), à une profondeur donnée. Lors de l'extraction des tubes, une fosse est creusée et quatre mesures de densité (cylindres 100 cm³) sont réalisées par profondeur.

Référence du tube	Comptage standart normalisé	Taux d'absorption (%)
S41	948	38.4
S43	958	37.8
S44	814	47.1
S46	966	37.3
S47	925	39.9
T1	1021	33.7
T3	1028	33.2
T5	962	37.5

Tableau 12 : Comptages neutroniques standarts obtenus pour quelques tubes d'accès en PVC. 10 répétitions. Les valeurs correspondent à un comptage standart égal à 1540 pour un tube en aluminium.

. En nous appuyant sur les travaux de Haverkamp et al. (1984) et Poss (1991), nous avons cherché à déterminer les intervalles de confiance associés aux estimations de l'humidité volumique et du stock hydrique par humidimétrie neutronique. La démarche mathématique est développée en annexe 1. Nous retiendrons de cette étude que la variance d'étalonnage est nettement supérieure à la variance de mesure de l'humidité à une cote donnée. L'intervalle de confiance (seuil 95 %) associé à une valeur de teneur en eau avoisine +/- 0.03 cm³/cm³ dans les horizons de surface (0-15 cm et 15-25 cm) puis +/- 0.02 cm³/cm³ dans les horizons inférieurs.

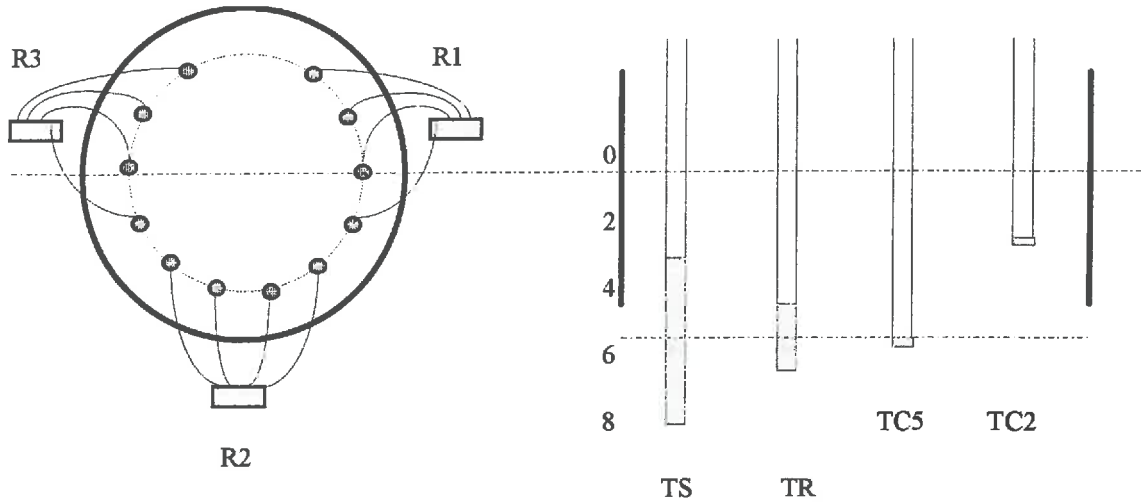


Figure 24 : Dispositif expérimental utilisé pour tester les tensiomètres modifiés. 3 répétitions. TS: tensiomètre standard, TR: tensiomètre raccourci, TC: tensiomètre à plaque poreuse.

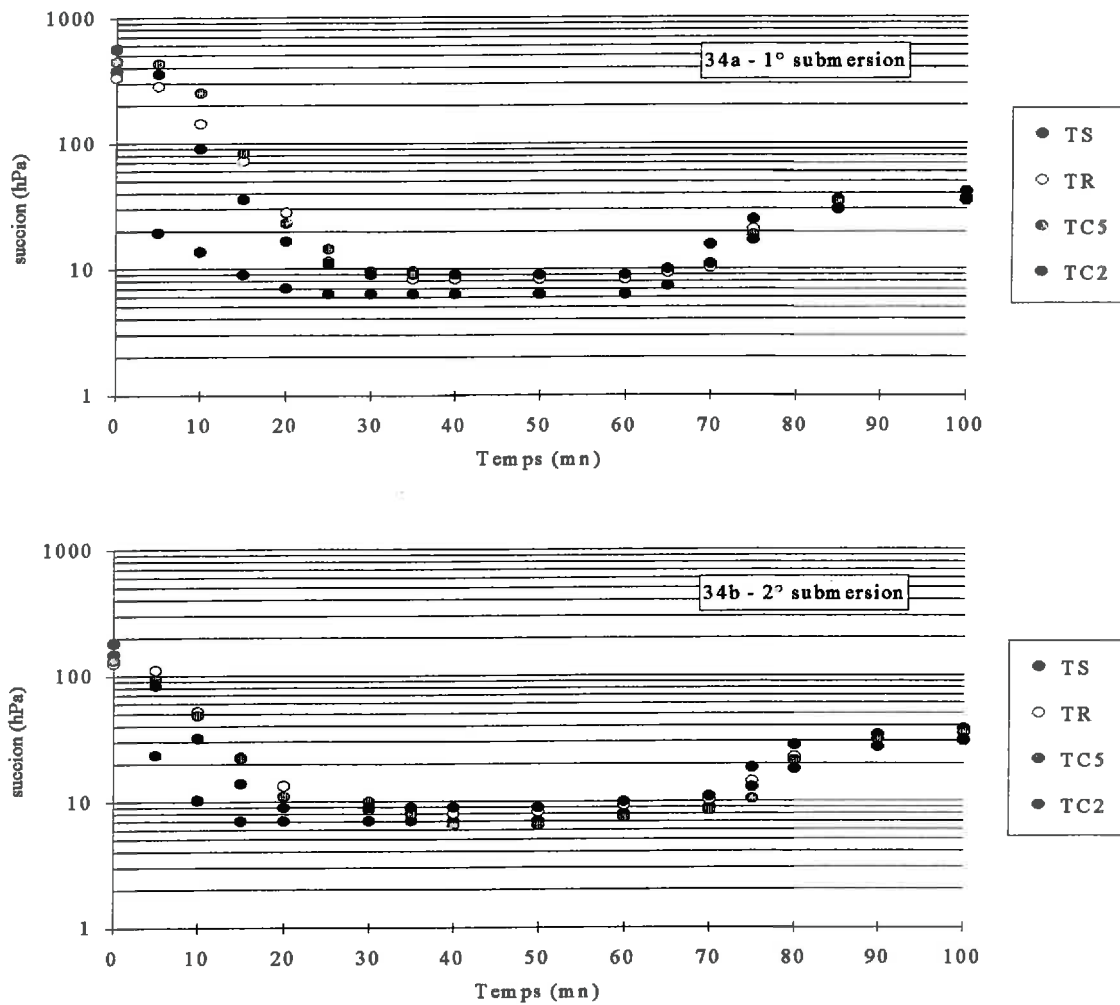


Figure 25 : Evolution des mesures de succion en fonction du temps pour différents modèles de tensiomètres. 34a: conditions initiales sèches, 34b: conditions initiales humides.

. La valeur du stock hydrique sur une épaisseur de sol de deux mètres est connue avec un intervalle de confiance de $\pm 13,5$ mm. Dans ce cas, la variance associée à l'estimation des humidités volumiques est du même ordre de grandeur que la variance associée à la méthode d'intégration sur l'ensemble du profil. Ces résultats sont en accord avec ceux présentés par Poss (1991) au Togo.

. La méthode neutronique ne permet donc pas de réaliser une étude du bilan hydrique sur un pas de temps journalier. L'incertitude sur les stocks nécessite d'utiliser des périodes de 8 à 10 jours pour obtenir des intervalles de confiance acceptables sur les variations de stock..

3.2.3 Mesure du potentiel de l'eau du sol :

. Les mesures de charge hydraulique (H) et de succion matricielle (h) ont été réalisées grâce à des tensiomètres de type DTM5000 (Nardeux) ; nous ne reviendrons pas sur les principes de mesure, largement décrits par ailleurs (Richards, 1965 ; Luc, 1978 ; Hillel, 1988). Ces mesures de potentiel ont deux objectifs :

- Mettre en évidence la présence de flux drainants sous la zone racinaire au niveau des sites de mesure du bilan hydrique. Pour ce faire, au moins deux tensiomètres sont installés en début de campagne aux côtes 150 et 170 cm, à proximité d'un tube d'accès neutronique. Dès que le front atteint la première côte, les lectures deviennent quotidiennes ;

- Déterminer les profils et gradients de charge qui se développent lors d'une infiltration dans un sol encroûté. Menées sous pluies simulées, ces expérimentations permettent d'estimer la conductivité hydraulique de la croûte superficielle, en accord avec le modèle développé par Hillel et Gardner (1970).

. Le deuxième objectif soulève quelques problèmes métrologiques, compte tenu des faibles volumes de sol et des courts temps de réponse qui caractérisent ce type d'expérience. **En effet, l'extrapolation de la valeur de la charge hydraulique à la base de la croûte sera d'autant meilleure que le profil sera bien défini au voisinage de la surface.** En accord avec les travaux de Touma (1992), les côtes 2,5, 5, 10 et 15 cm sont retenues. Si la mesure à 10 cm ne pose pas de problème majeur avec une bougie poreuse standard (longueur 6 cm), elle devient délicate, voire impossible pour $z = 2,5$ ou 5 cm. L'utilisation de micro-tensiomètres (longueur 2 cm, diamètre 0,8 cm) s'est révélé peu concluante en raison de la fragilité du dispositif (Albergel et al., 1989). Ceci nous a amené à modifier les tensiomètres classiques (TS) de plusieurs façons:

- raccourcir la bougie poreuse jusqu'à une longueur de 2 cm (TR),

- remplacer la bougie poreuse par une plaque poreuse, qui est collée (TC).

. Une expérience est menée, *in situ*, afin de tester les réponses des tensiomètres modifiés. A l'intérieur d'un anneau de garde de un mètre de diamètre, trois répétitions constituées de quatre tensiomètres sont installées à des cotes moyennes de 2 cm (TC₂) et 5 cm (TS, TR, TC₅) de profondeur (Figure 24). Une lame d'eau de 4 cm d'épaisseur est maintenue pendant une heure, soit un apport global de 141 litres d'eau. On laisse ressuyer le sol pendant 47 heures puis on applique une nouvelle charge de 4 cm d'eau pendant une heure, soit un apport de 94 litres. Les mesures tensiométriques sont effectuées toutes les deux minutes pendant les phases de submersion puis suivant un rythme logarithmique pendant les phases de ressuyage. La figure 25 présente les évolutions des valeurs moyennes de succion en fonction du temps.

. On observe une réponse plus rapide des tensiomètres lors de la seconde submersion, liée au temps d'équilibrage des bougies lors de la première mise en eau. Les tensiomètres standards (TS) réagissent le plus rapidement et se stabilisent à des valeurs de succion inférieures à $h = -10$ hpa au bout de 10 à 15 minutes. Les tensiomètres modifiés (TC) et (TR) installés à la même cote présentant des cinétiques de réponse comparables, le palier étant atteint entre 23 et 30 minutes. L'installation à la cote $z = 2$ cm se traduit par une stabilisation légèrement plus rapide (20 à 26 minutes) (Tableau 13).

Type	TS	TR	TC5	TC2
1° submersion	15	27	30	26
2° submersion	10	23	24	20

TS : tensiomètres standards (6 cm), installés à 5 cm.

TR : tensiomètres raccourcis (2 cm), installés à 5 cm.

TCx : tensiomètres équipés de plaques poreuses, installés à la côte 2 ou 5 cm.

Tableau 13 : Temps de réponse (en mn) des différents tensiomètres pour atteindre la valeur $h = -10$ hPa. 3 répétitions.

. Pour une même côte d'implantation, on enregistre un retard moyen de 15 minutes dont les deux tiers sont liés aux caractéristiques intrinsèques des bougies et le dernier tiers à l'effet intégrateur dû à la longueur des bougies standards. Ce retard est beaucoup plus prononcé que celui mis en évidence par Touma (1992) dans une expérience analogue mais à des profondeurs d'implantation supérieures.

. En pratique, nous retiendrons que les différents modèles testés conduisent à des valeurs de succion stabilisées équivalentes. En revanche, les modèles modifiés présentent une inertie certaine par rapport aux tensiomètres standards. Cependant, cette limitation n'est pas préjudiciable pour nos expériences, l'objectif étant d'obtenir un profil de charge en régime permanent. La durée des averses simulées doit être de 30 minutes, au minimum, afin d'assurer l'équilibrage de tous les tensiomètres.

. L'incertitude liée à la mesure a été évaluée grâce à l'écart-type expérimental calculé sur trois répétitions. On intègre, de la sorte, les erreurs dues au capteur, à l'observateur et à la variabilité spatiale. Dans un premier temps, les valeurs décroissent fortement et l'écart-type est important. Pendant la période de stabilisation au palier la variabilité est très faible et l'écart-type inférieur à $s(h) = -3$ hPa. La phase de reprise, consécutive à la disparition de la lame d'eau en surface, est la plus intéressante car tous les tensiomètres évoluent à partir de valeurs identiques. Les cinétiques étant semblables entre les deux épisodes d'infiltration, nous avons regroupé les valeurs de succion et leurs écart-types associés. Pour une gamme de succions allant de -10 à -50 hPa, les écarts-types varient de 1,5 à 5 hPa quel que soit le type de tensiomètre (Tableau 14).

. Ces valeurs, en excluant les erreurs de positionnement, ne sont pas négligeables devant les valeurs de charge hydraulique attendues sous la croûte, en régime d'infiltration permanent. Si on ajoute les imprécisions dues à l'extrapolation du profil de charge, le calcul de la conductivité hydraulique de la croûte qui en découle est une approximation grossière. L'objectif est d'obtenir un ordre de grandeur et non une hypothétique valeur absolue.

Succion (hPa)	s(h)		
	TS	TR	TC
10	2	1.5	-
20	3.5	2	3
30	4.5	5	5.5
40	5	3	5.5
50	4	3	4.5

Tableau 14 : Ecart-types expérimentaux pour différentes valeurs de succion (h) et trois modèles de tensiomètres testés. Trois répétitions. Valeurs exprimées en hPa.

3.2.4 Mesure de la rugosité du sol :

. Sur sol ferrugineux cultivé, le travail du sol entraîne l'apparition d'une macro-porosité de surface et la création d'un relief plus ou moins prononcé. La fugacité de ces transformations, sous l'action de la pluie, nécessite l'utilisation de méthodes d'évaluation rapides et répétitives afin de caractériser un état de surface donné. Nous avons associé, dans la plupart des cas, une approche qualitative (Casenave et Valentin, 1989) à une mesure de la rugosité de surface par profilographie (Henin et al., 1969; Ducreux, 1984).

. **Le profilographe** utilisé est constitué d'un cadre métallique supportant 37 tiges verticales de même longueur, régulièrement espacées (2,5 cm). La dénivellation enregistrée par la tige sur le sol est reportée à l'autre extrémité sur une feuille de papier millimétré. Selon le nombre de répétitions, on obtient 2 à 3 séries de mesures le long de transects parallèles à la ligne de plus grande pente. L'exploitation des données exige la création d'un indice synthétique qui remplace les 37 valeurs mesurées par une valeur calculée, représentative de la rugosité de surface, à la fois sensible et fidèle. Notre choix s'est porté sur deux indices de conceptions différentes :

- Indice statistique (Kuipers, 1957 ; Guillobez et Zougmore, 1994)

$$IR_1 = 10 \text{ m}^{-1} \sum_{j=1}^m [(n^{-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2)^{1/2}]$$

- Indice géométrique (Boiffin, 1984 ; Floret et al., 1990)

$$IR_2 = 10^2 \text{ m}^{-1} \sum_{j=1}^m [((\sum_{i=1}^n ((x_{i+1} - x_i)^2 + d^2)^{-1/2}) - (n-1)d)((n-1)d)^{-1}]$$

avec m : nombre de répétitions

n : nombre de tiges

d : distance entre 2 tiges

x_i : cote mesurée par la tige i

μ : cote moyenne

. Une comparaison réalisée sur des géométries simples, assimilées à des profils de travail du sol, met en évidence que IR_1 dépend principalement de la profondeur maximale atteinte. IR_2 est sensible à la valeur de pente maximale (Figure 26). Ainsi, pour chaque valeur indiciaire correspond une famille de profils distincts. *A contrario*, le pouvoir de discrimination d'un indice dépendra du type d'état de surface rencontré. Cette complémentarité entre indices peut être illustrée par la figure 27 sur laquelle sont positionnées quelques valeurs moyennes d'indices (3 répétitions) correspondant aux rugosités obtenues avec différentes pratiques culturales. La précision de lecture est estimée à +/- 2,5 mm, cependant, l'usage démontre que les écarts majeurs proviennent d'erreurs opératoires de deux ordres :

- erreur de positionnement du cadre de mesure,

- erreur de lecture.

. La sensibilité des indices à ces deux sources d'erreur a été testée dans deux cas de figure, tirés de situations réelles. On dispose de trois répétitions. Le premier cas illustre l'utilisation du profilographe en condition non horizontale. On fait subir à l'une des trois répétitions une rotation dans le plan vertical, autour du point de contact de la première tige de mesure. Par souci de clarté, on considère que le point de mesure au sol d'une tige ne varie pas pendant la rotation et que les changements d'abscisse sont négligeables. En effet, pour des angles faibles, la variation d'abscisse de la dernière tige est :

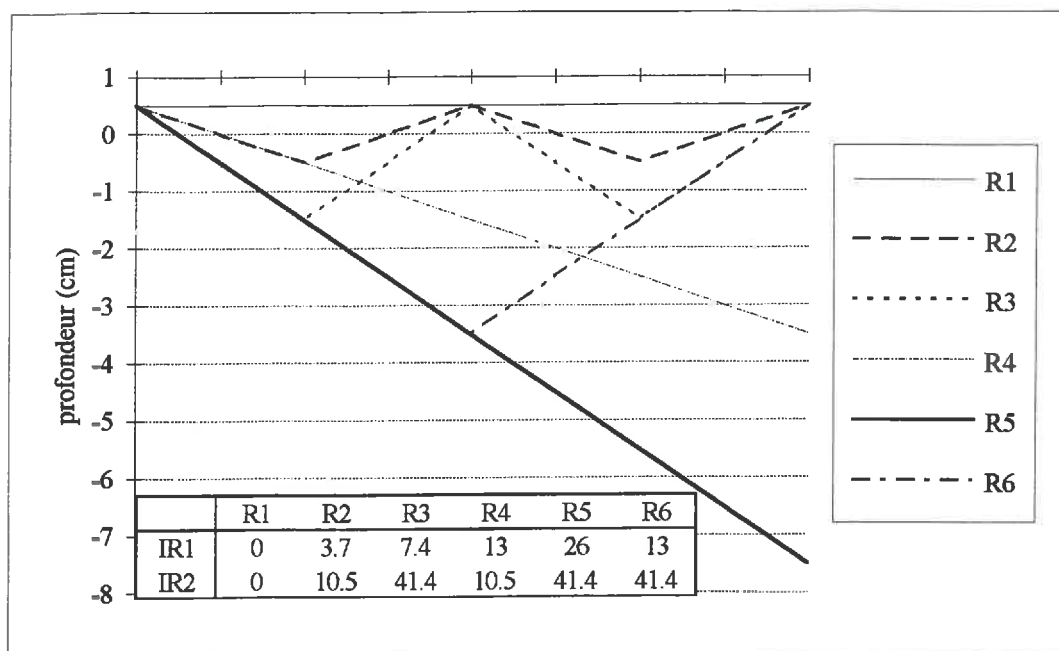


Figure 26 : Influence du type de relief (Rx) sur la valeur de l'indice de rugosité statistique (IR1) ou de l'indice de rugosité géométrique (IR2).

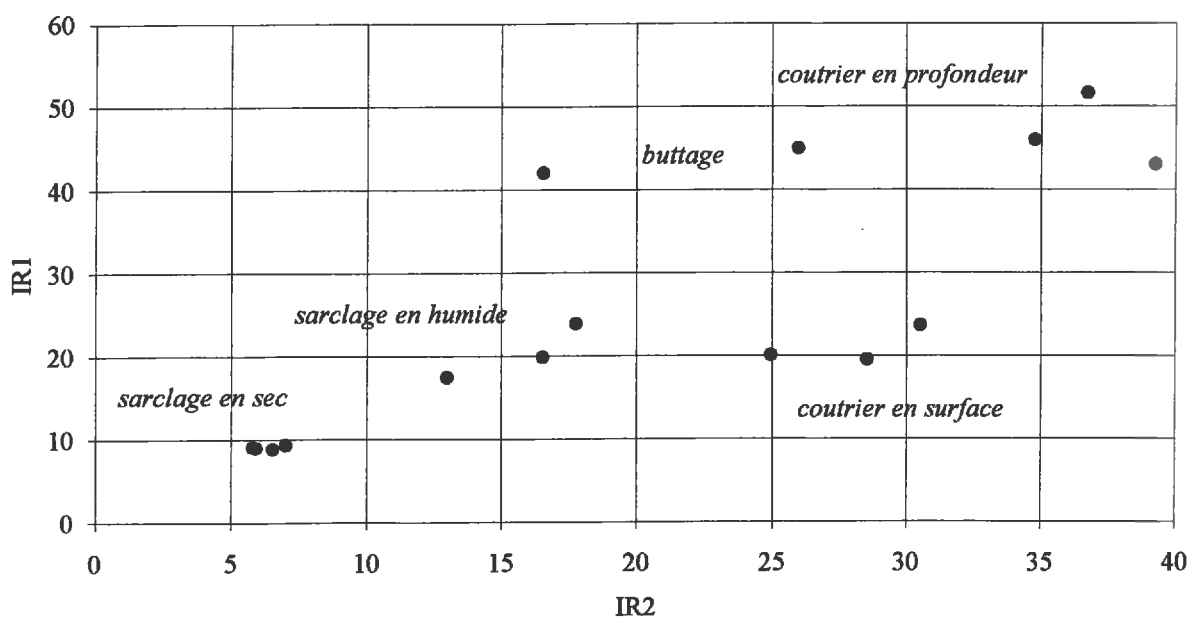


Figure 27 : Diagramme de rugosité présentant quelques valeurs moyennes d'indices correspondant à différentes pratiques culturales. 3 répétitions.

$$\Delta x = \operatorname{tg}^2 \alpha (n - 1) d$$

avec α : angle de rotation

n : nombre de tiges

d : distance entre deux tiges

si $\alpha = 3^\circ$, $n = 37$ et $d = 2,5$ cm, on obtient: $\Delta x = 0,2$ cm

Les résultats portés au tableau 23 montrent que l'indice IR_1 est sensible à l'inclinaison qui demeure sans incidence notable sur IR_2 .

Indice	Valeur originale	Inclinaison pour 1 répétition	
		2°	5°
IR1	8.6	9.4	11.5
IR2	3.0	3.0	3.1

Tableau 15 : Influence de l'inclinaison du profilographe sur les indices de rugosité IR1 et IR2. 3 répétitions.

. Concernant les erreurs de lecture, nous avons pris l'exemple de relevés comportant deux erreurs sur une même série, qui ont été corrigées successivement. Le travail du sol correspond à un buttage. L'indice IR_1 reste stable alors que l'indice IR_2 subit 37 % de variation après corrections. La nature de l'indice statistique entraîne donc une faible sensibilité aux erreurs de lecture (Tableau 16).

Indice	Valeur originale	1° correction	2° correction
IR1	37.3	37.4	37.5
IR2	11.2	10.3	8.0

Tableau 16 : Influence des erreurs de transcription sur les indices de rugosité IR1 et IR2. 3 répétitions.

. Cette complémentarité entre les deux indices nous a conduit à leur utilisation conjointe systématique. Les reliefs rencontrés dans la plupart de nos expérimentations sont issus d'interventions culturales isohypses. Les valeurs de rugosité calculées à partir de transects parallèles à la ligne de plus grande pente sont donc des valeurs maximales. L'influence de la pente (< 0,5 %) est négligeable.

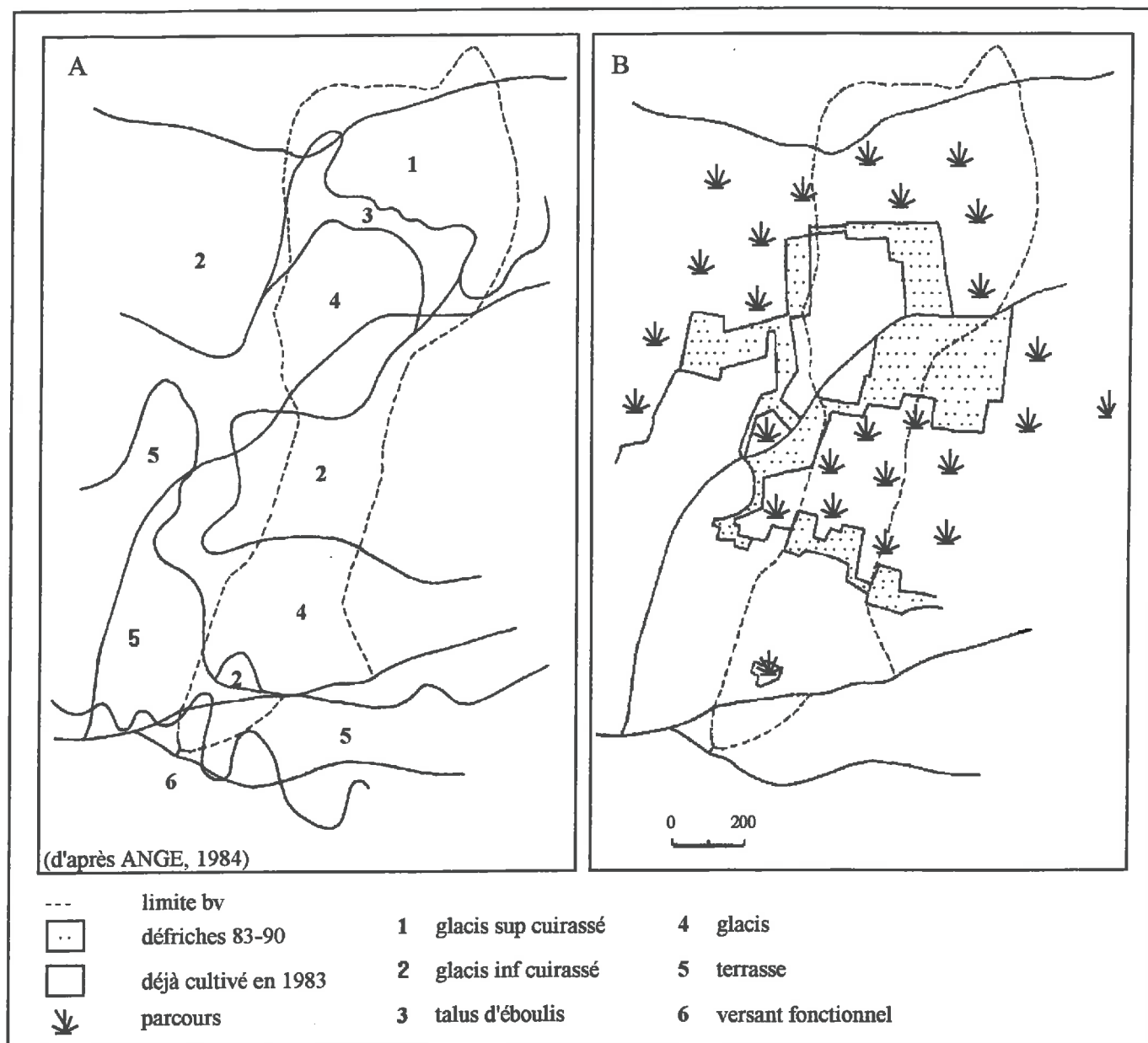


Figure 28 : Caractéristiques morphopédologiques (A) et évolution de l'occupation des sols 1983-1990 (B).
Bassin versant S2 (0.6 km²).
(Source: Sene et Perez, 1994)

3.3 Dispositifs expérimentaux :

. Conformément au dispositif théorique trois niveaux d'échelle spatiale sont étudiés :

- le versant (0,5 à 1 km²),
- la parcelle agronomique (1 à 10 ha),
- la surface élémentaire (1 à 10 m²).

. Deux échelles de temps sont privilégiées :

- **Etudes synchroniques** visant à hiérarchiser les facteurs de ruissellement (simulations de pluie) ou à caractériser la variabilité spatiale de certains paramètres (maillages géostatiques) ;
- **Etudes diachroniques** permettant un suivi intra et interannuel des processus de ruissellement.

. A partir de 1988, un certain nombre de bassins versants ont fait l'objet d'aménagements anti-érosifs. Des moyens humains et matériels limités, associés à la difficulté d'identifier des zones strictement identiques pour comparer les différents traitements, nous ont contraints à développer :

- un suivi de l'évolution des principaux paramètres hydrologiques des bassins versants avant et après aménagement. Cette méthode est sous-tendue par l'hypothèse de constance des autres facteurs évolutifs sur le domaine d'étude ;
- une comparaison de deux bassins versants non identiques, dont l'un est aménagé. L'objectif est de mettre en évidence la divergence éventuelle de séries chronologiques à partir de la date d'aménagement. L'hypothèse implicite précédente est également valable. **Les données de ces bassins versants, appelés S2 et S3, font actuellement l'objet d'une valorisation par un autre chercheur de l'équipe scientifique. Nous les présenterons dans le cadre du dispositif expérimental pour en souligner la cohérence.**

Les descriptions des dispositifs hydrométriques sont extraits des rapports de campagnes hydrologiques rédigés par l'ORSTOM (Dacosta, 1992 ; Albergel et al., 1988 à 1992).

3.3.1 Le bassin versant S2 (0,58 km²) :

- *Description* :

. Le bassin versant S2 regroupe les principales unités morphopédologiques de la toposéquence. De forme allongée ($I_c = 1,43$), le talus du plateau cuirassé lui confère un indice de pente élevée pour la zone ($I_g = 1,24$ m/km). Cependant, la faible déclivité des pentes latérales rend les limites du bassin versant imprécises et sujettes à variations sous l'action anthropique (pistes, défrichages). Deux campagnes topographiques ont permis de préciser cet aspect.

L'influence de la morphopédologie sur l'occupation des sols est manifeste au regard de la Figure 28 (Sene et Perez, 1994). Brouwers (1987) utilisant une classification légèrement différente étudie la répartition des couverts végétaux sur les différentes unités morphopédologiques ; répétée en 1990, cette cartographie souligne la forte dégradation subie par le glaciais, en terme de surfaces consommées et de couverts appauvris (Tableau 17). Valentin (1990) dresse une carte des états de surface du bassin versant qui confirme la plupart de ces résultats et indique que la majeure partie des sols cultivés sont soumis à des processus de réorganisations superficielles notables.

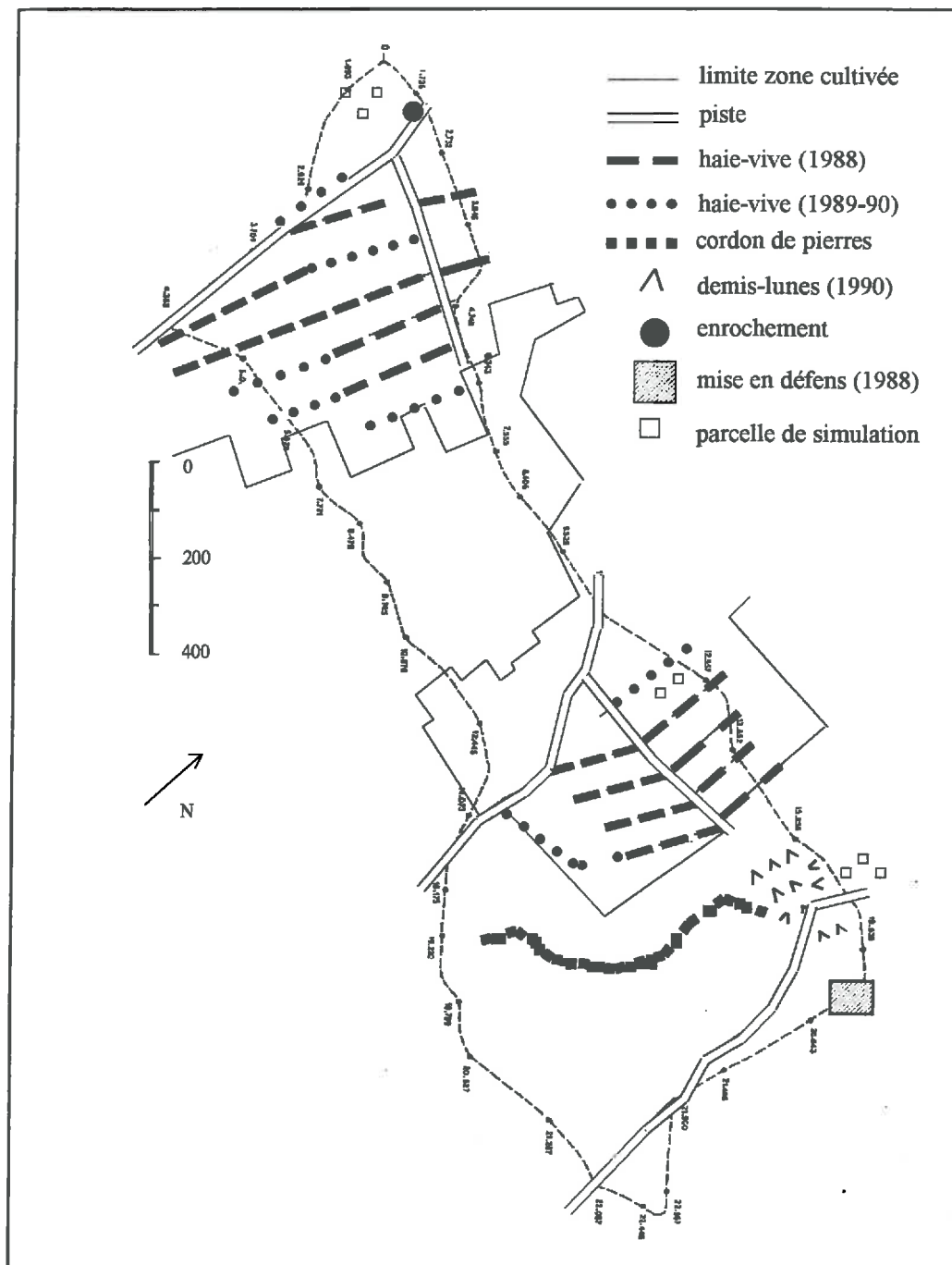


Figure 29 : Schéma d'aménagement du bassin versant S2 (0,6 km²). (Source: Sene et Perez, 1994).

Unité	%	Couvert végétal	% unité		% total	
			87	90	87	90
plateau	26	brousse moyt dégradée	72	60	19	16
		brousse dégradée	23	35	6	9
		chemins, passages d'eau	5	5	1	1
talus	7	brousse sur éboulis	95	90	7	6
		chemins, passages d'eau	5	10	0	1
glacis	44	cultures	25	60	11	26
		brousse peu dégradée	60	26	26	12
		brousse moyt dégradée	11	10	5	4
		chemins	4	4	2	2
terrasse	23	cultures	95	95	22	22
		chemins, friches	5	5	1	1

Tableau 17 : Occupation des sols sur les différentes unités morphopédologiques. Bassin versant S2. 1987 et 1990.

. A partir de 1988, un dispositif anti-érosif a été progressivement installé comprenant (Figure 29) :

- **11 haies vives multispécifiques**, disposées de manière isohypse dans les terroirs cultivés, totalisant 8000 plants sur une distance de 4 km ;
- **1 cordon pierreux** de 500 mètres de long, mis en place au pied du talus de raccordement au plateau ;
- **24 ouvrages ponctuels végétalisés**, dits en "arrêtes de poisson", placés dans un couloir de ruissellement concentré très érodé ;
- **la stabilisation de la ravine** qui collecte les eaux de ruissellement vers l'exutoire du bassin versant.

- *Dispositif expérimental :*

. Le suivi hydrologique s'est déroulé de 1983 à 1993. La station située à l'exutoire (13°46 nord et 15°33 ouest) comprend un canal bétonné de 3,50 m de long équipé d'un déversoir à lame mince à l'aval. Les hauteurs d'eau sont enregistrées à partir d'un limnigraphe OTTX de réduction 1/5°, lorsqu'il y a débordement. Le volume résiduel de la fosse (3 m³) peut être considéré comme négligeable compte tenu de la superficie du bassin. Différentes campagnes de jaugeage ont permis de définir la courbe d'étalonnage du déversoir. Un pluviographe est installé à proximité de la station. Des mesures de transports solides ont été réalisées de 1984 à 1987 grâce à un préleveur automatique, puis de 1988 à 1993 par prélèvement manuel en continu.

. A partir de 1990, le dispositif hydrologique a été complété par un **réseau de minipièges à ruissellement** répartis sur quatre niveaux le long de la toposéquence. L'aire d'influence pour chaque capteur est inconnue mais les réponses semi-quantitatives globales de chaque unité et leur évolution chronologique renseignent sur la contribution relative des différentes parties du bassin versant à l'écoulement général à l'exutoire. Les quatre niveaux choisis correspondent à la bordure du plateau, au piémont du talus de raccordement, à l'amont de la zone de brousse tachetée située à mi-versant et à l'aval de cette même zone (Figure 30).

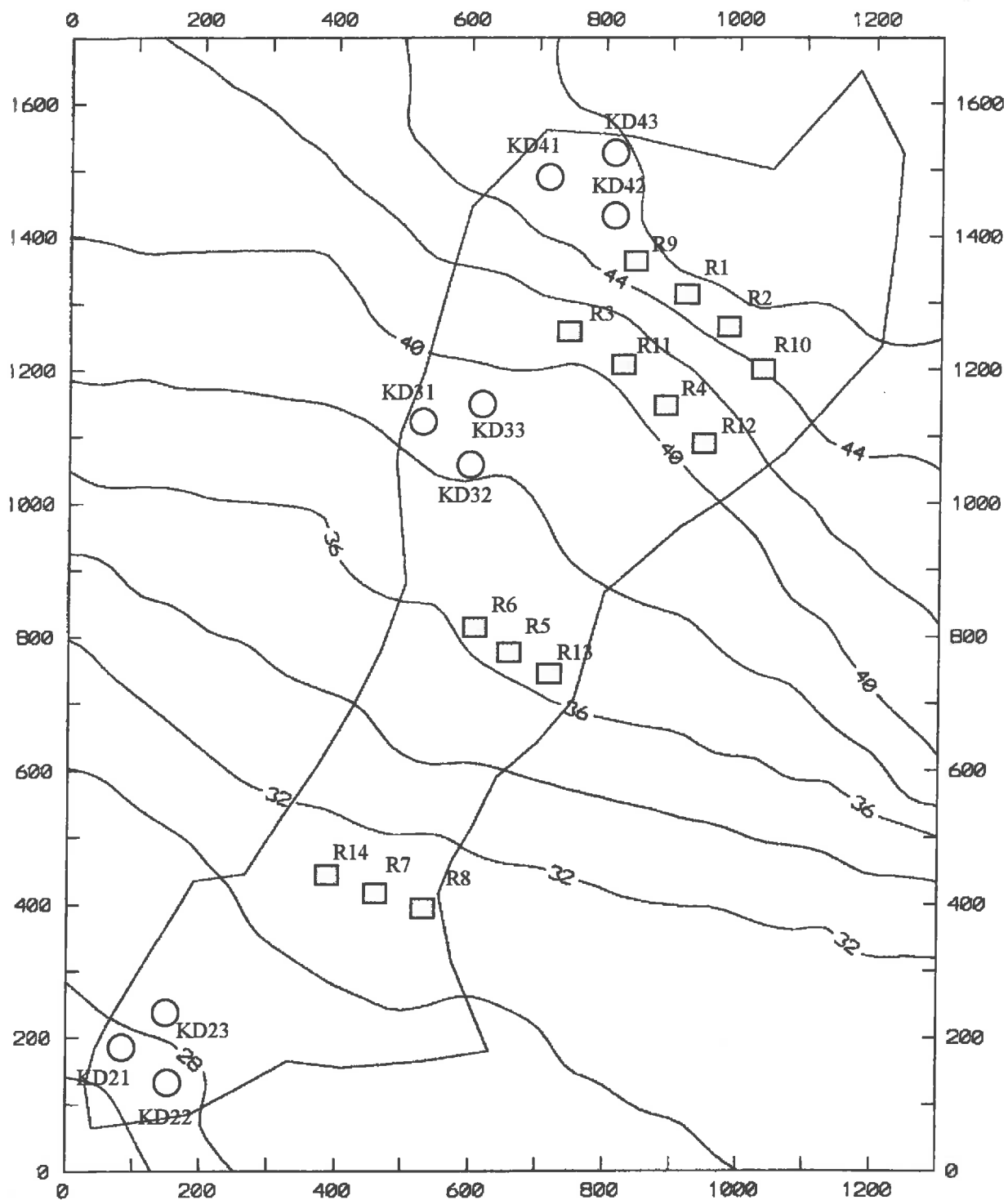


Figure 30 : Dispositifs de mesure mis en place sur le bassin versant S2 (0,6 km²). Mini-pièges à ruissellement (□) et sites de simulation de pluie (○).

. En février 1989, une campagne de simulation de pluies permet de répertorier les principaux faciès de ruissellement, après avoir défini trois sites d'expérimentation. Chaque site est équipé de trois parcelles élémentaires disposées sur des états de surface contrastés. Compte-tenu du degré d'anthropisation de la zone d'étude, l'accent est mis sur la caractérisation des sols cultivés. Cette campagne sera complétée en mars 1990 par l'étude du bas-fond de Keur Samba Diama, dernier élément de la toposéquence. Le protocole de simulation est identique pour tous les sites et peut être considéré comme représentatif des types d'averse de la région (Figure 30).

. D'un point de vue agronomique, l'ensemble des parcelles cultivées du bassin versant S2 fait l'objet d'un suivi de l'itinéraire technique depuis 1987. Les composantes du rendement sont mesurées à partir de placettes de 25 m² implantées dans chaque parcelle d'exploitation, à raison de deux par parcelle. La charge de travail nécessaire exclut tout suivi exhaustif des taux de recouvrement, des rugosités de surface ou des termes du bilan hydrique.

. Nous mentionnerons également l'étude du comportement des principales espèces arbustives implantées en haies vives et leurs interactions avec le milieu. Les principaux résultats sont consignés dans un document de synthèse (Rautureau et al., 1991) et font l'objet d'une valorisation plus poussée actuellement.

3.3.2 Le bassin versant S3 (0,9 km²) :

- Description :

. Le bassin versant S3 est légèrement plus compact que S2, son indice de pente est nettement inférieur ($I_g = 5,7$ m/km), sa situation géographique très en amont du réseau hydrographique explique en grande partie cette différence morphométrique. De même, l'étude morphopédologique traduit un rapprochement de la zone interne des plateaux. Ici également, les conquêtes effectuées au profit des terres cultivées sont nettement influencées par les caractéristiques du sol (Figure 31).

. A partir de 1988, le bassin versant S3 est maintenu en conditions naturelles et est considéré comme un témoin par rapport au bassin versant aménagé S2.

- Dispositif expérimental :

. La période d'observation du bassin versant s'étend de 1983 à 1993. L'étude concerne essentiellement le suivi hydrologique à l'exutoire. La station (13°45 nord, 15°32 ouest) comprend un canal bétonné de 3,80 m de long équipé d'un déversoir à lame mince à l'aval. Un limnigraphe OTTX de réduction 1/5° et une échelle limnimétrique permettant d'enregistrer les hauteurs d'eau lorsqu'il y a débordement. Le volume résiduel de la fosse (3 m³) est considéré comme négligeable. Différentes campagnes de jaugeage ont permis d'établir la courbe d'étalonnage du déversoir. Un pluviographe à augets est installé à proximité de la station. Des mesures de transports solides ont été réalisées en 1984 et 1985 grâce à un préleveur automatique puis en 1986, 1987 et de 1990 à 1993 par prélèvements manuels en continu durant les crues. C'est sur cette station que l'inadaptation du prélèvement automatique, fonctionnant par remplissage de bouteilles à siphon, donc uniquement pendant la phase de montée, a été mise en évidence (Dacosta, 1992).

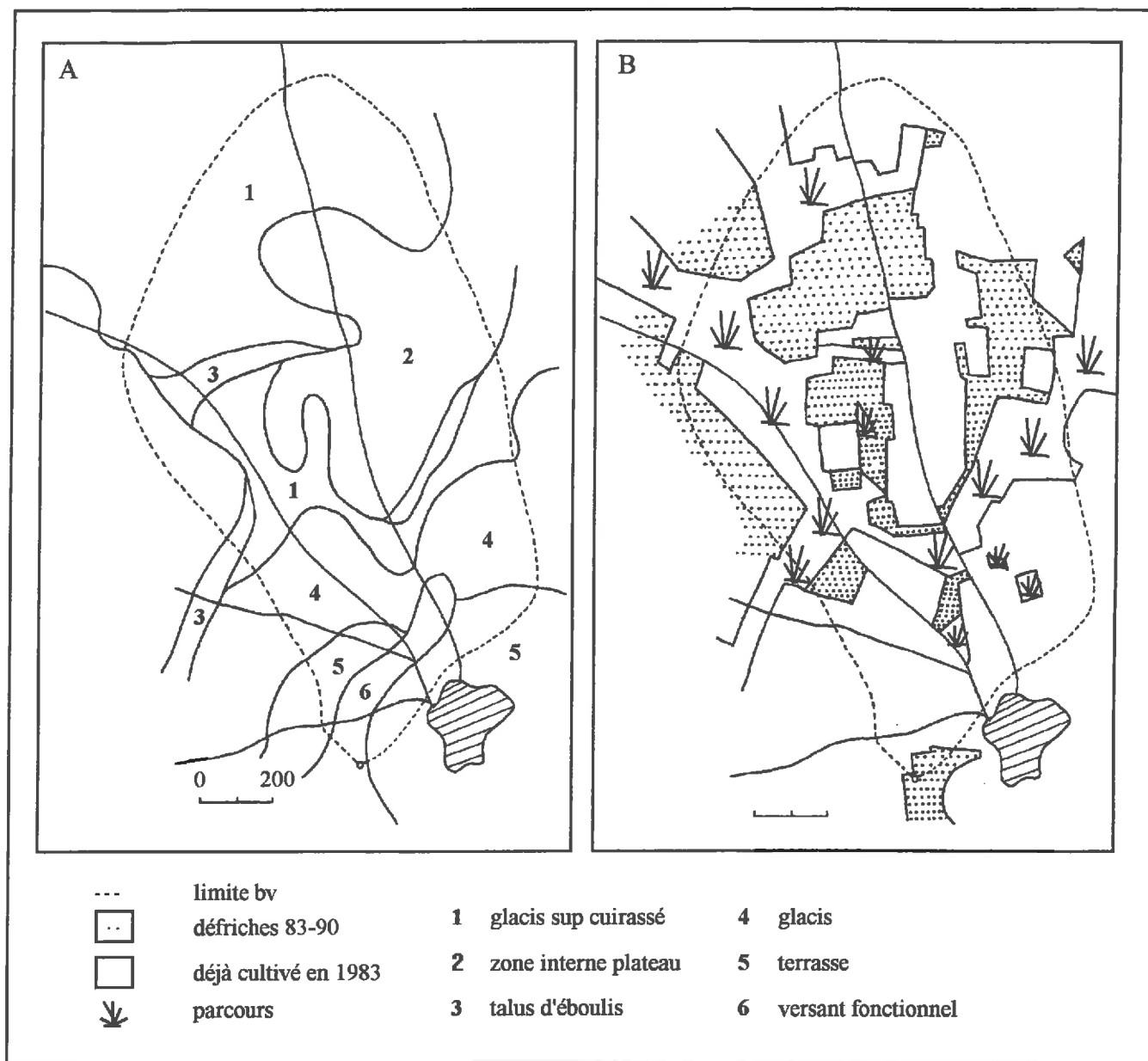


Figure 31 : Caractéristiques morphopédologiques (A) et évolution de l'occupation des sols 1983-1990 (B).
Bassin versant S3 (0,9 km²).

3.3.3 Le bassin versant S4 (2,5 ha) :

- Description :

. Le bassin versant S4 est situé sur la terrasse colluvio-alluviale, à 500 m de la station hydrographique S2. Il est bordé à l'est par une piste qui l'isole des secteurs amont du versant. A l'origine, la pente longitudinale sur les deux tiers amont du bassin est de l'ordre de 0,5 %. Elle s'accroît vers l'aval pour atteindre 2 % dans la zone où les passages d'eau (rigoles) se concentrent pour former une petite ravine évasée (Figure 32). Le bassin est entièrement cultivé et divisé en quatre parcelles d'exploitation soumises à une rotation mil/arachide.

. L'ensemble du bassin se classe dans le groupe des **sols ferrugineux lessivés, à taches et nodules en profondeur**. Sur les 60 premiers centimètres le sol est très sableux (5 % d'argile en surface, 18 % à 60 cm), le matériau est friable et fragile, la structure continue à éclats émoussés. La teneur en matière organique est faible dès la surface, des traces d'activité animale sont visibles jusqu'à 40 cm. Ensuite, la texture devient progressivement argilo-sableuse (30 % d'argile), le matériau est plastique, peu fragile et contient de nombreuses cavités biologiques. A partir de 1,50 m de nombreuses taches d'oxydation apparaissent, parfois développées en nodules (Brouwers, 1987).

. En fait, cette apparente homogénéité cache des différenciations de profils dues au décapage et au colluvionnement superficiel de la zone aval par l'érosion. Cette variabilité spatiale se traduit également en terme d'états de surface et d'aptitude au ruissellement, mais elle est fortement influencée par le facteur anthropique. Ainsi, Audin (1987) définit des unités homogènes dont les limites fluctuent annuellement en fonction du système de culture ; de plus, les zones cartographiées comme instables sont étroitement liées au piétinement intensif par le bétail, le couloir de passage sur le bassin versant étant confondu avec l'axe de développement des principales ravines (Figure 33).

. A partir de 1988, le bassin versant S4 a fait l'objet d'un aménagement intégré comprenant (Figure 34) :

- **1 haie vive multispécifique** isohypse. Implantée à mi-versant, en amont du système de ravines, elle est doublée en amont par une ligne de graminées pérennes (*Panicum maximum*) et par un andain de résidus de récolte ;

- **8 obstacles filtrants** placés dans l'axe des ravines et rigoles. Il s'agit de fascines, tressage de branches arbustives, et de seuils en pierre dont la répartition dépend du degré de concentration du ruissellement ;

- l'introduction de **techniques culturales anti-érosives** permet de conserver une rugosité maximale durant la saison de culture.

- Dispositif expérimental :

. Le suivi hydrologique s'est déroulé de 1985 à 1993. La station située à l'exutoire (13°46 nord et 15°33 ouest) comprend une fosse à sédiments bétonnée (8,4 m³) équipée d'un déversoir à lame mince à l'aval. L'enregistrement des hauteurs d'eau s'effectue à partir d'un limnigraphe OTTX et d'une échelle limnimétrique. De 1985 à 1988, la base du puits de mesure correspond à l'arête de la lame mince, or le volume de la fosse est loin d'être négligeable devant la plupart des volumes écoulés. Aussi, à partir de 1989, les enregistrements débutent au fond de la fosse afin d'obtenir l'intégralité des écoulements (Figure 35). Pendant le remplissage de la fosse, le débit entrant est directement proportionnel à la vitesse d'augmentation de la hauteur d'eau ; lorsqu'il y a déversement, s'y ajoute le débit sortant donné par la courbe d'étalonnage du déservoir. D'autre part, le réducteur utilisé sur le limnigraphe jusqu'en 1987 interdit toute lecture précise des faibles crues, cet ensemble de problèmes techniques explique la médiocrité de l'échantillon d'étude avant aménagement du bassin versant. Des mesures de transports solides ont été réalisées, à partir de 1988, par prélèvements manuels en continu.

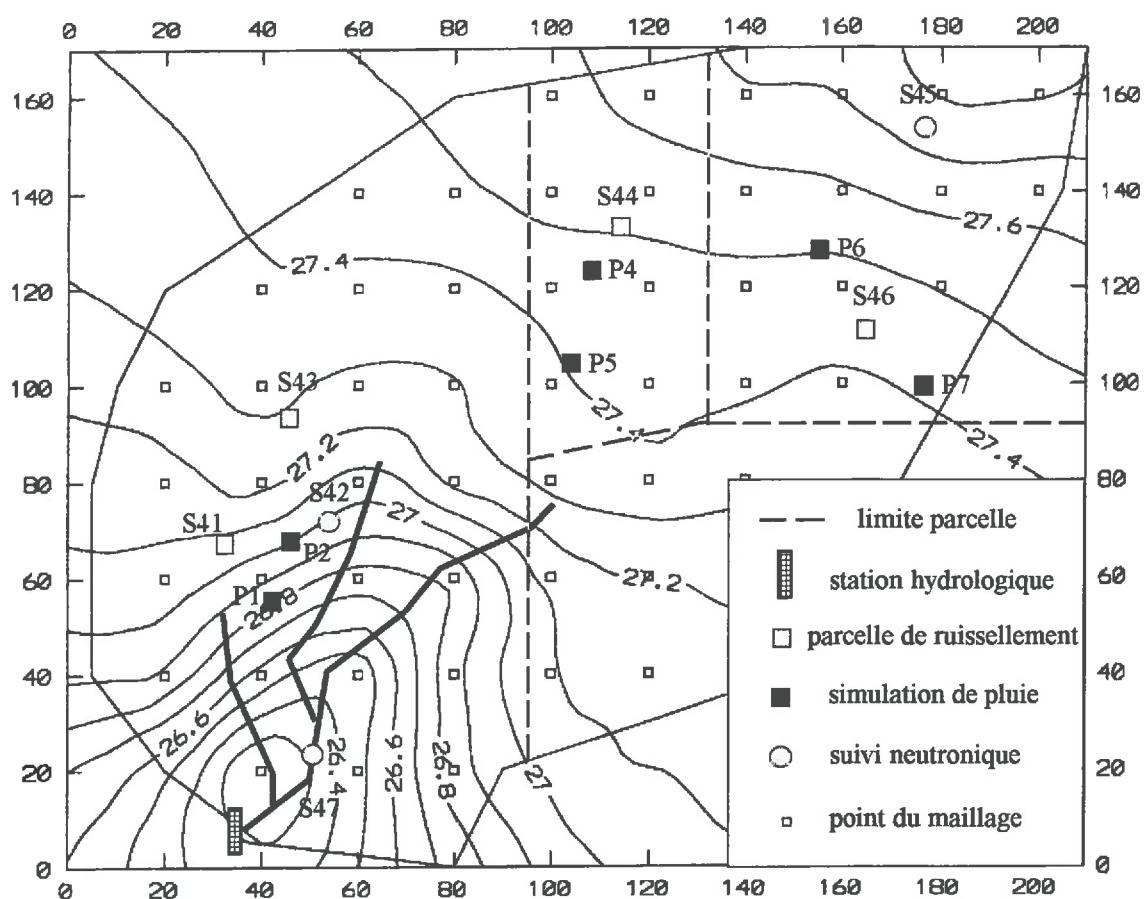


Figure 32 : Relevé topographique et dispositif expérimental du bassin versant S4 (2,5 ha).

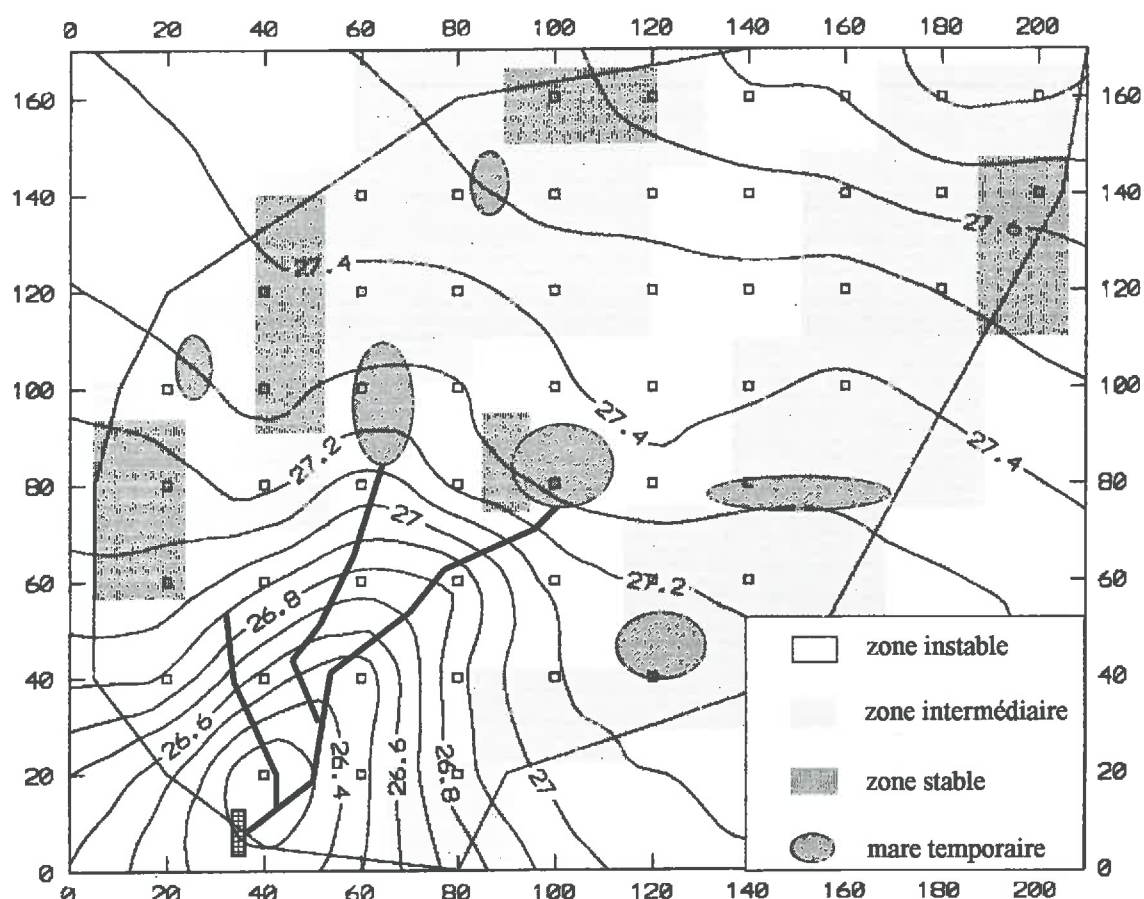


Figure 33 : Cartographie des états de surface (1987). Bassin versant S4. (Source: Ruelle et al., 1989).

Cependant l'influence du volume de la fosse perturbe fortement la répartition entre charriages et transports en suspension. Un pluviomètre est installé à proximité de la station (type SPIEA).

. Dès 1986, le dispositif hydrologique est complété par **quatre parcelles de ruissellement (1x1 m²)** dont les emplacements sont choisis en fonction de la cartographie des états de surface. Les volumes ruisselés sont mesurés après chaque pluie et, à partir de 1989, des prélèvements de solutions permettent le calcul de la charge solide et du taux de nitrites/nitrates moyens pour chaque averse importante. L'ensemble des parcelles fait l'objet d'un suivi périodique des états de surface, du couvert végétal et du bilan hydrique, par méthode tensio-neutronique (Figure 32).

. La variabilité du bilan hydrique des cultures est appréhendée par la mise en place de **sept sites de mesures tensio-neutroniques** dont quatre déjà cités et trois autres utilisés sans parcelles de ruissellement. Comme indiqué précédemment, l'étalonnage de l'humidimètre neutronique (TROXLER 3322) a été réalisé sur l'ensemble des sept tubes implantés; pour ce faire, on a tenu compte des différenciations des profils observés et des caractéristiques d'absorption de chaque tube PVC. Le tableau 27 résume les principales informations relatives aux quatre horizons d'étalonnages choisis. L'écart type d'estimation avoisine 0,016 cm³ cm⁻³ pour l'horizon 1 et 0,010 cm³ cm⁻³ pour les suivants. La fréquence de mesure est hebdomadaire durant toute la saison de culture, sauf panne de l'humidimètre (août 1988, par exemple).

Horizon	Profondeur	Couples	r	a1	a0	s ² (a1)	s ² (a0)	s(a1, a0)	s ² (e)
1	0 à 10	31	0.989	0.638	-0.014	31	2.9	-8.1	23.9
2	10 à 20	28	0.991	0.595	-0.032	24.5	2.5	-7	14.1
3	30 à 50	100	0.987	0.612	-0.052	9.7	1.1	-3.1	14.8
4	60 à 200	263	0.982	0.656	-0.083	5.8	0.9	-2.2	7.9

Tableau 18 : Caractéristiques d'étalonnage multilocal. Bassin versant S4. $\theta = a_1 N/N_0 + a_0$ (θ en cm³/cm³).

. L'étude de la variabilité spatiale du bilan hydrique est renforcée par **l'étude géostatistique des stocks hydriques du sol**. Les valeurs d'humidités sont fournies par prélèvements à la tarière en 53 verticales situées aux noeuds d'une grille de maille élémentaire 20 x 20 m, superposée au bassin versant (Figure 32). Les résultats de cet échantillonnage sont analysés en assimilant les stocks à des variables régionalisées et en y appliquant les concepts correspondants. En 1987, l'échantillonnage est réalisé à quatre dates (10/06, 02/07, 30/07 et 10/08) afin d'établir la stabilité temporelle de la structure spatiale des stocks hydriques et d'obtenir un, zonage fiable, par krigeage, du bassin versant (Ruelle et al., 1989). De 1988 à 1992, l'échantillonnage est réalisé en fin de période culturale afin de pouvoir relier les stocks hydriques résiduels aux consommations en eau durant le cycle végétatif et aux composantes du rendement. Celles-ci font l'objet d'un échantillonnage sur la même grille de prélèvement, des placettes de 12 m² pour l'arachide et 20 m² pour le mil sont centrées sur les noeuds du maillage. Les prélèvements de sol de 1991 servent également à définir les profils granulométriques, de teneurs en azote total et de teneurs calcium échangeable des 53 verticales échantillonnées.

. En 1988, avant aménagement du bassin versant, **une campagne de simulation de pluies** est réalisée afin d'étudier les relations pluie-ruissellement-états de surface. Trois sites, chacun équipé de deux parcelles de ruissellement, sont retenus en fonction des zones homogènes obtenues, en 1987, par krigeage des stocks hydriques (Albergel et al., 1989) (Figure 32). Après aménagement, quelques dispositifs et protocoles expérimentaux sont rajoutés afin de caractériser de manière plus précise le rôle des diverses techniques anti-érosives mises en oeuvre :

- **Mise en place d'une trentaine de plaquettes d'atterrissement** en amont des obstacles filtrants (haie-vive, fascines, seuils en pierre). Installés en 1989, ces repères permettent d'évaluer la sédimentation annuelle et inter-annuelle au droit des ouvrages. La mesure s'effectue par différence de cotes entre la surface du sol et le sommet de la tige. La précision de mesure est estimée à 0,3 cm et dépend fortement de la présence de laisses de crue grossiers en surface.

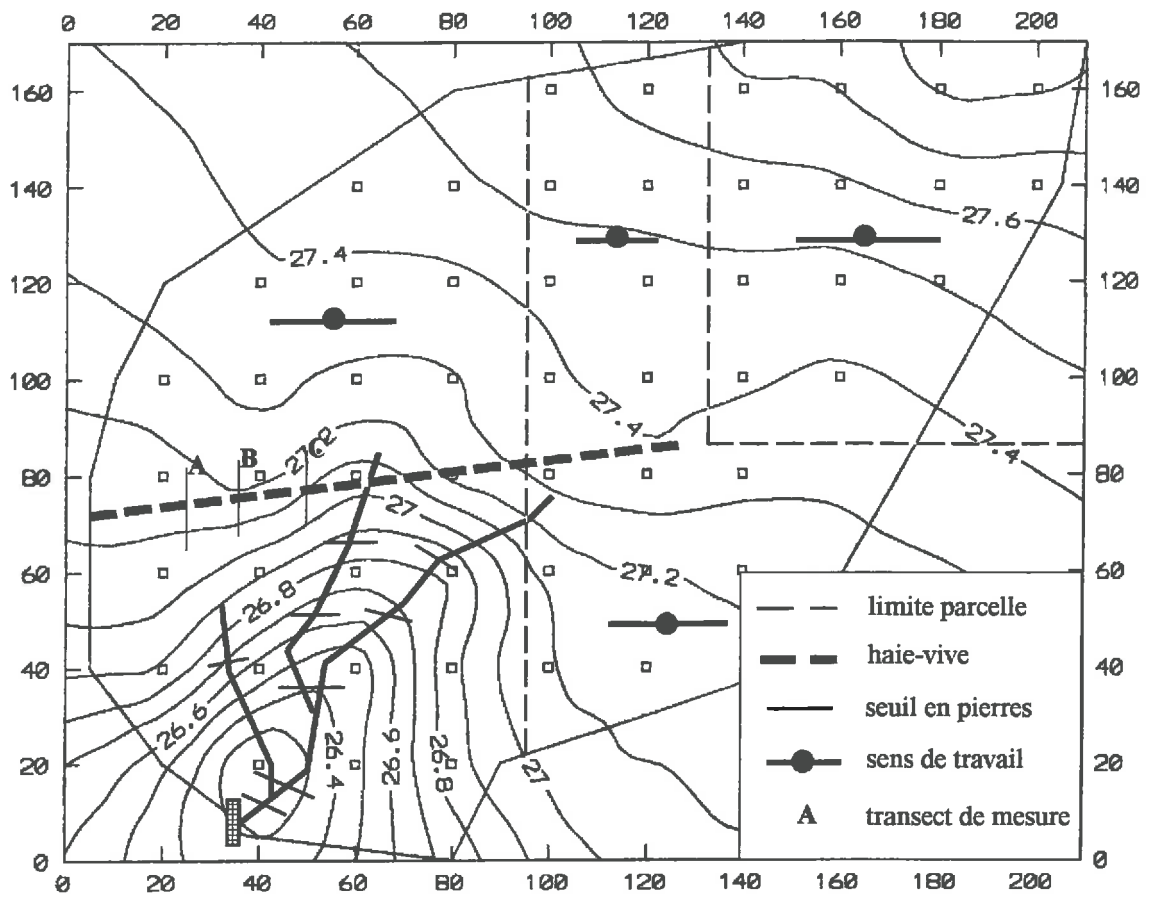


Figure 34 : Schéma d'aménagement du bassin versant S4 (2,5 ha) et positionnement des transects de mesure.

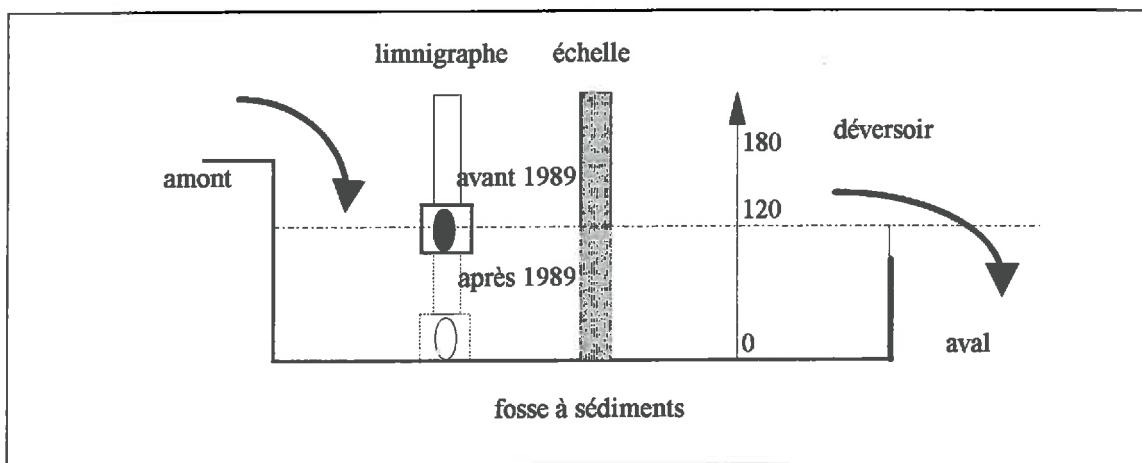


Figure 35 : Station hydrographique du bassin versant S4 (2,5 ha). (Source: Dacosta, 1992).

- **Réalisation d'un mini maillage 10 x 10 m** dans la zone aval du bassin versant afin d'étudier l'influence des obstacles filtrants sur l'infiltration de l'eau dans le sol. Les prélèvements ont eu lieu de 1989 à 1992, à la suite des échantillonnages sur l'ensemble du bassin. Malgré le faible nombre de points de mesures, un krigeage grossier des stocks hydriques est réalisé.

- La haie vive se prêtant moins à ce genre d'échantillonnage, nous avons préféré utiliser la **technique des transects** pour étudier la variabilité spatiale des stocks hydriques par rapport à la haie. De 1990 à 1992, trois transects sont répétés à 15 jours d'intervalle pendant toute la saison des pluies. Les prélèvements sont effectués à la tarière jusqu'à 1,00 m de profondeur. Pour chaque horizon, la moyenne des trois valeurs est prise en compte. Les points de mesure sont situés à des distances de 0,5, 1, 2 et 5 mètres de part et d'autre de la haie vive (Figure 34).

3.3.4 Le bassin versant S5 (2,5 ha) :

- Description :

. Le bassin versant S5 est situé à l'amont du glacis, en limite des terres cultivées, au nord du bassin versant S2. L'absence de limites naturelles stables a imposé la réalisation d'une levée en terre afin d'isoler l'unité hydrologique des apports extérieurs. La pente longitudinale est très régulière et voisine de 1 %, aucun réseau hydrographique nettement hiérarchisé n'est perceptible, les processus de ruissellement et d'érosion en nappe dominant. A l'origine, le quart sud-est du bassin versant était couvert d'une jachère arbustive de longue durée ; à partir de 1988, le défrichage de cette zone entraîne la mise en culture totale du bassin versant, divisé en trois puis quatre parcelles d'exploitation (Figure 36). Les rotations culturales intègrent le coton et le sorgho, sans aucune régularité, à la succession mil/arachide.

. L'ensemble du bassin versant se classe dans le groupe des **sols peu évolués d'érosion** et présente un niveau induré à une profondeur voisine de 45 cm. Sur les vingt premiers centimètres le sol est sableux (5 à 10 % d'argile), la structure est continue, le matériau est poreux et peu fragile, contenant de 5 à 30 % de gravillons ferriques. On passe rapidement à un horizon sablo-argileux (20 % d'argile), à structure continue, contenant 50 à 60 % de gravillons. Au-delà de 45 cm on passe progressivement à un horizon brun puis jaune pâle, de texture argilo-sableuse (30 % d'argile), contenant de nombreux nodules ferriques, plus ou moins indurés, occupant environ 80 % du volume du sol. En sec, ce dernier niveau s'apparente à une carapace ; cependant, en humide le matériau se fragmente facilement (Brouwers, 1987). La variabilité spatiale tient essentiellement dans les profondeurs d'apparition des niveaux gravillonnaires et indurés. La caractérisation des gravillons dépend de l'état hydrique du sol et du mode de prélèvement. Pour un site donné, leur participation pondérale peut varier du simple au double selon leur état de cohésion au moment du prélèvement (Figure 37).

. La cartographie des états de surface met en évidence un couloir de ruissellement assez large qui prend en écharpe l'ensemble du bassin versant (Figure 38). Comme pour le bassin versant S4, les états de surface sont fortement influencés par le système de culture et les activités pastorales.

. A partir de 1988, le bassin versant S5 a fait l'objet d'un aménagement intégré comprenant (Figure 39) :

- **1 haie-vive multispécifique** isohypse. Implantée dans le tiers supérieur du bassin, elle est doublée en amont par un andain de résidus de récolte ;

- **3 obstacles filtrants** placés dans l'axe du couloir de ruissellement : il s'agit de deux seuils en pierre et d'une facine, la topographie très plane rend le positionnement des ouvrages très approximatif ;

- l'introduction de **techniques culturales anti-érosives** permet de conserver une rugosité maximale durant la saison de culture.

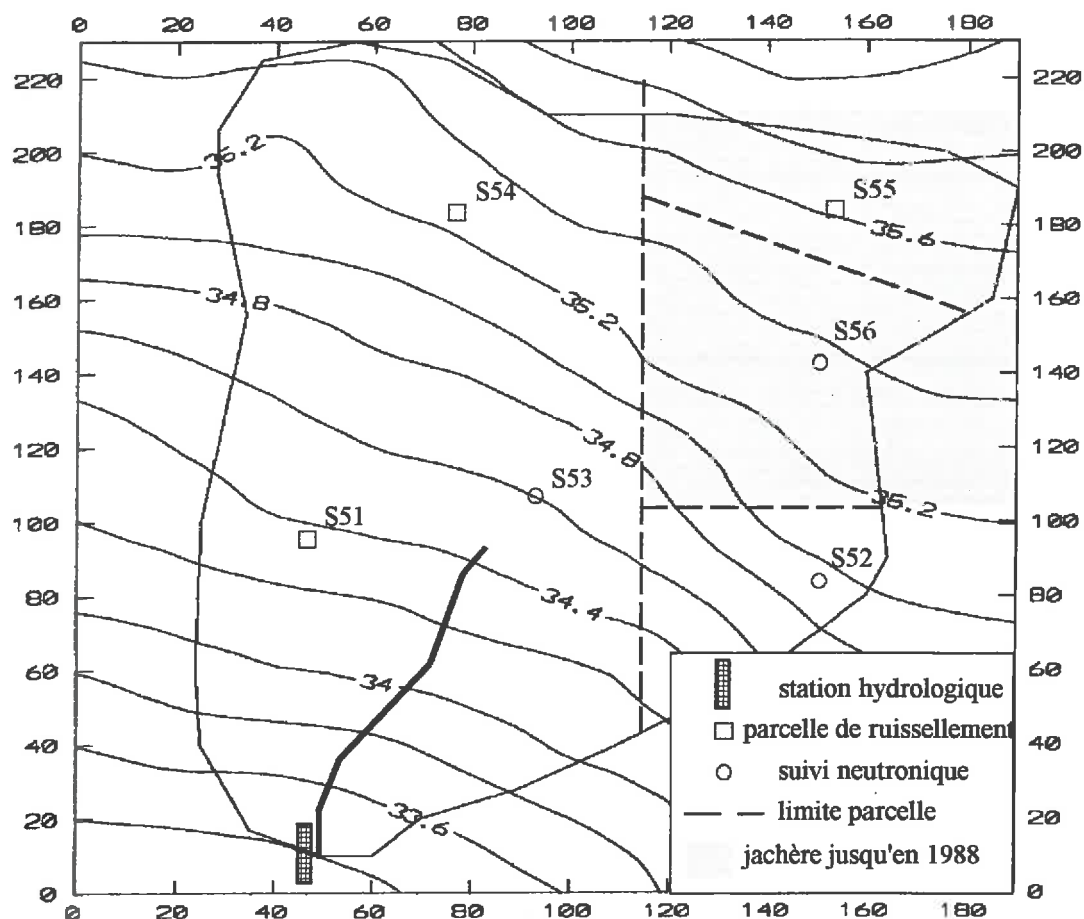


Figure 36 : Relevé topographique et dispositif expérimental du bassin versant S5 (2,5 ha).

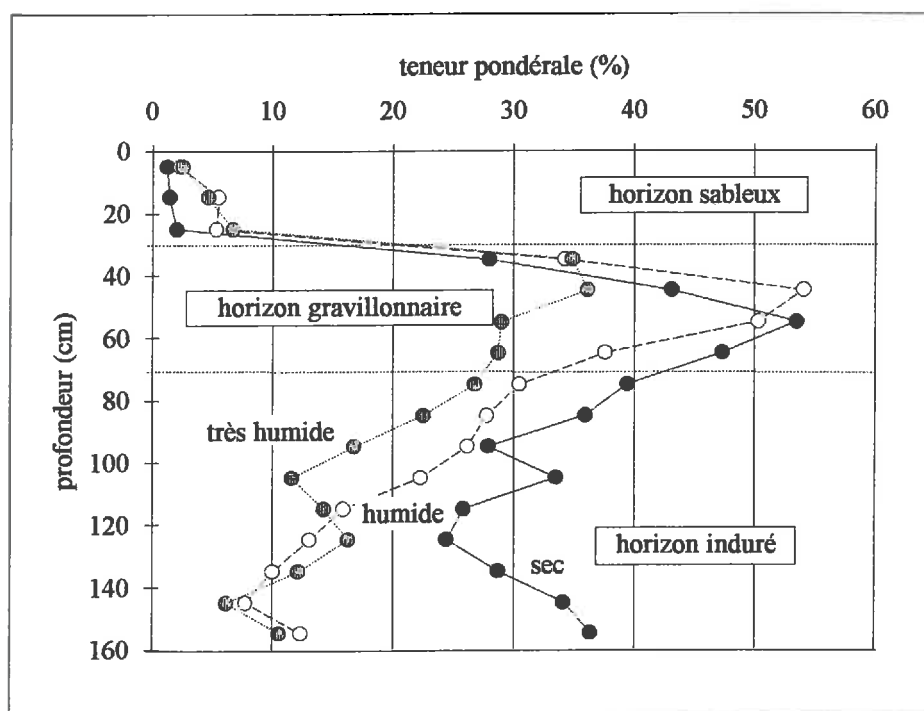


Figure 37 : Variations de la teneur mesurée en gravillons (> 2 mm) dans le profil, en fonction de la date de prélèvement. Bassin versant S5, site S51.

- Dispositif expérimental :

. Le suivi hydrologique s'est déroulé de 1986 à 1993. La station située à l'exutoire (13°46 nord et 15°32 ouest) comprend une fosse à sédiments bétonnée (5,1 m³) équipée d'un déversoir à lame mince à l'aval. Un limnigraphe OTTX de réduction 1/5° et une échelle limnimétrique permettent l'enregistrement des hauteurs d'eau. Comme pour la station S4, de 1986 à 1988, la base du puits de mesure n'atteint pas le fond de la fosse, éliminant du même coup toutes les crues sans débordement. Ce problème technique est corrigé en 1989. Des mesures de transports solides sont réalisées depuis 1988, par prélèvements manuels en continu. Le volume de la fosse perturbe fortement la répartition entre charriages et transports en suspension. Un pluviomètre est installé à proximité de la station (type SPIEA).

. A partir de 1990, les défrichages massifs réalisés en amont du bassin versant S5 perturbent les écoulements de surface. A plusieurs reprises, en 1990 et 1991, les levées de terre sont submergées et les écoulements à l'exutoire contaminés par des ruissellements extérieurs.

. En 1986, le dispositif hydrométrique est complété par **quatre parcelles de ruissellement (1x1 m²)** dont les emplacements sont choisis en fonction de la cartographie des états de surface. La quatrième parcelle est située au sud, hors de limites du bassin, en zone de brousse tachetée afin d'éviter tout défrichage intempestif pendant la durée de l'étude. Les volumes ruisselés sont mesurés après chaque pluie et l'ensemble des parcelles fait l'objet d'un suivi périodique des états de surface, du couvert végétal et du bilan hydrique, par méthode tensio-neutronique (Figure 36).

. L'étude des variabilités spatiales et temporelles du bilan hydrique des cultures devait faire l'objet d'un suivi analogue à celui du bassin versant S4. De fait, les problèmes posés par la caractérisation des gravillons présents dans le profil et par le comportement de l'horizon induré ont fortement retardé les protocoles. Le passage aux stocks hydriques nécessite une couverture quasi-exhaustive des profils de teneurs en éléments grossiers et des profils de densité. Nous avons jugé opportun de ne pas inclure les résultats disponibles, très fragmentaires, dans la présente étude.

. **Une vingtaine de plaquettes d'atterrissement** ont été mises en place, en 1989, en amont des obstacles filtrants afin d'évaluer la sédimentation annuelle et inter-annuelle au droit des ouvrages.

3.3.6 Le milieu contrôlé :

- Description :

. Certaines expérimentations sous pluie simulée ont demandé une mise en place minutieuse ou un important dispositif de mesure. Afin d'assurer leur réussite, nous avons préféré nous installer en milieu contrôlé, sur des stations de recherches gérées par l'ISRA. Deux sites ont été retenus pour leur proximité des bassins versants étudiés et la représentativité des sols rencontrés (Figure 1) :

- **la station de Sonkorong** : ouverte en 1969 pour servir de point d'appui pour l'expérimentation multilocale (PAPEM) dans le cadre du projet de recherche/développement des "Unités Expérimentales" (Benoit-Cattin, 1986). La station est située sur le versant rive droite du bas-fonds de Kaymor, au niveau du glacis, face aux bassins versants étudiés. Les sols sont de type ferrugineux tropicaux appauvris, à tâches et nodules en profondeur. Les parcelles utilisées sont soumises à une rotation mil/arachide régulière depuis 1985. Une station climatologique synoptique fonctionne depuis 1971 ;

- **la station de Nioro du Rip** : héritée du réseau de recherche colonial, la station est située à 30 km à l'ouest de Kaymor, dans la zone des bas-glacis d'épandage. Une partie des sols appartient au groupe des sols rubéfiés, remaniés, sur matériaux argilo-sableux ; l'autre partie, au groupe des sols ferrugineux lessivés sur matériaux polygéniques (Piéri, 1969; Bertrand, 1971). Les expérimentations se sont déroulées sur la seconde partie, les états de surface rencontrés

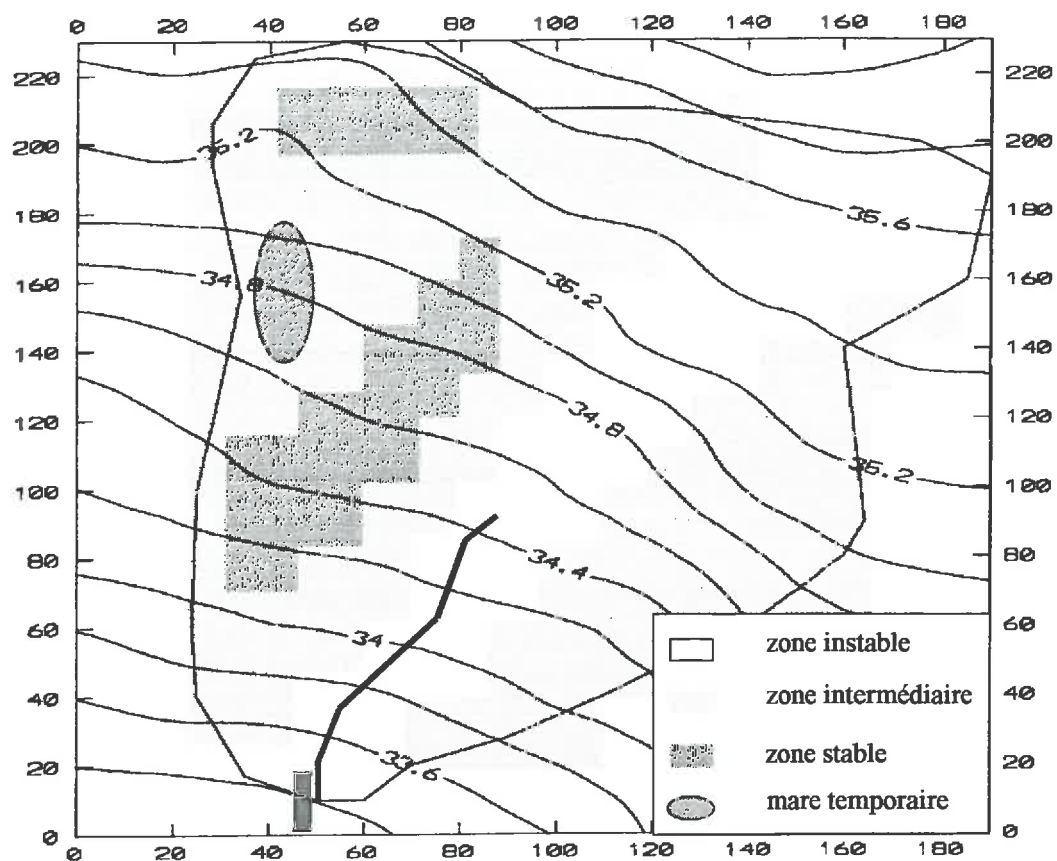


Figure 38 : Cartographie des états de surface (1987). Bassin versant S5. (Source: Ruelle et al., 1989).

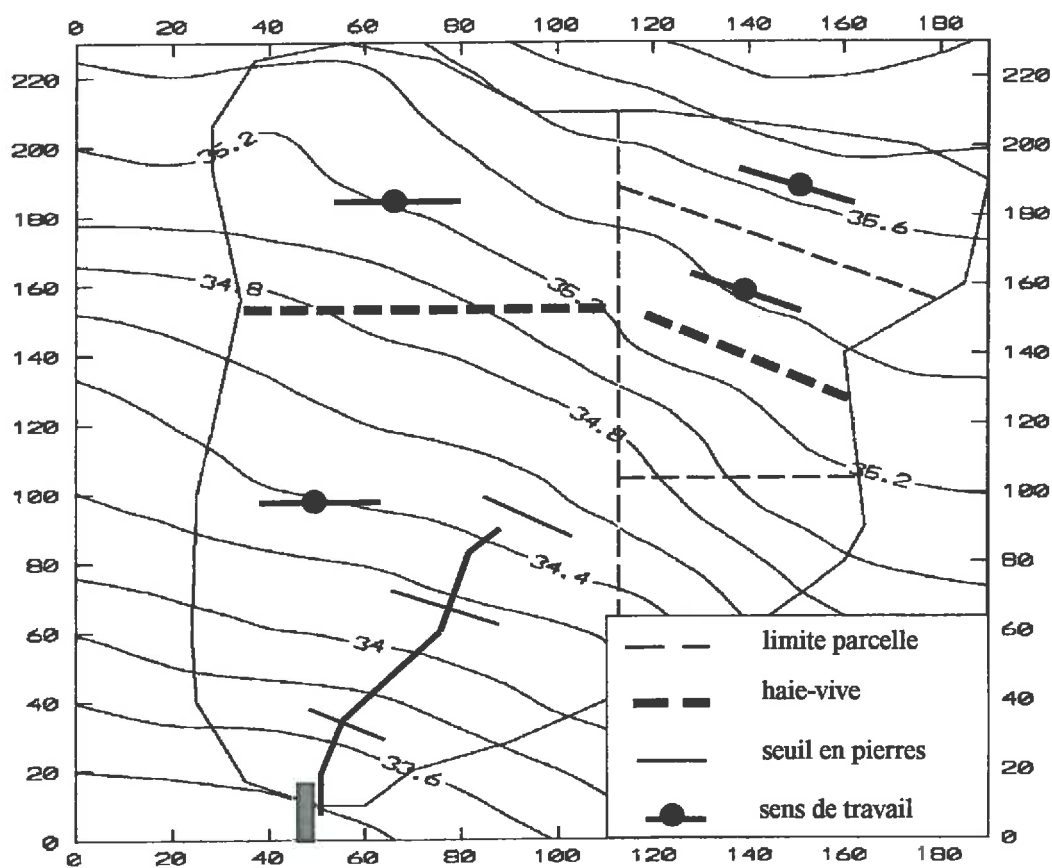


Figure 39 : Schéma d'aménagement du bassin versant S5 (2,5 ha).

montrant une certaine convergence avec ceux rencontrés à l'aval de la terrasse colluvio-alluviale, à savoir une faible aptitude aux réorganisations superficielles et au ruissellement. De plus, les sols de la station bénéficient de nombreuses études hydrodynamiques (Vachaud et al., 1991).

- Dispositifs expérimentaux :

. Un protocole d'étude du rôle d'un couvert d'arachide sur le ruissellement a été mis en place sur les deux sites, en janvier 1992 et 1993. L'objectif est de mieux cerner les interactions entre le taux de recouvrement et l'itinéraire technique et leurs conséquences sur la dynamique des états de surface. Le dispositif consiste en huit parcelles de 25 m², semées en arachide (var 73.33), recevant une série de cinq pluies simulées standardisées. Les dates de semis sont décalées afin d'obtenir, en début d'expérimentation, quatre stades culturels distincts (2 répétitions) :

- **stade implantation**, semis + 7 jours, non sarclé, recouvrement théorique 5 %,
- **stade végétation**, semis + 30 jours, sarclé au 15^e jour, recouvrement théorique 30 %,
- **stade végétation**, semis + 30 jours, sarclé aux 15^e et 30^e jours, recouvrement théorique 30 %,
- **stade floraison**, semis + 60 jours, sarclé aux 15^e et 30^e jours, recouvrement théorique 90 %.

. Afin d'éviter une pluie naturelle parasite, le protocole de simulations se déroule durant la saison sèche. Le dispositif est constitué de deux simulateurs de pluies identiques travaillant en parallèle, durant 10 jours, sur l'ensemble des parcelles (Figure 40). Cependant, les semis s'étalant de mi-novembre à mi-janvier, la physiologie de l'arachide est perturbée (Annerose, 1990). Afin de diminuer le retard végétatif, les inter-rangs sont paillés avec des bâches plastiques de couleur noire qui interdisent également tout développement de mauvaises herbes. La qualité germinative est assurée par l'emploi de semences sélectionnées dont la dormance est levée par passage à l'étuve (40°C pendant 7 jours). Pendant toute la phase de croissance, l'alimentation hydrique est assurée par des arrosages quotidiens manuels équivalents à des apports de 4 mm/jour. Les arrosages sont arrêtés 3 jours avant le début des pluies simulées pour obtenir des humidités de surfaces comparables. Un épandage d'engrais est effectué au 15^e jour, lors du premier sarclage (6-20-10), 75 kg/ha).

. Une seconde série d'études s'est déroulée sur la station de Sonkorong afin de tester l'efficacité anti-érosive du décompactage du sol en traction bovine, en conditions sèches. Le matériel testé est une réplique locale du coutrier mis au point par le CIRAD-SAR et a suscité de nombreux travaux de recherches antérieurs (Garin et Sene, 1989 ; Juncker et Sene, 1990). Ce décompacteur mono-dent permet d'atteindre, en conditions optimales, une profondeur de 15 cm. Deux campagnes de mesures ont été effectuées :

- comparaison entre sol nu et sol décompacté, écartement 45 cm, précédent arachide,
- comparaison entre sol nu et sol décompacté, écartement 45 cm, précédent mil,

. Dans tous les cas, le même protocole de trois pluies standardisées a été appliqué. On dispose de deux répétitions par traitement, l'une d'entre elles est équipée d'un dispositif tensiométrique permettant le suivi des caractéristiques hydrodynamiques sous la surface du sol. En outre, la rugosité, les états de surface et l'humidité du sol sont relevés périodiquement (Figure 54). Nous incluerons dans ce dispositif, les nombreuses études de laboratoire menées, au sein du Laboratoire de Gestion Physique des Sols (LAGEPHY, ENSA Montpellier/CIRAD), sur des échantillons de sols des stations de Sonkorong, de Nioro et du bassin versant S4. La détermination granulométrique, l'analyse de l'espace poral par porosimétrie au mercure et l'étude du compactage dynamique sur cylindre sont appliqués à des échantillons provenant de l'horizon superficiel des sols afin de caractériser leur aptitude à l'encroûtement.

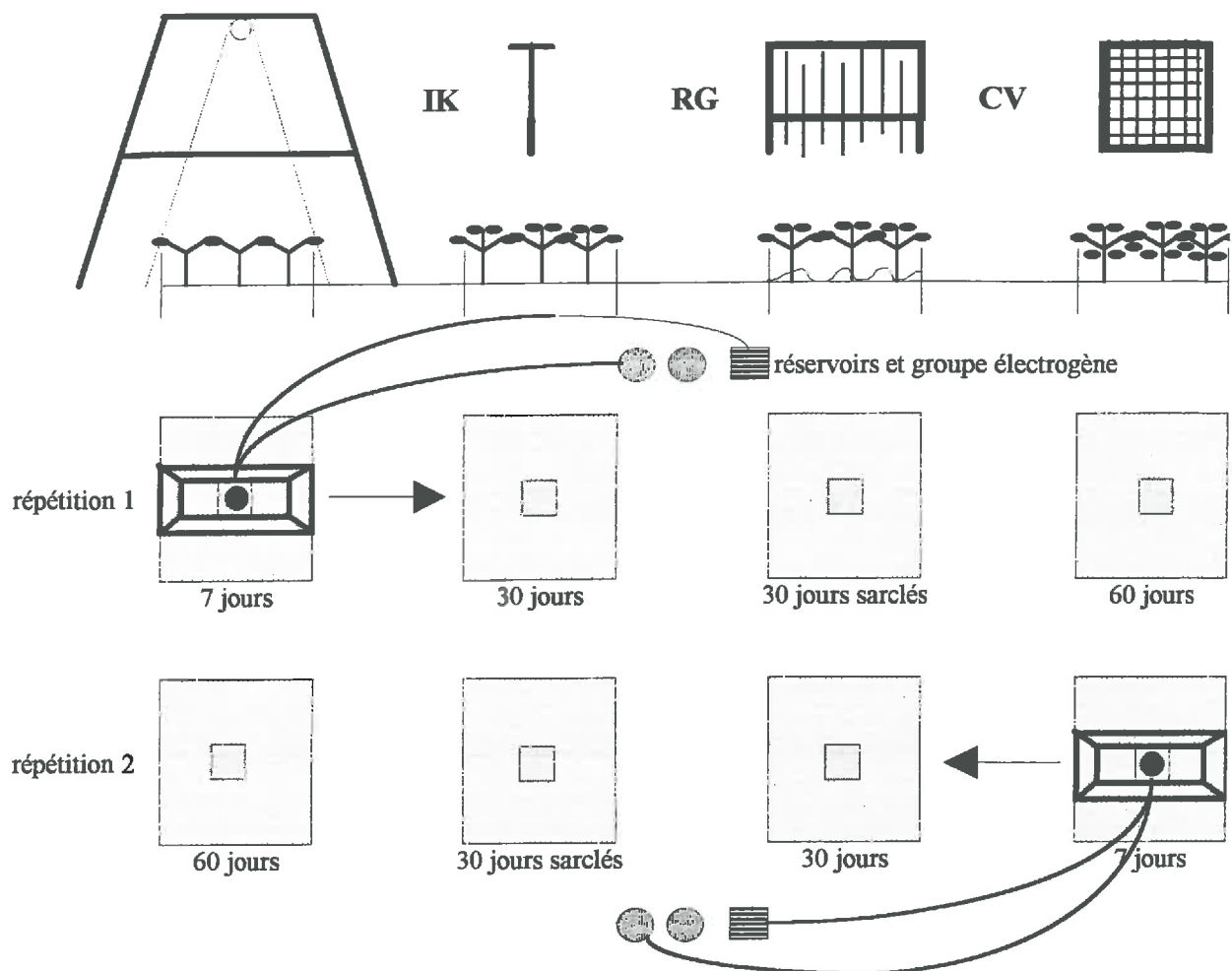


Figure 40 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier le rôle d'un couvert d'arachide sur le ruissellement. Utilisation simultanée de deux simulateurs de pluie (1 m²).

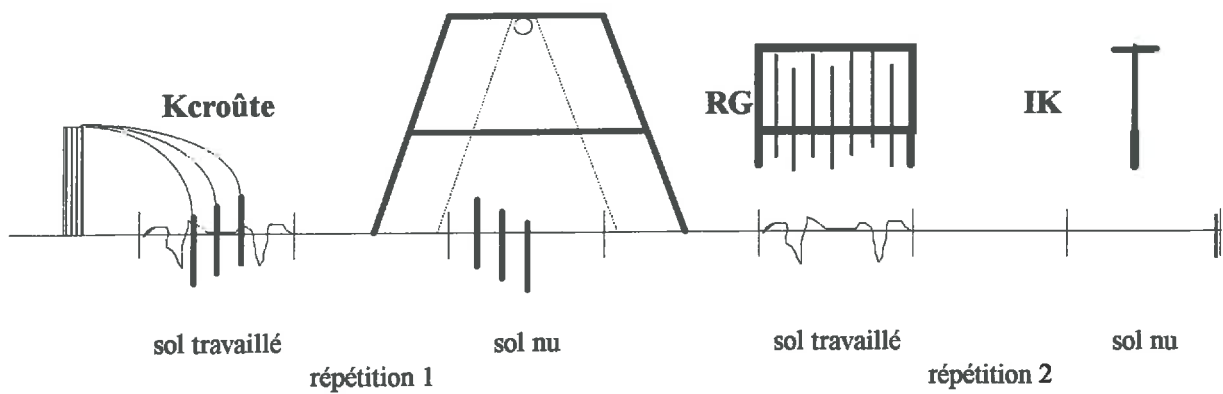


Figure 41 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier l'influence du décompactage du sol, en sec, sur le ruissellement.

QUATRIEME PARTIE :

**APPORTS DU SIMULATEUR DE PLUIE DANS
L'ANALYSE DES FACTEURS DE RUISSELLEMENT**

4 ETUDE DE LA VARIABILITE DU RUISSELLEMENT LE LONG DE LA TOPOSEQUENCE :

4.1 Protocole d'étude :

. Trois sites ont été choisis au sein du bassin versant S2, dit de Keur Dianko. Le premier (KD2) correspond à la terrasse colluvio-alluviale, le second (KD3) au glacis d'épandage et le dernier (KD4) à la bordure du plateau cuirassé. Afin de décrire une toposéquence complète, un quatrième site a été choisi dans le bas-fond de Keur Samba Diama situé à proximité (KD1).

. Pour chaque site, trois parcelles d'expérimentation sont installées (1x1 m²), caractéristiques d'états de surface différents. Sans être exhaustif, le choix effectué couvre la majeure partie des unités cartographiques définies par Valentin (1990) sur ce même bassin versant. La description des parcelles est réalisée selon la méthode proposée par Casenave et Valentin (1989) (tableau 19). On obtient une proportion de 60 % de parcelles cultivées et 40 % de parcelles sous végétation naturelle représentative de l'occupation du sol sur les versants proches.

. Il a paru intéressant de reconduire le protocole de simulation de pluie utilisé par Albergel (1987) pour la zone sahélienne. En effet, le rôle déterminant des intensités de pluie et des temps de ressuyage sur la modification des états de surface interdit toute comparaison de résultats entre protocoles trop éloignés et nécessite une certaine standardisation à des fins de modélisation.

. Le protocole adopté consiste en cinq pluies appliquées successivement sur chaque parcelle (Tableau 20). Les deux types de pluie simulée correspondent à des pluies naturelles de récurrences annuelle et décennale, définies dans les conditions climatiques du Burkina Faso. Il convient, dans un premier temps, de vérifier que leurs caractéristiques sont adaptées à notre région d'étude. Pour ce faire, on a comparé les hyétogrammes simulés à ceux fournis par Dacosta (1992) dans son étude fréquentielle des précipitations dans le sud Saloum (Figure 42). On constate que les formes générales sont respectées ainsi que les valeurs d'intensité pluviométrique de pointe. Les ondées préliminaires n'étant pas prise en compte dans l'analyse fréquentielle, nous avons conservé les caractéristiques originales de durée et d'intensité.

Pluie	P1	P2	P3	P4	P5
Lp (mm)	96.7	61.7	61.7	61.7	96.7
Tr (h)	sec	70	12	48	12

Tableau 20 : Protocole de simulations de pluies adopté. Hauteurs d'eau précipitées (Lp) et temps de ressuyage (Tr).

. Pour chaque parcelle, on analyse les paramètres hydrologiques suivants :

- lames ruisselée (**L_r**) et infiltrée (**L_i**) par averse,
- coefficients de ruissellement (**K_r**) et d'infiltration (**K_i**) par averse,
- pluie d'imbibition (**L_{pi}**) par averse, assimilée à la notion de "précipitation limite de ruissellement",
- intensités maximales de ruissellement (**R_x**) et minimale d'infiltration (**F_n**) par averse, qui permettent d'accéder à la notion "d'intensité limite de ruissellement",
- cinétiques d'infiltration (**F(t)**) pour chaque averse.

. Ces critères sont mis en rapport avec les caractéristiques des états de surface initiaux et finaux observés. Les parcelles KD22 et KD32 font l'objet d'un suivi hydrique par prélèvements gravimétriques afin de mettre en relation la lame infiltrée et le stock d'eau du sol et vérifier la validité de l'indice d'humectation IK, défini précédemment.

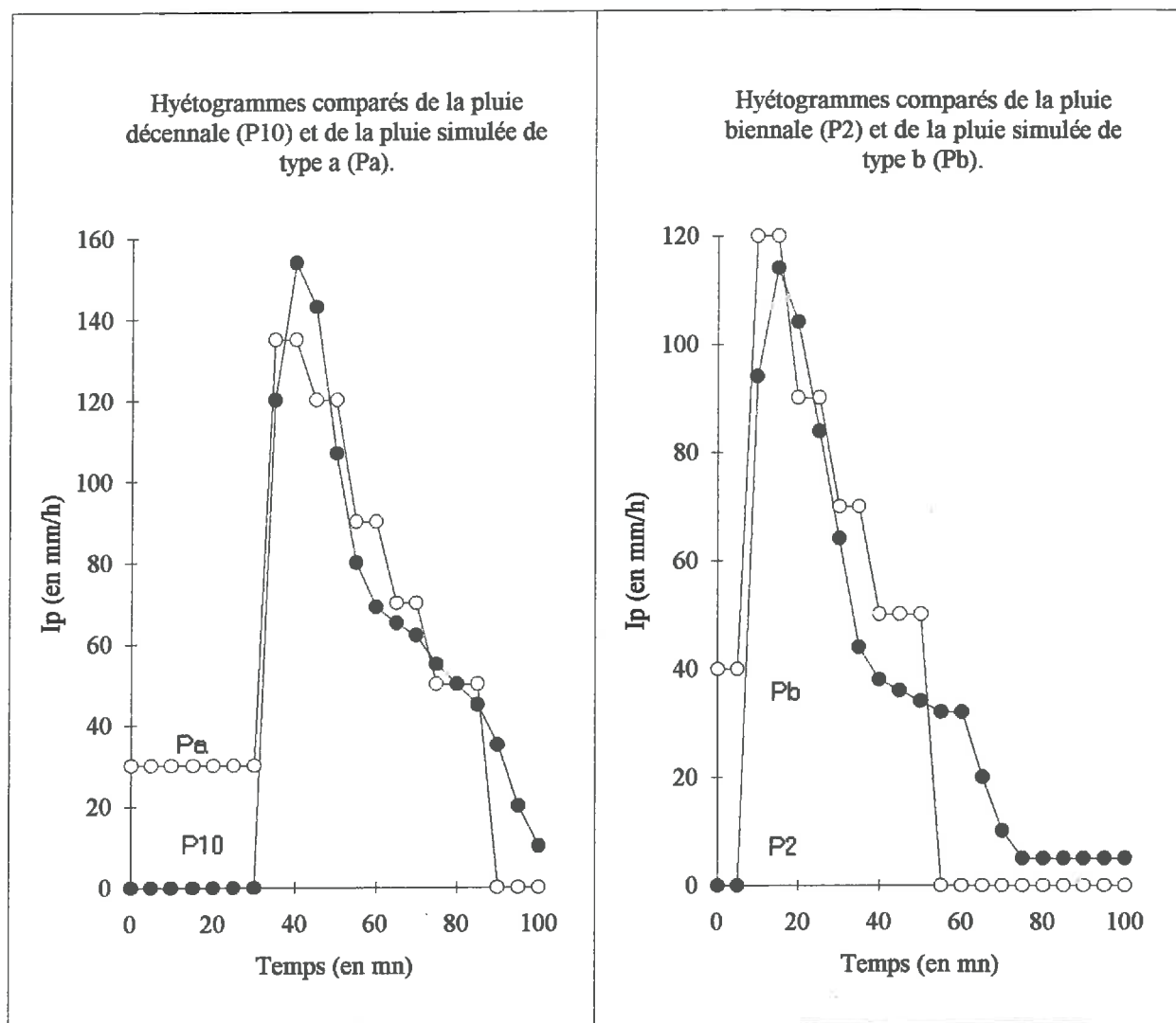


Figure 42 : Hyétogrammes comparés des pluies simulées de types a et b et des pluies naturelles de récurrence décennale et biennale. Sud-Saloum. (Source: Dacosta, 1992).

4.2 Etude des lames ruisselées et infiltrées :

4.2.1 Analyse globale :

. Les valeurs de lame ruisselée et de coefficient de ruissellement sont reportées dans le tableau 21. Les valeurs de lame infiltrée et de coefficient d'infiltration s'en déduisent aisément. Aucun incident majeur n'a été relevé, hormis sur la parcelle KD41 où une erreur de manipulation conduit à un allongement de la première pluie dont la hauteur d'eau augmente sensiblement ($L_p = 116,7$ mm).

. Dans le bas-fond, la grande variabilité des coefficients de ruissellement traduit l'hétérogénéité pédologique rencontrée, depuis les sols argilo-sableux (KD12), jusqu'aux sols sableux de berge (KD13). Sur la terrasse colluvio-alluviale, les phénomènes de réorganisation de surface sont limités et le ruissellement ne représente que 17 % à 26 % de la hauteur de pluie cumulée. A l'inverse, les sols de glacis se dégradent rapidement dès la première ou seconde averse et ne parviennent à infiltrer qu'un quart du total pluviométrique (K_r : 73 à 77 %), sauf si le sol reste correctement protégé (KD33). Les mêmes résultats, fortement amplifiés, sont obtenus sur la bordure du plateau cuirassé où les surfaces nues et encroûtées constituent de véritables impluviums dont la capacité d'infiltration n'excède pas 5 % (KD41). Nous obtenons ainsi une confirmation quantifiée des hypothèses émises lors de l'étude morphopédologique de la zone d'étude (Chapitre 1.7.2) :

- l'aptitude au ruissellement décroît du haut vers le bas de la toposéquence, en fonction des états de surface ;
- localement cette hiérarchisation est nuancée par le mode d'occupation du sol, en particulier le taux de couverture assuré par la végétation ou la litière disponible.

4.2.2 Analyse des corrélations :

. Ces comportements nuancés sont mis en évidence lors de l'établissement de la matrice des corrélations entre caractéristiques physiques initiales des parcelles et les lames infiltrées totales (L_i). Le faible nombre d'observations impose de définir des classes très synthétiques pour les paramètres qualitatifs :

- occupation du sol (OS) :
 - précédent céréale = 1
 - précédent arachide = 2
 - jachère ou végétation naturelle = 3
- taux de couverture (CV) :
 - $CV (\%) = \text{veg. morte} (\%) + \text{veg. vivante} (\%) + \text{litière} (\%)$
- activité de la meso-faune (MF) :
 - $MF (\%) = \text{termites} (\%) + \text{autres insectes} (\%)$
- rugosité du relief initial (RG) :
 - aucun = 1
 - rugosité faible = 2
 - rugosité moyenne = 3
- états de surface élémentaires (ESE) :
 - absence de pellicule, placages sableux = 1
 - pellicule fine peu individualisée = 2
 - pellicule consolidée, gravillons éventuels = 3

Tableau 19 : Descriptions des états de surface initiaux des parcelles de ruissellement (1 m²). Bassin versant S2.

Parcelle	Situation	Occupation du sol	Végétation (%)	Litière (%)	Relief	Mesofaune	Etat de surface
KD11	bas-fond	précédent maïs	0	30	néant	0	couverture sableuse (4 cm)
KD12	bas-fond	précédent riz	1	5	faible(1 cm)	0	croute de dessiccation
KD13	bas-fond	précédent mil	25	15	faible(3 cm)	0	couverture sableuse (2 cm)
KD21	terrasse	jachère	90	0	néant	0	couverture sableuse (2 cm)
KD22	terrasse	précédent arachide	20	0	faible(2 cm)	15	couv.sableuse + croute structurale
KD23	terrasse	précédent mil	0	40	néant	0	croute structurale
KD31	glacis	précédent arachide	0	0	faible(1 cm)	5	couv.sableuse + croute structurale
KD32	glacis	précédent arachide	5	0	faible(2 cm)	5	croute structurale
KD33	glacis	jachère	80	0	néant	5	croute structurale
KD41	plateau	brousse dégradée	0	0	néant	0	croute ruissellement /érosion
KD42	plateau	brousse dégradée	80	0	néant	30	croute structurale
KD43	plateau	brousse dégradée	5	0	néant	0	épandage de graviers

Tableau 21 : Lames ruisselées (Lr en mm) et coefficients de ruissellement (Kr en %) obtenus pour chaque averse du protocole.

Parcelle	Pluie 1		Pluie 2		Pluie 3		Pluie 4		Pluie 5		Total	
	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr
KD11	37.6	38.9	30.1	48.8	36.3	58.8	32.3	52.4	68	70.3	204.3	55.4
KD12	78.4	81.1	52.4	84.9	58.5	94.8	54.5	88.3	88.4	91.4	332.2	90.1
KD13	34.3	35.5	9.6	15.6	22	35.7	18.7	30.3	43.5	45	128.1	34.8
KD21	34.1	35.3	3.5	5.7	14	22.7	7.6	12.3	37.6	38.9	96.8	26.3
KD22	22.4	36.3	24.9	40.4	35.8	58	35	56.7	55.7	57.6	90.7	24.6
KD23	9.6	15.6	5	8.1	6.1	9.9	8.1	13.1	34.9	36.1	63.7	17.3
KD31	63	65.1	44.2	71.6	47.3	76.7	46.3	75	81.3	84.1	282.1	76.6
KD32	54.4	56.3	37.7	61.1	49.2	79.7	47.4	76.8	81.3	84.1	270	73.3
KD33	37.8	39.1	16.7	27.1	27.4	44.4	21.8	35.3	60.1	62.2	163.8	44.5
KD41	107.2*	91.9*	49.5	80.2	54.4	88.2	55.5	90	91.4	94.5	358	94.5
KD42	48.9	50.6	32.1	52	41	66.5	35.8	58	59.8	61.8	217.6	59.1
KD43	55.4	57.4	41.2	66.8	47.1	76.3	44.8	72.6	81	83.8	269.6	73.2

(valeur obtenue pour Lp = 116.7 mm)

- type de sol (SOL) :
 - sol peu évolué d'apport alluvial, hydromorphe = 1
 - sol peu évolué d'apport alluvial ou
 - sol ferrugineux tropical lessivé sur colluvio-alluvions = 2
 - sol ferrugineux tropical gravillonnaire sur carapace = 3

Les coefficients de corrélation sont faibles (Tableau 22). Seuls trois liaisons sont significatives au seuil de 5 % : CV/Li (0,642), SOL/OS (0,752) et SOL/ESE (0,644). Un fort taux de couverture (CV) entraîne toujours une augmentation de la lame infiltrée et pondère les écarts issus des différences morphopédologiques (SOL). Ces dernières influencent fortement les états de surface initiaux rencontrés (ESE). Le faible impact de la rugosité initiale (RG) ou de l'activité de la meso-faune (MF) doit être relié à la faible diversité des situation rencontrées pour ces deux paramètres.

	Li	OS	CV	MF	RG	ESE	SOL
Li	1	-0.328	0.58	0.291	0.131	-0.437	-0.456
OS		1	0.319	0.336	-0.456	0.466	0.752
CV			1	0.379	-0.392	-0.19	-0.412
MF				1	-0.084	0.517	0.341
RG					1	-0.243	-0.311
ESE						1	0.644
SOL							1

Tableau 22 : Matrice des corrélations entre caractéristiques physiques initiales et la lame infiltrée totale (Li).

. La figure 43 regroupe les courbes des lames ruisselées cumulées en fonction des hauteurs précipitées sur l'ensemble du protocole. On remarque que deux familles de courbes se différencient : la première caractérisée par une réponse quasi-linéaire et de fortes valeurs de pentes, constituée par les parcelles les plus ruisselantes, et la seconde caractérisée par de multiples ruptures de pente et des valeurs finales de ruissellement beaucoup plus faibles (KD13, KD21, KD23, KD33).

. Sur l'ensemble des 60 pluies enregistrées, moins de 12 % entraînent des coefficients de ruissellement inférieurs à 15%. Environ un tiers des averses engendrent des pertes en eau supérieures à 75 %. Tout en gardant en mémoire le caractère exceptionnel des pluies simulées, force est de constater l'importance des processus de ruissellement à l'échelle de la surface élémentaire.

4.3 Etude de la pluie d'imbibition :

. Suivant la définition donnée par Lafforgue (1977), la pluie d'imbibition (L_{pi}) correspond à la hauteur de pluie entièrement infiltrée ou stockée en surface en début d'averse, avant l'apparition du ruissellement. Le dépouillement des données est effectué graphiquement à partir des limnigrammes enregistrés, un exemple de détermination des valeurs de L_{pi} est fourni à la figure 44, pour la parcelle KD22. L'ensemble des valeurs est consigné dans le tableau 23.

. Dans la majorité des cas, les valeurs de pluie d'imbibition diminuent fortement dès la seconde averse et se stabilisent à un palier d'autant plus faible que la surface est plus ruisselante. Toutefois, on observe pour les parcelles KD21, et KD23, une augmentation des valeurs entre la 4ème et la 5ème pluie du protocole, ce comportement sera discuté plus loin. L'état d'humectation initial du sol, appréhendé à travers l'indice pluviométrique IK influence directement la valeur prise par L_{pi} (Casenave, 1982; Thèbe, 1987). Pour la première pluie ($IK = 0$), on peut définir une pluie d'imbibition en condition sèche (L_{pis}) dont les valeurs fluctuent entre 20 et 25 mm, sauf pour les parcelles KD12, KD31, KD41 et KD43 caractérisées par des valeurs beaucoup plus faibles (2 à 13 mm).

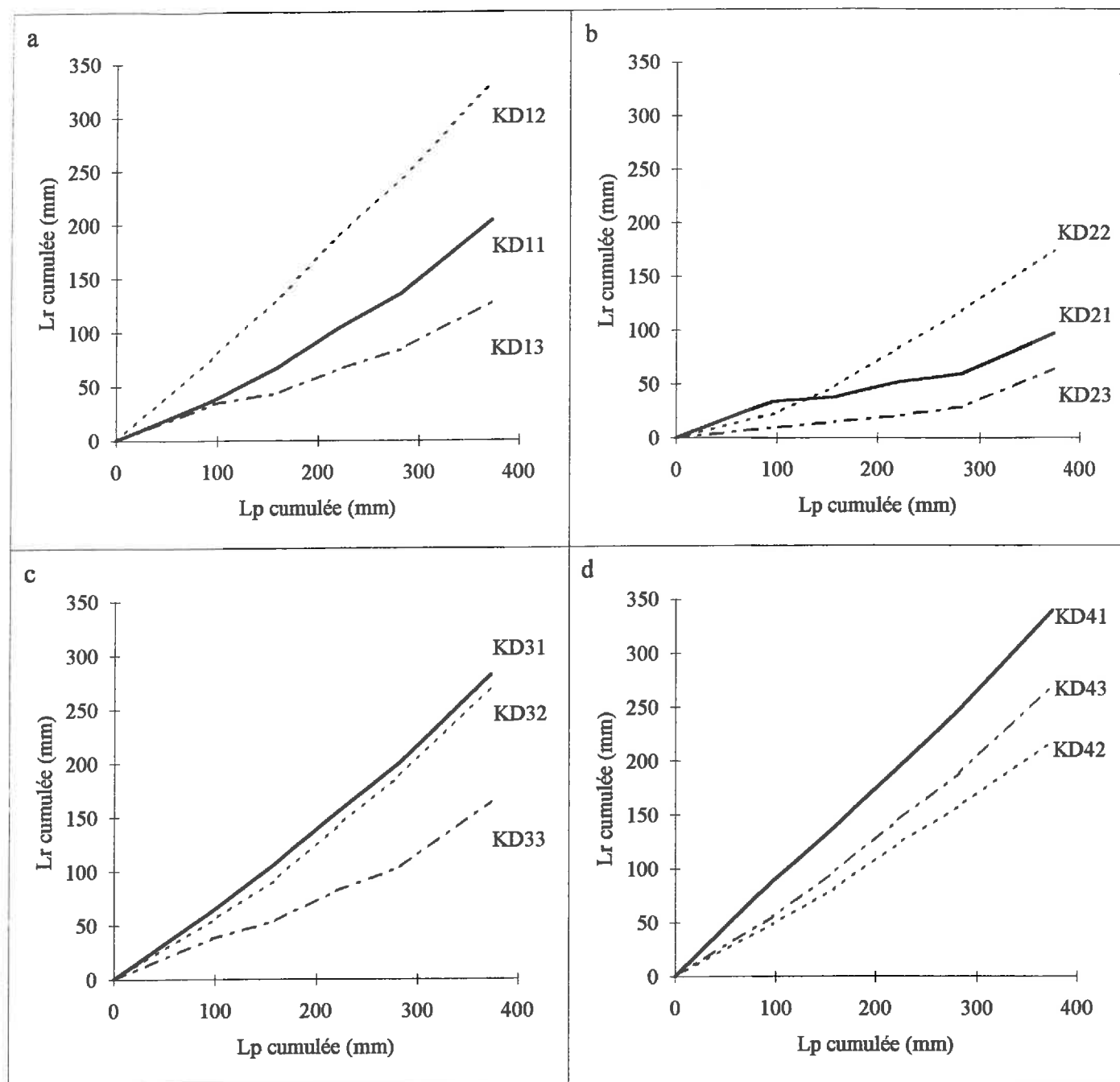


Figure 43 : Relations entre les lames ruisselées (Lr) et précipitées (Lp) cumulées sur l'ensemble du protocole. Sites de bas-fond (a), de terrasse (b), de glacis (c) et de plateau (d).

. De même, on peut définir une pluie d'imbibition en condition humide (**L_{pih}**) au regard des résultats obtenus lors de la cinquième pluie du protocole (IK = 90). Les valeurs sont alors beaucoup plus faibles et dépendent des niveaux de rugosité et d'infiltrabilité rencontrés en début d'averse : de 2 à 5 mm, sauf pour les parcelles KD13, KD21, KD23 et KD33 (9,5 à 22 mm).

Parcelle	Pluie 1	Pluie 2	Pluie 3	Pluie 4	Pluie 5
KD11	20	9.7	9	9	5
KD12	8	4	2.5	2.7	2.5
KD13	20	11	9.7	10.5	9.5
KD21	21.5	14.7	10.7	12.7	15
KD22	24	10	6.7	8.7	5
KD23	26.3	18.7	16.7	14.7	22
KD31	13.5	8	4	5.3	3
KD32	19.5	10	2.7	6.7	3
KD33	20.6	12.7	11.7	12.7	11
KD41	2	1	2	2.3	2
KD42	20.6	6.7	6.7	6.7	5.5
KD43	6.5	4	3.3	4	2.5

Tableau 23 : Pluies d'imbibition (L_{pi} en mm) obtenues pour chaque averse du protocole de simulation.

. Si on établit une matrice des corrélations entre les caractéristiques physiques initiales et les pluies d'imbibitions, on obtient des résultats analogues à ceux présentés pour la lame infiltrée totale (L_i). Le taux de couverture (CV) possède le seul coefficient représentatif au seuil de 5 %, à la fois pour L_{pis} (0,580) et L_{pih} (0,601). Les autres paramètres sont peu descriptifs (MF, RG) ou peu corrélés.

4.4 Etude de l'intensité limite de ruissellement :

4.4.1 Remarques préliminaires :

. D'après Lafforgue (1977), pour une pluie d'intensité constante, l'intensité minimale d'infiltration (F_n) peut être reliée à l'intensité maximale de ruissellement (R_x) et à l'intensité pluviométrique (I), lorsque le régime permanent est établi, par l'équation :

$$I - F_n - R_x = 0$$

. La valeur de F_n observée au cours d'un essai sur parcelle n'est pas une caractéristique définie et invariable de cette dernière, l'état d'humectation initial et l'intensité pluviométrique appliquée influencent l'infiltration en régime permanent. Le tracé de la courbe R_x = f(I), pour un état initial donné, permet de définir l'intensité limite de ruissellement (I_l) comme l'abscisse à l'origine de la courbe, telle que I = I_l pour R_x = 0. Comme pour la pluie d'imbibition, on peut envisager d'étudier :

- l'intensité limite de ruissellement en condition sèche (**I_{ls}** pour IK = 0),
- l'intensité limite de ruissellement en condition très humide (**I_{lh}** pour IK = 90).

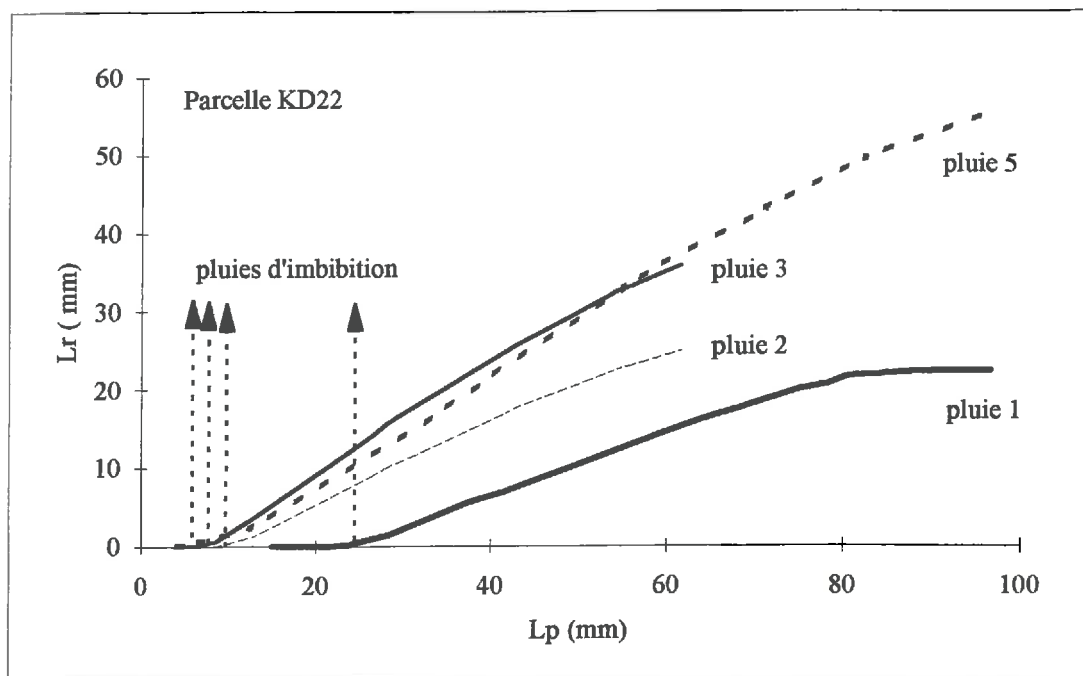


Figure 44 : Détermination des valeurs de pluie d'imbibition pour chaque pluie du protocole. Parcelle KD22.

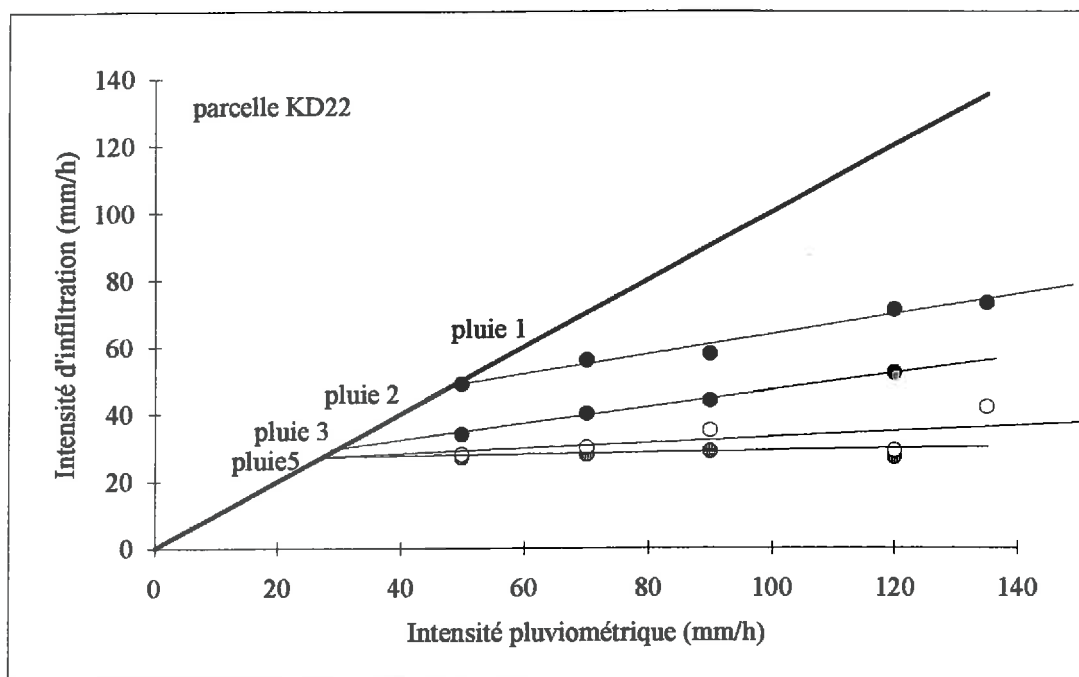


Figure 45 : Détermination des intensités limites de ruissellement (Il) à partir de la droite $F = I$, pour chaque pluie du protocole. Parcelle KD22.

. Ayant adopté un protocole fondé sur des pluies d'intensité variable, nous pouvons établir des couples de valeurs (I, Rs) ou (I, Fs) pour chaque séquence du hyétogramme d'intensité pluviométrique constante. La question qui se pose alors est de savoir si les intensités de ruissellement stabilisé (Rs) et d'infiltration stabilisée (Fs) définies dans ces conditions correspondent effectivement aux valeurs Rx et Fn (Albergel, 1987; Thèbe, 1987). Poss. et al. (1988) montrent, dans le cas des terres de Barre du Togo, qu'en condition initiale humide une séquence de dix minutes à intensité pluviométrique constante est suffisante pour obtenir $F_s = F_n$, quelle que soit la forme du hyétogramme utilisé. Ces auteurs estiment qu'au delà d'une période de ressuyage de trois jours le régime permanent d'infiltration s'établit dans un délai bien supérieur. De leur côté, Hoogmoed et Stroosnijder (1984) constatent que la dessiccation de la croûte superficielle d'un sol ferrugineux sableux renforce son rôle de barrière hydraulique lors des infiltrations suivantes.

. L'analyse des résultats issus de la première pluie d'un protocole de simulation, en général associée à un état initial sec ($IK = 0$), se heurte à un problème supplémentaire lié à la réorganisation des éléments de surface. Cette évolution dépend étroitement de l'instabilité de l'état structural étudié (sol nu sarclé, par exemple) et de l'énergie appliquée lors de l'aspersion (Poss et al., 1988; Collinet, 1988).

4.4.2 Résultats :

. Le dépouillement des données est effectué graphiquement à partir des droites de régression $F_s = f(I)$ calculées pour chaque pluie du protocole. Le point d'intersection avec la droite $F_s = I$ donne la valeur de l'intensité limite de ruissellement (Il). Les valeurs de Ils et Ilh sont définies pour la première ($IK = 0$) et la dernière pluie ($IK = 90$) du protocole, tout en gardant en mémoire le fait que les intensités limites de ruissellement en condition sèche sont entièrement tributaires du mode opératoire. Reprenons l'exemple de la parcelle KD22 : Il prend successivement les valeurs 49, 30, 27 28 et 27 mm/h pour les cinq averses étudiées (Figure 45). La décroissance rapide des valeurs puis leur stabilisation dès la troisième pluie s'accompagne d'une réduction progressive de la pente des droites de régression liée à l'homogénéisation de la surface de la parcelle.

. L'intensité limite de ruissellement en condition initiale sèche (Ils) varie fortement selon les situations. Les sols sableux de bas de toposéquence permettent d'atteindre des valeurs de 31 à 60 mm/h quel que soit l'état de surface rencontré. Sur le glacis et le plateau les résultats sont beaucoup plus contrastés mais les valeurs restent inférieures à 33 mm/h (Tableau 24). Trois parcelles se distinguent par des valeurs très faibles de Ils : KD12 (6,0 mm/h), KD31 (7,0 mm/h) et KD41 (1,0 mm/h). Ces mêmes parcelles se distinguaient déjà par leurs valeurs de pluie d'imbibition. **La rapidité de dégradation de la surface se traduit donc également par la mise en place d'une solide barrière hydraulique.**

. Lors de la cinquième averse du protocole, l'intensité limite de ruissellement (Ilh) diminue et les écarts entre situations deviennent plus faibles : de 20 à 39 mm/h sur les sols sableux de bas de toposéquence et de 2 à 19 mm/h pour les sols de glacis et de plateau. La parcelle sur sol hydromorphe de bas-fond (KD12) est à rapprocher du second groupe. **Notons, dès à présent, l'influence bénéfique de la couverture sur les caractéristiques hydrodynamiques finales dans le cas des parcelles KD21, KD23, KD33 et KD42.**

. La matrice des corrélations établie entre les caractéristiques physiques et les intensités limites de ruissellement ne présente pas de liaisons décisives dans le cas de Ils. En revanche, Ilh manifeste une liaison significative avec le taux de couverture (CV). Les autres paramètres sont peu descriptifs ou peu corrélés.

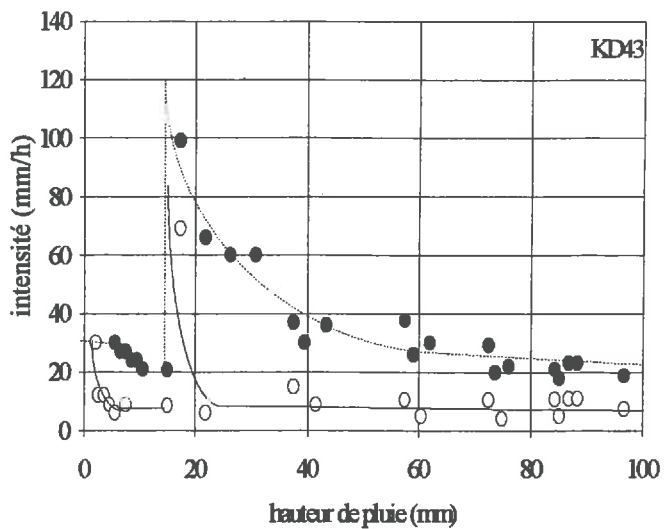
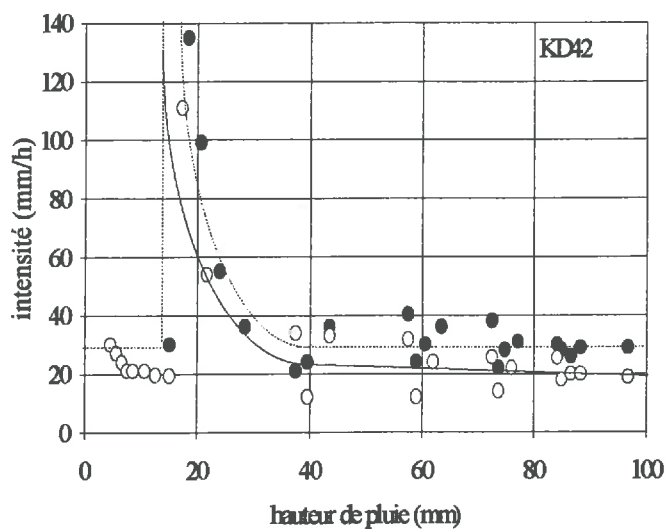
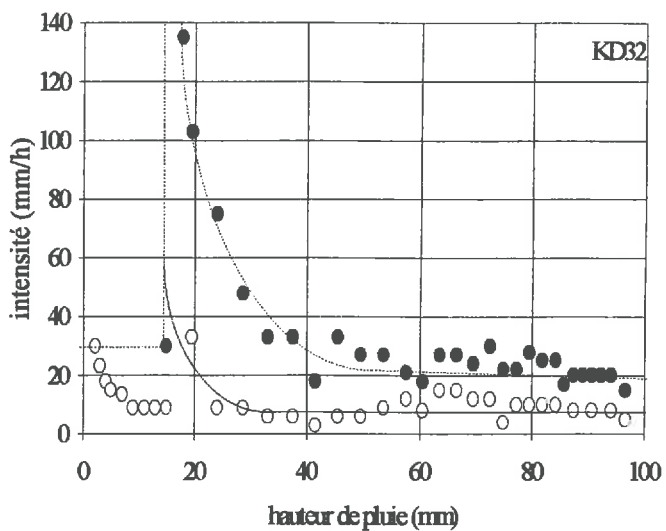
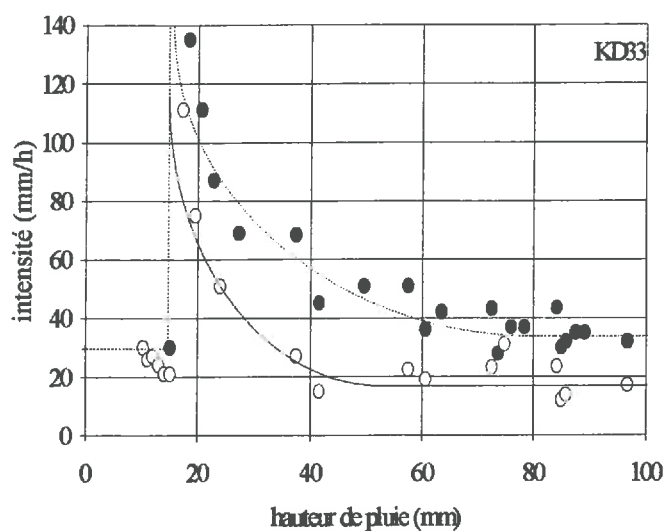
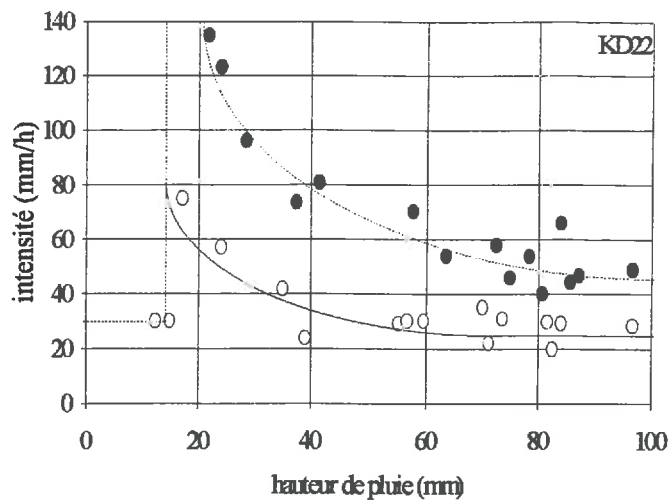
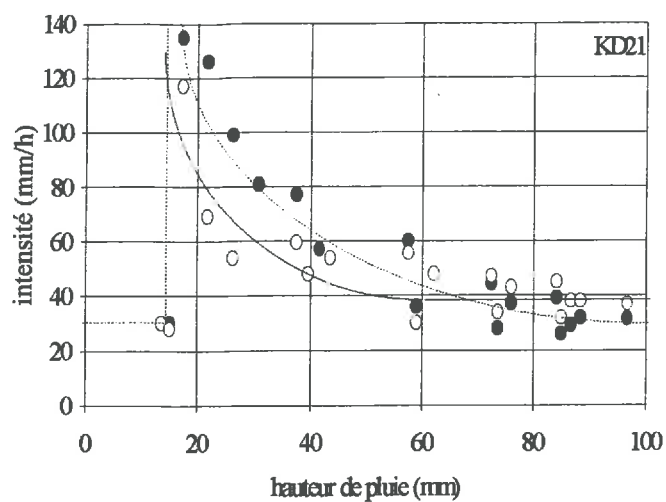


Figure 46 : Evolutions des intensités d'infiltration (F en mm/h) en fonction des lames précipitées cumulées (L_p en mm), pour les premières (●) et dernières (○) pluies du protocole. Parcelles KD21, KD33, KD42, KD22, KD32 et KD43.

Parcelle	Ils mm/h	Ilh mm/h
KD11	45	20
KD12	6	2
KD13	42	28
KD21	31	37
KD22	49	28
KD23	50	39
KD31	7	2
KD32	14	5
KD33	33	17
KD41	1	2
KD42	29	19
KD43	19	7

Tableau 24 : Intensités limites de ruissellement en conditions sèches (Ils) et humides (Ilh), correspondant, respectivement, aux premières et dernières pluies du protocole.

4.5 Etude des cinétiques d'infiltration :

4.5.1 Analyse à l'échelle de l'averse :

. Pour chaque événement pluvieux, l'intensité d'infiltration (F) peut être mise en relation avec la hauteur de pluie cumulée (Lp). Les cinétiques d'infiltration ont été étudiées pour les 1ère et 5ème pluies du protocole, correspondant respectivement à un état initial sec et à un état final humide et réorganisé. Les hyétoigrammes utilisés sont identiques et permettent une comparaison des évolutions sur chaque parcelle. La figure 46 regroupe les cinétiques obtenues pour les parcelles KD21, KD33, KD42 et KD22, KD32, KD43 ; les trois premières sont caractérisées par des taux de couverture importants (CV > 80 %) alors que les secondes offrent des surfaces fortement dénudées.

. Si on exclut l'ondée préliminaire (Lp < 15 mm) de faible intensité pluviométrique (I = 30 mm/h), l'ensemble des courbes présente une forme exponentielle décroissante dont la courbure et l'asymptote horizontale sont liées aux conditions initiales du milieu. Morin et Benyamini (1977), reprenant les travaux de Horton (1940), proposent une formulation du type:

$$F = F_f + (F_i - F_f) e^{-\gamma L_p}$$

avec F_i : valeur asymptotique de l'intensité d'infiltration initiale
 F_f : valeur asymptotique de l'intensité d'infiltration finale
 γ : paramètre de courbure

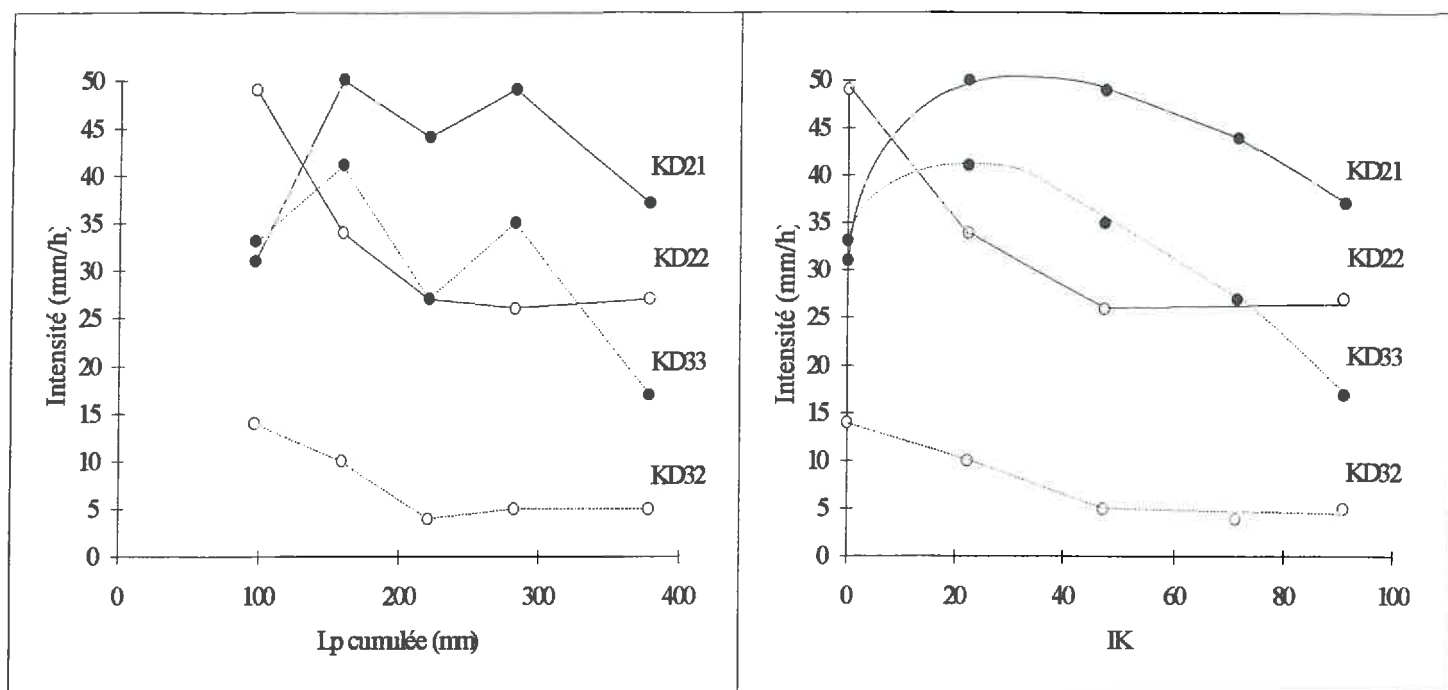


Figure 47 : Evolutions des valeurs d'intensité d'infiltration stabilisée (F50) en fonction des hauteurs d'eau cumulées (a) ou des indices de pluies antérieures (b). F50 correspond à la valeur de F_s à la fin de chaque pluie ($I = 50 \text{ mm/h}$). Parcelles KD21, KD22, KD32 et KD33.

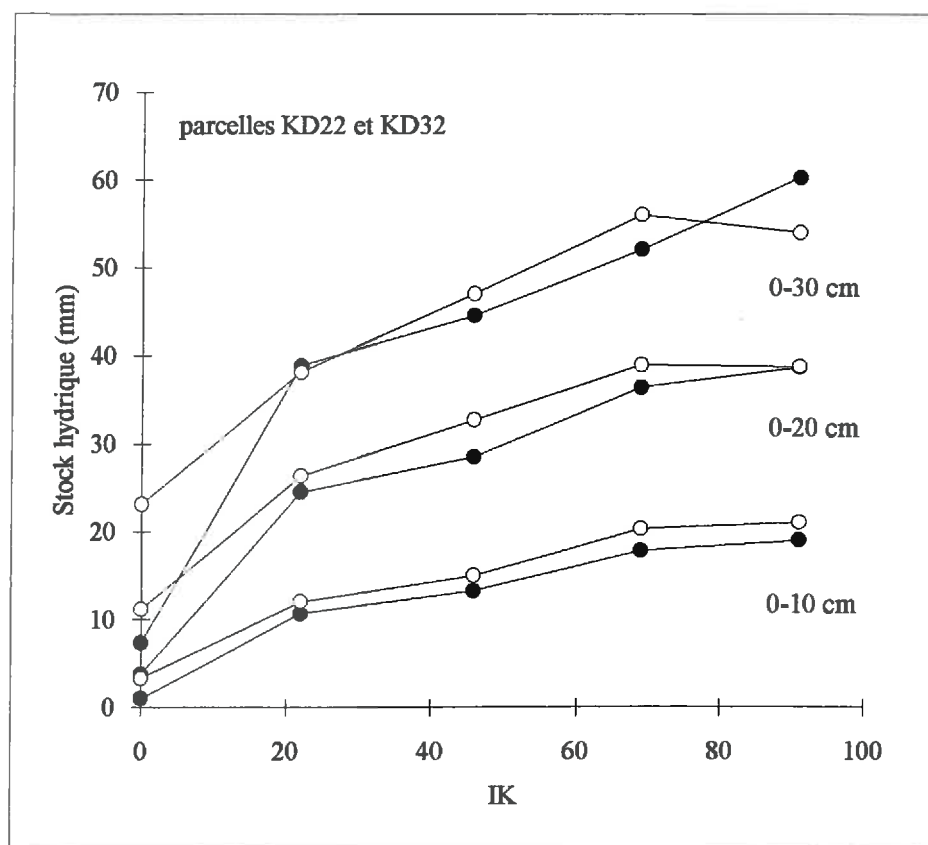


Figure 48 : Relations entre les stocks hydriques mesurés à différentes profondeurs et l'indice de pluie antérieure (IK). Parcelles KD22 (●) et KD32 (○).

. Nous avons tenté d'ajuster cette fonction aux données expérimentales, l'optimisation des paramètres étant obtenue par la méthode de Marquardt. Les valeurs de F_i et γ sont approximatives dans la majorité des cas, le paramètre F_f est mieux défini et correspond aux valeurs observées. L'utilisation de hyétogrammes d'intensité variable perturbe l'ajustement; en effet, chaque changement dans le régime pluviométrique se traduit par de fortes fluctuations des valeurs d'infiltration (Albergel, 1987). Cependant, l'examen des courbes et des valeurs des paramètres de régression (tableau 25) permet de tirer quelques conclusions :

- il existe une nette différence de comportement entre la première et la dernière pluie du protocole. On note à la fois une diminution de la valeur du seuil d'infiltration (F_f) et une augmentation de la concavité (γ). **Si on établit un lien direct entre le comportement hydraulique et l'état de surface du sol, les parcelles atteignent plus rapidement un état de dégradation plus avancé en fin de protocole ;**

- un couvert végétal important réduit les différences entre les valeurs de seuil (F_f) et de concavité (γ) constatées précédemment. **Les caractéristiques de surface évoluent donc plus lentement et l'état final semble moins dégradé;**

- **l'évolution de la surface du sol débute beaucoup plus tôt, en condition humide, sur les sites de milieu et de haut de versant (KD32 et KD43).** L'intensité d'infiltration décroît durant l'ondée préliminaire pour atteindre, dans la plupart des cas, une valeur proche du seuil (F_f). Le phénomène est enregistré dès la première pluie sur la parcelle KD43.

Parcelle	couverture (%)	F_f	$(F_i - F_f)$	γ	r^2
KD21 sec	90	27.09	120.69	0.043	0.96
KD21 humide	90	43.05	106.88	0.19	0.84
KD22 sec	20	49	124.8	0.059	0.93
KD22 humide	20	28.35	74.24	0.14	0.91
KD33 sec	80	36.91	119.82	0.087	0.97
KD33 humide	80	19.9	124.25	0.158	0.94
KD32 sec	5	22.58	166.4	0.136	0.97
KD32 humide	5	8.7	1645.7	0.843	0.72
KD42 sec	80	29.12	204.15	0.208	0.95
KD42 humide	80	21.95	131.38	0.196	0.92
KD43 sec	5	22.12	82.86	0.067	0.94
KD43 humide	5	8.82	670.12	1.205	0.96

Tableau 25 : Valeurs des paramètres d'ajustement de la fonction $F = F_f + (F_i - F_f)e^{-\gamma \cdot L_p}$ pour les premières (état sec) et les dernières pluies (état humide) du protocole. Parcelles KD21, KD22, KD32, KD33, KD42 et KD43.

4.5.2 Analyse à l'échelle du protocole complet :

. L'étude des cinétiques d'infiltration sur l'ensemble du protocole de simulation se heurte au problème des changements de types de pluie. Pour clarifier la présentation, nous avons privilégié les valeurs d'infiltration stabilisée enregistrées lors de la dernière plage d'intensité pluviométrique constante ($I = 50 \text{ mm/h}$) pour chaque événement pluvieux.

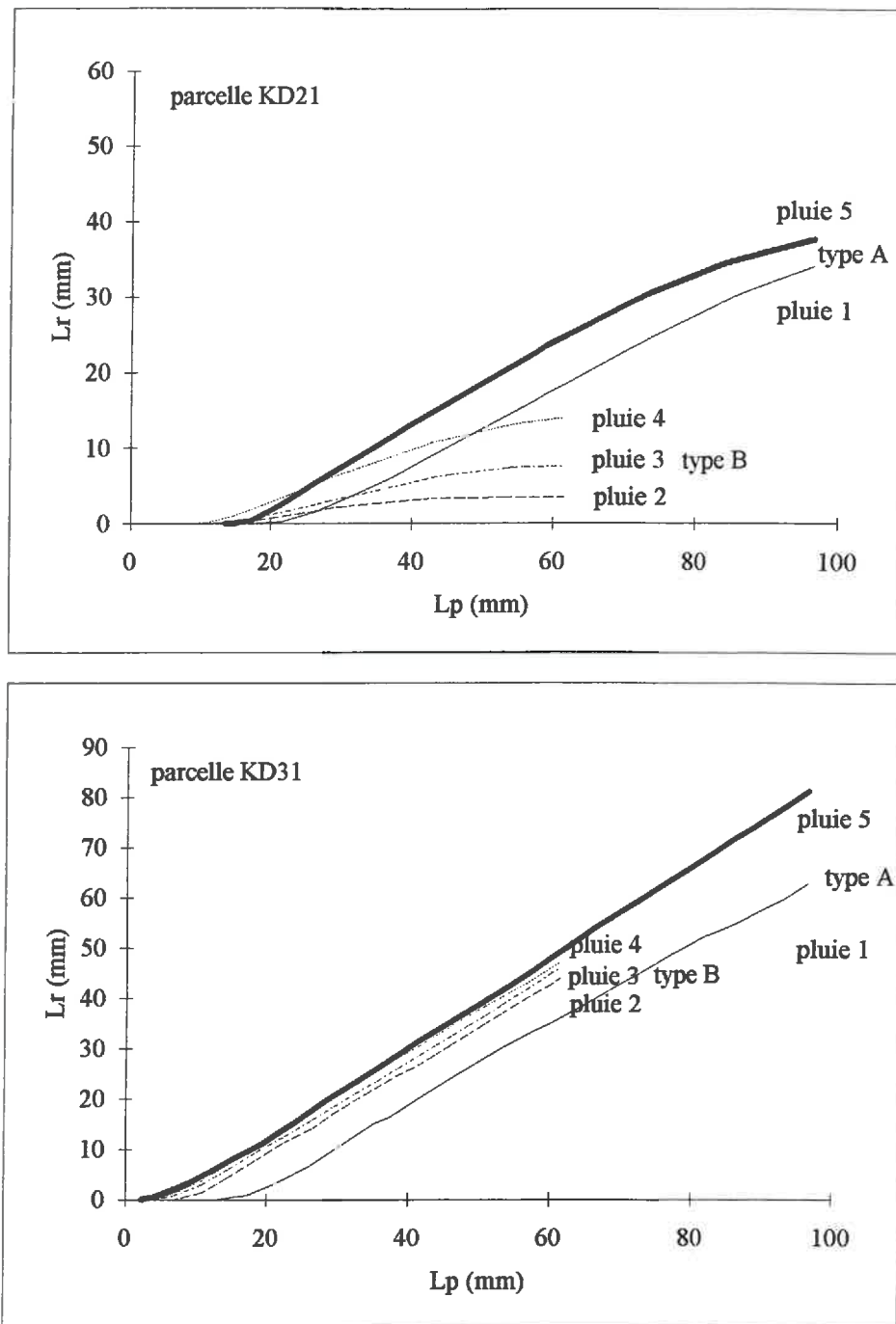


Figure 49 : Relations entre les lames ruisselées (Lr) et précipitées (Lp) pour chaque pluie du protocole. Influence du type de pluie (A ou B) sur la réponse des parcelles KD21 et KD31.

. Les valeurs d'infiltration (F_{50}) sont mises en relation avec les hauteurs de pluie cumulées des cinq averses (figure 47). L'influence de l'état hydrique du sol, dans le cas des parcelles KD21 et KD33, est mise en évidence par la relation entre l'intensité d'infiltration (F_{50}) et l'indice des pluies antérieures (IK). **Pour un même site d'étude, il existe donc une opposition entre des surfaces très exposées (sol nu), à réorganisation continue et rapide, et des surfaces bien protégées dont l'évolution est beaucoup plus lente et liée à l'histoire hydrique** (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984). Le comportement paradoxal des parcelles KD21 et KD33 lors de la première pluie, également perceptible sur KD13, est lié aux différences d'énergies cinétiques mises en jeu entre les deux types de pluie utilisés.

4.6 Modélisation des lames ruisselées :

. Les études menées sous simulation de pluies, standardisées et répétitives, ont un intérêt descriptif évident. S'il est possible de multiplier les sites de mesure à des fins de comparaison, il paraît plus raisonnable d'opter pour une utilisation prédictive des résultats accumulés. **Notre objectif est de fournir un modèle fonctionnel et bien adapté aux conditions sahéliennes**. A ce titre, la démarche poursuivie par de nombreuses équipes de recherche en zone sahélienne est intéressante (Casenave, 1982; Albergel, 1987; Casenave et Valentin, 1991). La formulation de la lame d'eau ruisselée qui en découle repose sur les interprétations graphiques successives des relations (Chapitre 2.3.1):

$$Lr = a_1 Lp + b_1 \quad (1)$$

$$Lr = a_2 IK + b_2 \quad (2)$$

Ainsi, pour chaque parcelle étudiée et pour l'ensemble des cinq pluies du protocole, (1) + (2) permet d'obtenir :

$$Lr = aLp + b IK + cLpIK + d \quad (3)$$

. Nous avons repris la même méthode, dans les conditions suivantes :

- chaque pluie du protocole est découpée suivant les hauteurs précipitées suivantes : 20, 30, 40, 60 et 80 mm. Cette dernière valeur est extrapolée à partir de la tangente au dernier segment de courbe pour les pluies de type B (61,7 mm);

- la double interprétation graphique est remplacée par un **calcul de régression linéaire multiple ascendante** sur les variables Lp , IK et $LpIK$. Cela permet de s'affranchir du problème de double linéarisation et du biais qu'elle introduit. On obtient également un critère de pertinence pour chaque variable explicative ;

. L'ensemble des résultats, consigné dans le tableau 26, met en évidence une redondance certaine entre les variables IK et $LpIK$, issue de leur mode de construction. Dans nos conditions d'étude, la lame d'eau ruisselée (Lr) est bien fonction de la hauteur d'eau précipitée (Lp) et de l'état hydrique du sol (IK ou $LpIK$).

. A ce stade, il est permis de s'interroger sur la signification physique de l'indice IK . Des mesures d'humidité du sol par prélèvements gravimétriques ont montré que l'indice des pluies antérieures peut être relié aux stocks hydriques sur l'horizon 0-10 cm. La relation se détériore rapidement au-delà de l'horizon 0-30 cm (Figure 48). Ce constat rejoint et confirme, pour les sols étudiés, les résultats obtenus par Chevallier (1983) puis Thèbe (1987) : **l'indice IK reproduit de manière satisfaisante les mouvements d'eau dans les horizons superficiels. Leur cinétique peut être assimilée à une loi de vidange exponentielle.**

Parcelle	obs.	a	b	c	d	r ²	s(y)
KD11	25	0.456	0.100	0.0036	-5.100	0.968	2.67
KD12	25	0.961			-10.190	0.987	2.36
KD13	25	0.303		0.0017	-4.187	0.769	4.62
KD21	25	0.264	0.077		-6.679	0.447	6.60
KD22	25	0.337		0.0039	-3.152	0.929	3.60
KD23	25	0.107		0.0020	-3.334	0.604	4.38
KD31	25	0.866	0.129		-14.443	0.989	2.03
KD32	25	0.759		0.0020	-13.757	0.981	2.72
KD33	25	0.375		0.0027	-6.613	0.898	3.87
KD41	25	0.899		0.0007	-2.795	0.987	2.23
KD42	25	0.602		0.0018	-7.768	0.973	2.49
KD43	25	0.648		0.0030	-5.470	0.986	2.15

(en gras: r² < 0.95)

Tableau 26 : Paramètres de régression calculés pour l'ensemble des parcelles étudiées, à partir de l'équation (3). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification (F = 4). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r²) et de l'écart-type d'estimation (s(y)).

. La qualité de la régression multiple est excellente, à l'exception des parcelles KD13, KD21, KD23 et KD33, caractérisées par de faibles lames d'eau ruisselées. L'examen de la figure 49 permet de constater des différences de comportement évidentes. La parcelle KD31 offre une réponse quasi-linéaire, quel que soit l'état hydrique initial (IK) ou le type de pluie. En revanche, le type de pluie influence clairement les résultats obtenus sur KD21. **Le modèle de régression utilisé s'accorde mal à ce dernier cas, l'hypothèse de linéarité par rapport à la variable Lr étant peu réaliste.**

. Ce constat nous a amené à transformer les hauteurs de pluie (Lp) en valeurs d'indice d'agressivité (R), pour tenir compte des spécificités de chaque hyétogramme. Pour ce faire, nous avons repris les valeurs d'énergie cinétique calculées précédemment (Chapitre 3.2.1), auxquelles nous avons appliqué l'équation proposée par Wischmeier et Smith (1958) et décrite au chapitre 2.5.4. Le tableau 27 présente les valeurs de R correspondant à des hauteurs précipitées de 20, 30, 40, 60 et 80 mm, pour des pluies de types A et B. L'ampleur de l'ondée préliminaire de la pluie A (30 mm/h pendant 30 mn) explique les faibles valeurs d'indice en début d'averse. A l'inverse, en fin de protocole, l'intensité pluviométrique maximale, supérieure dans le cas de la pluie A, entraîne une valeur plus élevée de l'indice.

. Si nous introduisons l'indice d'agressivité (R) à la place de la variable Lp, dans l'équation (3) nous obtenons :

$$Lr = aR + bIK + cLpIK + d \quad (4)$$

. Le calcul de régression linéaire multiple ascendante conduit aux résultats consignés dans le tableau 28. Seules les parcelles dont la qualité du modèle a été améliorée de manière significative sont présentées ; à une exception près, on retrouve le groupe des parcelles à faible ruissellement. Cependant, la qualité de la régression reste médiocre pour KD13, KD21 et KD23.

Tableau 27 : Valeurs de l'indice d'agressivité (R) pour différentes lames précipitées (Lp) et deux types de pluies simulées (A et B).

Lp (mm)	20	30	40	60	80
Type A	7.4	15.6	27	57.6	90.1
Type B	14.1*	23.8	32.5	54.6	72.9**

(* : valeur calculée sur une période inférieure à 30 mn)

(** : valeur extrapolée à partir des caractéristiques pluviométriques finales)

Tableau 28 : Paramètres de régression calculés pour l'ensemble des parcelles étudiées, à partir de l'équation (4). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Parcelle	obs.	a	b	c	d	r^2	$s(y)$
KD11	25	0.381		0.0037	1.044	0.981	2.03
KD13	25	0.271		0.0016	-0.623	0.841	3.83
KD21	25	0.202		0.0012	-1.593	0.544	6
KD23	25	0.113		0.0019	-2.578	0.662	4.04
KD33	25	0.329		0.0026	-1.992	0.942	2.82

Tableau 30 : Matrice des corrélations entre caractéristiques hydrologiques et la variable OPS.

	Li	Ils	Ilh	Lpis	Lpih	OPS
Li	1	0.877	0.944	0.845	0.893	-0.708
Ils		1	0.913	0.836	0.751	-0.704
Ilh			1	0.796	0.844	-0.707
Lpis				1	0.691	-0.745
Lpih					1	-0.631
OPS						1

Tableau 29 : Description des états de surface finaux. Les valeurs du coefficient d'infiltration (Ki20: Lp = 50 mm et IK = 20), de l'intensité limite de ruissellement (Ilh) et de la pluie d'imbibition (Lpih) issues du catalogue des états de surface (Casenave et Valentin, 1989) sont comparées aux valeurs expérimentales (en gras).

Parcelle	OPS	Porosité vésiculaire	Type de surface	Variante	Ki20	Ilh	Lpih
KD11	ST2/DES	<5%	C1	modal	75 à 85 57	15 à 25 20	5 à 15 5
KD12	ST1/ERO	5-30%	C3	modal	20 à 30 20	0 à 3 2	2 à 4 2.5
KD13	ST1/DES	<5%	C1	modal	75 à 85 75	15 à 25 28	5 à 15 5
KD21	ST1/DES	<5%	C1	couvert >50%	85 à 95 84	25 à 35 37	20 à 30 15
KD22	ST1/DES	<5%	C1	modal	75 à 85 65	15 à 25 28	5 à 15 5
KD23	ST1/DES	<5%	C1	modal	75 à 85 92	15 à 25 39	5 à 15 22
KD31	ST2/RUI	5-30%	C2	modal	50 à 70 37	1 à 7 2	2 à 4 3
KD32	RUI/ST2	5-30%	C2	modal	50 à 70 44	1 à 7 5	2 à 4 3
KD33	ST2/RUI	5-30%	ST2	couvert>50%	75 à 85 70	10 à 20 17	5 à 10 11
KD41	ERO/ST2	5-30%	ERO	modal	10 à 25 14	0 à 2 2	0 à 5 2
KD42	ST3/RUI	<5%	ST3	couvert>50%	55 à 65 52	10 à 15 19	5 à 10 5.5
KD43	G/ERO	<5%	G	graviers>50%	35 à 50 40	7 à 12 7	3 à 7 2.5

DES: croute de dessication; ERO: croute d'érosion; G: croute grossière; ST1(2,3): croute structurale à 1(2,3) micro/macro; RUI: croute de ruissellement; C1(2,3): surface culturale 1(2,3)

ACP - parcelles de Keur Dianko

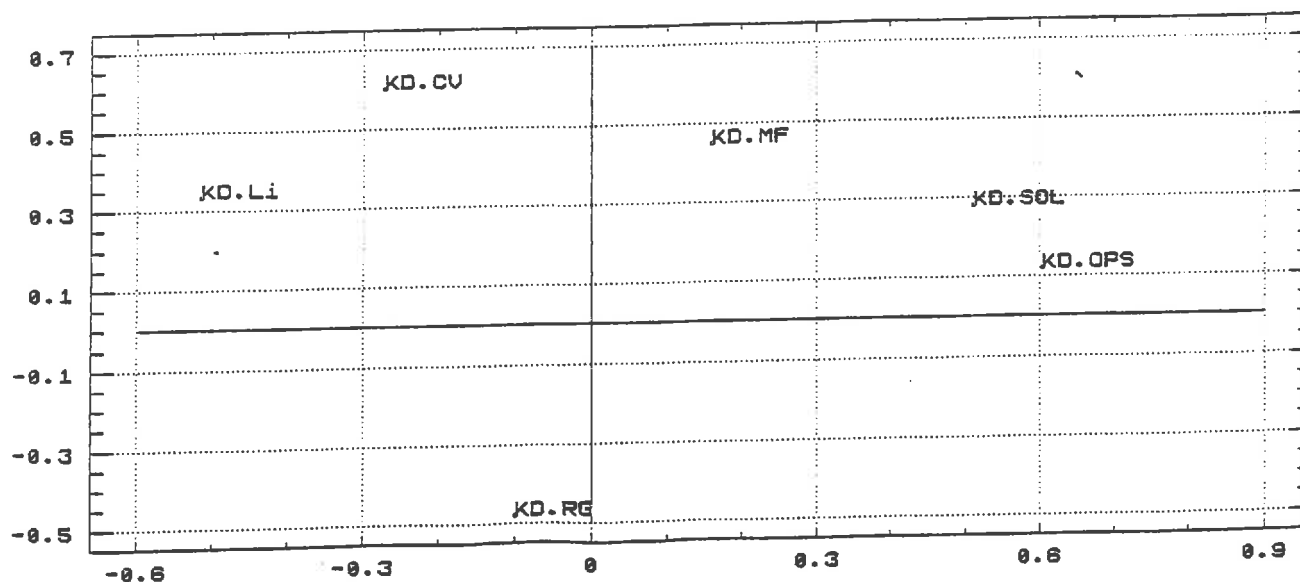


Figure 50 : Analyse en composantes principales, plan principal 1-2. Parcelles de Keur Dianko.

4.7 Caractérisation des états de surface finaux :

. La méthode de caractérisation des états de surface de la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989) a été reprise sur l'ensemble des parcelles expérimentales étudiées. **La principale difficulté d'interprétation réside dans le faible développement de la porosité vésiculaire observée dans les micro-horizons. Ce critère, peu descriptif dans notre cas, ne permet pas de différencier nettement les surfaces cultivées.** Nous avons reporté dans le tableau 29 les valeurs d'intensité limite de ruissellement (Ilh), de pluie d'imbibition (Lpih), en condition humide (IK=90), et les valeurs du coefficient d'infiltration (Ki20) calculé pour $L_p = 50$ mm et $IK = 20$. Les fourchettes de valeurs moyennes sont issues du catalogue des états de surface de la zone sahélienne, les valeurs notées en gras correspondent aux résultats expérimentaux.

. **Dans la majorité des cas, les prédictions s'accordent avec les données de terrain ; les variantes non modales, en particulier, restituent correctement l'effet modulateur des critères secondaires (couvert végétal, éléments grossiers).** Cependant, certains types de surface atypiques (KD11 et KD12) s'intègrent mal au référentiel existant. La parcelle KD23, dont le taux de couverture atteint 40 % possède un comportement plus proche de KD21 (couvert > 50 %) que de KD22 (variante type modal). Une variable synthétique, représentant les divers états de surface finaux, a été créée (OPS) et divisée en trois classes:

- surface de type C1 OPS = 1
- surface de type C2 ou ST2 OPS = 2
- surface de type ST3 ou G OPS = 3

. Cette variable est confrontée, dans un premier temps, aux variables caractéristiques des états de surface initiaux (OS, CV, MF, RG, ESE, SOL). La matrice de corrélation indique que seules trois variables sont liées de manière significative à OPS : le type de sol (OPS/SOL : 0,811), l'état de surface initial (OPS/ESE : 0,787) et l'occupation du sol (OPS/OS ; 0,625). Ces résultats divergent notablement de ceux obtenus pour les variables hydrologiques, essentiellement liées aux taux de couverture (CV). Nous avons établi une seconde matrice de corrélation entre les variables hydrologiques (Li, Lpih, Ils, Ilh) et OPS (Tableau 30). Toutes les liaisons sont significatives au seuil de 5 %. On s'aperçoit que les variables hydrologiques sont fortement redondantes, le meilleur coefficient de corrélation étant atteint entre OPS et Lpis (-0,745).

. Malgré le faible nombre d'observations, une analyse en composantes principales réalisée sur les variables OS, CV, MF, RG, SOL, Li et OPS permet de visualiser les principales relations existantes (Figure 50). Les deux premiers axes expliquent 74 % de la variance globale. On note l'influence de l'organisation des sols (SOL) sur les états de surface finaux (OPS) et les lames infiltrées cumulées (Li) dont les valeurs sont liées aux taux de couverture rencontrés (CV).

4.8 Discussion :

. L'ensemble des résultats présentés permet de dégager trois éléments essentiels concernant la genèse du ruissellement sur les versants du sud Saloum :

- **Le ruissellement prend naissance à tous les niveaux de la toposéquence, mais l'intensité du phénomène est en relation étroite avec l'organisation morphopédologique.** D'amont en aval on observe une augmentation de la hauteur d'eau infiltrée cumulée (Li), de la pluie d'imbibition en condition sèche (Lpis) et des intensités de pluie limite (Ils et Ilh). Ce constat traduit une dégradation plus lente et moins sévère de la surface lorsque l'on se rapproche du talweg, ceci confirme les résultats qualitatifs obtenus dans des travaux antérieurs (Angé, 1991). Cette distribution spatiale diffère notablement de celles mises en évidence en Côte d'Ivoire (Valentin et Janeau, 1989) ou au Burkina Faso (Serpantié et al., 1992).

- **Le taux de couverture, sans distinction entre végétation et litière, améliore fortement les caractéristiques hydrologiques du sol en place.** Les parcelles dont les recouvrements sont supérieurs à 40 %, présentent des hauteurs d'eau infiltrées cumulées (Li), des pluies d'imbibition (Ilh) en condition humide, supérieures à celles des parcelles sur sol nu correspondantes. Cependant les descriptions morphologiques des organisations pelliculaires de surface rendent peu compte de ces modifications. Si de nombreuses expériences sous simulations de pluie, réalisées dans des régions tropicales, confirment l'influence de la couverture du sol sur la hauteur d'eau infiltrée ou la pluie d'imbibition (Collinet, 1988; Delhoume, 1989; Molinier et al., 1989; Prat, 1989), il existe moins d'exemples concernant son influence sur l'intensité limite de ruissellement ou la cinétique d'infiltration (Casenave, 1982 ; Chevallier, 1982 ; Thèbe, 1987).

- **Les critères de rugosité (RG) et d'activité mesofaunique (MF) sont peu explicatifs de l'ensemble des résultats hydrologiques.** Ceci est en grande partie lié à la faible variabilité de ces critères dans notre échantillon de parcelles. Certains auteurs soulignent pourtant l'importance prépondérante de la rugosité d'un sol cultivé, en zone sahélienne, dans les processus de ruissellement (Rawitz et al., 1981 ; Albergel, 1987).

. Le protocole expérimental utilisé et le type de modélisation de la lame ruisselée qui en découle présentent certaines limites, dans les conditions de notre étude :

- **La première pluie du protocole, associée à un état hydrique initial sec ($IK = 0$), entraîne sur un sol sableux cultivé une profonde réorganisation des éléments de surface.** En effet, contrairement aux zones non cultivées, les croûtes superficielles sont temporaires et s'estompent durant la saison sèche (piétinement, érosion éolienne, vestiges de façons culturales). Cette modification conjointe des états structuraux et hydriques s'accompagne d'une évolution rapide des paramètres hydrologiques, phénomène bien décrit par ailleurs (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984; Poss et al., 1988). On comprend, dès lors, le rôle fondamental de la couverture du sol sur la rapidité de cette évolution.

- **Les deux types de hyétogrammes reproduits ont une action spécifique sur la réponse hydrologique des parcelles les moins ruisselantes.** Ainsi, les valeurs de pluie d'imbibition (L_{pi}), tributaires de la forme de l'ondée préliminaire, augmentent entre la 4^{ème} et la 5^{ème} pluie du protocole lorsque les intensités d'infiltration restent élevées ($Ilh > 35 \text{ mm/h}$).

- **Au delà de ces variations, la modélisation des lames ruisselées, fondée sur des relations de type linéaire, s'adapte médiocrement au cas des parcelles peu ruisselantes.** L'influence de l'énergie cinétique des gouttes de pluie devient prépondérante lorsque la nature du sol ou le taux de couverture limite les écoulements.

. **En conclusion, nous sommes confrontés aux limites inhérentes à l'extension d'une méthode développée, à l'origine, pour des objectifs précis : l'étude de la réponse hydrologique de surfaces ruisselantes, en majorité sous végétation naturelle, soumises à des événements climatiques exceptionnels (Casenave, 1982).** Néanmoins, il est réconfortant de constater que cette démarche empirique, élaborée hors de notre zone d'étude, permet d'appréhender la variabilité des situations locales. Pour un état de surface donné, l'ordre de grandeur des variables hydrologiques est, le plus souvent, respecté. Certaines lacunes demeurent pour arriver à reproduire le comportement des états de surface dans le cas des sols cultivés. L'évolution du couvert végétal (Thébé, 1987; Casenave et Valentin, 1991) et la reprise des croûtes superficielles par les interventions culturales (Guillobez et Zougmore, 1994) doivent être prises en compte.

5 ETUDE DE L'EVOLUTION D'UN COUVERT CULTIVE ET DE SON INFLUENCE SUR LE RUISSELLEMENT :

5.1 Objectifs :

. Le principal problème rencontré lorsqu'on étudie l'interaction entre un couvert végétal et le ruissellement consiste à obtenir un nombre d'événements climatiques aussi élevé que possible pour chaque stade phénologique d'une culture donnée, appelé événement agronomique. En zone sahélienne, le faible nombre de pluies et la mise en place assez lente des cultures sarclées nécessitent un nombre d'années d'observation élevé. Le recours au simulateur de pluie impose l'absence de pluie parasite durant le protocole expérimental, donc une réalisation de l'essai en saison sèche. Le dispositif expérimental décrit précédemment (Chapitre 3.3.6) permet d'atteindre trois objectifs :

- décrire l'influence d'un couvert d'arachide (var 73-33), à quatre stades cultureux distincts, sur les comportements hydrologiques de parcelles élémentaires soumises à une série de pluies simulées standardisées ;
- comprendre les interactions éventuelles entre l'évolution des états de surface, liée aux pratiques culturales, et la croissance du couvert végétal ;
- modéliser la relation entre les pertes par ruissellement et les paramètres climatiques et cultureux.

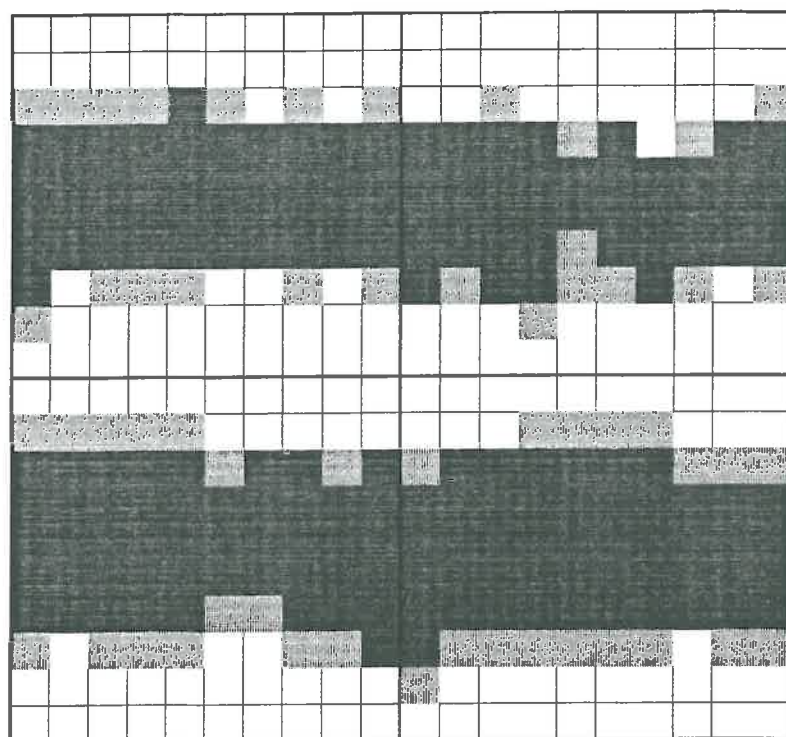
. Il est impératif de noter, dès à présent, les limites d'une telle approche :

- l'analyse porte sur une échelle spatiale réduite (1 m²). Cette échelle est néanmoins fondamentale puisqu'elle correspond au niveau de perception du bilan hydrique mesuré *in situ* ;
- le couvert d'arachide, homogène et rasant se prête à ce type d'expérience, les couverts graminéens, clairsemés et érigés, offrent plus de difficultés. Conscients de ce problème, nous nous sommes placés dans les conditions optimales pour valider notre protocole expérimental standardisé et étudier la précision des résultats qu'on peut en attendre ;
- le nombre restreint d'événements agronomiques est loin de couvrir l'ensemble des possibilités rencontrées en milieu naturel. Ceci provient d'un compromis entre les contraintes matérielles et l'intérêt scientifique. En ce sens, nous avons privilégié un dispositif à deux répétitions au dépend d'une augmentation des cas traités, moins pour l'aspect statistique que pour se prémunir de toute défaillance lors de la préparation des parcelles ou des expérimentations.

5.2 Protocoles de mesures :

. Nous rappelons brièvement les quatre stades cultureux choisis :

- **stade Implantation**, semis + 7 jours, non sarclé, recouvrement théorique 5 %,
- **stade Végétation**, semis + 30 jours, sarclé au 15^e jour, recouvrement théorique 30 %,
- **stade Végétation**, semis + 30 jours, sarclé aux 15^e et 30^e jours, recouvrement théorique 30 %,
- **stade Floraison**, semis + 60 jours, sarclé aux 15^e et 30^e jours, recouvrement théorique 90 %.



M1 = 56
 M2 = 176
 IV = 51%

Parcelle : N11
 Date : 18.01.93
 Observateur : PEREZ

Figure 51 : Représentation du couvert d'arachide sur la parcelle N11 et calcul de l'indice de végétation (IV) correspondant.

. L'arachide est mise en place entre les mois de novembre et janvier sur la station de Sonkorong (1992), puis sur la station de Nioro du Rip (1993). Le premier site est considéré, *a priori*, comme ruisselant, le second peut être qualifié de faiblement ruisselant, compte tenu des caractéristiques pédologiques rencontrés. Les semis sont réalisés de manière isohypse.

. Le protocole de pluies simulées est identique à celui utilisé dans l'expérimentation précédente (Chapitre 4.1). Les limites de ce protocole ont déjà été évoquées mais la volonté de partir d'un référentiel existant (Casenave et Valentin, 1989) a prévalu. Afin d'éviter une croissance végétative trop importante durant l'expérience, deux simulateurs de pluie sont utilisés simultanément pendant une période de dix jours.

5.2.1 Le taux de recouvrement :

. Les taux de recouvrement sont estimés grâce à une grille de notation de maille 5 x 5 cm². Chaque maille est affectée d'un indice selon que le recouvrement est nul (valeur : 0), partiel (valeur : 0,5) ou total (valeur : 1). L'indice de végétation (IV en %) est calculé à partir des 400 relevés d'une parcelle d'après la formule suivante :

$$IV = 0,25 (0,5M1 + M2)$$

avec M1 : nombre de mailles affectées de la valeur 0,5

M2 : nombre de mailles affectées de la valeur 1,0

. Cet indice peut être assimilé à un taux de couverture exprimé en pourcentage. Un traitement informatique simplifié permet de visualiser la structure spatiale du couvert végétal (Figure 51). Pour chaque parcelle, deux relevés sont effectués en début et fin de protocole, les valeurs intermédiaires sont calculées par interpolation linéaire entre ces deux points. Compte tenu du caractère photo-sensible de la canopée, les observations sont faites en pleine journée ; quelques lectures de début de matinée montrent qu'un couvert de 18 % peut être ramené à 13 % par fermeture des folioles.

5.2.2 L'état hydrique du sol :

. L'état hydrique du sol est contrôlé par prélèvements à la tarière en début et fin de protocole. On effectue deux répétitions par parcelle. Parallèlement, trois indices de pluies antérieures sont testés (voir Partie 2 Chap 1.3.1):

$$IK1 \quad \text{tel que} \quad IK_n = (IK_{n-1} + Lp_{n-1})e^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$IK2 \quad \text{tel que} \quad IK_n = \sum_{i=0}^{n-1} Lpi \quad (2)$$

et $IK_0 = 0$ à partir de la première irrigation.

$$IK3 \quad \text{tel que} \quad IK_n = \sum_{i=0}^{n-1} Lpi \quad (3)$$

et $IK_0 = 0$ à partir de la dernière façon culturale.

. L'expression (1) est désormais classique dans les expérimentations sous simulation de pluie en zone sahélienne (Casenave, 1982 ; Chevallier, 1983). L'expression (2) se déduit de la précédente en posant $\alpha = 0$, cette transformation confère au sol la mémoire de l'ensemble de l'historique pluviométrique de la parcelle. L'expression (3) est tirée des travaux de Lamachère (1991) qui étudie l'influence des sarclo-binages sur le ruissellement, cette approche crée un lien entre les modifications de l'état structural et la mémoire hydrique du sol. Dans notre cas, trois façons culturales sont prises en compte : le semis, le premier et le second sarclage.

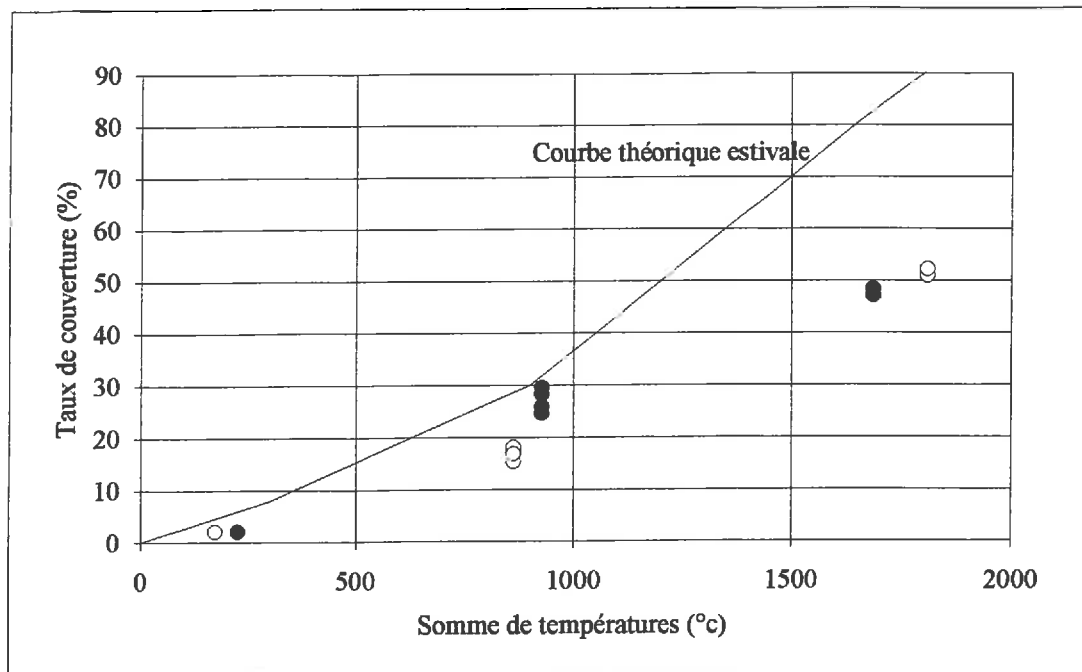


Figure 52 : Evolution du taux de couverture de l'arachide en fonction de la somme des températures moyennes. Hiver 91/92 à Sonkorong (●) et hiver 92/93 à Nioro du Rip (○), comparaison avec la courbe théorique estivale.

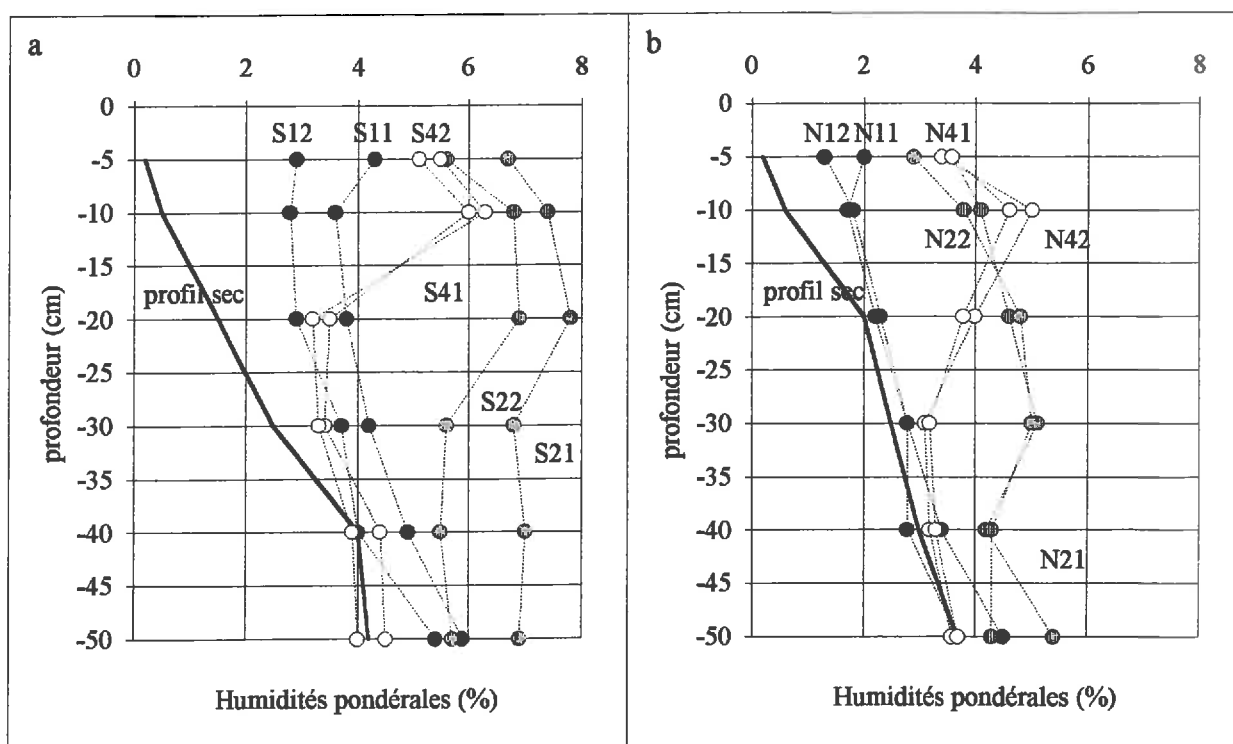


Figure 53 : Profils hydriques initiaux mesurés à proximité des différentes parcelles de simulation de pluie. Sonkorong (a) et Nioro du Rip (b).

5.2.3 La rugosité du sol :

. La rugosité du sol fait l'objet d'un suivi grâce à un profilographe à aiguilles. Avant chaque pluie simulée, deux profils sont relevés sur chaque parcelle. Les transects sont positionnés grâce à un jeu de repères fixes. Le dépouillement informatique des 37 points de mesure permet de calculer deux indices de rugosité dont les caractéristiques ont été évoqués dans un chapitre précédent (Chapitre 3.2.4). Nous nous contenterons de rappeler leur formulation :

$$IR1 = 10 \text{ m}^{-1} \sum_{j=1}^m [(n^{-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2)^{1/2}] \quad (\text{Kuipers, 1957})$$

$$IR2 = 10^2 \text{ m}^{-1} \sum_{j=1}^m [((\sum_{i=1}^n ((x_{i+1} - x_i)^2 + d^2)^{-1/2}) - (n-1)d)((n-1)d)^{-1}] \quad (\text{Boiffin, 1984})$$

5.3 Description des parcelles :

. Par convention d'écriture, les parcelles implantées à Sonkorong et Nioro du Rip sont notées S et N, respectivement. Les différents stades culturaux, classés par ordre de couvert végétal décroissant, sont représentés par des chiffres (de 1 à 4), suivis du numéro de répétition. Ainsi, S12 correspond à la 2ème répétition du stade Floraison (60 jours) de l'essai réalisé à Sonkorong.

. Les deux sites d'étude ont en commun une mise en culture ancienne (> 10 ans), une pente de faible déclivité (< 1 %) et l'absence d'éléments grossiers en surface. Les propriétés physiques et chimiques de l'horizon superficiel sont assez proches et confirment les résultats de travaux antérieurs (Sarr, 1981 ; Duivenbooden et Cisse, 1993) (Tableau 31). On constate, néanmoins des comportements très contrastés vis à vis du ruissellement qui peuvent représenter les deux pôles mis en évidence lors de l'étude de la variabilité le long d'une toposéquence.

. Les principaux paramètres descriptifs des états de surface initiaux observés sur l'ensemble des parcelles sont fournis dans le tableau 32. Les indices de végétation (IV) sont nettement plus faibles que les valeurs théoriques annoncées précédemment. L'implantation (13 à 14 pieds/m²) et l'alimentation hydrique sur les différentes parcelles étant correctes, nous pouvons soupçonner un déficit de température d'être responsable du retard de croissance, malgré les précautions prises. Si on compare les résultats obtenus avec la courbe d'évolution théorique du couvert en fonction de la somme de températures moyennes estivales, on constate un net décalage entre les cinétiques de croissance (Figure 52). Les températures minimales inférieures à 18° C ralentissent la germination et le développement végétatif, on enregistre, de ce fait, un retard physiologique de près de 20 jours pour le stade Floraison, 10 jours pour le stade Végétation et 2 à 4 jours pour le stade Implantation (Gillier et Silvestre, 1969 ; Doorenbos et Kassan, 1980).

. Les indices de rugosité IR1 et IR2 ont été multipliés par dix de manière à obtenir une gamme de variation comparable aux autres variables étudiées. Les valeurs enregistrées sont plus faibles sur le site de Nioro, hormis pour les parcelles sarclées qui présentent des rugosités comparables. La friabilité des mottes est plus faible à Sonkorong.

. Les indices hydriques initiaux illustrent des scénarios très différents qu'il est utile de comparer aux profils mesurés avant la première pluie simulée (Figure 53). Sur les deux sites, on constate, en règle générale, une bonne adéquation des profils entre deux répétitions d'un même traitement et une nette distinction des comportements hydriques entre traitements. Au stade Implantation (S41, S42, N41 et N42), le front d'humectation atteint la côte z = 30 cm et les horizons des surfaces sont frais. Au stade Végétation, l'ensemble du profil (0-50 cm) est frais et subit un phénomène de drainage vers les horizons sous-jacents. Au stade Floraison, le profil est considérablement desséché dans toute la zone racinaire mais le front d'humectation a gagné des horizons plus profonds (S11, S12, N11 et N12).

Tableau 31 : Propriétés physiques et chimiques de l'horizon de surface (0-5 cm). Sites de Sonkorong et de Nioro.

Site	Granulométrie (%)					C (%)	N (%)	pH
	A	Lf	Lg	Sf	Sg			
Sonkorong	4.7	2.7	20.5	42.3	29.8	0.25	0.025	5.7
Nioro	3.5	2.6	10.2	58.6	25.1	0.31	0.027	6.05

Tableau 32 : Principaux paramètres descriptifs des états de surface initiaux observés. Sites de Sonkorong et de Nioro

Parcelle	Traitement	IV (%)	IR1 (x 10)	IR2 (x 10)	IK1 (mm)	IK2 (mm)	IK3 (mm)	OPS initiales
S11	60 jours	47	112	41	6	254	112	ST1/RUI
S12	60 jours	48.2	87	15	6	254	112	ST1/RUI
S21	30 jours	28.2	75	34	6	142	142	ST1/RUI
S22	30 jours	24.5	53	16	6	142	142	ST1/RUI
S31	30 j sarclé	29.5	110	86	6	142	0	Sarc/ST1
S32	30 j sarclé	25.7	111	101	6	142	0	Sarc/ST1
S41	7 jours	2	94	28	6	34	34	ST1/DES
S42	7 jours	2.1	81	22	6	34	34	ST1/RUI
N11	60 jours	51	50	17	6	254	112	ST1/DES
N12	60 jours	52.2	52	19	6	254	112	ST1/DES
N21	30 jours	17.5	60	14	6	142	142	ST1/DES
N22	30 jours	18	80	16	6	142	142	ST1/DES
N31	30 j sarclé	15.2	116	112	6	142	0	Sarc/ST1
N32	30 j sarclé	16.8	106	59	6	142	0	Sarc/ST1
N41	7 jours	2	42	10	6	34	34	ST1/DES
N42	7 jours	2	50	13	6	34	34	ST1/DES

Tableau 33 : Densités apparentes sèches (γ_d) initiales, mesurées au densitomètre à membrane (1 000 cm³). Horizon 0-5 cm, 2 répétitions.

Site	Parcelle (S ou N . . .)							
	11	12	21	22	31	32	41	42
Sonkorong	1.59	1.61	1.62	1.6	-	-	1.53	1.58
Nioro	1.56	1.58	1.58	1.58	-	-	1.56	1.57

. Cette interaction entre la plante et le sol n'est pas prise en compte par les indices hydriques IK1, IK2 et IK3. *A priori*, l'indice IK1 semble le plus neutre et met en évidence l'assèchement de surface (0-5 cm) consécutif au trois jours d'arrêt de l'irrigation sur l'ensemble des parcelles, avant simulation.

. Les organisations pelliculaires de surface initiales sont peu différenciés entre traitements d'un même site. Les arrosages quotidiens ont entraîné des phénomènes de ruissellement localisé sur les parcelles de Sonkorong, d'où l'apparition de croûtes de ruissellement (RUI). L'essentiel des états de surface est composé de croûtes structurales (ST1) et de croûtes de dessiccation (DES) dans les zones protégées par le couvert végétal. On note un faible développement de la porosité vésiculaire.

. Les densité apparentes sèches (γ_d) initiales sont légèrement plus élevées à Sonkorong; la variabilité entre parcelles d'un même site est faible, hormis la parcelle S41 qui se différencie nettement de ces voisines (Tableau 33).

5.4 Etude des lames ruisselées et des coefficients de ruissellement :

. Les résultats fournis dans le tableau 34 permettent de dégager quelques conclusions partielles :

- les gammes de variation des coefficients de ruissellement cumulé, entre 54 et 73 % à Sonkorong et 25 à 46 % à Nioro du Rip, confirment les comportements très contrastés des deux sites. L'amplitude du phénomène correspond également aux variations observées sur les sols cultivés du versant de Keur Dianko. Ce constat est d'autant plus intéressant que les caractéristiques analytiques de l'horizon de surface sont peu différentes entre les deux sites d'essai ;

- si les écarts entre les lames ruisselées cumulées moyennes aux stades Floraison (225,5 mm à Sonkorong et 100,5 mm à Nioro) et Végétation (272,3 mm à Sonkorong et 134,5 mm à Nioro) valident l'hypothèse d'un rôle de protection croissant du couvert végétal, les ruissellements enregistrés au stade Implantation (225,8 mm à Sonkorong et 118,7 à Nioro) nous éloigne d'une généralisation trop hâtive ;

- l'influence bénéfique du sarclage ne s'étend pas au delà de la deuxième averse, sur le site de Sonkorong. Le gain d'infiltration cumulée moyenne (+ 12,9 mm) obtenu en fin de protocole, à couvert végétal équivalent, correspond au gain obtenu lors de la première pluie. A Nioro du Rip, cette influence est beaucoup plus discrète et ne parvient pas à compenser les pertes moyennes enregistrées lors des pluies suivantes par rapport aux parcelles non travaillées (N21 et N22).

. Ces quelques tendances ne doivent pas cacher l'hétérogénéité des résultats entre certaines répétitions, malgré nos efforts pour garantir une homogénéité optimale. Cependant, si chaque site d'étude est considéré comme un bloc, on a alors à faire à un plan factoriel à un facteur contrôlé à deux niveaux (le site); un facteur étudié à quatre niveaux (le stade cultural) et deux répétitions. Dans ce cas, la lame ruisselée cumulée permet de distinguer, au seuil de signification de 90 %, les quatre niveaux du facteur étudié (Tableau 35) et de confirmer les tendances précédentes.

. Dans la gamme de couverts végétaux initiaux disponibles (2 à 52 %), les différences maximales entre valeurs moyennes de la lame ruisselée cumulée représentent 12 % des hauteurs d'eau précipitées, à Sonkorong et Nioro du Rip. Si on prend comme base les pertes moyennes par ruissellement au stade Floraison, ces mêmes différences maximales représentent alors respectivement, 21 % et 45 % à Sonkorong et Nioro du Rip. Le comportement particulier au stade Implantation souligne la nécessité de différencier les notions de stade végétatif et de stade cultural dans l'étude des phénomènes de ruissellement (Figure 54).

Tableau 34 : Lames ruisselées (Lr en mm) et coefficients de ruissellement (Kr en %) obtenus pour chaque averse du protocole. Sites de Sonkorong et Nioro du Rip.

Parcelle	Pluie 1		Pluie 2		Pluie 3		Pluie 4		Pluie 5		Total	
	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr	Lr	Kr
S11	51.9	54	43.7	71	42.5	70	38	62	70.4	73	246.5	65
S12	35.8	37	34.9	57	35.3	57	31.6	51	66.9	69	204.5	54
moy.	43.9	45	39.3	64	38.9	63	34.8	56	68.7	71	225.5	60
S21	50.7	53	43.8	71	46.5	75	46.4	75	81	84	268.4	71
S22	63.3	66	44.3	72	42.4	69	45.6	74	80.5	83	276.1	73
moy.	57	59	44.1	71	44.5	72	46	75	80.8	84	272.3	72
S31	46.7	48	42.1	68	46.7	76	48.1	78	84.4	87	268	71
S32	43.2	45	39.5	64	43.2	70	42.5	69	77.5	80	250.7	66
moy.	45	47	40.8	66	45	73	45.3	73	81	84	259.4	69
S41	37.4	39	36.8	60	35.7	58	39.1	63	70.7	73	219.7	58
S42	45.1	47	37.8	61	40.7	66	32.6	53	75.7	78	231.9	61
moy;	41.3	43	37.3	61	38.2	62	35.9	58	73.2	76	225.8	60
N11	11	11	14.4	23	17.3	28	15.2	25	48.3	50	106.2	28
N12	13.6	14	13.6	22	15.9	26	13.3	22	38.4	40	94.8	25
moy.	12.3	13	14	23	16.6	27	14.3	23	43.4	45	100.5	27
N21	15.2	16	23.9	39	28.7	47	27.7	45	55.5	58	151	40
N22	10.2	11	17.3	28	21.4	35	20.9	34	48.2	50	118	31
moy.	12.7	13	20.6	33	25.1	41	24.3	39	51.9	54	134.5	36
N31	14.2	15	26	42	31.8	52	31.9	52	68.6	71	172.5	46
N32	6.8	7	17.4	28	21.3	35	22.1	36	50.6	52	118.2	31
moy.	10.5	11	21.7	35	26.6	43	27	44	59.6	62	145.4	38
N41	10.3	11	16.4	27	24.6	40	23.2	38	48	50	122.5	32
N42	12.4	13	14.8	24	18.7	30	21	34	48	50	114.9	30
moy.	11.4	12	15.6	25	21.7	35	22.1	36	48	50	118.7	31

Tableau 35 : Analyse de la variance et test de comparaison des moyennes au seuil de signification 90% (Newman-Keuls).
Variable utilisée: lame ruisselée cumulée (Lr totale).

Facteur	d.l	SCE	CM	F	seuil signification
Site (contrôlé)	1	58528	58528	170.00	0.00
Stade (étudié)	3	5140	1713	4.98	0.02
résidus	11	3787	344		
Niveaux	nb	moyenne	écart-type	Groupes homogènes, seuil 90%	
Floraison	4	163	37	a	
Végétation	4	203	40	b	
Vég.sarclé	4	203	35	b	
Implantation	4	172	31	a	

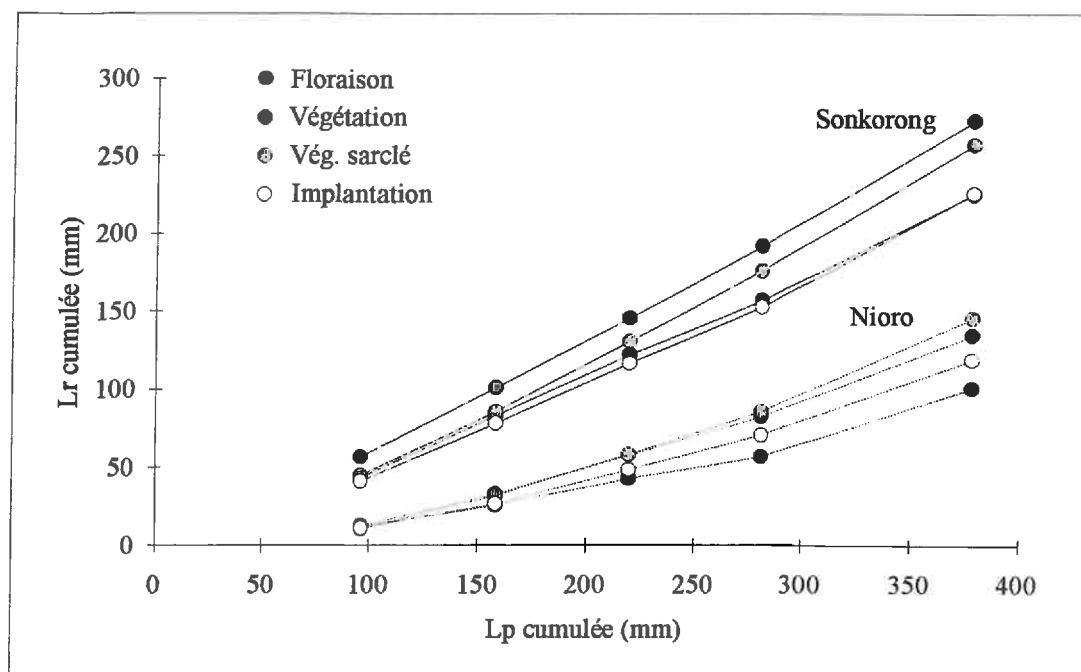


Figure 54 : Relations entre le ruissellement (Lr) et la hauteur de pluie (Lp) cumulés sur l'ensemble du protocole. Influence du stade culturel. Sites de Sonkorong et de Nioro du Rip.

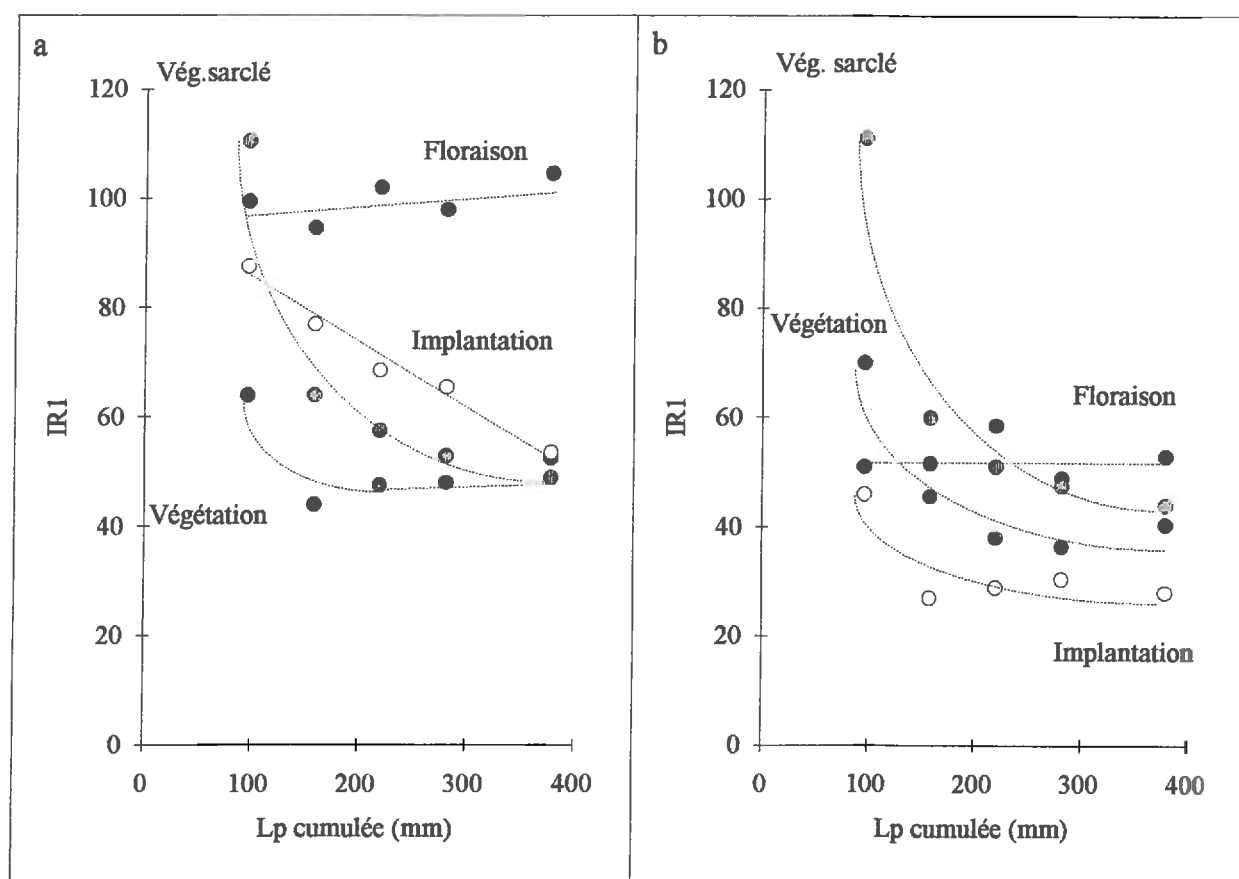


Figure 55 : Relations entre l'indice de rugosité (IR1) et la lame précipitée cumulée (Lp) pour les différents stades culturels étudiés. Sites de Sonkorong (a) et Nioro (b).

Tableau 36 : Pluies d'imbibition (Lpi en mm) obtenues pour chaque averse du protocole. Sites de Sonkorong et de Nioro du Rip.

Parcelle	Pluie 1	Pluie 2	Pluie 3	Pluie 4	Pluie 5
S11	17	6	5	6	8
S12	19	10	9	10	12
moy.	18	8	7	8	10
S21	16	6	3	4	3
S22	18	9	9	7	5
moy.	17	7.5	6	5.5	4
S31	19	8	4	4	3
S32	23	12	10	10	9
moy.	21	10	7	7	6
S41	19	8	7	7	5
S42	23	10	13	13	13
moy.	21	9	10	10	9
N11	20	13	13	12	18
N12	20	11	10	11	19
moy.	20	12	11.5	11.5	18.5
N21	22	9	9	8	15
N22	22	10	8	9	16
moy.	22	9.5	8.5	8.5	15.5
N31	22	9	6	7	5
N32	28	12	10	9	16
moy.	25	10.5	8	8	10.5
N41	21	10	10	10	16
N42	22	10	10	10	16
moy.	21.5	10	10	10	16

Tableau 37 : Analyse de la variance et test de comparaison des moyennes au seuil de signification 90 % (Newman-Keuls). Variable utilisée: pluie d'imbibition de la 1^o averse (Lpi1).

Facteur	d.l	SCE	CM	F	seuil signification
Site (contrôlé)	1	33.1	33.1	7.18	0.02
Stade (étudié)	3	39.7	13.2	2.87	0.09
résidus	11	50.7	4.6		
Niveaux	nb	moyenne	écart-type	Groupes homogènes, seuil 90%	
Floraison	4	19	0.7		b
Végétation	4	19.5	1.5		b
Vég.sarclé	4	23	1.9	a	
Implantation	4	21.3	0.9	a	b

5.5 Etude de la pluie d'imbibition :

. En début de protocole, les valeurs de pluie d'imbibition varient de 16 à 23 mm à Sonkorong et de 20 à 28 mm à Nioro, ces hauteurs d'eau sont comparables à celles trouvées sur les sites cultivés de glacis et de terrasse du bassin versant de Keur Dianko (Tableau 36). Lors de la seconde pluie simulée on observe une chute généralisée des valeurs qui se stabilisent à des niveaux plus faibles à Sonkorong. On retrouve sur certaines parcelles l'augmentation de la hauteur de pluie d'imbibition entre les quatrième et cinquième averses du protocole. Nous avons montré précédemment que ce phénomène dérivait des différentes formes de hyétoigrammes utilisés, lorsque les parcelles sont faiblement ruisselantes (type de sol ou couvert végétal) ;

. A couvert végétal équivalent, l'effet du sarclage s'estompe dès la seconde pluie, quel que soit le site. A ce titre, il est intéressant de constater que seule la variable L_{pi1} permet d'établir une analyse statistique significative du plan factoriel décrit plus haut (Tableau 37). On note, toutefois, une certaine tendance à un maintien de valeurs finales plus élevées pour le stade Floraison (S11, S12, N11 et N12).

. De nombreuses études ont montré que la pluie d'imbibition était liée à la rugosité initiale du sol (Rawitz et al., 1981; Lamachère, 1991) et que cette rugosité évoluait avec le cumul de pluie (Guillobez et Zougmore, 1994). Dans notre cas, la relation entre $IR1$ et L_p sur l'ensemble du protocole est fortement dépendante du stade cultural étudié (Figure 55). **Quel que soit le site, un couvert végétal important (> 50 %) permet de conserver intacte la rugosité initiale. Un taux de couverture inférieur (15 à 25 %) se traduit par un effondrement du micro-relief.**

. **Au stade Implantation, c'est moins la rugosité globale qui constitue le paramètre pertinent que le profil de surface observable.** La figure 56 présente les différents profils moyens enregistrés en début d'expérience sur les parcelles de Sonkorong. On constate que le relief hérité du semis est inversé par rapport aux stades suivants : les dépressions sont situées au niveau des rangs d'arachide, alors que les sarclages entraînent la formation de micro-buttes au pied de chaque plant. Ces dernières tendent à s'affaisser et à se rompre avec le cumul de pluies, leur impact devient alors négligeable sur la hauteur de pluie d'imbibition et le ruissellement. Les dépressions se combleront beaucoup plus progressivement et constituent, même pour des valeurs d'indice de rugosité faibles, des zones de stockage efficaces. Ce phénomène se répète à Nioro du Rip avec des amplitudes beaucoup plus faibles.

5.6 Etude de l'intensité limite de ruissellement :

. La détermination des intensités limites de ruissellement s'effectue par dépouillement graphique des relations entre l'intensité d'infiltration stabilisée (F_s) et l'intensité pluviométrique (I) lors des cinq pluies simulées. Les valeurs de I_{ls} , en condition sèche ($IK = 6$) et de I_{lh} , en condition humide ($IK = 84$) sont reportées dans le tableau 38 et permettent d'établir que :

- quelles que soient les conditions initiales, les intensités limites de ruissellement sont nettement inférieures sur les parcelles de Sonkorong. Les barrières hydrauliques formées par les organisations superficielles sont donc nettement plus sévères dans ce cas. A nouveau, ces écarts sont comparables à ceux enregistrés sur les sites cultivés du bassin versant de Keur Dianko ;

- l'influence du stade cultural sur I_{ls} est peu marquée, mis à part le cas de la parcelle N31 ; en revanche, en condition humide (I_{lh}), on parvient à différencier au seuil de signification 90 % trois groupes homogènes (Tableau 39). Il est intéressant de noter que le sarclage, à couvert végétal équivalent, conduit aux intensités limites de ruissellement les plus faibles et ce d'autant plus que le sol est sensible à l'encroûtement.

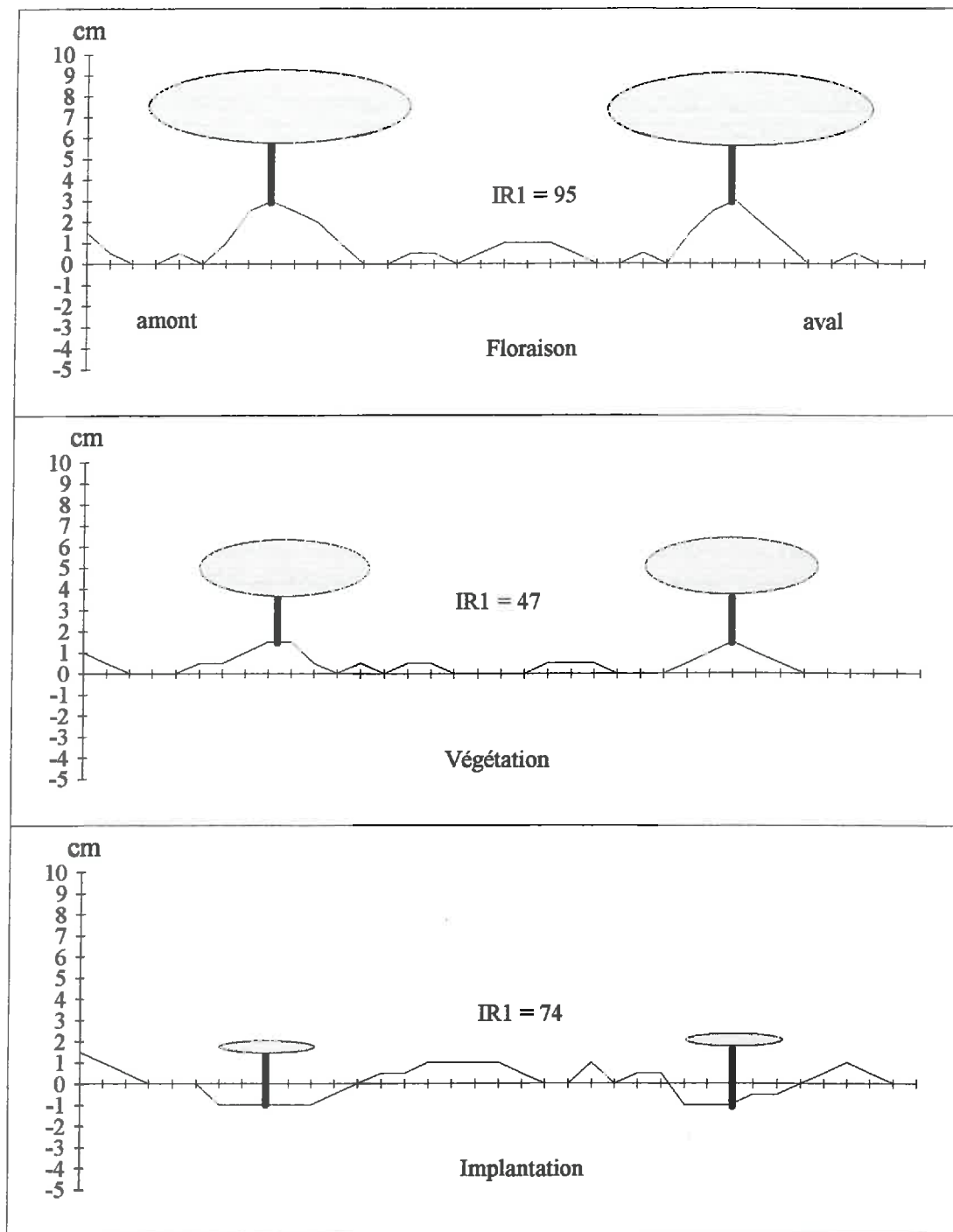


Figure 56 : Influence du stade culturel sur les profils de surface observés après la première pluie du protocole. Valeurs indicatives de l'indice de rugosité (IR1). Site de Sonkorong.

. Afin d'établir quels paramètres pouvaient expliquer la variabilité des valeurs de I_{lh} , les états de surface finaux ont été caractérisés par leur taux de couverture (IV), leur rugosité (IR1) et leur densité apparente sèche (γ_d) superficielle (Tableau 40).

Parcelle	IV	IR1	γ_d	$s(\gamma_d)$
S11	56.2	99	1.57	0.06
S12	55	101.5	1.59	0.02
S21	33.5	52.4	1.60	0.02
S22	31.5	56.9	1.60	0.03
S31	36.5	29.3	1.58	0.01
S32	30.4	56	1.59	0.04
S41	5	38.6	1.53	0.03
S42	5	64	1.56	0.05
N11	54.5	40.2	1.52	0.04
N12	55.7	58.4	1.57	0.04
N21	23.7	49.2	1.54	0.04
N22	21.8	39.4	1.50	0.05
N31	21.2	47.9	1.51	0.05
N32	19.8	26.7	1.49	0.05
N41	2.3	34.5	1.50	0.07
N42	2.8	29.3	1.53	0.03

Tableau 40 : Paramètres descriptifs des états de surface finaux observés. Indice de végétation (IV), indice de rugosité (IR1), densité apparente sèche de surface (γ_d) et écart-type associé ($s(\gamma_d)$). 4 répétitions. Sites de Sonkorong et Nioro.

. Les matrices de corrélations établies entre IV, IR1, γ_d et I_{lh} pour les deux sites n'offrent aucune liaison significative; à l'exception du couple I_{lh} /IR1. En fait, le volume et la profondeur explorés lors du prélèvement s'accordent mal avec l'hétérogénéité spatiale et la faible épaisseur des organisation pelliculaires.

. **L'évolution de la rugosité modifie les capacités de détention superficielle du sol et influence donc les valeurs d'intensité limite de ruissellement. Cependant ces valeurs sont également influencées par le mode de mise en place des organisations pelliculaires.** L'examen de micro-profils culturaux, en fin de protocole, permet de souligner des différences morphogénétiques incontestables ; l'exemple très contrasté des parcelles S22 et S32 (Figure 57) montre que le sarclage entraîne la formation d'un profil plus hétérogène qui intéresse une épaisseur de sol plus importante (1 à 2 cm). De nombreux fragments de pellicules plasmiques résiduelles alternent alors avec des vésicules de tailles différentes. L'influence de cette barrière hydraulique complexe peut être variable selon les cas et beaucoup moins prévisible que celle de la parcelle S22, dont l'organisation reste simple.

Tableau 38 : Intensités limites de ruissellement en condition sèche (Ils) ou humide (Ilh). Valeurs en mm/h. Sites de Sonkorong et de Nioro du Rip.

Parcelle	Ils	Ilh
S11	30	12
S12	45	20
S21	29	9
S22	20	11
S31	32	4
S32	35	9
S41	45	15
S42	33	10
N11	69	32
N12	68	41
N21	69	25
N22	70	35
N31	49	15
N32	71	33
N41	69	30
N42	72	35

Tableau 39 : Analyse de la variance et test de comparaison des moyennes au seuil de signification 90% (Newman-Keuls). Variable utilisée: intensité limite de ruissellement en condition humide (Ilh).

Facteur	d.l	SCE	CM	F	seuil signification
Site (contrôlé)	1	1521	1521	50.78	0.000
Stade (étudié)	3	256	85	2.84	0.087
résidus	11	330	30		
Niveaux	nb	moyenne	écart-type	groupes homogènes, seuil 90%	
Floraison	4	26.3	6.3	a	
Végétation	4	20.0	6.1	a	b
Vég. sarclé	4	15.3	6.3		b
Implantation	4	22.5	6.0	a	b

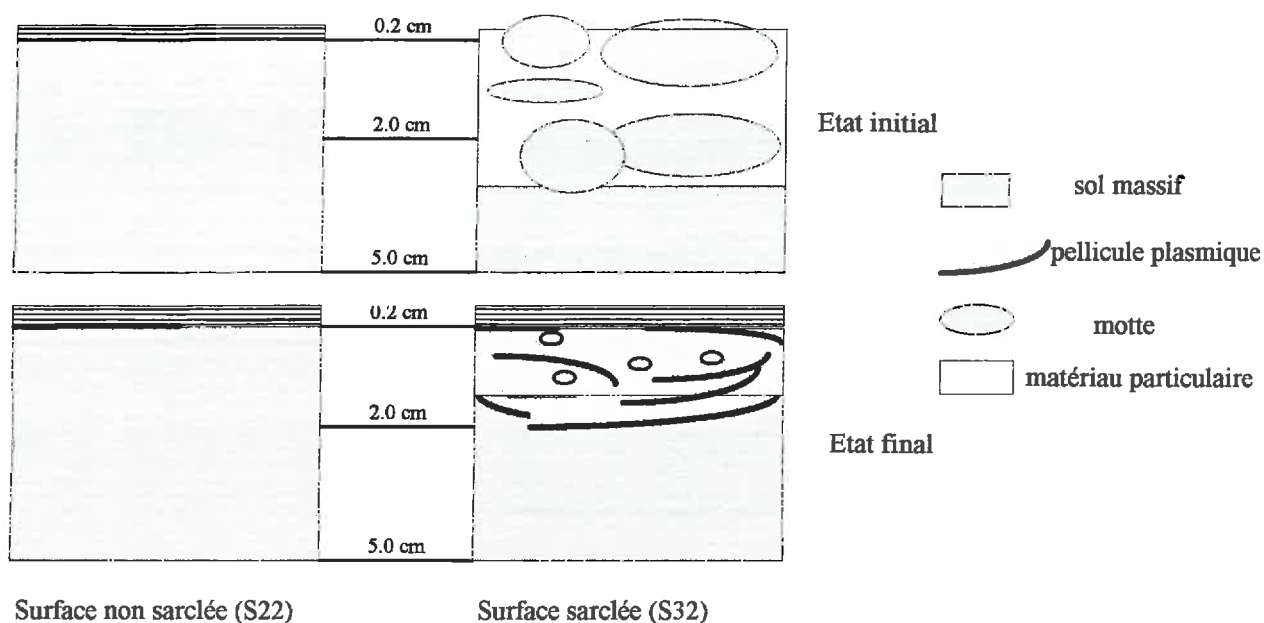


Figure 57 : Evolution schématisée du profil de surface d'un sol non sarclé (S22) ou sarclé (S32).

Tableau 41 : Paramètres de régression calculés, pour l'ensemble des traitements, à partir de l'équation (1). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Site	Traitement	obs.	a	b	c	d	r^2	$s(y)$
Sonkorong	Floraison	50	0.618		0.0019	-7.443	0.922	4.51
	Végétation	50	0.707		0.0024	-7.181	0.972	3.11
	Vég.sarclé	50	0.62		0.0039	-8.502	0.952	4.11
	Implantation	50	0.603		0.0028	-9.626	0.956	3.53
Nioro	Floraison	50	0.174		0.0028	-2.865	0.819	3.63
	Végétation	50	0.221		0.0038	-2.839	0.873	3.94
	Vég.sarclé	50	0.206		0.0049	-3.659	0.838	5.23
	Implantation	50	0.171		0.0036	-1.979	0.887	3.22

(en gras: $r^2 < 0.95$)

Tableau 42 : Paramètres de régression calculés, pour l'ensemble des traitements, à partir de l'équation (2). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Site	Traitement	obs.	a	b	c	d	r^2	$s(y)$
Nioro	Floraison	50	0.161		0.0027	-1.074	0.85	3.31
	Végétation	50	0.191		0.0038	-0.245	0.881	3.81
	Vég.sarclé	50	0.176		0.005	-1.179	0.841	5.18
	Implantation	50	0.153		0.0036	-0.099	0.903	2.99

5.7 Modélisation des lames ruisselées :

. Rappelons que l'objectif de cette modélisation est de fournir une formulation prédictive et fonctionnelle de la lame ruisselée, à l'échelle de l'averse individuelle. Nous prendrons comme modèle de base celui proposé par Casenave et Valentin (1989) dont nous connaissons déjà les limites :

- modèle de type empirique inféodé à la base de données utilisée pour la calibration,
- approche statistique fortement dépendante du protocole expérimental mis en oeuvre,
- modèle prédictif établi, à l'origine, pour des pluies fortes à exceptionnelles,
- prise en compte succincte du caractère évolutif des états de surface cultivés.

. Notre objectif est d'étudier la possibilité d'évolution du modèle pour intégrer les facteurs analysés durant notre expérimentation, à savoir, le couvert végétal (IV) et la rugosité du sol (IR). L'ensemble des données recueillies sous simulation de pluie est utilisé pour le calage du modèle, la validation sera développée dans le chapitre suivant. Soulignons, dès à présent, le caractère très ponctuel de nos propositions, fondées sur un seul type de couvert végétal et deux types de sol, certes contrastés.

5.7.1 L'approche séquentielle :

. Sur chaque site, les données relatives aux deux répétitions d'un même traitement sont regroupées, pour des valeurs de hauteur de pluie de 20, 30, 40, 60 et 80 mm. Une régression multiple ascendante est établie sur le modèle suivant:

$$L_r = aL_p + bIK1 + cL_pIK1 + d \quad (1)$$

avec L_r : lame ruisselée (mm)
 L_p : lame précipitée (mm)
 $IK1$: indice de pluie antérieure

. Les résultats sont consignés dans le tableau 41. Le contraste entre les deux sites apparaît nettement et les ordres de grandeur des différents paramètres sont identiques à ceux calculés sur la terrasse et le glacis du bassin versant de Keur Dianko. La qualité des régressions est satisfaisante à Sonkorong, site ruisselant. A Nioro, la relation se détériore car les intensités limites de ruissellement restent élevées ($II > 30$ mm/h) et l'hypothèse de linéarité de la relation entre les hauteurs d'eau précipitée (L_p) et ruisselée (L_r) n'est pas satisfaite. L'introduction de l'indice d'agressivité de Wischmeier (R) améliore sensiblement la part de la variance globale expliquée (Tableau 42) :

$$L_r = aR + bIK1 + cL_pIK1 + d \quad (2)$$

. En résumé, cette approche séquentielle fournit des résultats acceptables au regard des écarts-types d'estimation obtenus, inférieurs à la précision qu'on peut attendre d'un calcul de stock hydrique du sol, par exemple. De plus, elle valide partiellement la méthode de caractérisation des états de surface de la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989). En effet, on observe, à Sonkorong, la présence de pellicules plasmiques individualisées, de faible épaisseur (< 1 mm), et d'une porosité vésiculaire moyennement développée sur l'ensemble des parcelles. La surface est alors partagée entre croûtes structurales à 2 micro-horizons (ST2), croûtes d'érosion (ERO) et croûtes de ruissellement (RUI). A Nioro, l'absence ou le faible développement des pellicules plasmiques et de la porosité vésiculaire nous amène à décrire principalement des croûtes structurales à 1 un micro-horizon (ST1), d'érosion (ERO) et de ruissellement (RUI).

. En tenant compte des taux de couverture (IV) et du relief (IR1) observés en fin d'expérience, on peut comparer les valeurs moyennes d'intensité limite de ruissellement (Ilh), de pluie d'imbibition (Lpih) et du coefficient d'infiltration (Ki20) de chaque stade cultural aux valeurs prédictives issues du catalogue des états de surface de la zone sahélienne (Tableau 43). Les résultats sont satisfaisants à Nioro du Rip. En revanche, l'interaction entre le relief et le couvert diminue la qualité de la prédiction à Sonkorong. Ceci souligne les limites du référentiel actuel, concernant les sols cultivés.

. D'autre part, l'application de l'approche séquentielle en conditions naturelles rencontre quelques limites préalables :

- **Les stades culturaux choisis doivent être repérés au sein d'un cycle cultural à évolution continue.** En d'autres termes, nous nous trouvons confrontés à la discrétisation d'un ensemble selon trois critères principaux que sont le type de sol, la rugosité et le couvert végétal. Le nombre de cas étudiés étant très faible, il est fort probable que cet exercice se solde par de longs tâtonnements pour déterminer la durée de chaque stade. Le couplage avec un modèle de bilan hydrique se solderait alors par un processus de calage permanent pour trouver "la solution-la-moins-mauvaise"...

- **D'un point de vue mathématique, il n'existe aucune solution de continuité entre les équations affectées à deux stades culturaux distincts.** Dans les faits, cet aspect n'engendre pas de contradictions rédhibitoires compte tenu du caractère erratique des couples (LP, IK) rencontrés dans la nature, on peut toutefois souligner l'inélégance du procédé.

5.7.2 L'approche univoque :

. En partant de l'expression proposée par Thébé (87), nous pouvons envisager une formulation de la lame ruisselée qui soit calée sur les résultats de l'ensemble des parcelles d'un même site. Les hauteurs de pluie 20, 30, 40, 60 et 80 mm sont retenues pour établir une régression multiple ascendante sur le modèle additif suivant :

$$L_r = aL_p + bIK_1 + cIV + dIR_1 + e \quad (3)$$

avec L_r : lame ruisselée (mm)
 L_p : lame précipitée (mm)
 IV : indice de végétation
 IK_1 : indice de pluie antérieure
 IR_1 : indice de rugosité

. Les régressions sont établies pour chaque répétition puis sur l'ensemble des deux (200 observations), afin de tester l'homogénéité de chaque site. A Sonkorong, le paramétrage n'est pas significativement différent entre répétitions et la qualité de la régression est satisfaisante. (Tableau 44). La valeur positive affectée au paramètre c souligne, à nouveau, l'interaction qui existe entre le couvert végétal et la rugosité du sol. A Nioro du Rip, les résultats sont moins probants; les différences de paramétrage entre répétitions sont significatives et la qualité de la régression finale ($r^2 = 0,740$) souffre des limites du modèle linéaire utilisé. Si l'indice de végétation (IV) est bien un facteur modérateur du ruissellement, l'absence de l'indice de rugosité (IR1) souligne son impact très réduit, compte tenu des faibles valeurs enregistrées (Tableau 44).

. Le remplacement de l'indice de rugosité statistique IR1 par l'indice géométrique IR2 n'apporte aucune amélioration au modèle si on se contente d'examiner les coefficients de régression à Sonkorong ($r^2 = 0,931$) ou à Nioro ($r^2 = 0,740$). De même pour les indices de pluie antérieure IK1 et IK3 proposés par Lamachère (1991), les écarts obtenus ne justifiant aucune modification de l'équation. Les renseignements de l'approche séquentielle nous incitent à inclure les variables R et L_pIK_1 dans le modèle univoque soient :

Tableau 43 : Description des états de surface finaux. Les valeurs du coefficient d'infiltration (Ki20: Lp = 50 mm et IK = 20), de l'intensité limite de ruissellement (Ilh) et de la pluie d'imbibition (Lpih) issues du catalogue des états de surface (Casenave et Valentin, 1989) sont comparées aux valeurs expérimentales (en gras).

Site	Traitement	Porosité vésiculaire	Couverture	Relief	Type de surface	Ki20 (%)	Ilh (mm/h)	Lpih (mm)
Sonkorong	floraison	5 - 30 %	> 50 %	moyen	C2 relief	75 à 85 50	10 à 20 16	5 à 10 10
	végétation	5 - 30 %	< 50 %	faible	C2 modal	50 à 70 39	1 à 7 10	2 à 4 4
	veg. sarclé	5 - 30 %	< 50 %	faible	C2 modal	50 à 70 47	3 à 7 6	4 à 4 6
	implantation	5 - 30 %	< 50 %	faible	C2 modal	50 à 70 53	5 à 7 13	6 à 4 9
Nioro	floraison	< 5 %	> 50 %	faible	C1 couvert	85 à 95 82	25 à 35 36	20 à 30 19
	végétation	< 5 %	< 50 %	faible	C1 modal	75 à 85 76	15 à 25 30	5 à 15 16
	veg. sarclé	< 5 %	< 50 %	faible	C1 modal	77 à 85 77	17 à 25 24	7 à 15 11
	implantation	< 5 %	< 50 %	faible	C1 modal	79 à 85 80	19 à 25 33	9 à 15 16

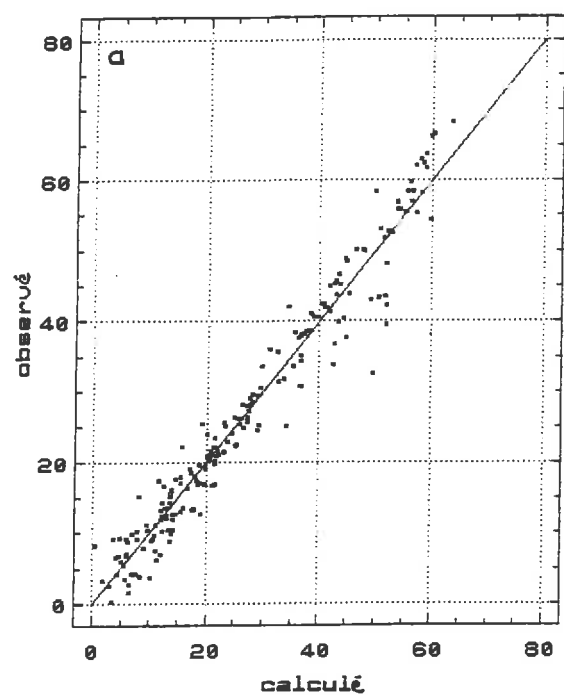
Tableau 44 : Paramètres de régression calculés, pour chaque site étudié, à partir de l'équation (3). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Site	Répétition	obs.	a	b	c	d	e	r^2	$s(y)$
Sonkorong	1	100	0.776	0.071	0.137	-0.169	-2.213	0.974	2.91
	2	100	0.756	0.096	0.109	-0.178	-4.113	0.956	3.63
	1 + 2	200	0.765	0.084	0.126	-0.169	-3.561	0.957	3.67
Nioro	1	100	0.415	0.176	-0.07		-10.071	0.760	5.81
	2	100	0.322	0.152	-0.057		-7.792	0.760	4.63
	1 + 2	200	0.369	0.164	-0.064		-8.912	0.740	5.49

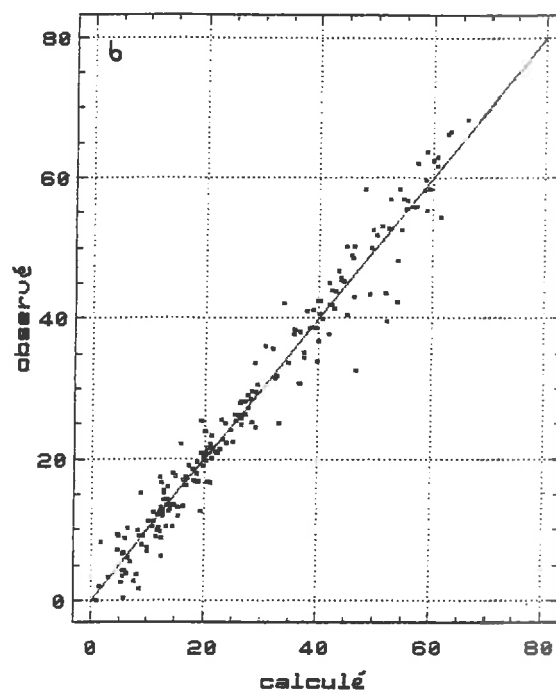
Tableau 45 : Paramètres de régression calculés, pour chaque site étudié, à partir des équations (4) et (5). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Site	obs.	a	b	c	d	e	f	r^2	$s(y)$
Sonkorong eq. (3)	200	0.678		0.0019	0.124	-0.168	0.261	0.962	3.43
Nioro eq. (4)	200	0.137	-0.065	0.005	-0.064		1.73	0.823	4.54
Nioro eq. (5)	200	0.132	-0.054	0.0047	-0.064		2.799	0.832	4.42

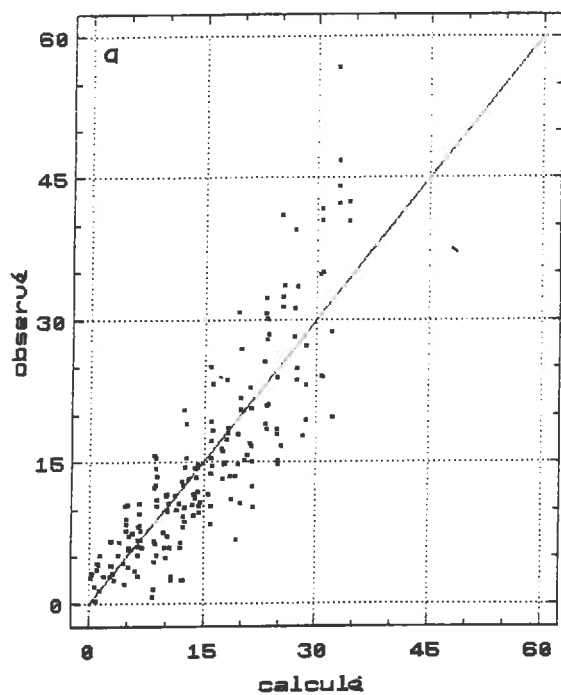
SONKORONG



SONKORONG



NIORO



NIORO

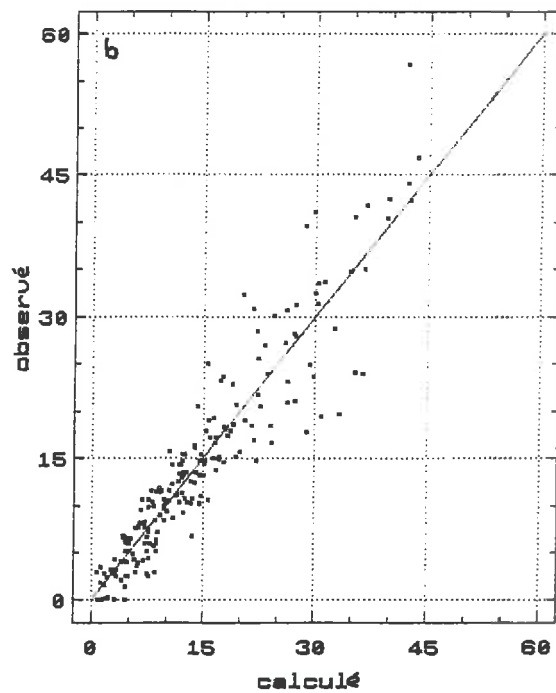


Figure 58 : Ajustement des lames ruisselées simulées aux valeurs observées. (a) : utilisation de l'équation (3); (b) : utilisation de l'équation (4) à Sonkorong et (5) à Nioro.

$$Lr = aLp + bIK1 + cLpIK1 + dIV + eIR1 + f \quad (4)$$

et

$$Lr = aR + bIK1 + cLpIK1 + dIV + eIR1 + f \quad (5)$$

Comme on pouvait s'y attendre, la variable R est rejetée sur le site de Sonkorong et la variable LpIK1 n'apporte qu'une faible amélioration à une régression déjà satisfaisante. A Nioro, en revanche, la qualité de la régression progresse en grande partie grâce à l'introduction de la variable LpIK1 (Tableau 45 et Figure 58).

5.8 Discussion :

. Si on considère les lames ruisselées (Lr) utilisées pour caler les différents modèles on constate que la part de la variance expliquée par la lame précipitée (Lp) représente 87 % à Sonkorong et 54 % à Nioro du Rip. L'indice de pluie antérieure (IK1) explique, respectivement, 5,0 % et 25,0 % de la variance globale. En comparaison, l'indice de végétation (IV : 0,1 % et 1,7 %) et l'indice de rugosité (IR1 : 3,7 % et 0,2 %) semblent bien modestes, pourtant les cumuls de hauteurs d'eau ruisselées différencient nettement les stades cultureux étudiés. Les écarts entre traitements extrêmes avoisinent 21 % à Sonkorong et 45 % à Nioro du Rip, soit une hauteur d'eau proche de 45 mm dans les deux cas. Ce paradoxe apparent découle de contingences reliant l'évolution du couvert d'arachide à l'état de surface du sol :

- à un stade végétatif donné peut correspondre un type de relief particulier imposé par le calendrier cultural. Sa valeur de rugosité globale peut ne pas être comparable à celles définies lors de stades ultérieurs ;

- pour un type de relief donné, le taux de couverture influence en partie l'évolution de la rugosité, fortement liée par ailleurs au type de sol ;

. Ces quelques conclusions rejoignent celles énoncées par Lafforgue (1977), Roose (1977), Thébé (1987) ou Stocking (1988). On s'aperçoit ainsi que deux stades cultureux éloignés, Implantation et Floraison, peuvent aboutir à des valeurs comparables de ruissellement global, de pluie d'imbibition ou d'intensité de ruissellement.

. L'étude des pluies d'imbibition (Lpi) montre que la rugosité créée par le sarclo-binage a une influence significative mais fugace sur le démarrage du ruissellement. Ce constat est en accord avec les résultats des travaux réalisés en zone tropicale par Chevallier (1982), Hoogmoed et Stroosnijder (1984) ou Lamachère (1991). Lors de la première averse, la cinétique d'infiltration traduit les transformations progressives de la surface fraîchement sarclée comme l'ont observé Rawitz et al. (1981), Hoogmoed et Klaij (1991) ou Gresillon (1991). Par la suite, les organisations pelliculaires mises en place peuvent conduire à des intensités d'infiltration voisines, voire inférieures, à celles mesurées sur une parcelle non travaillée. Collinet (1988) et Valentin (1991) aboutissent à des conclusions voisines.

. La plupart des auteurs cités ont travaillé sur des sols nus alors que nos sarclo-binages ont été effectués sous des couverts d'arachide allant de 15 à 30 % de recouvrement. Force est de constater l'inefficacité d'une telle couverture pour la protection de la surface du sol (Elwel et Stocking, 1974 ; Sharma et al., 1976), dont l'évolution correspond aux descriptions fournies par Valentin (1981), Valentin et Ruiz Figueroa (1987) ou Poss et al. (1988) :

- Phase 1 : Colmatage de la surface par fonte des mottes, dès l'ondée préliminaire (I = 30mm/h). Une structure en cratères s'individualise en surface et les premières surfaces luisantes apparaissent et se transforment en flaques isolées.

- Phase 2 : Forte réorganisation de la surface sous l'effet du tassement et de la liquéfaction de l'horizon superficiel. Les structures en cratères reculent face aux croûtes d'érosion et de ruissellement. Les flaques deviennent coalescentes.

- Phase 3 : Naissance du ruissellement peu après le changement d'intensité pluviométrique (I = 120 ou 135 mm/h). Le relief s'estompe et les croûtes de ruissellement deviennent dominantes. Le couvert d'arachide protège les zones sous-

jaçentes qui émergent encore entre les flaques.

- **Phase 4** : Mise en charge de la parcelle. Un film d'eau continu recouvre la quasi-totalité de la surface, le relief est minimum. La diminution progressive de l'intensité pluviométrique peut entraîner un retour à la phase précédente si l'intensité d'infiltration reste élevée.

- **Phase 5** : Dessication de la surface. Les croûtes de ruissellement occupent la majorité de la surface, accompagnées latéralement de croûtes d'érosion et de quelques reliques de croûtes structurales sur le relief résiduel.

. **En conclusion, un couvert d'arachide bien développé a deux actions majeures sur l'évolution des états de surface du sol. La première consiste à protéger le relief sous-jacent et, ce faisant, à maintenir la détention superficielle des eaux de pluie. La seconde, consiste à ralentir la transformation des croûtes superficielles situées au sommet des micro-buttés qui sont alignées sur le rang de semis. Cette action influence directement les valeurs de conductivité hydraulique des surfaces concernées.**

CINQUIEME PARTIE :

**GENESE DU RUISSELLEMENT
SOUS PLUIES NATURELLES**

6 ETUDE DU RUISSELLEMENT SOUS PLUIES NATURELLES :

6.1 Collecte des données :

. En 1986, quatre parcelles de ruissellement ($1 \times 1 \text{ m}^2$) ont été installées dans le bassin versant S4 situé sur la terrasse colluvio-alluviale. Nous reviendrons ultérieurement sur le choix des emplacements, mais retenons que le dispositif intègre l'hétérogénéité spatiale de la zone considérée. Quatre autres parcelles ont été mises en place, dans le même temps, dans le bassin versant S5 situé sur le glacis d'épandage.

. Sur chaque site, pour la période 1988/1992, une base de données hydrologiques est constituée à partir :

- des relevés pluviométriques journaliers sur chaque bassin versant,
- des mesures de ruissellement journalières,
- des intensités pluviométriques maximales en 5 et 10 minutes (I5 et I10 mm/h) enregistrées au pluviographe le plus proche (bassin versant S2),
- des valeurs de l'indice d'agressivité (R) calculées pour chaque pluie à partir des hyétogrammes obtenus au pluviographe précédent,
- des valeurs de IK1 calculées à partir des pluies journalières.

. L'hétérogénéité spatiale de certaines averses doit nous amener à utiliser avec prudence les variables I5, I10 et R malgré le faible éloignement des bassins versants S4 (500 m) et S5 (900 m) du pluviographe choisi. Cette base de données est complétée par une fiche de renseignements agronomiques qui fournit pour chaque parcelle de ruissellement :

- le type de culture,
- la date de travail du sol,
- les dates de semis et de récolte,
- les dates de sarclages,
- l'état de la végétation à la récolte.

. Les parcelles de ruissellement ont fait l'objet d'un suivi de leur couvert végétal à partir de 1989. La qualité du suivi diffère selon le type de culture :

- Dans le cas de l'arachide, trois dates d'observation sont disponibles par an. L'appréciation visuelle du taux de recouvrement est aisée et permet d'obtenir un paramètre d'évolution quantitatif.
- Dans la cas du mil et du sorgho, l'appréciation du taux de recouvrement est possible jusqu'au tallage, au-delà une simple description qualitative est utilisée. L'évolution du couvert n'a pu être quantifiée.
- Dans le cas du coton aucune mesure n'a été effectuée.

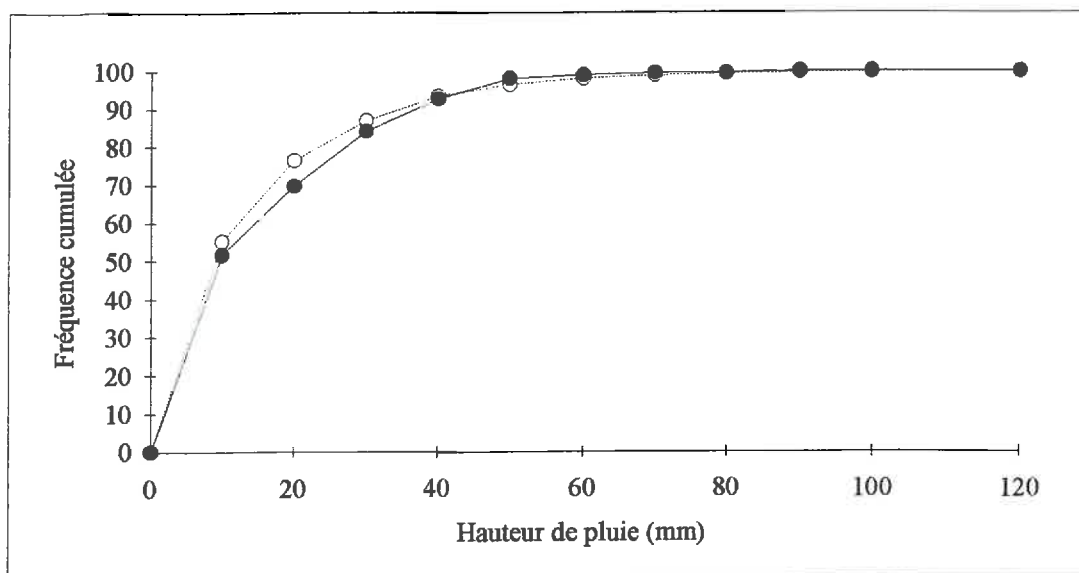


Figure 59 : Fréquences cumulées des hauteurs de pluie journalières. Nioro du Rip (○) durant la période 1969-1992 et bassin versant S4 (●) durant la période 1988-1992.

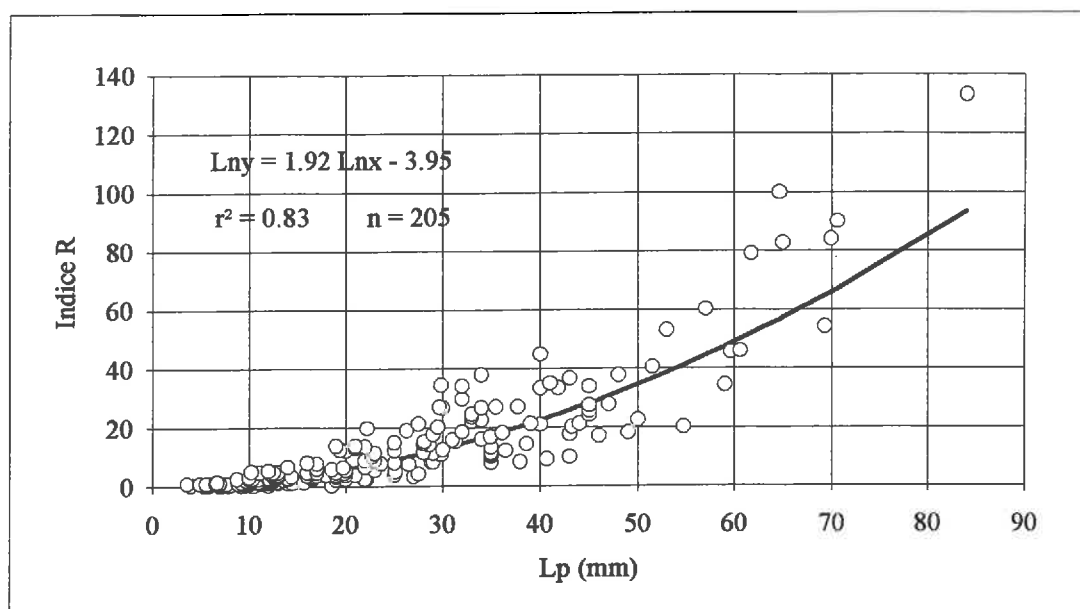


Figure 60 : Relation entre l'indice d'agressivité (R) et la hauteur de pluie (Lp en mm). Période 1983 - 1992.

6.2 Les données pluviométriques :

. Toutes les pluies inférieures à 0,5 mm ont été écartées de l'échantillon, ce qui porte le nombre d'observations à 205 sur le bassin versant S4 et 203 sur S5, pour la période 1988-1992. Près de 52 % des événements enregistrés présentent une lame précipitée inférieure à 10 mm, soit une hauteur d'eau moyenne de 16 mm. Les courbes de fréquence cumulée sont en accord avec celle établie précédemment pour la période de référence 1969-1992 à Nioro du Rip (Figure 59) ; on note, toutefois, un léger déficit de petites pluies (< 20 mm) compensé par celles des classes intermédiaires (20 à 50 mm).

. L'analyse fréquentielle pour la période de référence donnait des hauteurs de pluie de récurrence biennale de 81,9 mm et de récurrence quinquennale de 108,8 mm, les fréquences observées pour la période d'étude fournissent des valeurs inférieures : 70,6 mm (S4) et 63,0 mm (S5) pour la biennale; 84,5 mm (S4) et 83,0 mm (S5) pour la décennale.

. Les valeurs d'intensité pluviométrique maximale dix minutes (I10) sont calculées de manière exhaustive pour toutes les pluies supérieures ou égales à $L_p = 8$ mm, au pluviographe choisi. Ces valeurs sont affectées aux pluies journalières correspondantes sur S4 et S5. Des pannes instrumentales nous ont privés d'un certain nombre d'enregistrements, entraînant ainsi des lacunes dans les bases de données :

- bassin versant S4 : 8 données manquantes, soient 125 averses exploitées,
- bassin versant S5 : 10 données manquantes, soient 121 averses exploitées.

. Les valeurs de I10 inférieures à 38 mm/h représentent 50 % de l'échantillon dont la moyenne avoisine 48 mm/h. Ces chiffres confirment ceux trouvés par Dacosta (1992) à partir des enregistrements du pluviographe installé sur le bassin versant S3, pour la période 1983-1988.

. L'indice d'agressivité (R) est calculé pour chaque pluie supérieure ou égale à $L_p = 8$ mm, à partir des énergies cinétiques calculées par tranches d'intensité. Afin d'obtenir une base de données complète, on affecte une valeur $R = 0$ aux pluies inférieures à 4 mm et $R = 0,5$ aux pluies comprises entre 4 et 8 mm. Les lacunes existantes pour des valeurs plus fortes sont remplacées par les valeurs issues de l'équation de régression établie entre R et L_p , pour la période 1983-1992 (205 observations) (Figure 60). Ces valeurs sont proches de celles proposées par Roose (1977) pour différentes hauteurs de pluie dans la zone soudano- sahélienne.

6.3 Les données agronomiques :

. Chaque parcelle de ruissellement est incluse dans une parcelle agricole dont elle partage l'itinéraire technique. Les dates et types de travaux sont identiques mais les interventions sont parfois effectuées manuellement dans les parcelles de ruissellement car leurs dimensions réduites gênent la culture attelée. La rotation mil/arachide est respectée sur le bassin versant S4. L'assolement entraîne une opposition culturale entre les parcelles S41, S43, S44 et la parcelle S46. Sur le bassin versant S5, l'introduction du coton et du sorgho perturbent la rotation. La parcelle S57 est placée dans une jachère arbustive située à proximité et qui s'étendait sur une partie du bassin versant, avant défrichage en 1987. Les tableaux 46 et 48 résument les principales informations agronomiques disponibles qui permettent une première analyse des données hydrologiques.

. A partir de 1990, les états de surface sont décrits régulièrement. Ces observations font appel à la typologie des surfaces élémentaires proposée par Casenave et Valentin (1989). La caractérisation des parcelles a été gênée par différents facteurs (Tableaux 47 et 49) :

Tableau 46 : Calendriers culturels des parcelles situées dans le bassin versant S4. Période 1988-1992.

Parcelle	Opération	1988	1989	1990	1991	1992
S41	culture	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)
	préparation	03.Jun	02.Jun		06.Jun	
	semis	15.Jun	22.Jun	22.Jun	12.Jul	08.Jun
	sarclage 1	07.Jul	08.Jul	12.Jul	30.Jul	25.Jun
	sarclage 2	27.Jul	23.Jul	27.Jul	15.Aoû	23.Jul
	sarclage 3	07.Aoû	12.Aoû	09.Aoû		08.Aoû
	récolte	15.Oct	28.Oct	15.Oct	31.Oct	18.Sep
S43	culture	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)
	préparation	03.Jun	02.Jun	19.Jun	20.Jun	
	semis	15.Jun	16.Jun	22.Jun	11.Jul	08.Jun
	sarclage 1	07.Jul	08.Jul	12.Jul	29.Jul	25.Jun
	sarclage 2	27.Jul	23.Jul	27.Jul	12.Aoû	23.Jul
	sarclage 3	07.Aoû	12.Aoû	09.Aoû	25.Aoû	08.Aoû
	récolte	15.Oct	17.Oct	15.Oct	30.Oct	18.Sep
S44	culture	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)
	préparation	02.Jun		15.Jun	05.Jun	
	semis	22.Jun	22.Jun	23.Jun	13.Jul	09.Jun
	sarclage 1	01.Jul	06.Jul	13.Jul	29.Jul	01.Jul
	sarclage 2	19.Jul	19.Jul	23.Jul	08.Aoû	19.Jul
	sarclage 3		05.Aoû	08.Aoû	27.Aoû	31.Jul
	récolte	10.Oct	18.Oct	10.Oct	30.Oct	20.Sep
S46	culture	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)
	préparation	03.Jun	02.Jun	07.Aoû	06.Jun	16.Jun
	semis	25.Jun	13.Jun	30.Jun	11.Jul	28.Jun
	sarclage 1	03.Jul	30.Jun	23.Jul	19.Jul	18.Jul
	sarclage 2	03.Aoû	20.Jul	03.Aoû	05.Aoû	27.Jul
	sarclage 3		01.Aoû	15.Aoû	20.Aoû	04.Aoû
	récolte	13.Oct	21.Sep	27.Oct	14.Oct	20.Oct

Tableau 47 : Description des états de surface. Les appréciations synthétisent l'ensemble des observations effectuées sur une parcelle. Bassin versant S4.

Parcelle	Porosité vésiculaire	Croûte structurale	Extension croûte ERO	Consistance croûte	Etat de surface
S41	<5%	ST1	lente	friable	C1
S43	<5%	ST1	lente	friable	C1
S44	5 à 10%	ST1/ST2	rapide	résistante	C1/C2
S46	5 à 10%	ST1/ST2	moyenne	résistante	C1/C2

Tableau 48 : Calendriers culturels des parcelles situées dans le bassin versant S5. Période 1988-1992.

Parcelle	Opération	1988	1989	1990	1991	1992
S51	culture	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	coton	arachide(7333)
	préparation	07.Jun	24.Mai	06.Jun		11.Jun
	semis	26.Jun	13.Jun	30.Jun	22.Jul	28.Jun
	sarclage 1	18.Jul	30.Jun	26.Jul	07.Aoû	14.Jul
	sarclage 2	15.Aoû	21.Jul	08.Aoû	17.Aoû	29.Jul
	sarclage 3		21.Aoû	20.Aoû	25.Aoû	17.Aoû
	récolte	25.Oct	22.Sep	29.Oct	19.Nov	21.Oct
S54	culture	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	coton	mil (Souna)
	préparation		24.Mai	08.Jun		
	semis	15.Jul	13.Jun	07.Jul	22.Jul	08.Jun
	sarclage 1	15.Aoû	30.Jun	28.Jul	07.Aoû	27.Jun
	sarclage 2		21.Jul	12.Aoû	17.Aoû	20.Jul
	sarclage 3		02.Aoû	25.Aoû	25.Aoû	02.Aoû
	récolte	30.Oct	22.Sep	03.Nov	19.Nov	22.Sep
S55	culture	arachide(7333)	mil (Souna)	arachide(7333)	mil (Souna)	sorgho
	préparation			01.Jul		28.Jun
	semis	24.Jul	19.Jun	17.Jul	18.Jun	16.Jul
	sarclage 1	30.Jul	30.Jun	29.Jul	18.Jul	28.Jul
	sarclage 2	15.Aoû	11.Jul	18.Aoû	31.Jul	16.Aoû
	sarclage 3		25.Jul	29.Aoû	20.Aoû	
	récolte	09.Nov	28.Sep	01.Nov	18.Oct	16.Nov
S57		jachère arb.	jachère arb.	jachère arb.	jachère arb.	jachère arb.

Tableau 49 : Description des états de surface. Les appréciations synthétisent l'ensemble des observations effectuées sur une parcelle. Bassin versant S5.

Parcelle	Porosité vésiculaire	Croûte structurale	Extension croûte ERO	Consistance croûte	Etat de surface
S51	5 à 30%	ST2	moyenne	résistante	C2
S54	5 à 30%	ST2	moyenne	résistante	C2
S55	5 à 30%	ST2	rapide	résistante	C2
S57	5 à 30%	ST2	rapide	résistante	C2

- le faible développement de la porosité vésiculaire,
- la reprise des croûtes superficielles par les interventions culturales ou le piétinement.
- l'influence du couvert végétal sur l'extension des organisations pelliculaires.

6.4 Les données hydrologiques :

6.4.1 Les parcelles situées sur la terrasse (S4) :

- Résultats à l'échelle annuelle :

. La pluviométrie annuelle a varié de 488,4 mm à 931,5 mm durant les cinq années d'étude. Les hauteurs d'eau mesurées en 1990 (488,4 mm) et 1991 (505,1 mm) sont inférieures à la valeur estimée pour l'année décennale sèche. Les ruissellements enregistrés sur les parcelles S41, S43, S44 et S46 traduisent cette hétérogénéité interannuelle mais également une importante variabilité spatiale (Tableau 50). Ces résultats appellent quelques commentaires :

- lors d'une année climatique peu agressive, les pertes relatives par ruissellement varient de 10 à 25 %. En 1988, année pluvieuse, les pertes s'échelonnent entre 20 et 40 % ;

- pour une même année, les valeurs passent du simple au double selon la parcelle étudiée. Le site S44 demeure le plus ruisselant durant toute la période ;

- ce suivi pluriannuel confirme les résultats obtenus sous pluies simulées sur le versant de Keur Dianko : à l'échelle de la surface élémentaire les sols de terrasse subissent des pertes par ruissellement notables dont il convient de tenir compte pour l'élaboration du bilan hydrique des cultures.

- Résultats à l'échelle de l'averse :

. Une forte proportion d'événements pluvieux n'occasionnent aucun ruissellement. Pour chaque parcelle, nous avons déterminé les seuils interannuels de lame précipitée (L_{plim}), d'intensité pluviométrique maximale en dix minutes (I_{10lim}) et d'indice d'agressivité (R_{lim}) à partir desquels le ruissellement prend naissance (Tableau 51). Les seuils sont définis à partir des séries classées par ordre croissant de lames ruisselées et correspondent à un ruissellement cumulé de 1 mm, ce procédé permet de s'affranchir du caractère erratique des très faibles valeurs de ruissellement enregistrées. Sur un total de 205 observations seuls 107 se trouvent au-dessus du seuil L_{plim} pour le site S41, 130 pour S43, 140 pour S44 et 117 pour S46. L'examen du tableau 52 permet de constater que **les pluies les plus violentes engendrent des ruissellement moyens importants mais que les pertes cumulées sur l'ensemble de la période sont issues, pour 65 % environ, des pluies de classe intermédiaire (20 à 50 mm).**

. L'hétérogénéité de la réponse hydrologique entre parcelles apparaît clairement après examen des courbes de doubles cumuls des écoulements (Figure 78). En prenant la parcelle S41 comme référence, on observe une réponse équivalente des parcelles S43 (pente : 0,94) et S46 (pente : 1,06) malgré des rotations opposées. En revanche, la parcelle S44 subit une dérive monotone durant toute la période (pente : 1,68), attribuable, pour l'essentiel, à la variabilité des états de surface du bassin versant. L'étude de cette variabilité sera développée dans la sixième partie.

Tableau 50 : Bilan annuel des lames précipitées (Lp), des indices d'agressivité (R) et des lames ruisselées (Lr). Parcelles situées sur le bassin versant S4.

Année	Lp (en mm)	Indice R	Lr (en mm)			
			S41	S43	S44	S46
1988	931.5	449.5	239.3	222.4	389.7	204.5
1989	752.1	258.2	68.7	66.2	135.2	128.7
1990	488.4	246.7	67.0	51.9	105.1	74.5
1991	505.1	267.0	55.7	68.3	82.0	68.8
1992	594.1	320.0	85.0	96.2	159.6	69.2

Tableau 51 : Seuils interannuels de naissance du ruissellement pour les lames précipitées (Lplim), les intensités pluviométriques (I10lim) et les indices d'agressivité (Rlim).

Parcelle	S41	S43	S44	S46
Lplim (en mm)	10.5	7.0	6.0	9.0
I10lim (en mm/h)	24.0	20.0	18.0	20.0
Rlim	1.2	1.1	1.1	1.1

Tableau 52 : Valeurs de la lame ruisselée moyenne (<Lr>) et de la lame ruisselée cumulée (Lr cumul) par classes de lames précipitées.

Classe de pluie	obs.	S41		S43		S44		S46	
		<Lr>	Lr cumul	<Lr>	Lr cumul	<Lr>	Lr cumul	<Lr>	Lr cumul
] 0 , 10]	98	0.0	0.8	0.0	1.0	0.1	5.5	0.0	2.1
] 10 , 20]	45	0.8	34.0	0.8	35.4	2.0	89.8	1.2	54.7
] 20 , 50]	56	6.1	339.0	5.9	330.7	10.2	572.4	6.5	362.9
] 50 , 100]	6	23.7	141.9	23.0	137.9	34.0	203.9	21.0	126.1

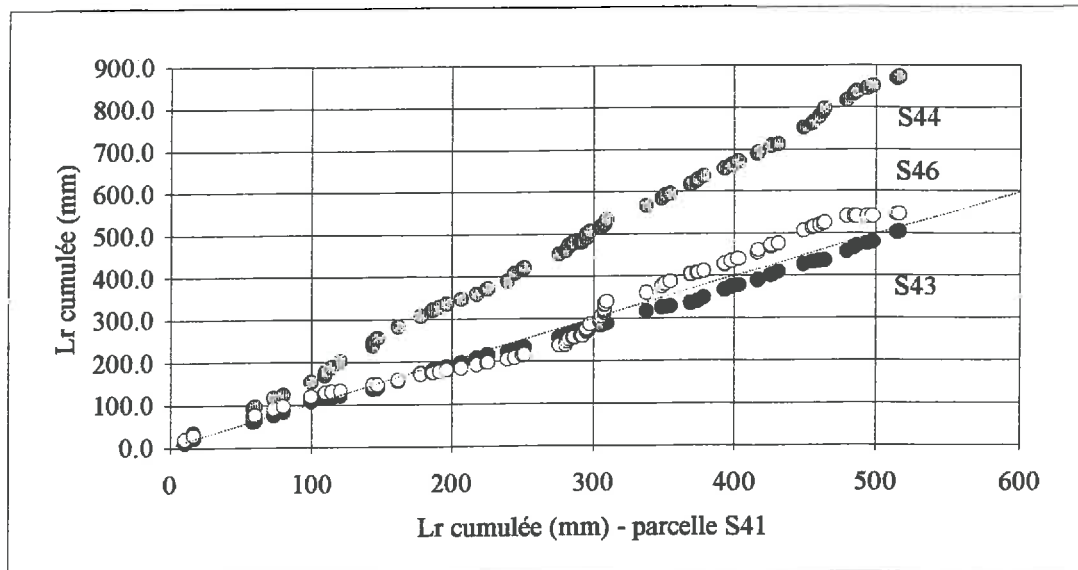


Figure 61 : Courbes de doubles cumuls des écoulements. La parcelle S41 est prise comme référence. Bassin versant S4, période 1988-1992.

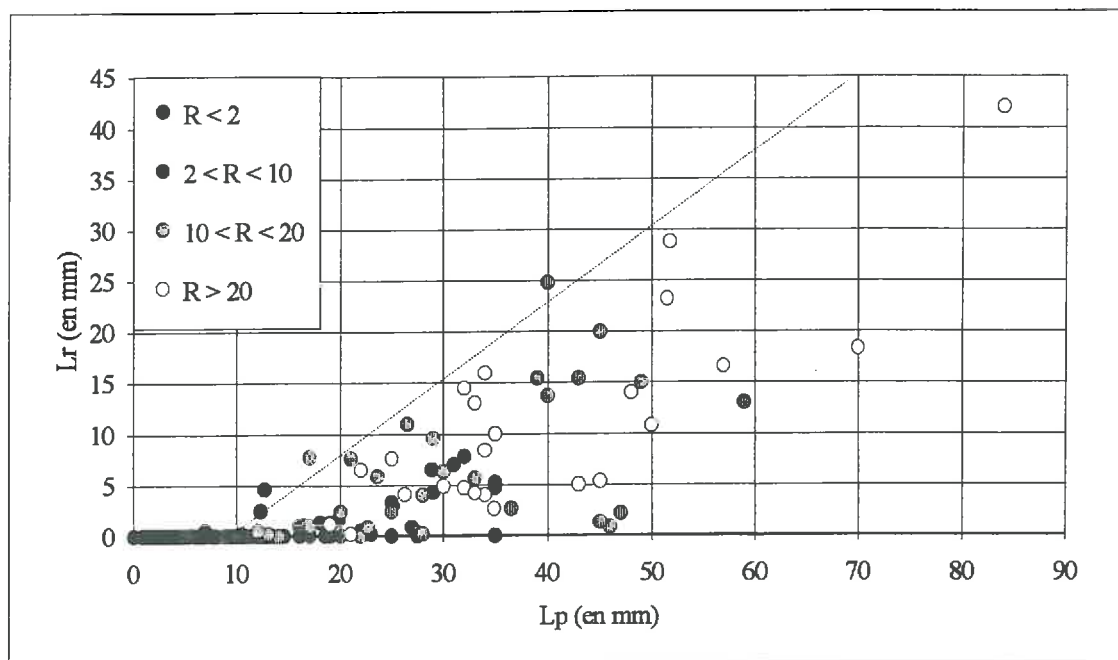


Figure 62 : Relation entre les lames précipitées (L_p) et ruisselées (L_r). Influence de l'indice d'agressivité (R). Parcelle S41, période 1988-1992.

- *Analyse factorielle des correspondances* :

. La figure 62 illustre la liaison très lâche qui existe entre les lames précipitées (Lp) et ruisselées (Lr) d'un même site. Il est certes possible de tracer une droite limite, caractéristique d'une aptitude maximale au ruissellement, mais on ne rend pas compte de la complexité des relations entre le type de couvert végétal, le stade cultural, l'état hydrique du sol et le type d'averse. A elle seule, la variable Lp n'explique pas plus de 50 à 60 % de la variance globale. Afin d'aller plus loin, nous avons effectué une analyse factorielle multiple, après codage disjonctif complet des variables suivantes :

- Coefficient de ruissellement (Kr en %) :

Kr1 : $K_r = 0$

Kr2 : $0 < K_r < 10$

Kr3 : $10 < K_r < 50$

- *Lame précipitée (Lp en mm)* :

Lp1 : $L_{plim} < L_p < 15$

Lp2 : $15 < L_p < 30$

Lp3 : $30 < L_p < 90$

- *Type de culture (CULT)* :

CU1 : CULT = mil

CU2 : CULT = arachide

- *Stade cultural (VEG)* :

VG1 : VEG = 1 début hivernage à semis + 10 jours

VG2 : VEG = 2 semis + 10 jours à semis + 40 jours

VG3 : VEG = 3 semis + 40 jours à semis + 70 jours

VG4 : VEG = 4 semis + 70 jours à fin hivernage

- *Indice de pluie antérieure (IK)* :

IK1 : $0 < IK < 2$

IK2 : $2 < IK < 10$

IK3 : $10 < IK < 60$

- *Indice d'agressivité (R)* :

R1 : $R_{lim} < R < 5$

R2 : $5 < R < 15$

R3 : $15 < R < 133$

. Chaque averse constitue une observation ; sur les 205 événements disponibles, nous avons écarté les averses inférieures au seuil L_{plim} car leur poids statistique est trop important et l'information apportée assez pauvre. Un second problème surgit avec l'alternance annuelle des cultures sur une même parcelle : les hivernages très contrastés et le nombre impair d'années d'étude peuvent biaiser l'analyse. Aussi, avons-nous regroupé les résultats des sites S41 et S46 afin d'équilibrer l'échantillon et augmenter le nombre d'observations (224). La figure 63 présente le plan factoriel (1-2) issu de l'analyse

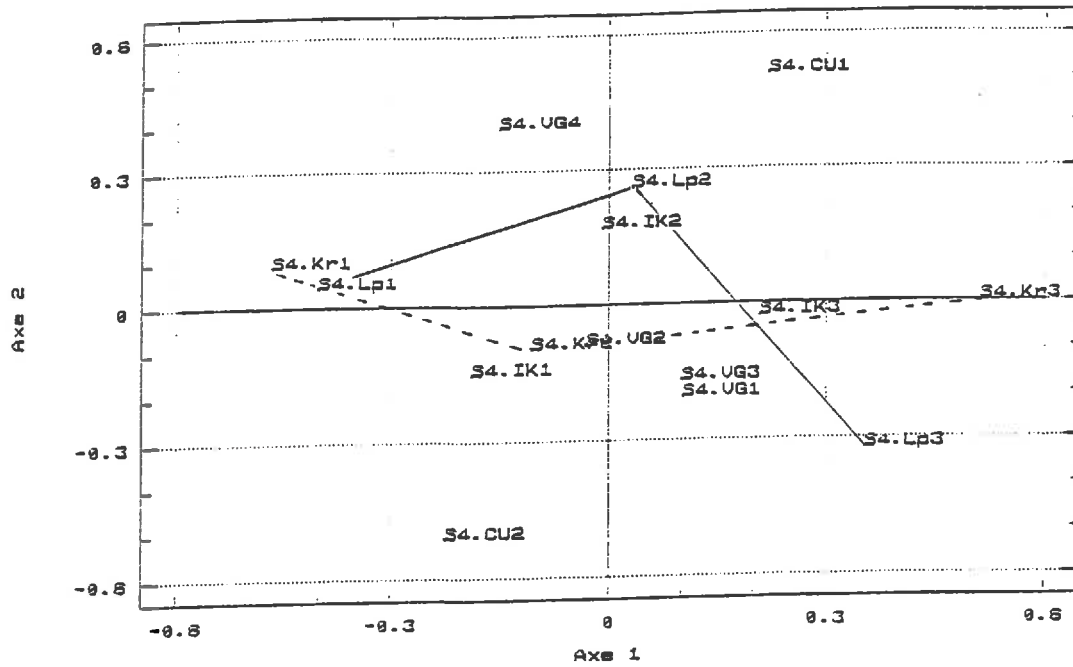


Figure 63 : Analyse factorielle des correspondances, plan factoriel 1-2. Parcelles S41 et S46.

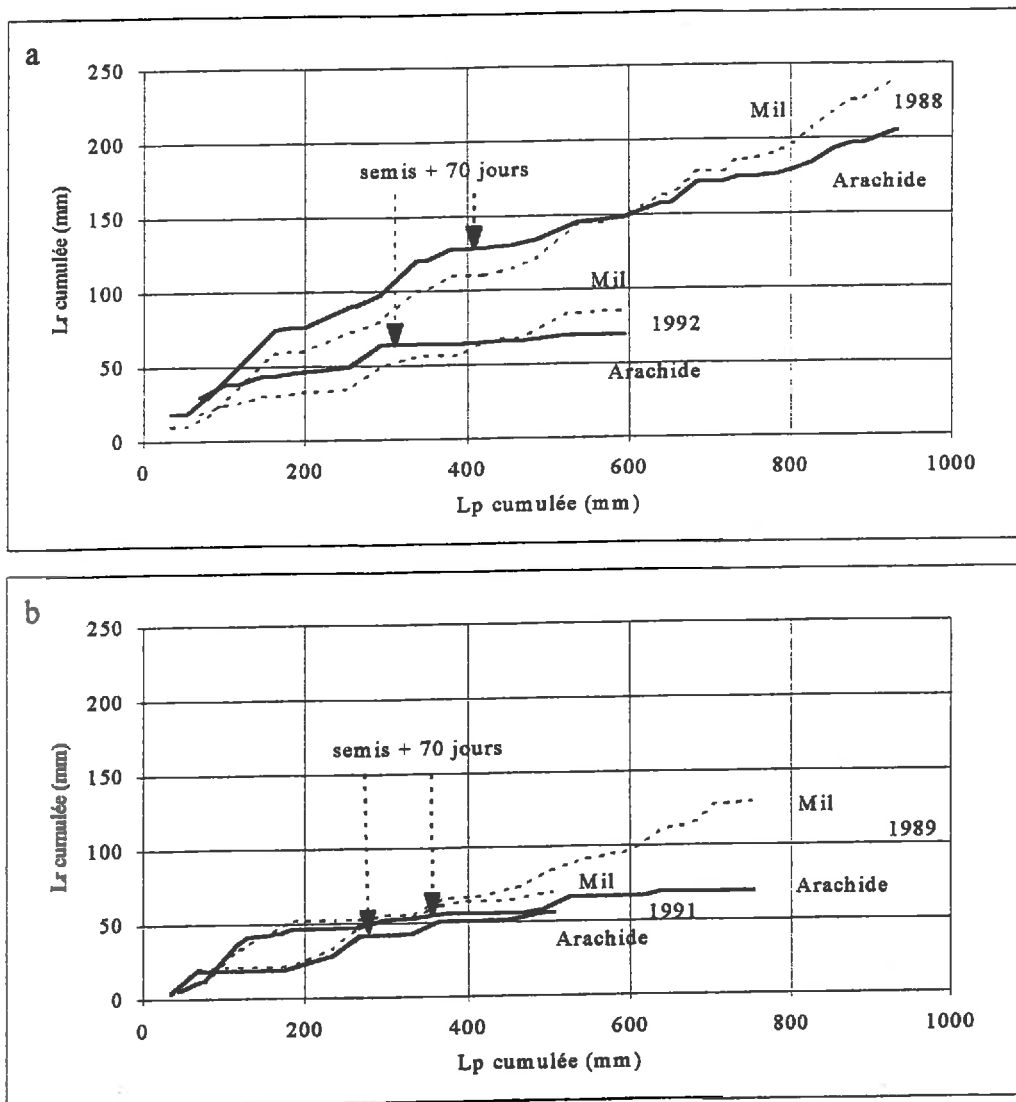


Figure 64 : Influence du type de culture sur l'évolution des lames ruisselées.
(a) : S41 semée en mil et S46 en arachide, (b) : S41 semée en arachide et S46 en mil.

finale, la variable R, redondante, a été écartée. La part de la variance globale expliquée est faible (44 %), on peut cependant faire les remarques suivantes :

- l'axe 1 est défini par les variables hydrologiques et oppose les coefficients de ruissellement élevés (KR3) et faibles (KR1). les premiers sont associés aux fortes averses (Lp3) et aux sols humides (IK3), les secondes aux faibles pluies (Lp1) ;

- l'axe 2 est défini par les variables agronomiques et oppose nettement les deux types de culture (CU1 et CU2). Il semble exister une liaison entre le premier stade cultural (VG1) et les fortes pluies (Lp3), de même entre le dernier stade cultural (VG4) et les pluies moyennes (Lp2). Dans les deux cas la relation avec le ruissellement est hésitante et nécessite une analyse plus approfondie.

. Concernant le premier stade cultural (VG1), l'étude des fréquences relatives des différentes modalités de la variable Lp permet de confirmer que la classe Lp3 est légèrement surévalué par rapport à l'échantillon total (41% contre 31%). On observe des écarts plus nets encore si on s'intéresse à la variable Kr: la classe Kr3 passe de 46% à 65%. **Cela traduit deux évidences de terrain, pour l'agronome sahélien : en début d'hivernage, la probabilité d'occurrence d'un orage violent et l'aptitude des sols au ruissellement sont élevées.**

. En fin de cycle (VG4), une étude analogue permet d'établir que 54 % des averses appartiennent à la classe Lp2, contre 41 % pour l'échantillon total. Les fortes pluies (Lp3) sont peu représentées : 15 % contre 31 %. Une distinction très nette apparaît entre les cultures de mil et d'arachide si on analyse les coefficients de ruissellement au stade cultural VG4 :

- sous mil, la majorité des averses sont caractérisées par des coefficients de ruissellement élevés (Kr3 : 55 %),

- sous arachide, la majorité des averses sont caractérisées par des coefficients de ruissellement faibles (Kr1 : 56 %).

. La figure 64 permet de constater que ce phénomène persiste quelles que soient l'année et la parcelle de ruissellement choisies. D'aucun pourrait évoquer l'influence de la récolte précoce du mil sur une reprise du ruissellement lors des pluies ultérieures, en fait le décalage s'amorce bien plus tôt et met d'avantage en cause l'arachide que le mil : **70 jours après le semis (fin du stade VG3), le couvert végétal de l'arachide est suffisamment développé pour protéger efficacement le sol et réduire le ruissellement. A l'inverse, l'évolution du couvert de mil ne semble pas influencer l'aptitude au ruissellement de la parcelle.**

6.4.2 Les parcelles situées sur le glacis (S5) :

- *Résultats à l'échelle annuelle :*

. La pluviométrie annuelle a varié entre 433,8 mm et 971,2 mm durant les cinq années d'étude. Les hauteurs d'eau sont proches de celles enregistrées sur la terrasse (S4), permettant ainsi des comparaisons entre sites expérimentaux. Cependant, l'analyse des résultats est rendue délicate par l'irrégularité des rotations sur les trois parcelles cultivées (S51, S54 et S55). L'examen du tableau 53 permet d'établir que :

- **sous culture, les pertes relatives par ruissellement varient de 18 à 40 % pour des hivernages à faible pluviométrie. En 1988, ces pertes atteignent 35 % sur la parcelle S55 ;**

- la parcelle S55 conserve la meilleure aptitude au ruissellement durant toute la période d'étude. Seules les années 1989 et 1990 permettent de s'affranchir, en partie, de l'influence de la rotation sur les écarts constatés ;

Tableau 53 : Bilan annuel des lames précipitées (Lp), des indices d'agressivité (R) et des lames ruisselées (Lr). Parcelles situées sur le bassin versant S5.

Année	Lp (en mm)	Indice R	Lr (en mm)			
			S51	S54	S55	S57
1988	917.2	434.5	275.8	141*	322.9	210.5
1989	740.2	253.6	171.7	139.7	225.6	112.1
1990	433.8	246.5	98.6	86.1	143.7	97.2
1991	505.6	268.2	128.4	102.5	198.9	110.1
1992	603.0	277.9	108.8	120.4	215.0	123.7

(* : données manquantes)

Tableau 54 : Seuils interannuels de naissance du ruissellement pour les lames précipitées (Lplim), les intensités pluviométriques (I10lim) et les indices d'agressivité (Rlim).

Parcelle	S51	S54	S55	S57
Lplim (en mm)	6.0	7.0	6.0	7.0
I10lim (en mm/h)	11.0	11.0	11.0	24.0
Rlim	0.7	0.8	0.8	0.8

Tableau 55 : Valeurs de la lame ruisselée moyenne (<Lr>) et de la lame ruisselée cumulée (Lr cumul) par classes de lames précipitées.

Classe de pluie	obs.	S51		S54*		S55		S57	
		<Lr>	Lr cumul	<Lr>	Lr cumul	<Lr>	Lr cumul	<Lr>	Lr cumul
] 0 , 10]	104	0.2	18.6	0.0	4.1	0.2	18.5	0.1	6.9
] 10 , 20]	41	1.7	68.3	1.0	37.6	3.1	125.9	1.4	57.1
] 20 , 50]	51	10.7	547.7	9.2	375.8	14.1	718.0	8.2	420.1
] 50 , 100]	7	21.5	150.7	24.6	172.2	34.8	243.7	24.2	169.5

(* : données manquantes)

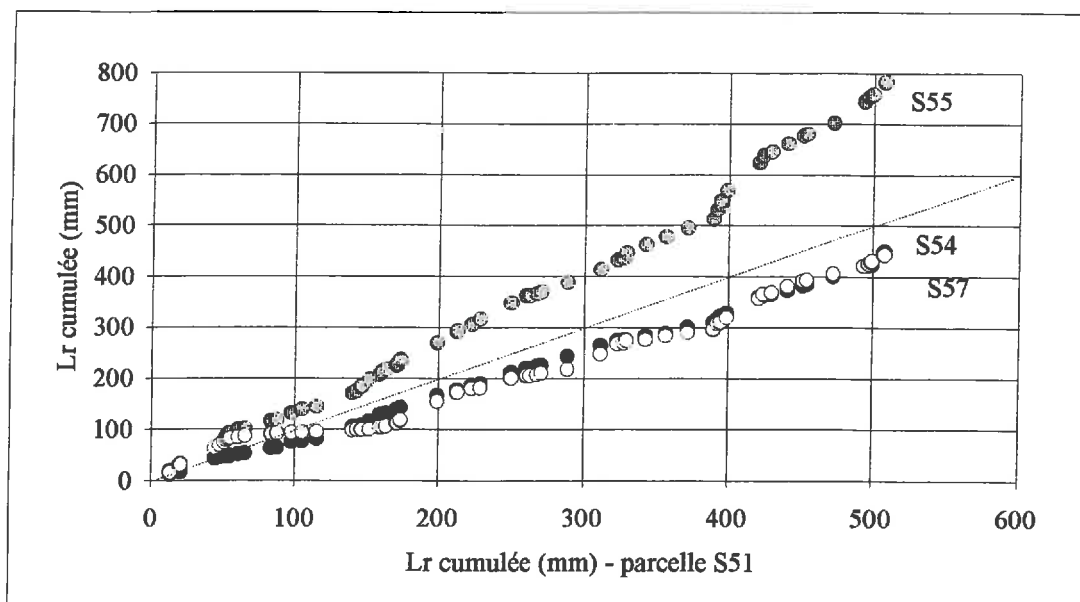


Figure 65 : Courbes de doubles cumuls des écoulements. La parcelle S51 est prise comme référence. Bassin versant S5, période 1989-1992.

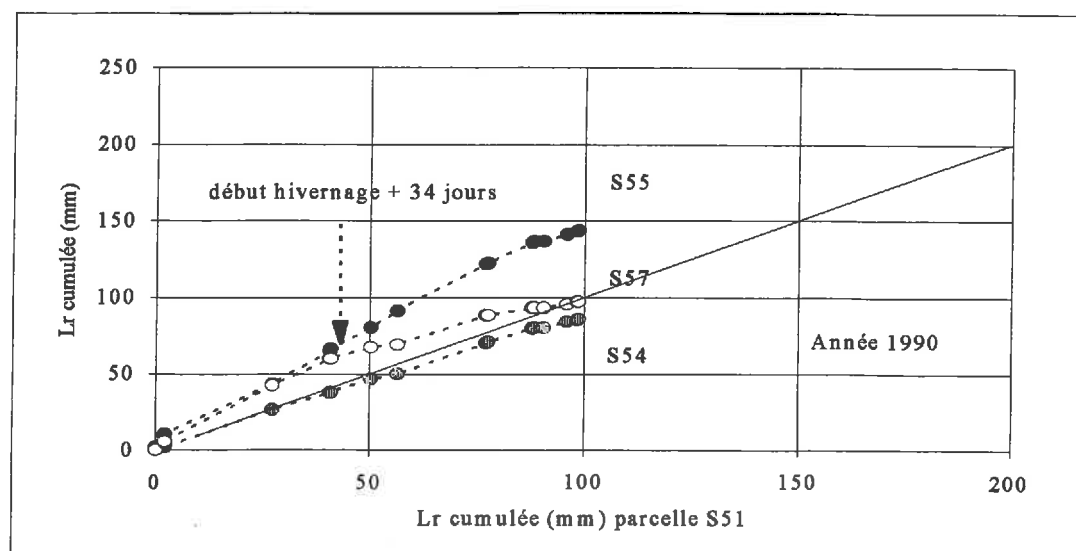
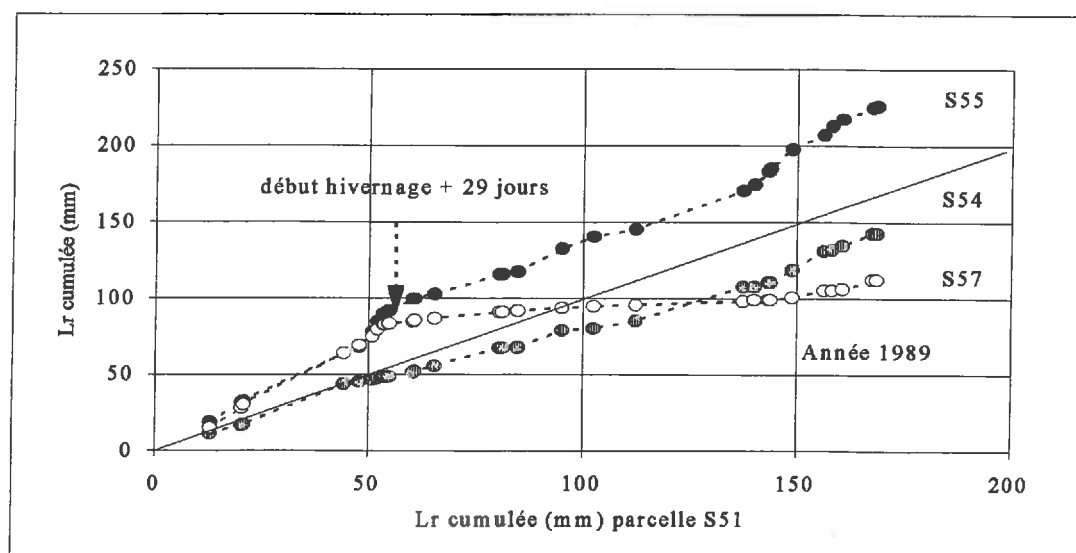


Figure 66 : Influence du mode d'occupation du sol sur l'évolution des lames ruisselées. (a) : 1989, (b) : 1990.

- les écoulements mesurés sous jachère (S57) semblent peu différents de ceux obtenus sous culture, quelle que soit l'année. Cependant, une analyse plus poussée est nécessaire pour dissocier les influences du sol et du couvert végétal.

- Résultats à l'échelle de l'averse :

. Nous avons déterminé les seuils interannuels de lame précipitée (L_{plim}), d'intensité pluviométrique maximale en dix minutes (I_{10lim}) et d'indice d'agressivité (R_{lim}) à partir desquels le ruissellement prend naissance (Tableau 54). Seuls 62 % à 66 % des pluies enregistrées produisent des écoulements à l'échelle du mètre carré.

. La valeur de I_{10lim} pour les parcelles cultivées (S51, S54 et S55) correspond à la moyenne de la variable I_{lh} calculée sur l'ensemble des traitements sous pluies simulées mis en place à Sonkorong ($I_{lh} = 11,2$ mm/h). En revanche, la pluie d'imbibition moyenne ($L_{pih} = 9,7$ mm) est supérieure aux valeurs du seuil de pluie (L_{plim}) établies en conditions naturelles. **Comme sur la terrasse colluvio-alluviale, les pluies de classe intermédiaire (20 à 50 mm) produisent 65 à 70 % des pertes par ruissellement cumulées sur l'ensemble de la période (Tableau 55).** Les différences de comportement entre parcelles situées sur le glacis ou la terrasse affectent principalement les pluies faibles à moyennes (0 à 50 mm), les pluies violentes engendrent des lames ruisselées moyennes voisines, dans la limite du nombre d'observations disponibles.

. Les courbes de doubles cumuls des écoulements sont établies en prenant la parcelle S51 comme référence (Figure 65), l'année 1988 est exclue compte tenu des lacunes présentes. La parcelle S55 subit une dérive monotone durant toute la période (pente : 1,52), alors que S54 (pente : 0,86) et S57 (pente : 0,84) fournissent une réponse hydrologique légèrement inférieure à la parcelle de référence. Cependant, l'analyse plus précise des années 1989 et 1990 montre que le comportement de la parcelle S57 peut se diviser en deux phases distinctes (Figure 66) :

- **une première phase** pendant laquelle l'aptitude au ruissellement est comparable à celle de la parcelle S55. D'une durée approximative de trente jours, cette phase correspond à la période d'installation de la strate herbacée annuelle, dans les conditions écologiques rencontrées. Le rôle protecteur du couvert végétal est négligeable par rapport aux caractéristiques intrinsèques de la surface ;

- **une seconde phase** pendant laquelle le ruissellement devient nettement plus faible que celui produit par la parcelle S55. La strate herbacée est installée et son taux de couverture (> 80 %) assure une protection efficace du sol. En 1989 et 1990, cette protection est supérieure à celle fournie par les couverts cultivés des parcelles S51 et S54.

- Analyse factorielle des correspondances :

. Ces comportements différenciés s'expriment également dans l'analyse factorielle multiple effectuée à partir des observations des parcelles S51 et S57 (Figure 67). Le découpage des variables est le même que précédemment, seul le type de culture (CULT) s'enrichit d'une classe supplémentaire correspondant à la jachère (CU3). La classe CU2 regroupe les cultures de mil et de coton. La part de la variance globale expliquée est faible (30 %) mais on remarque sur le plan factoriel (1 - 2) que le dernier stade cultural (VG4) différencie nettement culture (CU2) et jachère (CU3). L'analyse des données hydrologiques est sensiblement identique à celle développée pour les parcelles S41 et S46. La position intermédiaire de la classe CU1 découle de son hétérogénéité : en 1991, la culture de coton est butée en fin de campagne (04/09/91) provoquant une diminution brutale des écoulements ultérieurs.

6.5 Influence des interventions culturales :

. La prise en compte de l'influence des interventions culturales sur la réponse hydrologique des parcelles présente un problème. En effet, l'absence de suivi exhaustif de la rugosité du sol durant la période d'étude nous prive de tout critère quantitatif. Une approche simplifiée consiste à affecter d'un repère chaque pluie précédée d'une opération culturale (travail du sol, semis, sarclage). L'analyse des résultats se heurte à deux contraintes majeures :

AFC - Parcelles S51 et S57

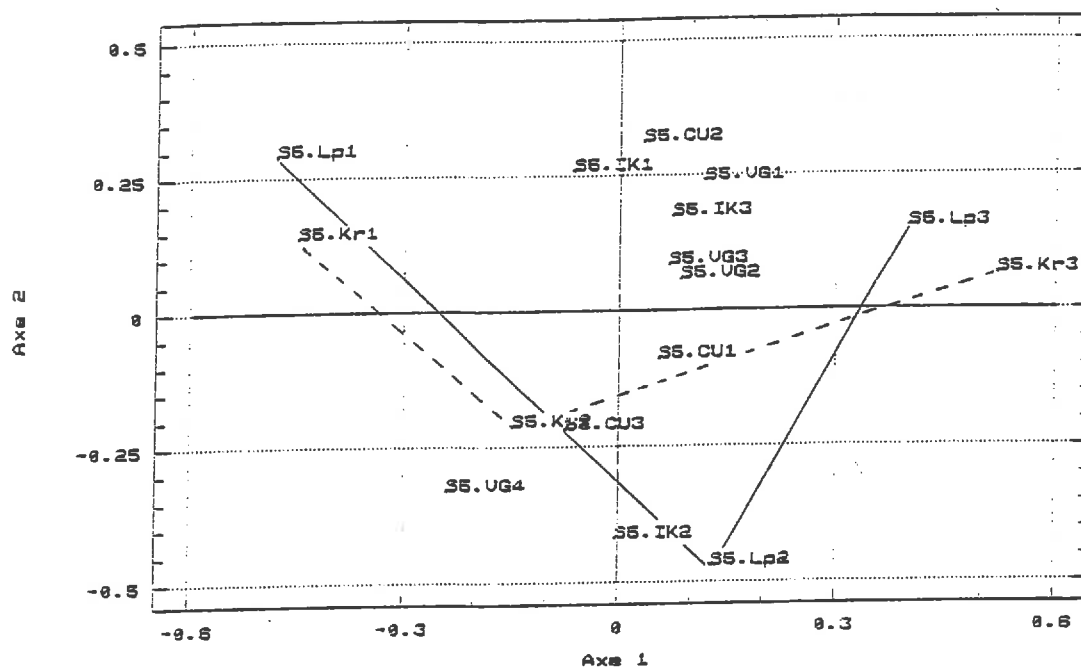


Figure 67 : Analyse factorielle des correspondances, plan factoriel 1-2. Parcelles S51 et S57.

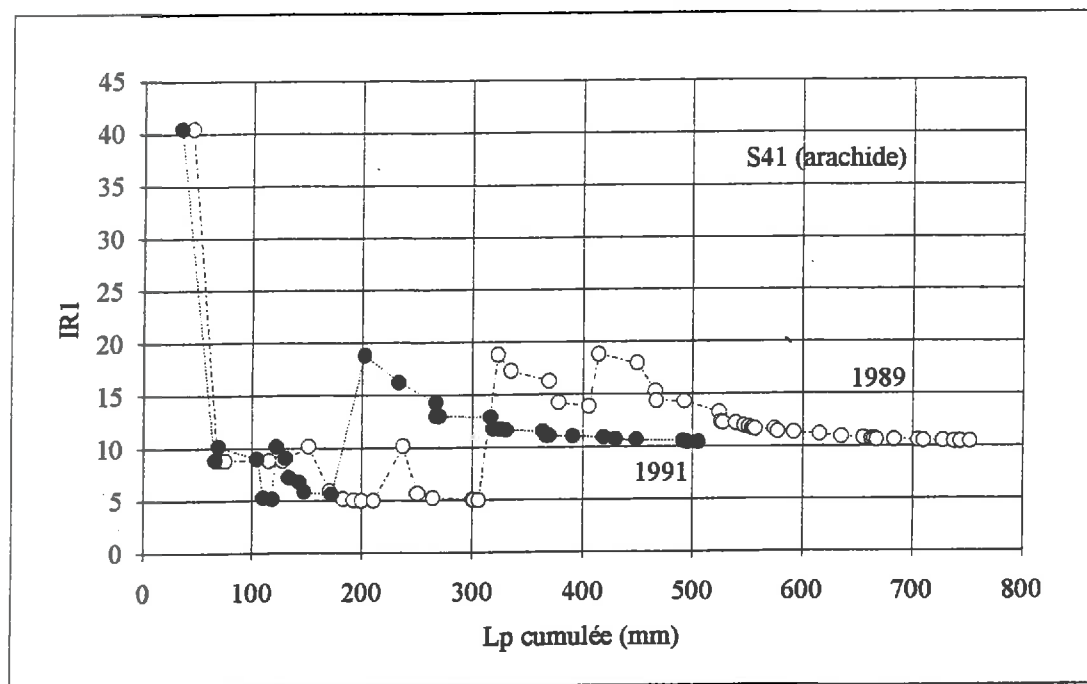


Figure 69 : Evolution simulée de l'indice de rugosité (IR1) en fonction des hauteurs de pluie cumulées. Parcelle S41, années 1989 et 1991.

- Pour une même parcelle, on dénombre, en moyenne, 21 pluies précédées par une intervention culturale. Si on exclut de la base de données les événements inférieurs au seuil limite de ruissellement (L_{lim}), il subsiste 14 observations exploitables. Il devient donc illusoire d'établir un échantillon dont la distribution des hauteurs de pluie (L_p) soit proche de la population de départ et de vouloir comparer les valeurs moyennes.
 - Cette approche néglige l'aspect qualitatif des opérations culturales à savoir le type d'outil ou les conditions d'intervention.
- . Des études complémentaires menées entre 1990 et 1992 à la station de Sonkorong nous ont permis d'obtenir quelques résultats concernant l'évolution du micro-relief avec le cumul de pluie. Les valeurs de rugosité ($IR1$) sont calculées à partir des mesures de profilographie effectuées après chaque intervention culturale et chaque cumul de pluie supérieur à 30 mm (3 répétitions par parcelle). Ces résultats sont complétés par des valeurs acquises sous pluies simulées sur le même site. La relation entre l'indice de rugosité ($IR1$) et la lame précipitée cumulée (L_p) permet de différencier trois types de travaux auxquels nous donnerons des noms génériques (Figure 68) :
- **Décompactage en sec** : réalisé en fin de saison sèche grâce à un coutrier droit (type RRS), ce travail permet d'atteindre une profondeur de 10 à 15 cm selon le type de sol. L'écartement utilisé est ici de 45 cm. Les valeurs de rugosité initiale ($L_p = 0$) correspondent au profil travaillé et non au profil de surface qui sous-estime l'effet tranchée dont nous étudierons l'influence dans le prochain chapitre. La rugosité se stabilise très rapidement autour de $IR1 = 9$.
 - **Sarclage en sec** : cette appellation regroupe les sarclages effectués deux à trois jours après une pluie ou sur un sol très peu protégé par le couvert végétal. Ils correspondent, dans la plupart des cas, au sarclo-binage de prélevée ou au premier sarclo-binage. La valeur de rugosité initiale est faible ($IR1 = 10$) et caractérise un état de surface très fugace.
 - **Sarclage en humide** : cette appellation regroupe les sarclages effectués le jour même de la pluie ou le lendemain sur un sol bien protégé par le couvert végétal. Ils correspondent aux second et troisième sarclo-binage. Les valeurs initiales de $IR1$ sont plus élevées que précédemment et l'évolution de la rugosité est beaucoup plus lente.
- . Une fonction exponentielle peut être ajustée aux données expérimentales concernant le décompactage en sec (DS), le sarclage en sec (SS) ou en humide (SH) (Tableau 56). Ces relations sont utilisées pour simuler l'évolution de la rugosité des parcelles de ruissellement des bassins versants S4 et S5, moyennant quelques remarques préliminaires :
- Le sol de la station de Sonkorong diffère sensiblement de ceux de deux bassins versants. Or, l'amplitude du micro-relief et son affaissement dépendent étroitement des caractéristiques de l'horizon superficiel comme l'ont montré les résultats obtenus à Nioro du Rip et Sonkorong. Notre démarche ne peut être qu'une approximation grossière.
 - L'opération de semis n'est pas définie de manière explicite. En fait, en culture attelée, le semis s'apparente à un grattage superficiel localisé et précède souvent de quelques heures un sarclabinage de prélevée. Ces motifs ont amené à associer le semis à la famille des sarclages en sec.
 - Les travaux de récolte ne sont pas pris en compte. La récolte manuelle du mil modifie peu le micro-relief existant, hérité du dernier sarclage ; en revanche, le soulèvement mécanisé de l'arachide perturbe fortement les états de surface. Outre le manque de données exploitables, l'examen des calendriers culturels montre que cette opération n'affecte, en règle générale, que la dernière pluie de la saison.
- . L'évolution de l'indice $IR1$ a donc été simulé pour chaque parcelle de ruissellement. La figure 69 présente l'exemple de la parcelle S41 en 1989 et 1991, années assez contrastées. On remarque l'effondrement rapide de la rugosité induite par le décompactage en sec, le maintien de la rugosité issue du dernier sarclage et l'absence de troisième sarclage en 1991.

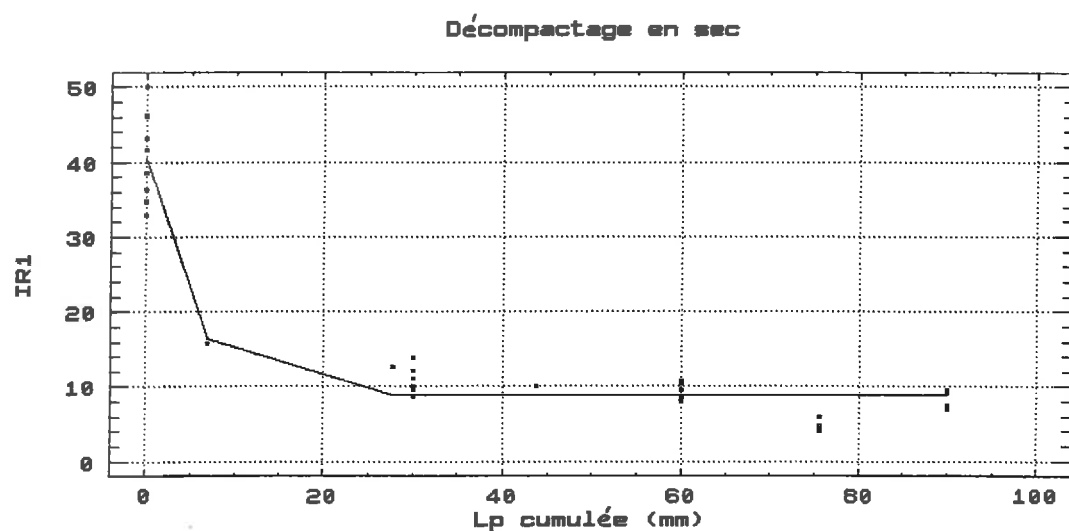
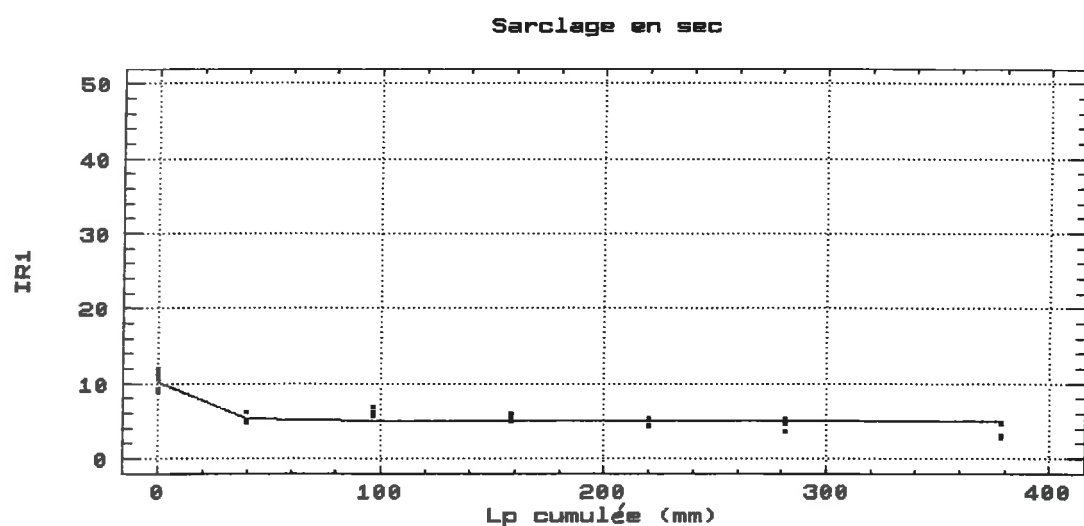
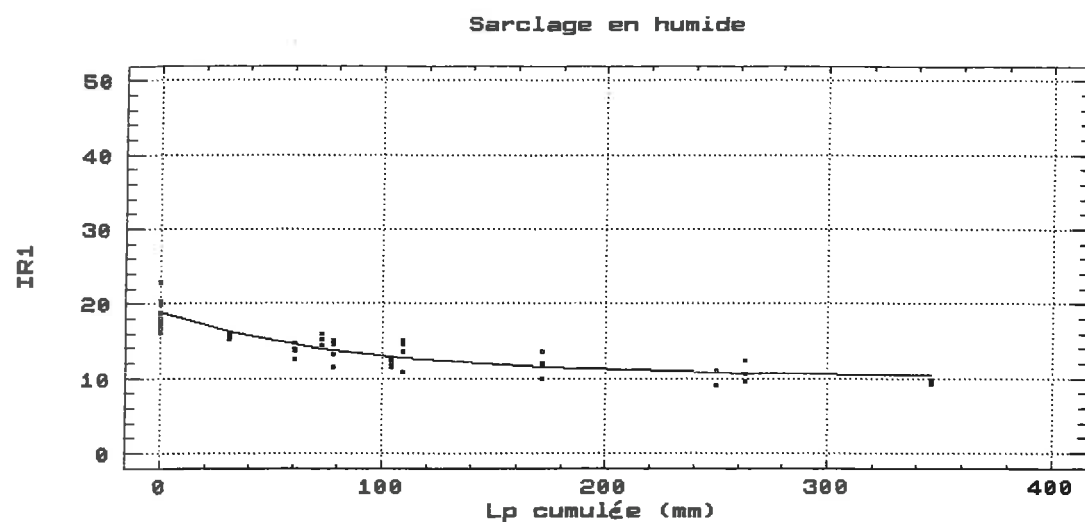


Figure 68: Evolution de l'indice de rugosité (IR1) en fonction du cumul de pluies. Sonkorong 1990-1992.

6.6 Modélisation des lames ruisselées :

6.6.1 Toutes cultures confondues :

- Calibration d'un modèle empirique :

. Dans un premier temps on a cherché à connaître la réponse hydrologique globale de chaque parcelle durant les cinq années d'étude. Pour ce faire, on a ajusté le modèle linéaire suivant aux données recueillies :

$$L_r = aL_p + bIK + cL_pIK + d \quad (1)$$

Outre les hypothèses de linéarité des relations avec les variables dépendantes, ce modèle repose implicitement sur la possibilité d'obtenir une estimation de la lame ruisselée (L_r) indépendante des variations annuelles ou saisonnières.

. Un premier ajustement est tenté sur l'ensemble des observations (205 sur S4 et 203 sur S5), mais la présence des averses inférieures aux pluies limites de ruissellement (L_{lim}) biaise fortement les modèles établis. L'hypothèse de normalité des résidus n'est pas vérifiée. Pour chaque parcelle, nous avons donc calculé un second ajustement à partir des échantillons de pluies supérieures à L_{lim} . Dans la plupart des cas, la dispersion reste importante et les fortes valeurs sont systématiquement sous évaluées ; ce constat nous a amené à intégrer l'indice d'agressivité (R) dans l'équation de régression :

$$L_r = aR + bIK + cL_pIK + d \quad (2)$$

. Les différentes étapes de cette démarche sont illustrées par la figure 70 qui présente les ajustements et les distributions des résidus successifs obtenus pour la parcelle S41. Les tableaux 57 et 58 fournissent les valeurs des paramètres de régression calculés à partir des équations (1) et (2) pour l'ensemble des parcelles. Nous pouvons constater que :

- **L'équation (1) permet d'expliquer de 56 à 77 % de la variance globale.** Comme dans les expérimentations sous pluies simulées, la variable IK est généralement rejetée et le poids de la variable L_pIK est d'autant plus important que la parcelle est peu ruisselante, exception faite de S44. Cependant, les écarts d'estimation entre sites sont faibles et la qualité de la régression n'est pas meilleure pour les parcelles situées sur le glacis (S5), contrairement aux résultats obtenus sur le versant de Keur Dianko (bassin versant S2) : les estimations des écoulements sur les parcelles S51, S54 et S57 sont inférieures à celles établies sur les parcelles KD31, et KD32 pourtant caractérisées par des états de surface initiaux comparables.

- **L'équation (2) améliore la part de la variance globale expliquée, qui varie de 74 à 82 %.** Ce résultat confirme, sous pluies naturelles, l'importance des énergies cinétiques mises en jeu durant une averse dans les processus d'encroûtement des sols étudiés.

- Validation des formules de référence :

. Compte tenu de la variabilité des résultats à l'intérieur d'un même site, on a cherché à valider, pour des cas extrêmes, les relations obtenues sous pluies simulées : S41 et S44 sur le bassin versant S4 ; S51 et S55 sur S5. Les équations suivantes, considérées, *a priori*, comme caractéristiques de chaque site, sont utilisées :

- Parcelles S41 et S44 :

(C1)	$L_r = 0,20 L_p + 0,03 IK + 0,004 L_pIK - 3,0$	(surface type C1, Casenave et Valentin, 1989),
(C2)	$L_r = 0,35 L_p + 0,04 IK + 0,004 L_pIK - 3,0$	(surface type C2, Casenave et Valentin, 1989),
(KD22)	$L_r = 0,34 L_p + 0,004 L_pIK - 3,2$	(parcelle KD22, bassin versant S2)

Tableau 56 : Valeurs des paramètres d'ajustement de la fonction $y = a + b.e^{-ax}$ qui relie l'indice de rugosité (IR1) à la lame précipitée cumulée (Lp). Décompactage en sec (DS), sarclage en sec (SS) et sarclage en humide (SH).

Intervention culturale	obs.	a	b	c	r ²
DS	35	8.82	31.59	0.211	0.94
SS	35	4.95	5.19	0.074	0.84
SH	45	10.25	8.57	0.012	0.79

Tableau 57 : Paramètres de régression calculés à partir de l'équation (1). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification (F = 4). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r²) et de l'écart-type d'estimation (s(y)).

Site	Parcelle	obs.	a	b	c	d	r ²	s(y)
S4	S41	107	0.358		0.007	-6.095	0.65	4.2
	S43	130	0.319		0.005	-4.491	0.59	4.3
	S44	140	0.486		0.008	-5.978	0.72	4.9
	S46	117	0.375			-4.722	0.58	4.5
S5	S51	133	0.462			-4.457	0.67	5.0
	S54	112	0.481			-5.658	0.71	4.8
	S55	133	0.628			-5.767	0.77	5.2
	S57	127	0.440			-5.126	0.56	6.0

Tableau 58 : Paramètres de régression calculés à partir de l'équation (2). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification (F = 4). Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r²) et de l'écart-type d'estimation (s(y)).

Site	Parcelle	obs.	a	b	c	d	r ²	s(y)
S4	S41	107	0.303		0.008	-1.281	0.82	3.0
	S43	130	0.299		0.006	-0.917	0.78	3.1
	S44	140	0.429		0.011	-0.564	0.83	3.9
	S46	117	0.309		0.003	-0.168	0.74	3.6
S5	S51	133	0.419		0.007	0.032	0.75	4.3
	S54	112	0.428		0.006	-0.709	0.81	3.9
	S55	133	0.530	-0.157	0.011	1.807	0.78	5.1
	S57	127	0.474			-0.457	0.79	4.1

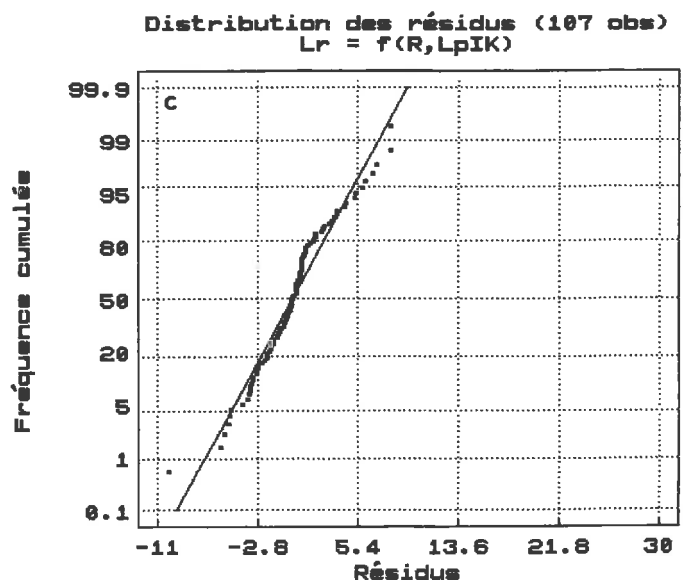
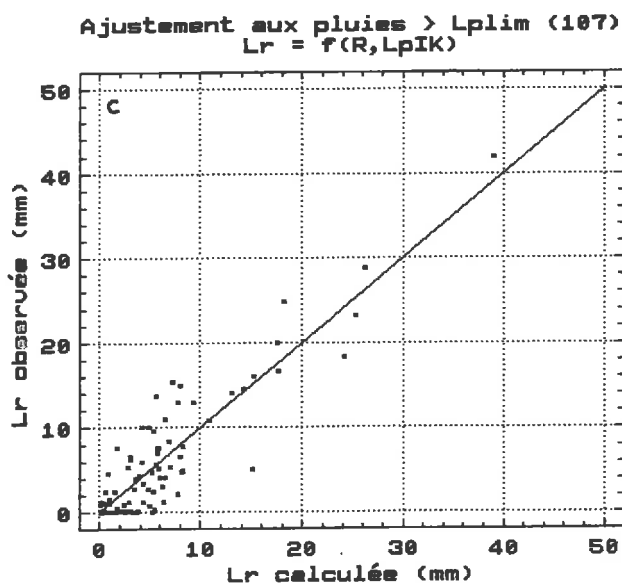
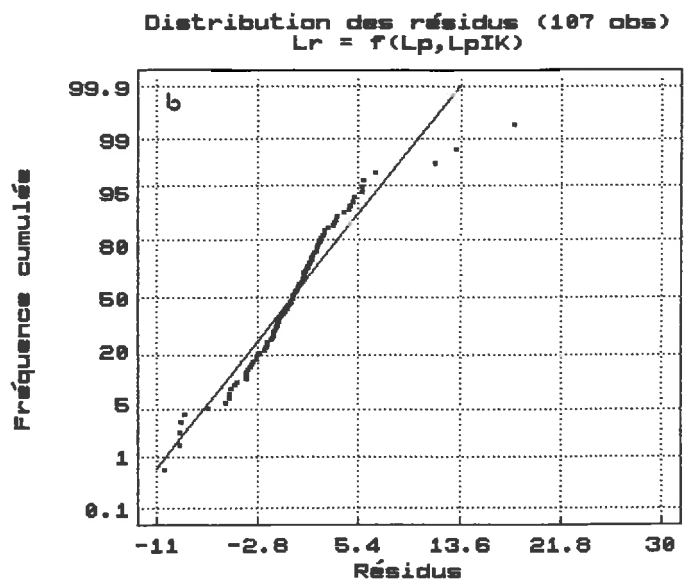
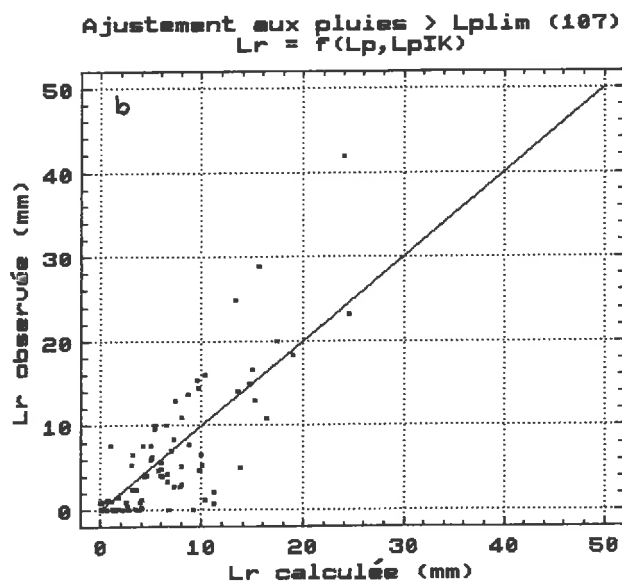
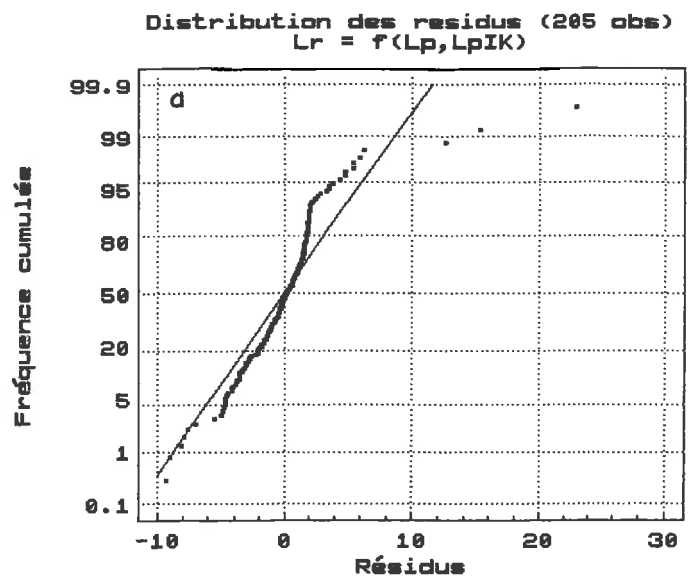
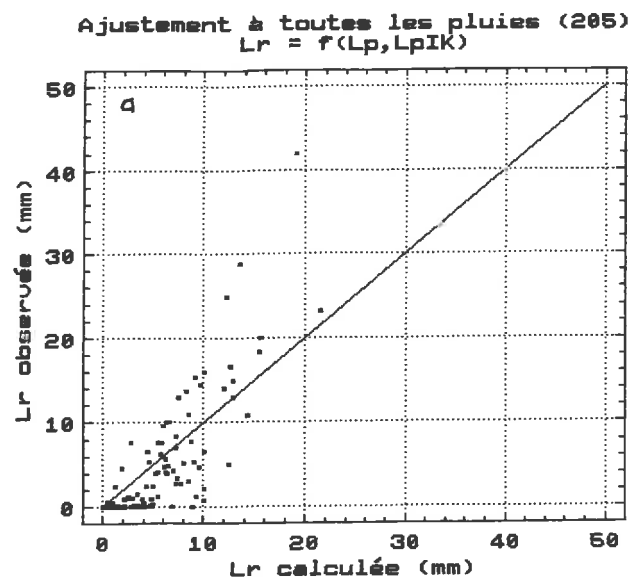


Figure 70 : Ajustement des lames ruisselées simulées aux valeurs observées et distribution des résidus.
 (a) : $L_r = f(L_p, L_{pIK})$ et $n = 205$; (b) : $L_r = f(L_p, L_{pIK})$, et $n = 107$; (c) : $L_r = f(R, L_{pIK})$ et $n = 107$.

- Parcelles S51 et S55 :

(C2)	$L_r = 0,35 L_p + 0,04 IK + 0,004 L_p IK - 3,0$	(surface type C2, Casenave et Valentin, 89),
(C3)	$L_r = 0,90 L_p + 0,05 IK + 0,002 L_p IK - 10,0$	(surface type C3, Casenave et Valentin, 89),
(KD32)	$L_r = 0,76 L_p + 0,10 IK + 0,002 L_p IK - 13,8$	(parcelle KD32, bassin versant S2)

. Les éventuelles valeurs négatives sont ramenées à la valeur $L_r = 0$. Les résultats sont comparés aux lames ruisselées observées (L_r) et simulées à partir des données expérimentales. Dans les tableaux 59 et 60 sont reportés les écoulements cumulés (L_r) des parcelles cultivées. Sur la terrasse colluvio-alluviale, le comportement des parcelles S41, S43 et S46 est intermédiaire entre ceux décrits par les équations (C1) et (C2), alors que S44 s'apparente plus nettement à une surface de type C2. L'équation (KD22) traduit un comportement moyen entre ces deux extrêmes. Sur le glacis, les parcelles S51 et S54 se comportent globalement comme des surfaces de type C2, alors que S55 est intermédiaire entre les surfaces de types C2 et C3. Ces résultats confirment, en partie, les descriptions des états de surface présentées précédemment.

. Une étude des écarts absolus entre valeurs observées et simulées ($\Delta L_r = L_{r_{obs}} - L_{r_{sim}}$) montre une forte dissymétrie de leur répartition autour des valeurs modales (Figure 71). Le début de cycle est défini par les stades culturaux VEG = 1 et 2, la fin de cycle par VEG = 3 et 4. Le stade cultural a une influence certaine sur la distribution des écarts :

- Pour la parcelle S41 en début de cycle, les écoulements engendrés par les pluies faibles ($L_p < 30$ mm) sont surestimés par les équations (C2) et (KD22). Pour des pluies de hauteurs supérieures, l'équation (C1) sous-estime les valeurs observées. En fin de cycle, la divergence due aux équations (C2) et (KD22) s'accroît.

- Pour la parcelle S51 en début de cycle, l'équation (C3) sous-estime légèrement les écoulements engendrés par les pluies faibles ($L_p < 15$ mm). Elle surestime fortement les valeurs suivantes. Le même phénomène affecte l'équation (KD32) avec une amplitude plus importante lors de la première phase ($L_p < 25$ mm). En fin de cycle, les divergences s'accroissent quelle que soit l'équation.

- *Conclusion partielle :*

. Concernant l'emploi de formules de référence issues de données obtenues sous pluies simulées et sur des parcelles dénudées, trois réflexions s'imposent :

- Ces équations sont établies à partir de lames précipitées variant de 20 à 80 mm. Leur utilisation en conditions naturelles reconnaît implicitement que le comportement hydraulique reste identique pour les pluies comprises entre le seuil de ruissellement (L_{plim}) et $L_p = 20$ mm. Malgré l'annulation des valeurs calculées négatives, on s'aperçoit que cette hypothèse est invalidée dans le cas des équations (KD32) et (C3).

- Le développement du couvert végétal en fin de cycle, toutes cultures confondues diminue l'aptitude au ruissellement des différentes parcelles. Cette influence ne s'exprime pas dans les formules de référence, d'où une surestimation accrue des écoulements simulés pendant cette phase. A l'échelle du cycle cultural, l'approche univoque nécessite donc la prise en compte de l'évolution du couvert végétal.

- La réponse globalement satisfaisante de certaines formules de référence découle dans la plupart des cas d'une accumulation de processus compensatoires.

Tableau 59 : Lames ruisselées annuelles (Lr en mm) observées et calculées à partir de différentes équations de référence. Bassin versant S4, période 1988-1992.

Parcelle	Equation	1988	1989	1990	1991	1992	Total
S41	observé	239.3	68.7	67	55.7	85	515.7
	(S41)	202.8	80.9	72.2	80.8	89.4	526.1
	(NIO)		61.8		49.2		
S43	observé	222.4	66.2	51.9	68.3	96.2	505
	(S43)	192.9	82	72	80.7	91.1	518
	(NIO)		59.8		68.3		
S44	observé	389.7	135.2	105.1	82	159.6	871.6
	(S44)	326.3	153.5	117.2	132.6	151.8	881.4
	(NIO)		67.5		54.7		
S46	observé	204.6	128.7	74.5	68.8	69.2	545.8
	(S46)	190.8	94.7	80.2	88.8	103.8	558.3
	(NIO)			53.5		56.2	
référence	(C1)	141	68.6	46.5	55.5	61	372.6
	(C2)	277.6	172.6	106.7	120.9	139	816.8
	(KD22)	237.4	144.3	95.4	108.8	123.8	710.2

Tableau 60 : Lames ruisselées annuelles (Lr en mm) observées et calculées à partir de différentes équations de référence. Bassin versant S5, période 1988-1992.

Parcelle	Equation	1988	1989	1990	1991	1992	Total
S51	observé	275.8	171.7	98.6	128.4	108.8	783.3
	(S51)	297	151.5	117.5	133.1	152.3	851.4
	(SON)			91.1		128.7	
S54	observé	140*	139.7	86.1	102.5	120.4	588.7*
	(S54)	159.7*	121.1	102.3	118.3	133.9	635.3*
	(SON)			79.5			
S55	observé	322.9	225.6	143.7	198.9	215	1106.1
	(S55)	374.7	231.6	195	205.2	227.2	1233.7
	(SON)			95.6			
référence	(C2)	275.6	166.2	88.2	122.6	139.3	791.9
	(C3)	505.5	297.2	176.7	253.1	291.3	1523.8
	(KD32)	327.6	149.7	101.1	149.6	172.8	900.7

(* : données manquantes)

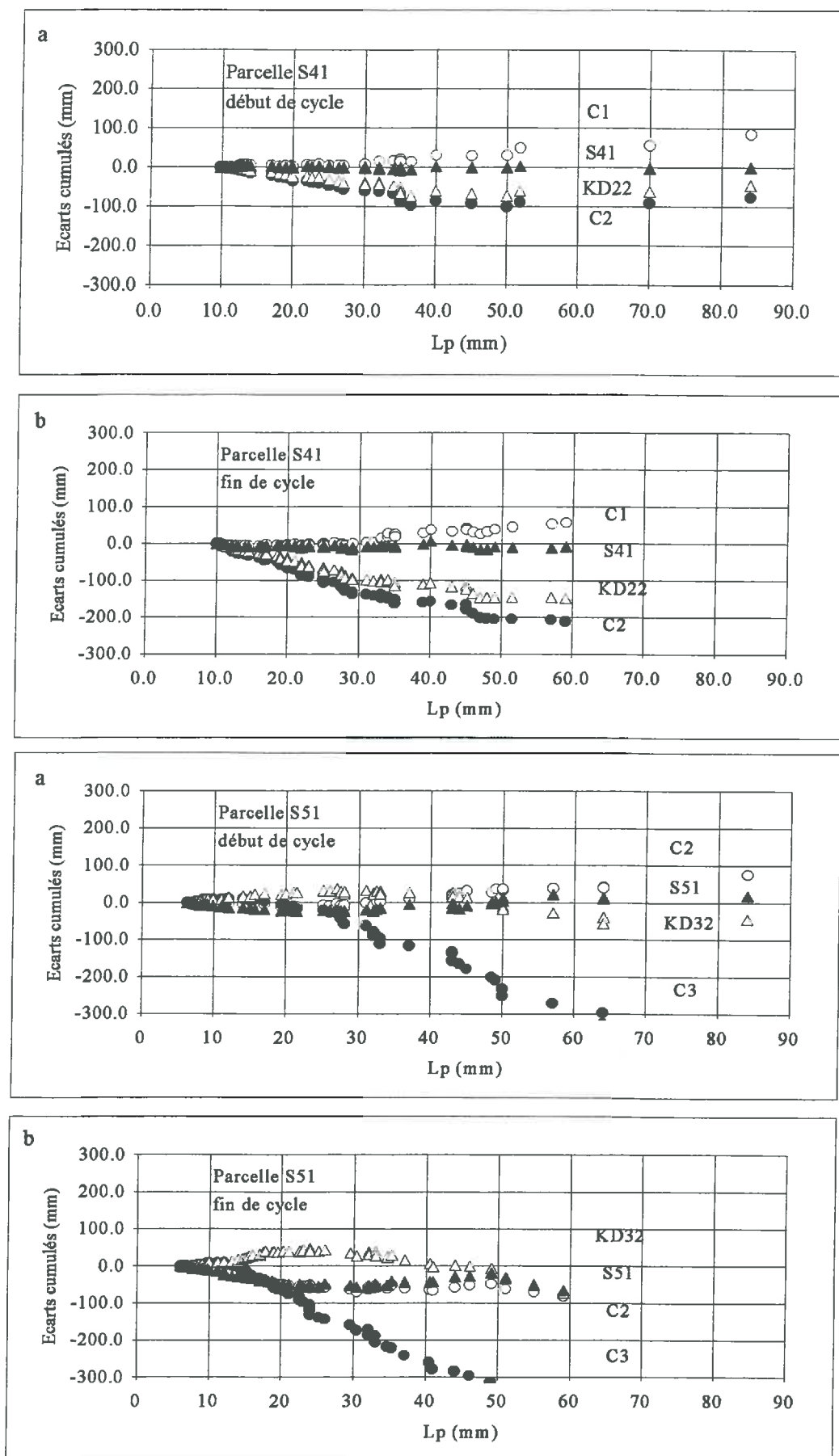


Figure 71 : Relations entre les écarts cumulés (ΔL_r) et les hauteurs de pluie (L_p); avec $\Delta L_r = (L_{r_{obs}} - L_{r_{sim}})$. Parcelles S41 et S51: (a) en début de cycle; (b) en fin de cycle. Période 1988-1992.

6.6.2 Les parcelles cultivées en arachide :

- Modélisation de l'évolution du couvert :

. Seules les parcelles cultivées en arachide sont susceptibles d'apporter les données nécessaires à l'établissement d'un modèle de ruissellement tenant compte du couvert végétal. Nous avons donc constitué une seconde base de données regroupant douze parcelles x années sur les quarante disponibles.

. La première étape consiste à ajuster un modèle de croissance du couvert végétal aux données expérimentales existantes (Tableau 61). Des études complémentaires menées en 1990 et 1992 à la station de Sonkorong nous ont permis d'établir une courbe d'évolution optimale de la variété 73-33 dans le cas d'une alimentation hydrique et minérale non limitante. Une fonction de type logistique a pu être ajustée aux données expérimentales (Figure 72) et corrobore des travaux antérieurs (Roose, 1977; Annerose, 1990) :

$$CV_{OPT} = 101.44 (1 + e^{-0.106(jas - 35.32)})^{-1} \quad n = 38 \quad r^2 = 0.995$$

avec CV_{OPT} : taux de couverture (%) dans le cas d'une croissance optimale.
 jas : nombre de jours après semis

. En fin de cycle, les taux de couverture observés sur les parcelles de ruissellement sont toujours inférieurs à 100 %, variant de 50 à 95 %. Afin d'adapter le modèle de croissance à chaque cas nous avons fait l'hypothèse de l'existence d'une **relation homothétique** entre la courbe optimale, caractérisée par une valeur finale $CV_{OPT} = 100$ %, et l'évolution du couvert d'une parcelle donnée, caractérisée par une valeur finale CV_f :

$$CV = CV_f * 10^{-2} * CV_{OPT}$$

avec CV_f : taux de couverture final d'une parcelle donnée (%)
 CV : taux de couverture d'une parcelle donnée (%)

. Ce modèle a le mérite d'être simple et de s'ajuster aux quelques données disponibles ; cependant nous devons faire les remarques suivantes :

- le modèle s'adapte à un déficit de surface foliaire progressif, dû, par exemple, à une carence minérale ou une maladie systématique. Les conséquences d'une période de sécheresse temporaire ou d'une attaque parasitaire sont plus complexes (Annerose, 1990).

- le modèle néglige les phénomènes de défoliation en fin de cycle. Outre la faible diminution du taux de couverture, les folioles tombées au sol protègent efficacement la surface, l'hypothèse d'un plateau final est donc recevable.

- la phase de germination est négligée. La durée de cette phase est courte (4 à 6 jours) et les taux de couverture simulés pendant cette période sont très faibles, ces raisons nous ont incité à supprimer un paramètre de calage peu pertinent.

- Calibration d'un modèle empirique :

. Le taux de recouvrement (CV) ainsi défini est alors assimilé à l'indice de végétation (IV) présenté dans le chapitre précédent. Disposant également des indices de rugosité (IR1) simulés, on peut caractériser l'évolution de chaque parcelle x année (Figure 73). Des régressions multiples ascendantes sont établies, à partir de l'ensemble des données disponibles sur chaque parcelle, afin d'ajuster les modèles suivants :

$$Lr = aLp + bIK + c LpIK + dIV + e IR1 + f \quad (1)$$

Tableau 61 : Taux de recouvrement (CV en %) observés sur les différentes parcelles cultivées en arachide.
Jas : nombre de jours après semis.

Année	Parcelle	observation 1		observation 2		observation 3	
		jas	CV	jas	CV	jas	CV
1989	S41	30	35	60	90	100	95
	S43	36	40	66	90	106	95
	S44	30	35	60	90	100	95
1990	S46	24	15	75	80	88	80
	S51	37	25	89	70	102	75
	S54	30	20	81	65	94	65
	S55	20	10	71	60	84	60
1991	S41	30	30	53	80	94	90
	S43	31	15	54	40	95	50
	S44	29	30	52	75	93	80
1992	S46	35	40	55	75	72	90
	S51	35	35	55	65	72	80

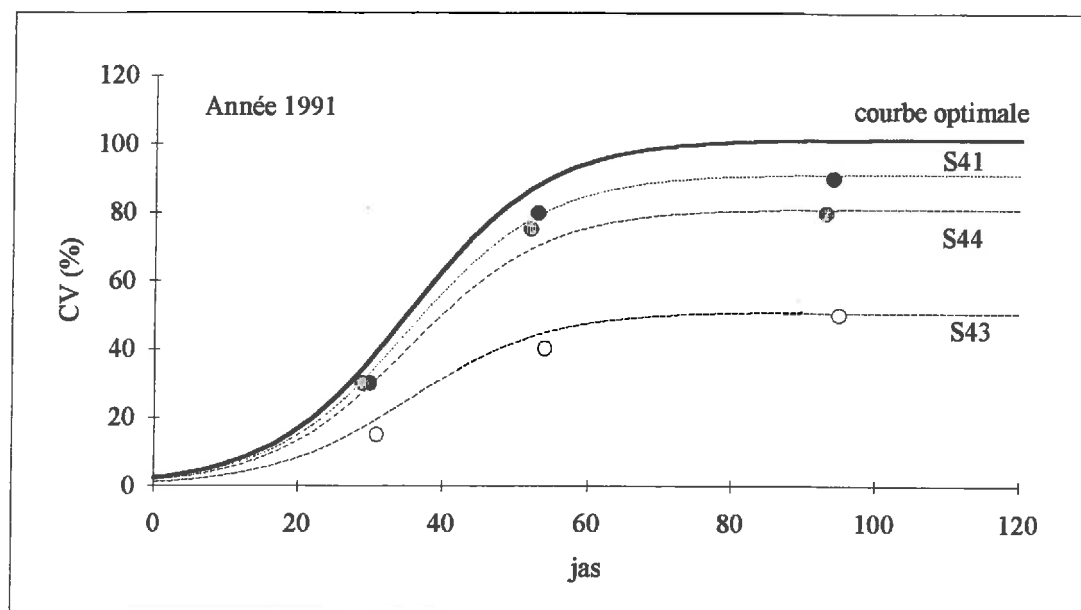


Figure 72 : Evolution du taux de couverture (CV en %) en fonction du nombre de jours après semis. Ajustement d'une fonction logistique aux observations de terrain (arachide 7333; année 1991).

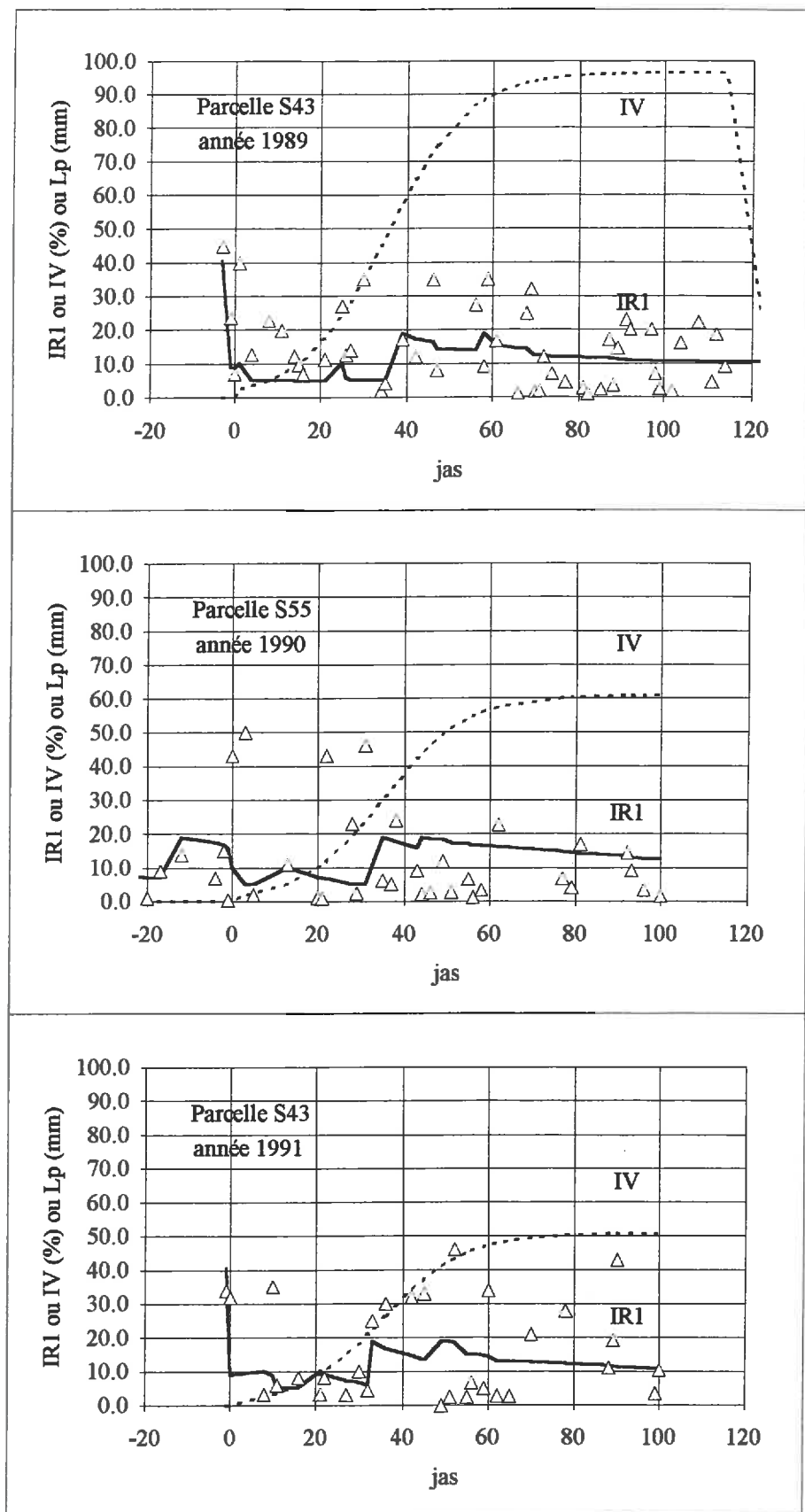


Figure 73 : Evolutions simulées des indices de végétation (IV) et de rugosité (IR1) en fonction du nombre de jours après semis (jas). Les hauteurs de pluie journalières (Lp) sont indiquées par des triangles. Parcelles S43 et S55.

$$Lr = aR + b IK + c LpIK + dIV + e IR1 + f \quad (2)$$

. Les paramètres de calage les plus significatifs sont reportés dans le tableau 62. Le rejet systématique de l'indice de rugosité (IR1) peut avoir deux causes :

- **IR1 est un paramètre peu descriptif.** En fait, la gamme de variation de l'indice (50 à 400) est supérieure, dans tous les cas, à celle observée dans les expérimentations sous pluies simulées.

- **IR1 est un paramètre peu corrélé au ruissellement.** On peut alors mettre en cause le modèle d'évolution de la rugosité utilisé ou bien le nombre trop faible de pluies enregistrées qui ne permet pas l'expression d'une liaison éventuelle. Ce dernier point semble confirmé par l'absence de l'indice IV dans les équations dont le nombre d'observations est limité à 18 (campagne 1990).

- *Validation des formules de référence :*

. Comme nous l'avons fait précédemment toutes cultures confondues, on peut chercher à valider les relations établies sous pluies simulées à Nioro et Sonkorong. A cet effet, on considère que le site de Nioro peut être représentatif de la terrasse colluvio-alluviale et celui de Sonkorong représentatif du glacis. Nous rappelons les équations obtenues :

- Nioro :
$$Lr = 0,132 R - 0,054 IK + 0,0047 LpIK - 0,0064 IV + 2,799 \quad (NIO)$$

- Sonkorong :
$$Lr = 0,678 R + 0,0019 LpIK + 0,124 IV - 0,168 IR1 + 0,261 \quad (SON)$$

. Les résultats du modèle simulateur sont comparés aux valeurs observées sur les parcelles (Tableaux 59 et 60). L'équation (NIO) permet d'estimer les écoulements cumulés sur S41 et S43 de manière correcte. Il en est de même pour l'équation (SON) et les parcelles S51 et S54. Les résultats concernant les parcelles S44 et S55 sont plus décevants. Lorsque les états de surface des sites de référence (Nioro et Sonkorong) correspondent à ceux des parcelles testées, les simulations reproduisent assez fidèlement l'évolution annuelle des lames ruisselées (Figure 74). **Cependant, il est permis de s'interroger sur l'intérêt d'accroître la complexité d'un modèle empirique dont la limite essentielle réside dans l'utilisation d'un référentiel discrétisé. Cette question est particulièrement pertinente dans l'optique d'une prise en compte du ruissellement dans le calcul du bilan hydrique d'une culture.**

6.6.3 Prise en compte du ruissellement dans un modèle de bilan hydrique :

. Les modèles de bilan hydrique les plus utilisés par les agronomes de la zone sahélienne sont de type déterministe fonctionnel. Ces modèles ont l'avantage de fonctionner à partir de données agro-climatologiques facilement mesurables (Forest, 1984 ; Chopart et Siband, 1988 ; Poss, 1991). Le modèle journalier utilisé, BIPODE (Vaksmann et Traoré, 1989), dérive de celui proposé par Forest et Franquin (1977). Il a été démontré qu'il restitue assez fidèlement les termes moyens du bilan hydrique d'une situation donnée à partir des valeurs moyennes des paramètres d'entrée (Marchand, 1988 ; Chopart et Vauclin, 1990). Dans de nombreuses situations, la non prise en compte du ruissellement entraîne une surestimation des stocks hydriques et du drainage (Albergel et al., 1991).

. Nous avons utilisé les données du bilan hydrique mesurées, *in situ*, en 1989 et 1991, sur les parcelles S41 et S44, pour caler les paramètres de simulation, à savoir :

- les lames précipitées et ruisselées journalières;

- les valeurs du stock hydrique à des dates données déduites des mesures d'humidimétrie neutronique;

Tableau 62 : Paramètres de régression calculés à partir des équations (1) ou (2) pour les parcelles x années semées en arachide. Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Parcelle	Equation	obs.	a	b	c	d	e	f	r^2	$s(y)$
S41	2	45	0.243		0.009	-0.026		-0.059	0.71	2.57
S43	2	56	0.225		0.010	-0.025		0.000	0.73	2.35
S44	2	53	0.384		0.007	-0.034		0.980	0.68	3.46
S46	2	48	0.233		0.009	-0.046		1.780	0.75	3.41
S51	1	45	0.345		0.007	-0.027		-2.050	0.76	3.45
S54	1	18	0.444					-4.644	0.74	4.21
S55	1	18	0.673					-6.252	0.81	4.70

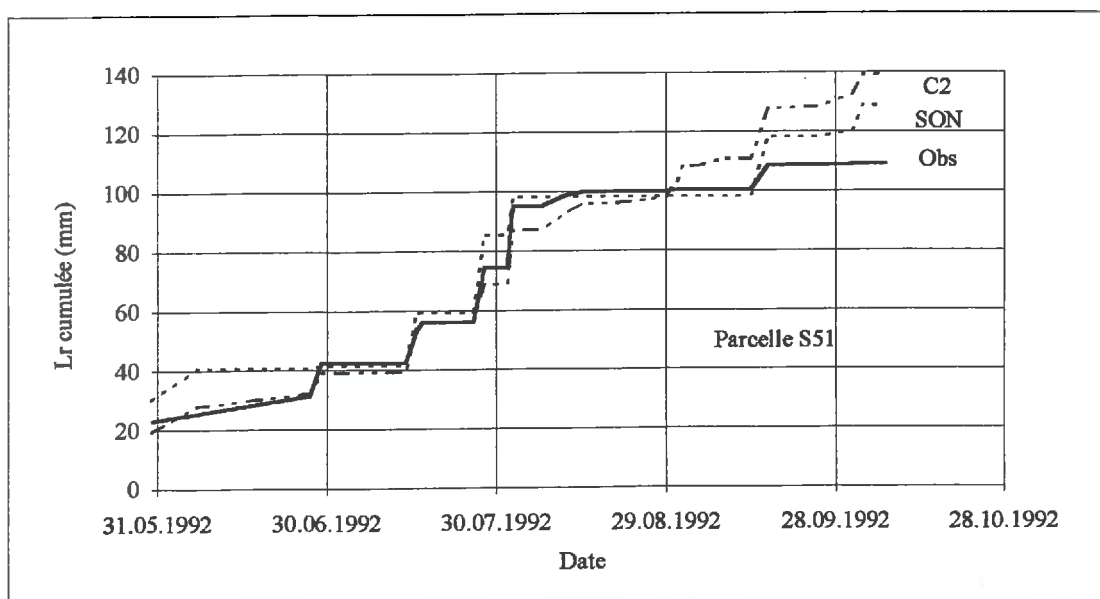
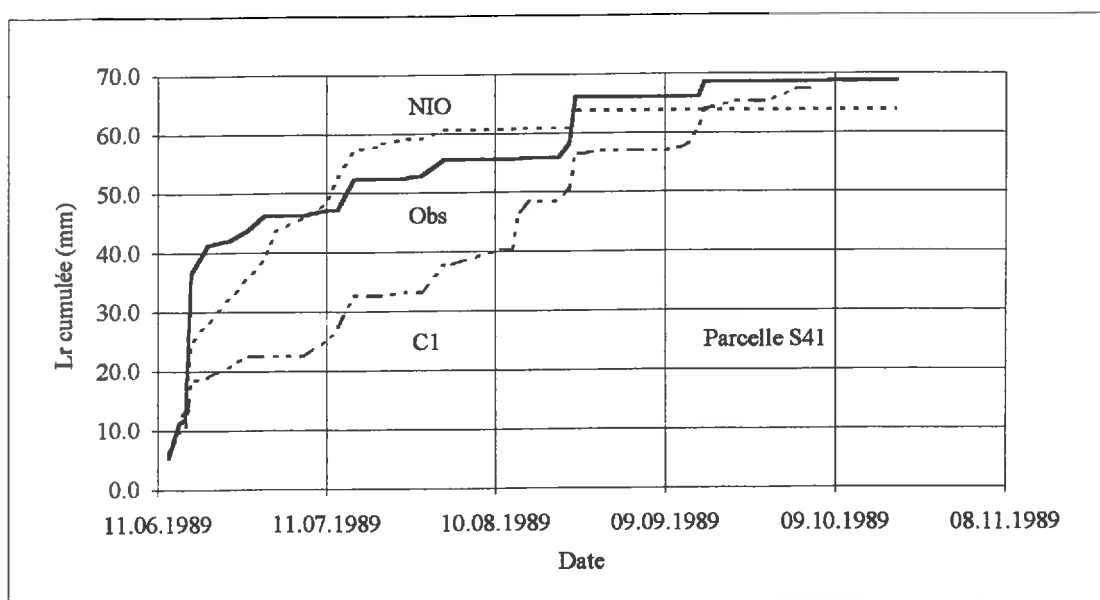


Figure 74 : Evolutions observées et simulées des lames ruisselées (L_r) en fonction du temps.
(a) : parcelle S41 en 1989; (b) : parcelle S51 en 1992.

- les valeurs de drainage sous le front racinaire ($Z = 170$ mm) calculées à partir des mesures tensio-neutroniques.

. Les réserves utiles (RU) sont évaluées à partir des profils d'humidité volumique enregistrés entre 1988 et 1992 sur S41 (RU = 170 mm) et S44 (RU = 200 mm). Après avoir calé la simulation sur les données de lames infiltrées observées; le même paramétrage est repris pour tester l'influence des différentes formulations de la lame ruisselée. Les équations (C1), (NIO) et (KD22) sont appliquées aux données pluviométriques brutes.

. En tenant compte de l'intervalle de confiance associé à la mesure d'un stock hydrique, qui avoisine ± 13 mm, il apparaît que l'intégration de l'indice de végétation (IV) a peu d'influence sur les valeurs simulées finales d'évapotranspiration (tableau 63). Les erreurs engendrées par la variabilité des états de surface entre deux parcelles sont plus grandes. Toutefois, ces résultats sont obtenus à partir de deux années qui ne reflètent pas l'ensemble des conditions pluviométriques possibles. Une analyse détaillée de l'évolution des stocks hydriques souligne les défauts de chaque type de simulation (Figure 75) :

- **la formule de référence régionale (C1), caractéristique d'un état de surface de type C1, surestime l'évolution du stock hydrique en début de cycle.** Ce gain est ensuite amorti par la non prise en compte du rôle du couvert végétal. A l'échelle du cycle cultural les valeurs d'infiltration et d'évapotranspiration sont donc moyennées ;

- **la formule de référence locale (KD22), qui traduit un comportement proche de celui d'une surface de type C2, connaît un phénomène d'amortissement analogue.** Ceci entraîne une nette sous-estimation des stocks finaux ;

- **la formule établie à Nioro du Rip (NIO), tenant compte de l'évolution du couvert végétal, surestime les stocks en fin de cycle.** Il semble que l'influence du couvert soit exagérée, sans qu'il soit possible de déterminer si la formule elle-même est en cause ou bien le mode de simulation de l'indice de recouvrement.

. Le même travail a été mené avec l'ensemble des parcelles du bassin versant S4, les résultats confirment ceux qui sont présentés. Les problèmes d'humidimétrie neutronique sur le bassin versant S5 nous ont privé des valeurs de stock hydrique nécessaires.

6.7 Discussion :

. Les résultats obtenus sous pluies naturelles confirment la plupart des conclusions tirées des expériences sous pluies simulées, à savoir :

- **l'aptitude au ruissellement des sols de glakis est supérieure à celle des sols de terrasse. Cependant, il existe une forte variabilité des comportements au sein d'un même site, les écarts entre lames ruisselées pouvant aller du simple au double.** Les critères proposés par Casenave et Valentin (1989) pour décrire les états de surface ne rendent pas entièrement compte de ces différences significatives, du fait de la faible longévité des organisations pelliculaires et du développement limité de la porosité vésiculaire associée. Ces raisons peuvent expliquer les divergences de notations des états de surface constatées par Castanier (1993) en fonction de l'observateur et de la date d'observation.

- **à l'échelle du mètre carré, l'influence du couvert végétal sur l'aptitude au ruissellement est indéniable mais fluctue suivant le type de culture.** L'arachide protège efficacement le sol en fin de cycle (semis + 70 jours) si le développement foliaire a été régulier. La croissance végétative du mil ne semble pas avoir une action déterminante sur les écoulements tout au long de la saison ; malheureusement l'absence de mesures de recouvrement fiables limite la portée de nos observations. Enfin le développement du tapis herbacé d'une jachère naturelle limite très rapidement les pertes par ruissellement, la durée d'installation est d'environ un mois dans les conditions étudiées. Rawitz et al. (1981), Thebe (1987), travaillant sur un nombre d'années plus restreint, arrivent à des conclusions semblables.

Tableau 63 : Lames infiltrées (Li), stocks hydriques les 31/07 et 31/10, évapotranspirations réelles (ETR) calculées par le logiciel BIPODE pour différentes estimations des lames ruisselées. Valeurs en mm. Parcelles S41 et S44.

Parcelle	Equation	1989				1991			
		Li totale	Stock le 31.07	Stock le 30.10	ETR totale	Li totale	Stock le 31.07	Stock le 30.10	ETR totale
S41	observé	684	67	67	617	397	34	65	332
	(C1)	684	83	64	620	393	43	67	326
	(NIO)	690	63	76	614	404	34	70	334
	(KD22)	608	51	17	591	349	30	30	319
S44	observé	617	46	46	571	372	17	20	352
	(C1)	684	89	82	602	394	49	35	359
	(NIO)	682	66	87	595	398	40	45	353
	(KD22)	607	57	24	585	349	36	10	339

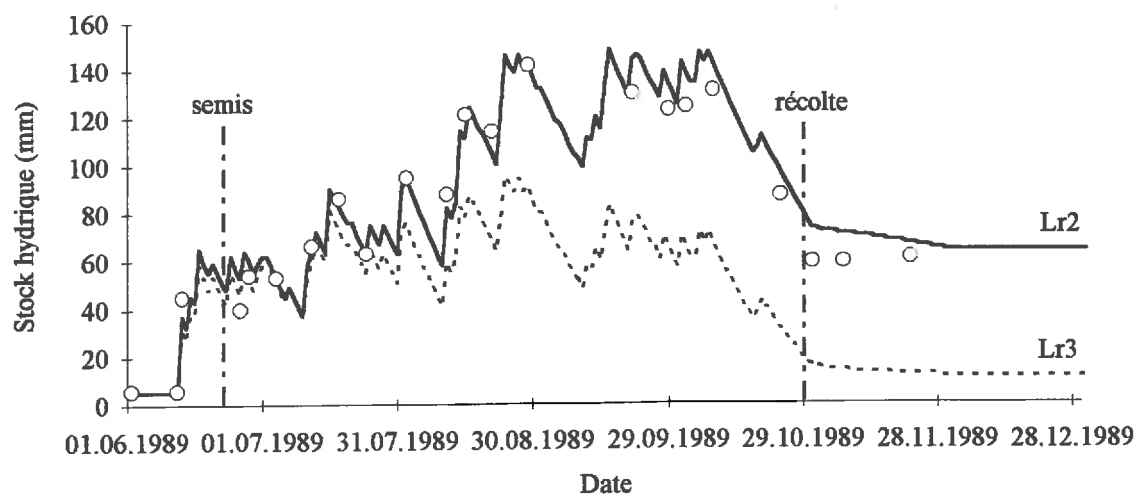
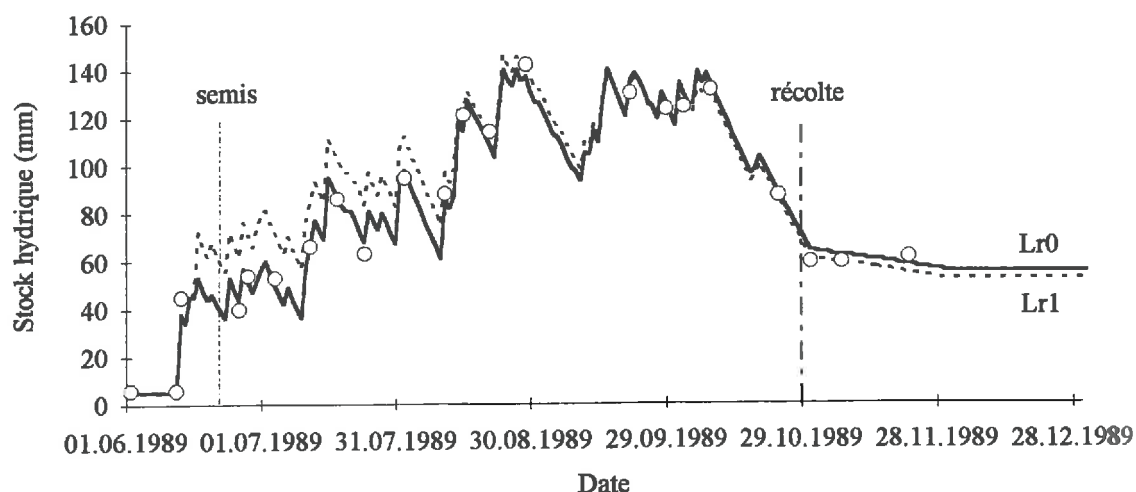


Figure 75 : Evolution chronologique du stock hydrique, simulée par le logiciel BIPODE. (Lr0) : ruissellement observé, (Lr1) : ruissellement simulé par (C1), (Lr2) : simulé par (NIO), (Lr3) : simulé par (KD22). Valeurs des stocks hydriques mesurés (○). Parcelle S41.

- **Le rôle d'un couvert cultivé est indissociable des pratiques agricoles (Roose, 1977; Stocking, 1988) mais il est fort difficile, en conditions naturelles, de cerner l'influence d'une intervention culturale donnée du fait du nombre limité d'événements pluvieux utilisables.** Cette limitation explique, en partie, l'absence généralisée du facteur plante dans les études sur l'influence du travail du sol sur le ruissellement, en zone soudano-sahélienne (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984 ; Lamachère, 1991 ; Guillobez et Zougmore, 1994). Les observations effectuées en milieu contrôlé montrent qu'au delà d'un certain seuil le couvert d'arachide favorise le maintien de l'humidité superficielle du sol et ralentit l'affaissement du relief hérité du dernier sarclage, confirmant ainsi les résultats obtenus sous pluies simulées.

- La simulation des lames ruisselées à partir d'un modèle climatique ($L_r = f(R, L_{pIK})$) calé sur l'ensemble des données expérimentales est globalement satisfaisante. Cependant, la qualité de la prédiction du ruissellement annuel est très variable et dépend des caractéristiques pluviométriques et agronomiques rencontrées. Ceci doit nous amener à considérer avec circonspection les modèles établis à partir d'un nombre d'années trop faible, dont le calage est souvent excellent (Thebe, 1987 ; Ibrahima et Schmidt, 1991). **La validation, toutes cultures confondues, de modèles climatiques de référence issus d'expérimentations sous pluies simulées met en évidence trois sources d'erreurs:**

*** la représentativité du site de référence, qu'il soit local ou régional.** La variabilité spatiale et temporelle des états de surface implique une description minutieuse et répétitive des organisations pelliculaires pour une parcelle donnée (Guillobez et Zougmore, 1994).

*** l'influence du stade végétatif.** La formule de référence n'intègre pas l'amortissement de la réponse hydrologique réelle de la parcelle. L'utilisation d'une équation établie à partir d'une parcelle de référence couverte de végétation morte ou de litière (KD21 ou KD31, par exemple) présente un intérêt limité de par l'éloignement physionomique et le caractère statique de cette couverture (Thebe, 1987 ; Casenave et Valentin, 1989).

*** L'extension des formules de référence aux pluies faibles.** Les pluies comprises entre les valeurs $L_p = L_{plim}$ et $L_p = 20$ mm se situent en dehors du domaine de définition des équations calculées à partir des résultats de pluies simulées.

- **Dans le cas d'une culture d'arachide, les évolutions simulées des indices de végétation (IV) et de rugosité (IR1) permettent de calculer les écoulements à partir d'un modèle univoque complet ($L_r = f(R, IK, IV, IR1)$).** La qualité de la prédiction est toujours fortement dépendante de la représentativité du site de référence. Cette condition doit être levée (S41 et NI0), par exemple) afin que la reconstitution des lames ruisselées trouve tout son intérêt dans un couplage avec un modèle de bilan hydrique adapté aux conditions soudano-sahéliennes (Vaksmann et Traoré, 1989 ; Albergel et al., 1991).

. Ces résultats soulignent l'importante variabilité spatiale qui peut exister à courte distance, concernant l'aptitude des sols au ruissellement des sols cultivés. Au delà de la simple description morphologique, nous allons donc tenter de mieux cerner le déterminisme de formation des croûtes superficielles et leur comportement hydrodynamique.

Tableau 64 : Composition granulométrique en huit fractions (en %). 2 répétitions.

origine du matériau	A < 2	Lf 2 à 20	Lg 20 à 50	Sf1 50 à 100	Sf2 100 à 200	Sg1 200 à 500	Sg2 500 à 1000	Sg3 > 1000
Sonkorong	3.3	2.9	14.4	16.2	38.1	24.1	1.1	0.0
S4	3.5	3.0	12.8	25.9	35.7	17.7	1.3	0.1
Nioro	3.6	2.6	10.2	17.3	42.2	24.1	1.0	0.0
Dior	2.4	1.4	3.3	23.5	44.9	23.4	1.2	0.0
Deck	8.1	2.5	6.5	22.7	39.2	19.1	0.8	0.1

Tableau 65 : Densité apparente sèche (γ_d) avant et après retrait, variation de volume (en %) et humidité pondérale à la limite de retrait (wr en %). Moyennes de 12 répétitions.

origine du matériau	γ_d		variation de volume	wr (%)
	avant retrait	après retrait		
Sonkorong	1.64	1.74	6.3	15.6
S4	1.69	1.77	4.6	16.4
Nioro	-	-	-	-
Dior	1.62	1.69	4.1	16.1
Deck	1.57	1.77	11.4	18.1

Tableau 66 : Influence de l'intensité pluviométrique (I) sur le volume d'intrusion (V_p en $\text{cm}^3/100\text{g}$), le diamètre équivalent médian (D_{eq} en mm), la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et la porosité (n_{Hg} en %) mesurés par porosimétrie au mercure. 2 répétitions.

Traitement	type	V_p	D_{eq}	γ_{dHg}	n_{Hg}
I = 30 mm/h	croûte	20.3	18.8	1.69	34.2
	massif	21.3	20.3	1.65	35.2
I = 60 mm/h	croûte	20.9	17.7	1.66	34.6
	massif	22.1	22.8	1.63	35.1
I = 120 mm/h	croûte	20.4	19.5	1.67	34.1
	massif	21.1	23.9	1.66	35.1

7 CARACTERISATION DES CROÛTES SUPERFICIELLES :

. Dans un premier temps, nous décrirons certains aspects du comportement mécanique du matériau superficiel de divers sols de la zone. Nous caractériserons ensuite le comportement hydraulique d'une croûte en place à partir d'expérimentations réalisées in situ. Les résultats de laboratoire ont été obtenus au Laboratoire de gestion Physique des Sols de Montpellier (LAGEPHY - ENSAM/CIRAD).

7.1 Caractérisation du matériau sableux superficiel :

7.1.1 Analyse granulométrique :

. Durant la saison sèche, nous avons prélevé des échantillons de l'horizon superficiel (0-5 cm) du sol des stations de Sonkorong et Nioro du Rip, ainsi que du bassin versant S4. Le matériau est en général pulvérulent et ne contient aucun élément grossier. Deux autres échantillons, provenant de la station de Bambey, sont ajoutés et constituent des références comparatives compte-tenu des nombreuses études antérieures les concernant (Charreau et Nicou, 1971 ; Nicou, 1974 ; Ducreux, 1984). Il s'agit d'un sol ferrugineux faiblement lessivé (Sol Dior) et d'un sol de transition avec les vertisols (Sol Deck). Après homogénéisation, une analyse granulométrique en huit fractions est réalisée à raison de deux répétitions par type de sol. La prise d'échantillon est de 30 grammes et la fraction des limons grossiers est mesurée afin d'améliorer l'évaluation des fractions fines.

. Les compositions granulométriques moyennes sont présentées dans le tableau 64. Tous les matériaux sont sableux et leurs squelettes granulométriques sont centrés sur la fraction fine comprise entre 100 et 200 μm . Les échantillons provenant de nos sites d'étude sont caractérisés par une fraction limoneuse plus importante que celle des sols de référence. Cet étalement du squelette granulométrique conditionne l'aptitude du sol à l'encroûtement et au ruissellement (Roose, 1977 ; Poesen, 1986) ; il est mis en évidence par l'indice suivant :

$$IG = (Lg + Sg)/(Lg + Sf + Sg).$$

avec IG : indice granulométrique

Lg : fraction des limons grossiers

Sf : fraction des sables fins

Sg : fraction des sables grossiers

7.1.2 Analyse du retrait :

. Disposant également d'échantillons non remaniés et séchés, prélevés au cylindre (100 cm^3), nous avons cherché à connaître la courbe de retrait des différents matériaux disponibles. En effet, si le retrait demeure négligeable, hypothèse acceptable pour un matériau sableux, les mesures ou observations réalisées sur les échantillon secs restent représentatives des traitements subis à l'état humide (Fies et Zimmer, 1982). Pour chaque matériau, douze échantillons (30 g) malaxés à une humidité proche de la saturation sont placés dans des capsules et séchés à l'étuve. Le volume après retrait est mesuré par la méthode au pétrole (Monnier et al., 1973).

. Seul le matériau Deck peut être saturé, les autres matériaux présentent des taux de saturation inférieurs à 95 %. Pour ces derniers, avant retrait, les volumes massiques apparents ($1/\gamma_a$) mesurés sont indépendants du taux de saturation initial et caractérisent un espace poral apparemment rigide (Bruand, 1986). Après retrait, seul le matériau Deck subit une variation moyenne de volume supérieure à 10 %, pour les autres matériaux cette variation avoisine 5 % (Tableau 65). Nous pouvons donc confirmer l'hypothèse de représentativité des échantillons secs prélevés sur nos sites d'étude

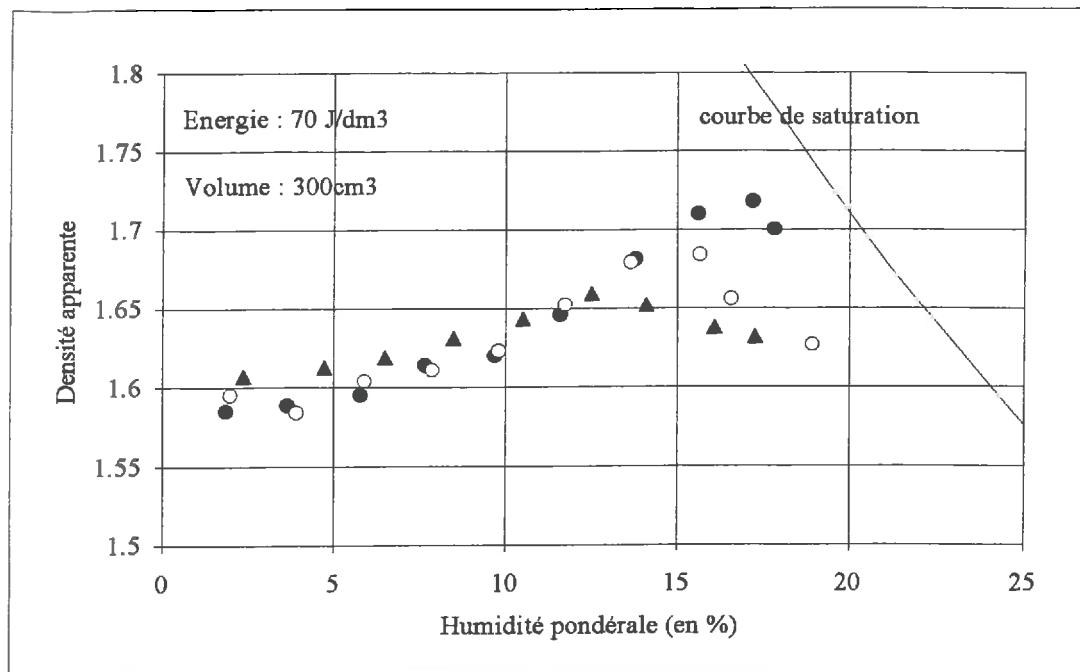


Figure 76 : Influence de l'humidité du matériau (w en %) sur la densité apparente sèche (γ_d) obtenue par compactage Proctor modifié (70 J/dm³). Matériau Dior (▲), Papem (○) et S4 (●).

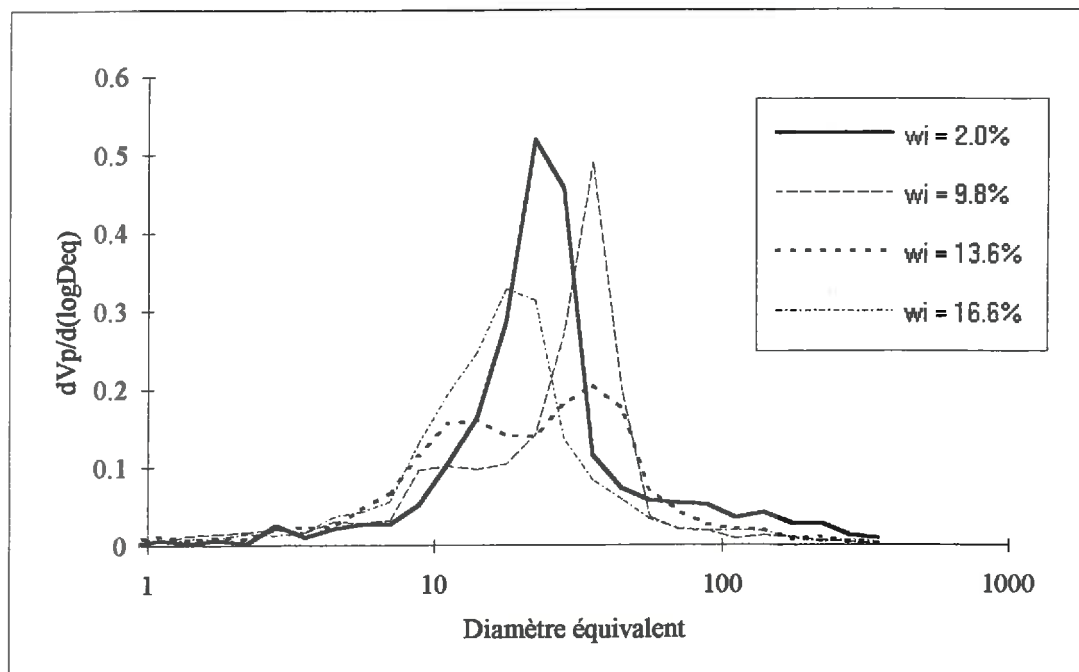


Figure 77 : Répartition des pentes des courbes d'intrusion en fonction du diamètre équivalent (Deq en μm). Influence de l'humidité initiale (w_i en %) lors d'un compactage Proctor modifié (70 J/dm³).

7.1.3 Test de compactage dynamique :

. Pour caractériser le comportement mécanique de différents matériaux, nous avons soumis les échantillons à un test de compactage. Nous avons suivi un protocole voisin de celui proposé par Ducreux (1984) : 500 grammes de terre tamisée sont humidifiés lentement puis compactés, en trois couches successives, dans un moule de 300 cm³ avec une énergie de 70 J/dm³. Cette énergie permet d'obtenir des niveaux de compactage du même ordre de grandeur que ceux observés sur le terrain. La gamme d'humidités pondérales testée s'étend de 2 % à 18 %. Les matériaux Deck et Nioro n'ont pas subi le test de compactage, les quantités de terre disponibles étant insuffisantes.

. Les valeurs d'humidité (w_p) et de densité apparente (γ_{ap}) au seuil de compactage sont assez proches pour les trois matériaux ; en revanche, l'optimum de compactage correspond à des valeurs d'humidité ($w_m = 13,5\%$) et de densité ($\gamma_{dm} = 1,66$) plus faibles dans le cas du matériau Dior (Figure 76). La présence plus marquée de la fraction limoneuse se traduit par une plasticité légèrement plus forte des matériaux provenant de S4 et de Sonkorong.

. A l'intérieur de chaque massif compacté et séché nous avons prélevé 2 échantillons (2 x 1 x 0,5 cm³) destinés à une analyse de l'espace poral par porosimétrie au mercure. Cette technique permet d'obtenir une courbe cumulative des volumes de mercure entrés dans un échantillon sous l'effet de pressions croissantes. Nous renvoyons le lecteur à la bibliographie existante concernant les conditions générales d'application (Pellerin, 1980 ; Fies, 1984). Pour une pression donnée, on obtient le volume d'intrusion (V_p) et le diamètre de pore équivalent (Deq), en application de la loi de Jurin. Le volume total d'intrusion mesuré permet de calculer les valeurs de la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et de la porosité (n_{Hg}) d'un échantillon.

. La représentation de la relation entre la pente de la courbe d'intrusion ($dV_p/d(\log Deq)$) et le diamètre équivalent (Deq) permet de visualiser l'étalement et le mode de la fonction de répartition des pentes d'intrusion (Fies et Zimmer, 1982). Les valeurs modales, que nous appellerons pics d'intrusion, évoluent en fonction de l'humidité initiale des échantillons soumis au test de compactage (Figure 77). Au voisinage de l'optimum de compactage, on assiste à un effondrement du pic et à l'étalement du domaine d'intrusion. Ce phénomène est assez discret dans le cas du matériau Dior. Pour une humidité initiale supérieure, le pic se reforme sur une valeur de diamètre équivalent inférieure à la valeur initiale. La géométrie de l'espace poral est donc fortement modifiée lorsqu'on compacte les matériaux provenant de S4 et de Sonkorong dans un état proche de la liquidité. On observe une réduction des volumes accessibles par des pores de gros diamètre, compris entre 20 et 60 μm , et un accroissement relatif du volume commandé par des pores plus petits, compris entre 6 et 20 μm . Dans tous les cas, le volume poral accessible dans la phase argileuse ($Deq < 0,1 \mu m$) avoisine 0,8 cm³/100 g et n'est pas affecté par le compactage.

7.2 Caractérisation physique des croûtes sableuses :

7.2.1 Influence de l'intensité pluviométrique :

. Une analyse semblable a été menée sur des échantillons non remaniés (100 cm³) prélevés dans l'horizon superficiel du sol (0-5 cm), à la station de Sonkorong. Les échantillons proviennent d'un essai de pluies simulées à intensités constantes : une hauteur d'eau de 30 mm est apportée sur trois parcelles de sol nu à raison de 30 mm/h pendant 60 minutes, 60 mm/h pendant 30 minutes et 120 mm/h pendant 15 minutes. Compte tenu des caractéristiques de l'appareil, les énergies globales des averses sont identiques et avoisinent 480 J/m². Lors du prélèvement, les croûtes superficielles sont conservées intactes. Dans chaque cylindre séché, deux échantillons sont prélevés à la surface ("croûtes") et deux autres à la base ("massifs"). Chaque échantillon occupe un volume de 1 à 2 cm³.

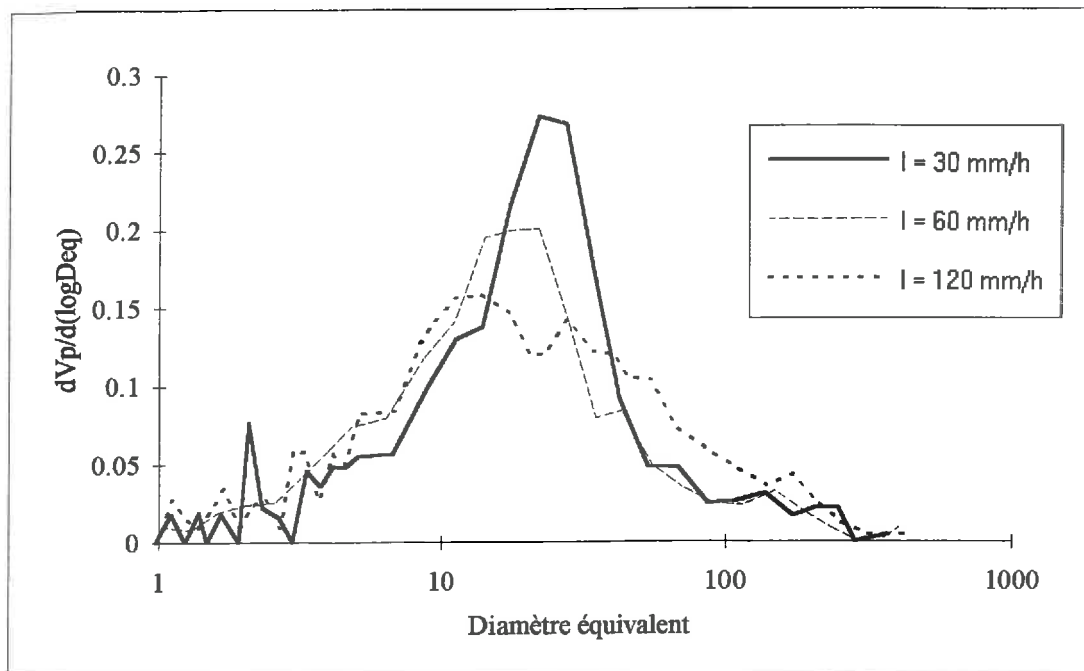


Figure 78 : Répartition des pentes des courbes d'intrusion en fonction du diamètre équivalent (Deq en μm). Influence de l'intensité pluviométrique (I) sur la géométrie de l'espace poral d'une croûte superficielle.

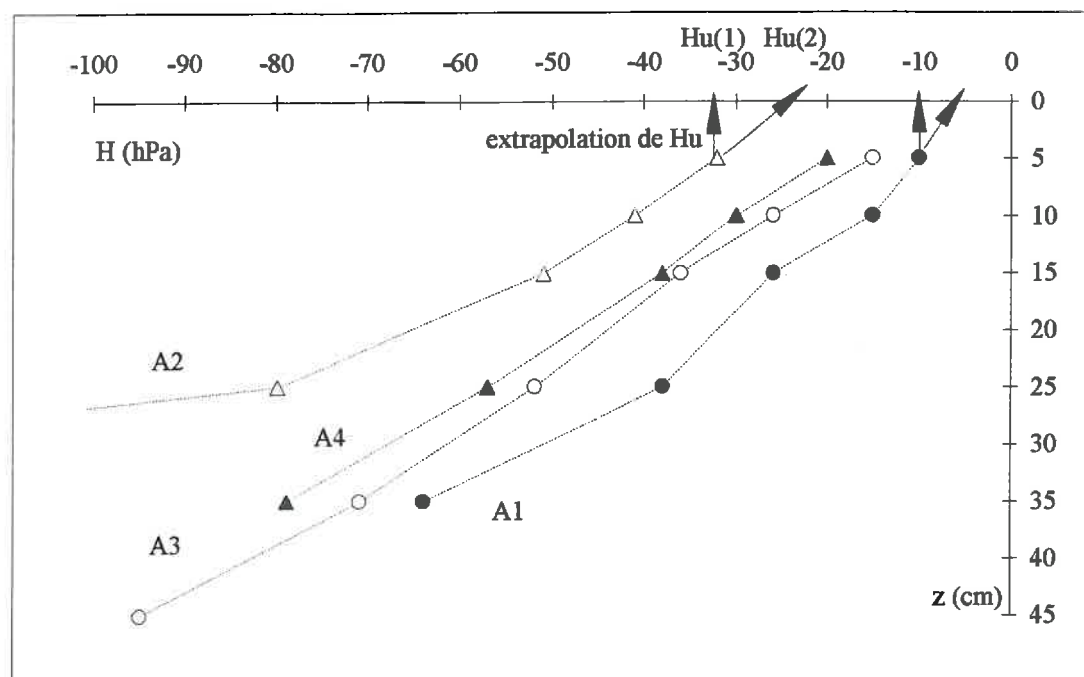


Figure 79 : Profils de charge hydraulique (H en hPa) mesurés, in situ, sous des croûtes superficielles. Méthodes d'extrapolation de la valeur Hu.

. Le tableau 66 fournit les valeurs moyennes du volume d'intrusion (V_p), du diamètre équivalent médian (Deq), de la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et de la porosité (n_{Hg}) issues de l'analyse par porosimétrie au mercure. Les deux premiers critères différencient de manière significative les types d'échantillons : les croûtes présentent un volume d'intrusion et un diamètre de pore médian inférieurs aux massifs. Les écarts de porosités sont plus faibles. Aucune influence de l'intensité pluviométrique n'est décelable. En revanche, on observe sur la figure 78 un affaissement progressif du pic d'intrusion et un étalement du domaine intrusif avec l'augmentation d'intensité. Il a été montré dans la seconde partie (Chapitre 2.2.1) que les intensités pluviométriques délivrées par le simulateur de pluie sont uniquement liées à l'amplitude d'oscillation de l'asperseur. L'énergie cinétique des gouttes étant constante, les modifications de l'espace poral dépendent de la fréquence de passage du pinceau d'arrosage.

7.2.2 Influence de l'état structural initial :

. Une seconde série d'échantillons non remanié a été soumise à une analyse de l'espace poral par porosimétrie au mercure. Ces échantillons proviennent des parcelles ayant servi à étudier l'influence d'un couvert d'arachide sur le ruissellement, à Sonkorong. Le mode préparatoire est identique à la série précédente.

. Le tableau 67 fournit les valeurs moyennes du volume d'intrusion (V_p), du diamètre équivalent médian (Deq), de la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et de la porosité (n_{Hg}). Nous rappelons que le traitement [semis + 30j sarclé] a subi un sarclage manuel de 2 à 3 cm de profondeur avant de recevoir, comme l'autre traitement, un total de 378 mm d'eau répartis en cinq averses. Les échantillons de croûte se distinguent nettement des massifs. Le sarclage préalable entraîne des modifications profondes par rapport au témoin non sarclé :

- au niveau de la croûte, les diamètres équivalents médians et modaux diminuent de 20 % environ. Les volumes d'intrusion, en revanche, sont peu affectés (- 3 %) ce qui explique les faibles différences entre les valeurs de densité et de porosité. Le volume poral accessible par des pores de gros diamètre ($Deq > 30 \mu m$) passe de 6,7 cm³/100 g à 4,3 cm³/100 g au profit d'une porosité plus fine.

- au niveau du massif, les diamètres équivalents médians et modaux diminuent de 25 % et 10 % respectivement. Cette distinction traduit un étalement plus large de la distribution porale après sarclage. A nouveau, les valeurs de densité et de porosité sont peu affectées (-2 %). Le volume poral accessible par des pores de gros diamètre ($Deq > 30 \mu m$) passe de 11,3 cm³/100 g à 8,5 cm³/100 g ;

- dans tous les cas, l'espace poral de la phase argileuse ($Deq < 0,1 \mu m$) n'est pas affecté et reste faible (1 cm³/100 g).

. En conclusion, l'analyse de l'espace poral par porosimétrie au mercure nous a permis d'obtenir des résultats convergents à partir d'expérimentations différentes. En effet, il y a peu d'analogie entre un compactage dynamique, sur matériau remanié, réalisé en laboratoire et un matraquage d'une surface par les gouttes de pluie. Cependant, nous avons montré que des sols sableux sensibles à l'encroûtement réagissent à une contraintes énergétique par la réorganisation de leur espace poral. Les modifications sont d'autant plus importantes que la contrainte est forte. Les conditions hydriques et structurales initiales interviennent également. Pour les sols étudiés, le volume poral global est peu affecté. Ce phénomène, associé aux faibles dimensions des croûtes, explique le manque de pertinence de la plupart des mesures de densité apparente effectuées in situ ou en laboratoire.

Tableau 67 : Influence du sarclage sur le volume d'intrusion (V_p en $\text{cm}^3/100\text{g}$), les diamètres équivalents médian et modal (Deq en μm), la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et la porosité (n_{Hg} en %) mesurés par porosimétrie au mercure. 2 répétitions.

Traitement	type	V_p	Deq		γ_{dHg}	n_{Hg}
			median	modal		
non sarclé	croûte	21.2	20.5	22.2	1.7	35.0
	massif	23.1	30.5	35.2	1.6	37.1
sarclé	croûte	20.6	15.5	17.7	1.7	34.6
	massif	21.9	22.8	31.5	1.6	36.0

Tableau 68 : Influence du mode d'apport d'eau sur l'humidité maximale (θ_{max} en cm^3/cm^3) et de la succion minimale (h_{min} en hPa) mesurées. (Source : Albergel et al., 1989).

Horizon	apport d'eau	θ_{max} (cm^3/cm^3)	h_{min} (hPa)
0 à 10 cm	infiltromètre	0.23	-37
	simulateur	0.28	-20
20 à 40 cm	infiltromètre	0.22	-29
	simulateur	0.26	-17

Tableau 69 : Intensité d'infiltration stabilisée (F_s), gradient de charge hydraulique (dH/dz) et conductivité hydraulique à la cote $z = 10$ cm (K_u). Conductivité hydraulique de la croûte (K_c) calculée avec $z_c = 2$ mm et deux valeurs probables de la charge hydraulique sous la croûte (H_u).

Parcelle	F_s (mm/h)	dH/dz à $z = 10$ cm	K_u (mm/h)	$H_u(1)$ (hPa)	$K_c(1)$ (mm/h)	$H_u(2)$ (hPa)	$K_c(2)$ (mm/h)
A1	29	-1.6	18.1	-10	0.58	-5	1.16
A2	18	-1.8	10	-33	0.1	-26	0.14
A3	30	-1.9	15.8	-15	0.4	-7	0.86
A4	21	-1.7	12.4	-20	0.22	-12	0.36

7.3 Caractérisation hydrodynamique d'une croûte sableuse :

7.3.1 Influence du mode d'apport d'eau :

. Durant la saison sèche 1988, une étude comparée de l'infiltration sous flux constant (simulateur de pluie) et sous charge d'eau constante (infiltromètre à double anneau) a été menée dans le bassin versant S4, à proximité de la parcelle S41. La parcelle expérimentale ($1 \times 1 \text{ m}^2$) est équipée d'un tube d'accès neutronique installé au centre de la parcelle et de dix tensiomètres étagés entre 10 et 160 cm de profondeur. L'infiltration sous charge d'eau constante ($H = +4 \text{ cm}$) précède de cinquante jours une série de trois pluies simulées séparées par douze heures de ressuyage. Pendant l'infiltration, seules les charges hydrauliques et les lames infiltrées (et ruisselées) sont mesurées. Le suivi de la redistribution est réalisé selon la méthode du drainage interne (Hillel et al., 1972) durant les dix premiers jours puis la méthode en conditions naturelles (Arya et al., 1975). Les résultats expérimentaux ont été analysés par Albergel et al. (1989) puis Touma et Albergel (1991).

. Des quantités d'eau similaires se sont infiltrées durant les essais avec infiltromètre ($L_r = 180 \text{ mm}$) ou simulateur ($L_r = 195 \text{ mm}$). Dans le second cas, la lame ruisselée totale avoisine 45 mm. La vitesse d'infiltration stabilisée atteint des valeurs de 120, 57, 48 et 30 mm/h pour le double anneau et les trois pluies simulées, respectivement. Le tracé des profils de charge hydraulique permet d'établir les gradients de charge à la fin de chaque infiltration, près de la surface : les valeurs sont proches de -1,7 avec l'infiltromètre et de -2 à -2,4 avec le simulateur. En admettant l'absence de croûte superficielle la conductivité hydraulique à saturation calculée est de 71 mm/h dans le premier cas et de 24 mm/h dans le second. La faible valeur obtenue sous pluie simulée laisse supposer qu'une croûte s'est formée à la surface du sol.

. Les couples (h, θ) obtenus lors de la redistribution permettent d'établir les courbes de rétention en eau des horizons 0-10 cm et 20-40 cm. La séparation en horizons homogènes est la même dans les essais avec infiltromètre ou simulateur de pluie. En tenant compte de la précision de mesure, aucune distinction ne peut être établie entre les points obtenus à partir des deux types d'essais. En revanche, la gamme de variation des paramètres mesurées dépend du mode d'apport d'eau, notamment pour les fortes humidités. Sous pluies simulées, les horizons de surface n'atteignent pas la saturation naturelle malgré le ruissellement observé lors des expérimentations (Tableau 68). Cette limitation peut être attribuée à la formation d'une croûte superficielle dont la conductivité hydraulique est nettement inférieure à celle du sol en place (Hillel et Gardner, 1970).

7.3.2 Détermination de la conductivité hydraulique d'une croûte sableuse :

. En application du modèle proposé par Hillel et Gardner (1970), la détermination, *in situ*, de la conductivité hydraulique d'une croûte superficielle nécessite une mesure précise du profil de charge sous la surface. Pour ce faire, nous avons modifié le matériel tensiométrique existant afin d'obtenir une mesure fiable de la charge hydraulique à la cote $z = 5 \text{ cm}$ (Chapitre 3.2.3). Les expérimentations ont été conduites à la station de Sonkorong, sur un sol présentant une bonne aptitude à l'encroûtement et au ruissellement. Les parcelles de ruissellement ($1 \times 1 \text{ m}^2$) sont installées sur un sol nu et sec dont l'état de surface est hérité des pratiques culturales de l'année précédente (mil ou arachide). Les tensiomètres sont enfoncés aux côtes 5, 10, 15, 25, 35 et 45 cm de profondeur, au centre de la parcelle (Figure 79). Une pluie est simulée avec une intensité pluviométrique constante ($I = 30 \text{ mm/h}$) et une lame précipitée de 35 mm.

. On considère qu'à la fin de l'averse le régime permanent d'infiltration est atteint et que l'équilibrage des tensiomètres est satisfaisant. Le profil de charge hydraulique à cet instant permet d'extrapoler la valeur de charge sous la croûte (H_u). La valeur d'intensité d'infiltration stabilisée (F_s) permet alors d'accéder aux conductivités hydrauliques de la croûte (K_c) et du sol sous-jacent (K_u), connaissant l'épaisseur (z_c) de la croûte (chapitre 2.3.1). Compte-tenu de la précision des mesures tensiométriques proches de la surface, l'extrapolation de la valeur H_u a été réalisée à partir de deux hypothèses simplificatrices. La valeur réelle se trouve entre ces deux limites arbitraires (Figure 80):

- (1) : La valeur $H_u(1)$ est identique à la valeur de charge hydraulique à la côte $z = 5$ cm,
- (2) : La valeur $H_u(2)$ correspond à l'intersection de la droite $H = (dH/dz) z + C$ avec l'axe des abscisses.

. En admettant que l'épaisseur de la croûte avoisine la valeur $z_c = 2$ mm, sa conductivité hydraulique varie de 0,10 à 1,16 mm/h pour les différentes parcelles étudiées (Tableau 69). On constate que le gradient de succion dans l'horizon sous-jacent n'est pas négligeable. Il est donc abusif d'assimiler l'intensité d'infiltration stabilisée (F_s) à une conductivité hydraulique (K_u), voire à une conductivité à saturation. Nous retiendrons que la croûte présente une conductivité dix à cinquante fois inférieure à celle du sol sous-jacent. Il est possible de s'affranchir de l'épaisseur de la croûte en utilisant la notion de résistance de croûte ($R_c = z_c / K_c$), on obtient alors des valeurs variant de 0,2 à 1,8 heure.

7.4 Discussion :

. L'horizon superficiel des sols étudiés se caractérise par une faible teneur en argile et un étalement plus ou moins marqué de la phase sableuse. Ces traits distinctifs influencent l'aptitude à l'encroûtement et à la prise en masse (Nicou, 1974 ; Ducreux, 1984 ; Chrétien, 1986). La quasi-absence d'argile ($A < 8$ %) confère à ces sols un mode d'assemblage squelette-plasma de type enrobage (Fies et Zimmer, 1982) que l'analyse micrographique permet de définir comme une structure gefuric ou chitonic (Bullock et al., 1985 ; Dutartre et al., 1993) ; contrairement à de nombreux sols ferrugineux sahéliens dont le taux d'argile est suffisant pour développer des structures plus complexes (porphiric). La géométrie de l'espace poral (Ouattara et al., 1993) et le comportement mécanique du sol (Ducreux, 1984 ; Valentin, 1991) sont alors nettement différents.

. La croûte sableuse superficielle est caractérisée par un espace poral dont les lacunes sont commandées par des seuils de diamètres médians inférieurs à ceux du sol sous-jacent. Ce glissement s'accompagne d'un étalement plus ou moins prononcé du domaine d'intrusion ; en conséquence, le volume poral global est peu affecté. Des phénomènes identiques sont décrits par Fies et Zimmer (1982) ou Grimaldi et Boulet (1990). Le remaniement préalable de l'horizon de surface par un sarclo-binage entraîne une modification de l'espace poral sur une profondeur plus importante, confirmant ainsi nos observations des profils culturaux et les conclusions auxquelles aboutissent Valentin (1991) au Niger et Rawitz et al. (1981) au Mali.

. La croûte crée une barrière hydraulique qui gouverne le régime d'infiltration et impose une condition non saturante dans l'horizon sous-jacent, conformément au modèle proposé par Hillel et Gardner (1970). Ce constat limite l'utilisation en condition naturelle des valeurs de conductivité hydraulique obtenues avec un infiltromètre à charge d'eau constante (Hoogmoed et Kievit, 1981 ; Valentin, 1991). La croûte possède une conductivité au minimum dix fois inférieure à celle du sol en place (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984 ; Morin et al., 1981).

SIXIEME PARTIE :

**LUTTE CONTRE LE RUISSELLEMENT A L'ECHELLE
DE LA PARCELLE**

8 GESTION DU RUISSELLEMENT A L'ECHELLE DE LA PARCELLE AGRICOLE :

8.1 Conséquences techniques des études ponctuelles sur le ruissellement :

. Nous avons montré dans les chapitres précédents qu'à l'échelle de la surface élémentaire :

- Le ruissellement prend naissance à tous les niveaux de la toposéquence et le refus d'infiltration décroît d'amont en aval du versant. Cette spatialisation doit permettre une régulation progressive des écoulements si on parvient à limiter leur vitesse et éviter leur concentration. Pour cela, il est nécessaire de cloisonner le versant avec un réseau d'obstacles filtrants (Roose, 1977 ; Lal, 1988 ; Vlaar, 1992). Une maîtrise totale de l'eau est exclue, compte-tenu d'une pluviométrie conséquente et de l'absence d'un réseau de drainage naturel bien hiérarchisé.

- L'aptitude à l'encroûtement de l'horizon superficiel du sol est liée à l'éventail granulométrique du squelette sableux. Les faibles teneurs en argile et en matière organique limitent fortement les tentatives d'amélioration durable du profil cultural. Un objectif plus réaliste consiste à maintenir une rugosité temporaire suffisante afin d'augmenter la durée de détention de l'eau en surface (Rawitz et al., 1981 ; Guillobez, 1990).

- La protection des états de surface assurée par une litière ou un couvert végétal bien développé permet de diminuer les pertes par ruissellement et de ralentir l'évolution des croûtes. Il faut favoriser l'implantation rapide des cultures et le développement d'une biomasse apte à intercepter efficacement la pluie. Cela impose d'associer étroitement les techniques de gestion de l'eau et de maintien de la fertilité des sols (Roose et al., 1992 ; Sessay et Stocking, 1993).

. Ce triple constat nous a conduit à proposer, puis mettre en place, un schéma d'aménagement des bassins versants S4 et S5. Ces bassins de 2,5 ha chacun sont à l'échelle de la parcelle agricole. Les techniques utilisées, décrites précédemment (Chapitre 3.3.3) répondent aux objectifs mentionnés plus haut :

- cloisonnement de l'espace agricole par des haies-vives pour le traitement du ruissellement diffus et par des seuils filtrants pour le traitement des écoulements concentrés ;

- amélioration de l'infiltration par l'adoption de techniques culturales adaptées et complémentaires telles que le décompactage du sol en condition sèche, le semis isohypse ou le sarclo-buttage de prélevée ;

- développement d'un couvert végétal homogène et protecteur grâce à l'utilisation de semences de qualité et aux apports fréquents de fumier ou de compost produit en bordure de champs. Ces apports n'ont pas été systématiques sur l'ensemble des bassins versants mais correspondent à des fréquences nettement supérieures aux pratiques traditionnelles.

. L'influence d'un tel aménagement intégré sera étudiée globalement, les conditions expérimentales ne se prêtent pas à une analyse détaillée des processus. Au delà de cet obstacle, il n'est pas certain qu'une analyse des différents facteurs soit pertinente, compte-tenu du caractère complémentaire des techniques utilisées, à la fois dans l'espace et dans le temps. Cette remarque n'exclut pas la mise en place d'expérimentations plus ciblées qui nous ont permis d'approfondir nos connaissances de certaines techniques. C'est le cas du décompactage du sol, en condition sèche, dont nous avons étudié l'influence sur l'infiltration.

Tableau 70 : Influence du décompactage du sol sur les principaux paramètres hydrologiques mesurés sous pluies simulées. 2 répétitions. Site de Sonkorong.

Précédent	Traitement	Pluie 1			Pluie 2			Pluie 3			Total Lr (mm)
		Lr (mm)	Lpi (mm)	Fn (mm/h)	Lr (mm)	Lpi (mm)	Fn (mm/h)	Lr (mm)	Lpi (mm)	Fn (mm/h)	
Arachide	Témoin	10.2	15.4	41.7	19	10	24.2	5.6	12.3	21.3	34.7
	Travaillé	0.4	18	117	8.3	11.4	68	0.2	17.5	29.6	8.9
Mil	Témoin	9.3	16.5	61	16.5	9.7	38	4.4	17	23.7	30.2
	Travaillé	0.1	32.5	118.2	4	14.7	87.6	0.1	30	29.9	4.1

Tableau 71 : Influences du décompactage et du précédent cultural sur les états de surface initiaux et finaux.

Précédent	Traitement	Etat initial			Etat final					
		Rugosité (IR1)		Mottes	Rugosité (IR1)		Extension de croûte (%)			
		surf	prof	taille max (cm ²)	surf	prof	ST2	ERO	RUI	DEC
Arachide	Témoin	11.2	15.1	20	8	-	1.9	28.3	55.3	14.5
	Travaillé	17.1	28.5	40	9.5	-	12.7	43.5	35	8.8
Mil	Témoin	11.1	14.1	10	9.1	-	3	38.6	48.1	10.3
	Travaillé	16.3	36.4	100	10.8	-	13.3	30.1	43.9	12.7

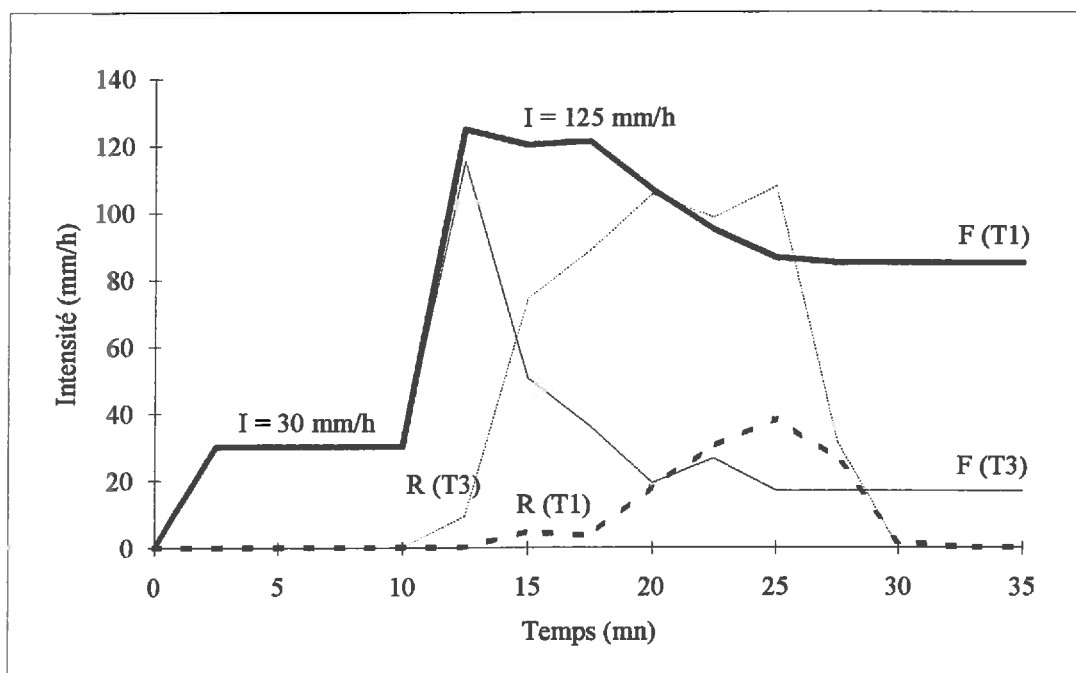


Figure 80 : Evolutions des intensités de ruissellement (R) et d'infiltration (F) lors de la seconde pluie simulée. (T1) : parcelle travaillée, (T3) : parcelle non travaillée.

8.2 Influence sur l'infiltration du décompactage du sol en condition sèche :

. Afin d'améliorer l'infiltration dans les sols nus, en début d'hivernage, il existe peu de solutions techniques transférables. En effet, un labour en condition humide se heurte à un calendrier cultural chargé pendant cette période (Benoît Cattin, 1986) et une réalisation avant les premières pluies nécessite une énergie de traction énorme (Charreau et Nicou, 1971). En revanche, le décompactage de sol grâce à un dispositif mono soc équipé d'un coute droit et étroit (type RS8 ou M5) permet d'obtenir un bon compromis entre le profil travaillé et l'effort de traction moyen (Le Thiec et Bordet, 1990).

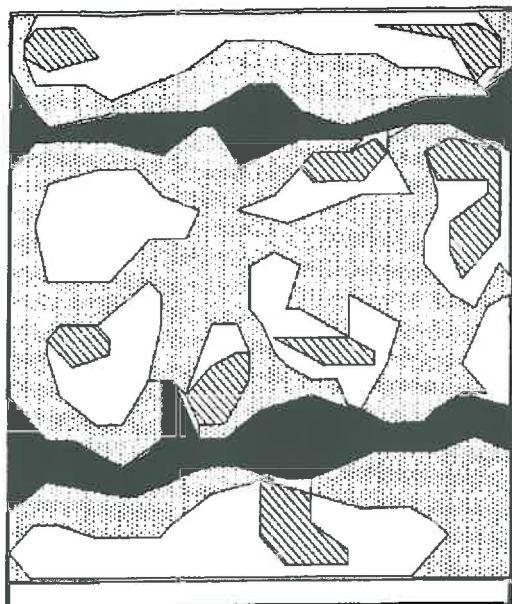
. Les expérimentations ont été conduites sous pluies simulées, à la station de Sonkorong (Chapitre 3.3.6). Trois pluies sont simulées avec des périodes de ressuyage de douze heures. Les deux premières se composent d'une séquence de dix minutes à 30 mm/h suivie d'une séquence de quinze minutes à 120 mm/h. La troisième pluie est constituée par une averse de 70 minutes à 30 mm/h. Dans tous les cas, la lame précipitée totale vaut $L_p = 35$ mm. Le décompactage est réalisé juste avant le début du protocole de simulation, avec un écartement moyen de 45 cm entre les passages. On dispose de deux parcelles travaillées et deux témoins. L'influence du précédent cultural (mil en arachide) sur l'état de surface initial est également pris en compte.

. Pour une lame précipitée cumulée de 105 mm, le coefficient de ruissellement moyen est ramené de 30 % à 6 % grâce au décompactage en sec (Tableau 70). L'infiltration préférentielle au niveau des saignées influence fortement les valeurs de pluie d'imbibition (L_{pi}) et d'intensité d'infiltration stabilisée (F_n) lors des deux premières averses. La lame d'eau précipitée durant la première pluie est presque entièrement absorbée. Pendant la seconde pluie les flux d'infiltration et de ruissellement sont nettement différenciés malgré le comblement partiel des saignées (Figure 80). Lors de la dernière pluie, à intensité constante ($I = 30$ mm/h), les intensités d'infiltration finales deviennent comparables quel que soit le traitement.

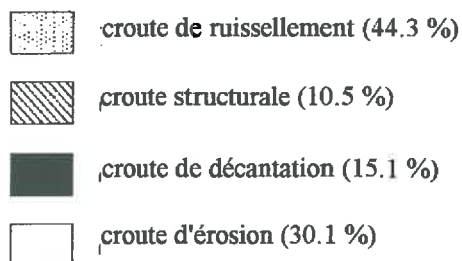
. L'état de surface hérité de la culture d'arachide est caractérisé par un horizon superficiel pulvérulent de 3 à 5 cm d'épaisseur qui repose sur le toit ondulé d'un horizon massif. Ce profil est créé par le soulèvement mécanique des gousses d'arachide et entretenu par le piétinement des troupeaux en saison sèche. De la culture du mil ne subsiste qu'un vague modelé et des débris de croûtes issus du dernier sarclage. Lors du décompactage, l'éclatement du massif est satisfaisant lorsque l'horizon de surface est cohérent (Tableau 71). La présence d'une couche sableuse particulière limite la taille des mottes ramenées à la surface et favorise le comblement rapide du profil cultural.

. Le précédent cultural influence également la mise en place des croûtes superficielles sur les parcelles témoins. En effet, les écoulements s'organisent en fonction du modelé résiduel issu du sarclage (mil) ou du soulèvement (arachide). Dès la première pluie simulée, les croûtes structurales s'effacent devant les croûtes d'érosion et de ruissellement (Figure 81). Les ondulations du relief créées par le soulèvement concentrent le ruissellement dans de larges zones de décantation. Seules les parcelles travaillées présentent des croûtes structurales en fin d'expérimentation, à l'emplacement des mottes décimétriques qui ont progressivement fondu.

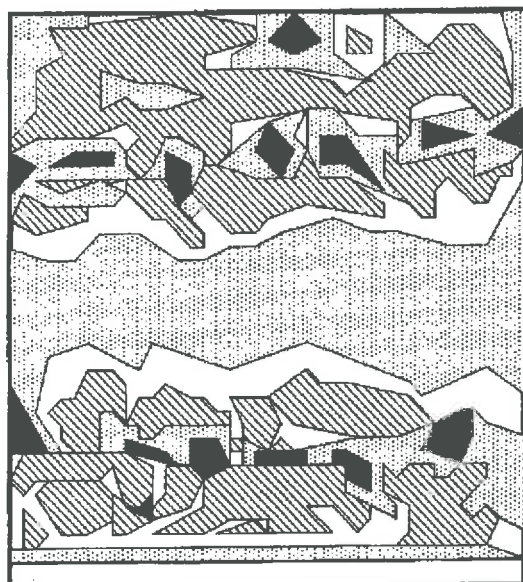
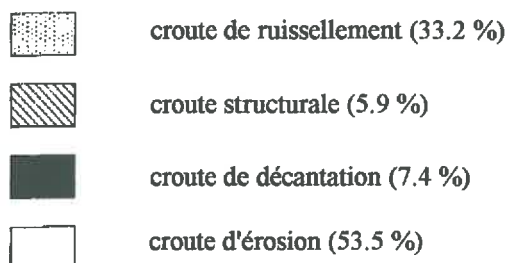
. Globalement, le décompactage en condition sèche permet d'augmenter de 26 mm la lame d'eau infiltrée, soit un gain de 35 % par rapport au témoin. En fin d'expérience, le front d'humectation atteint la cote $z = 40$ cm dans les parcelles témoins et la cote $z = 60$ cm dans les parcelles travaillées. Des ordres de grandeur équivalents sont fournis par Juncker et Sene (1990) ou Le Thiec et Bordet (1990). Réalisé dans de bonnes conditions cette intervention assure un rôle protecteur vis à vis du ruissellement et sécurise l'alimentation hydrique des graines lors de la germination.



Parcelle : (T41) précédent arachide, non travaillée.
 Pluie : après pluie P1 (35 mm).
 Rugosité : IR1 = 15.1



Parcelle : (T42) précédent mil, non travaillée.
 Pluie : après pluie P1 (35 mm).
 Rugosité : IR1 = 11.1



Parcelle : (T11) précédent mil, travaillée en sec.
 Pluie : après pluie P1 (35 mm).
 Rugosité : IR1 = 17.1

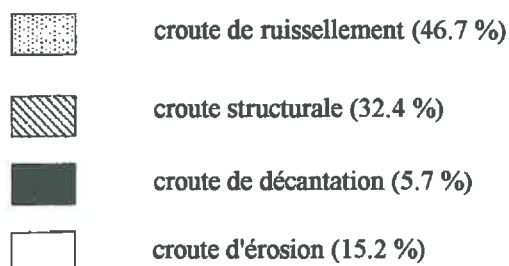


Figure 81 : Répartition spatiale des croûtes superficielles en fonction de l'état de surface initial.

8.3 Etude de la réponse hydrologique globale des bassins versants S4 et S5 :

8.3.1 Le bassin versant S4 :

. Nous disposons de trois années d'étude avant aménagement (1985 à 1987) que nous appellerons **période noire**. Les aménagements ont été mis en place à partir de 1988, année charnière dite **période grise**. Les quatre années d'étude suivantes (1989 à 1992) constituent la **période blanche** caractéristique de la phase aménagée. Les différentes couleurs correspondent aux symboles utilisés dans les graphiques qui seront présentés. Le mauvais dimensionnement du dispositif de mesure, de 1985 à 1988, ne permet pas d'établir des comparaisons fiables des temps de montée, des temps de base ou des débits spécifiques des crues.

- Données pluviométriques :

. Durant la période noire, 129 pluies ont été enregistrées, 50 pendant la période grise et 154 pendant la période blanche. Les fréquences d'apparition par classes de hauteur de pluie présentent des distributions équivalentes avant et après aménagement (Figure 82). Les averses de hauteur supérieure à $L_p = 8$ mm pour lesquelles les données pluviographiques sont complètes (I5, I10, indice R) sont au nombre de 67, 32 et 93 en périodes noires, grises et blanches respectivement. Les distributions des intensités horaires sont équivalentes avant et après aménagement. Nous pouvons donc admettre que les échantillons de pluies des périodes noires et blanches peuvent se prêter à une analyse comparative des résultats hydrologiques. Les probabilités d'occurrence des événements pluvieux influencent également les écoulements du bassin versant. L'analyse de la distribution des valeurs de l'indice de pluies antérieures (IK) indique peu de différences entre les périodes noires et blanches. Dans les deux cas, la moitié des averses se produisent sur un sol bien ressuyé ($IK > 5$). Néanmoins, la période noire présente les valeurs les plus fortes.

- Données hydrométriques :

. D'un point de vue hydrométrique, certaines crues n'ont pu être reconstituées pour des raisons techniques. Ces événements ont été exclus de la base de données. On obtient 40 écoulements avant aménagement 18 en 1988 et 36 après aménagement.

. Globalement, la période noire est caractérisée par une hauteur de pluie cumulée de 2 057 mm et une lame ruisselée de 87 mm. La période blanche totalise une pluviométrie de 2 340 mm et un ruissellement de 60 mm. Le coefficient de ruissellement passe de 4,2 % à 2,6 % (Tableau 72). La variabilité interannuelle est forte au sein des deux périodes comme le montrent les coefficients du ruissellement annuels qui varient de 2,4 % à 5,7 % avant aménagement et de 0,4 % à 5,5 % après aménagement. Cette hétérogénéité des écoulements est essentiellement due à l'occurrence d'une (ou plusieurs) averse violente durant la saison, dont la lame ruisselée peut représenter jusqu'à 60 % de la valeur annuelle (Tableau 73).

. A l'échelle de l'averse, seule une faible proportion d'événements occasionne un ruissellement : 31 % en période noire et 24 % en période blanche. Nous avons déterminé les seuils interannuels de lame précipitée (L_{plim}), d'intensité pluviométrique en dix minutes (I_{10lim}) et d'indice d'agressivité (R_{lim}) à partir desquels le ruissellement prend naissance. La méthode d'évaluation est identique à celle utilisée pour les parcelles élémentaires (Chapitre 4.3.3.1). La valeur de L_{plim} n'est pas modifiée entre les deux périodes ; en revanche les valeurs de R_{lim} et I_{10lim} sont plus fortes pendant la période blanche (Tableau 74). A hauteurs précipitées équivalentes, le bassin versant parvient à absorber, après aménagement, des pluies plus violentes qu'auparavant. La faible pertinence du critère L_{plim} provient essentiellement de l'hétérogénéité des types de pluies. L'analyse est plus aisée avec les valeurs d'intensités pluviométriques ; dans ce cas, le bassin versant ne réagit pratiquement pas lorsque les intensités sont inférieures à 80 mm/h, contrairement à la première période. Au delà de cette valeur, pour les quelques pluies disponibles, la réponse hydrologique est peu

Tableau 72 : Bilans hydrologiques globaux du bassin versant S4 pendant les trois périodes successives.

Période	nb pluies	nb crues	Lp (mm)	R	Lr (mm)	Kr (%)
noire (1985-1987)	129	40	2057.7	900.7	87.1	4.2
grise (1988)	50	18	931.5	449.5	40.1	4.3
blanche (1989-1992)	154	36	2339.7	1091.9	60.2	2.6

Tableau 73 : Bilans hydrologiques annuels et caractéristiques des événements pluviométriques les plus forts. Bassin versant S4.

Année	Bilan annuel				Evènement le plus fort		
	Lp (mm)	R	Lr (mm)	Kr (%)	Lp (mm)	I10 (mm/h)	Lr (mm)
1985	616.1	339.4	28.5	4.6	73.0	144.0	14.5
1986	722.3	378.6	41.0	5.7	112.0	118.0	14.6
1987	719.3	182.7	17.6	2.4	38.5	54.0	5.6
1988	931.5	449.5	40.1	4.3	84.0	121.0	18.4
1989	752.1	258.2	3.2	0.4	40.0	72.0	0.4
1990	488.4	246.7	26.9	5.5	51.8	179.0	16.7
1991	505.1	267.0	25.4	5.0	32.0	111.0	13.9
1992	594.1	320.0	4.7	0.8	70.0	-	2.3

Tableau 74 : Seuils de hauteur de pluie (Lplim), d'intensité pluviométrique (I10) et d'indice d'agressivité (Rlim) durant les trois périodes. Bassin versant S4.

Période	Lplim (mm)	I10lim (mm/h)	Rlim
noire (1985-1987)	21	24	4.1
grise (1988)	21	28	5.1
blanche (1989-1992)	22	36	7.9

Tableau 75 : Bilans globaux par périodes des pertes en terre. Bassin versant S4.

Période	nb pluies	nb crues prélevées	Matière solide transportée (kg)	Erosion spécifique (t/ha/an)	Evènement exceptionnel (kg)
noire (1985-1987)	129	25	13955	1.9	4924
grise (1988)	50	0	-	-	-
blanche (1989-1992)	154	28	2967	0.3	912

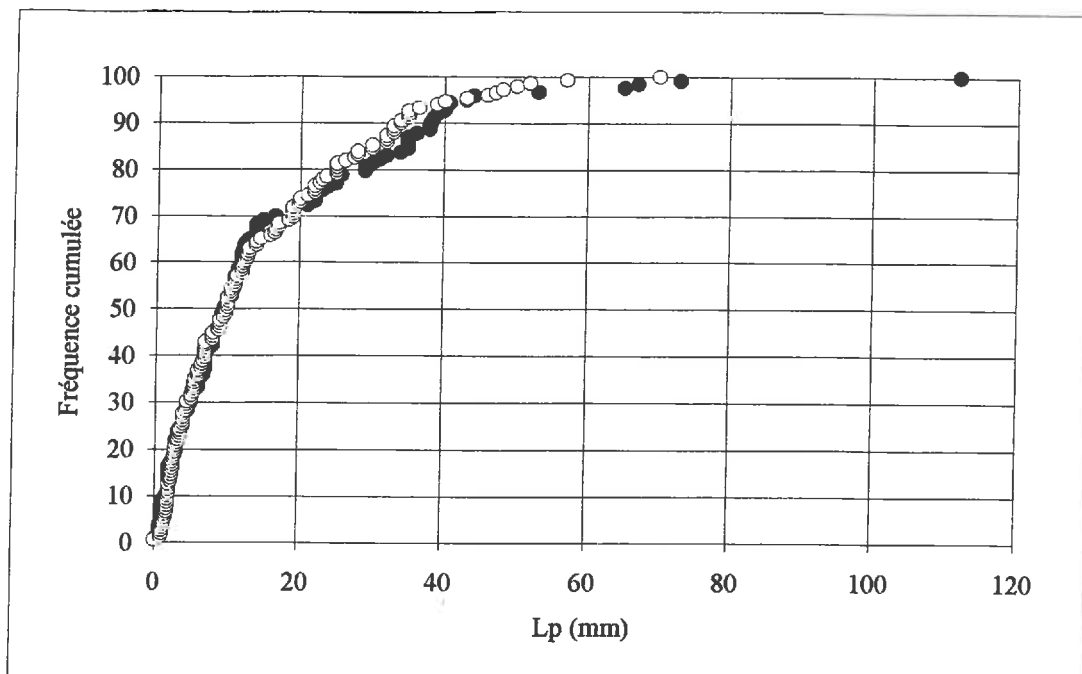


Figure 82 : Distribution des hauteurs de pluie enregistrées pendant la période noire (●), puis la période blanche (○). Bassin versant S4.

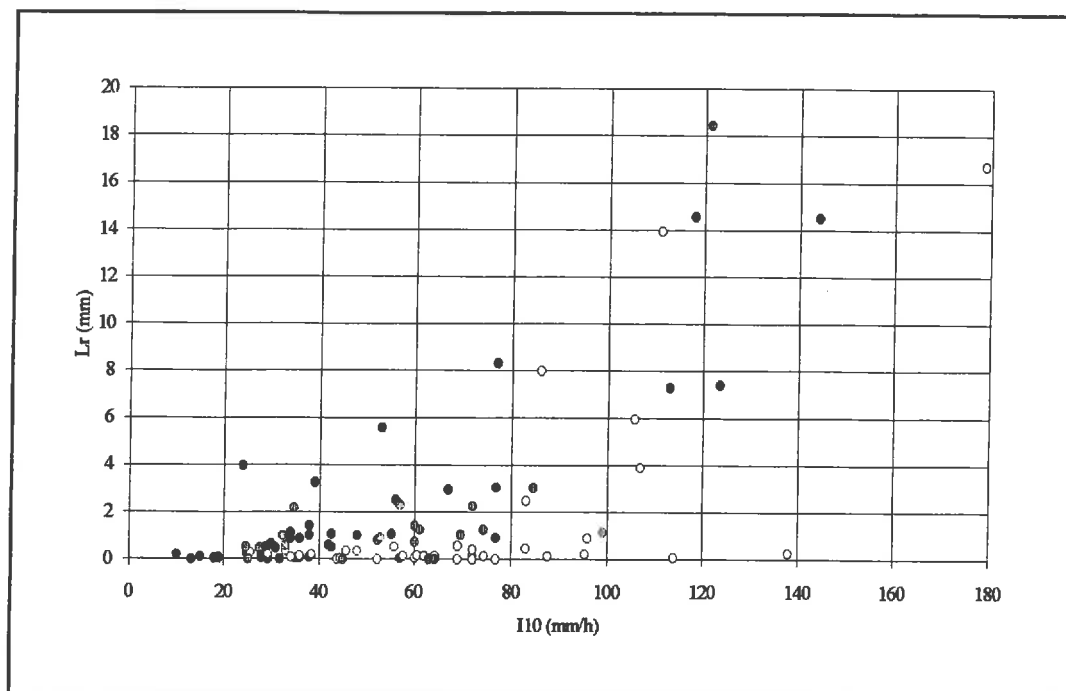


Figure 83 : Relation entre la lame ruisselée (Lr) et l'intensité pluviométrique en dix minutes (I10). (●) : période noire, (◐) : période grise, (○) : période blanche. Bassin versant S4.

modifiée (Figure 83). Cette analyse globale permet de mettre en évidence les faits suivants :

- les écoulements à l'exutoire du bassin versant représentent 10 à 20 % des lames ruisselées enregistrées sur les parcelles élémentaires ($1 \times 1 \text{ m}^2$) pendant la même période. Les processus de transfert internes sont donc nettement supérieurs aux pertes en eau vers l'extérieur. Cette différence est due, d'une part, à la détention superficielle de l'eau dans le micro-relief ou dans des dépressions topographiques (Milleville, 1991). D'autre part, l'échelle du mètre carré ne prend pas en compte la longueur de pente ce qui, théoriquement, conduit à surestimer les lames ruisselées dans le cadre d'un ruissellement en nappe (Bader, 1990; Guillobez, 1990). Les ordres de grandeur présentés confirment ceux observés, en Afrique, par d'autres auteurs (Thébé, 1987 ; Miller, 1992).

- L'impact de l'aménagement sur les lames ruisselées globales est significatif mais il porte sur des valeurs assez faibles. De par sa nature, le dispositif filtrant mis en place n'absorbe qu'une partie des écoulements et son effet est peu marqué lorsque les volumes d'eau sont importantes. Cependant, nous n'avons aucune information, à ce stade de l'analyse, sur les redistributions des flux hydriques qui ont pu s'opérer au sein du bassin versant.

- *Modélisation des lames ruisselées :*

. L'objectif est de pouvoir comparer les écoulements effectivement mesurés pendant la période blanche avec les écoulements qui auraient été observés, dans le même temps, si la bassin versant n'avait pas été aménagé. L'absence de bassin témoin rend l'interprétation des résultats délicate en nous plaçant dans la situation du fait accompli. Cependant, les fortes convergences qui ont été constatées entre les deux séries pluviométriques laissent espérer qu'on puisse comparer, à l'échelle de l'averse, les fonctions de production des périodes blanches et noires.

. Nous avons conservé les événements dont les variables pluviométriques (L_p , $I10$, R) et hydrométriques (L_r) étaient complètes. Pour chacune des périodes, nous avons ajusté les modèles suivants :

$$(1) L_r = aL_p + bIK + cI10 + d \quad (\text{Dacosta, 1992}),$$

$$(2) L_r = aR + bIK + c$$

$$(3) L_r = L_r = aL_p^b \quad (\text{Chevallier et al., 1985})$$

$$(4) L_r = (L_p^2 + a^2)^{0.5} - a \quad (\text{Seguis, 1986})$$

. Les deux premières équations sont calculées par régression multiple ascendante et les deux dernières par optimisation non linéaire avec la méthode de Marquardt. Seuls les équations (2) et (3) donnent des résultats acceptables et seront présentés.

- Période noire ($n = 64$) :

$$\begin{aligned} L_r &= 0,120 R - 0,286 & r^2 &= 0,852 \\ L_r &= 2,9 \cdot 10^{-3} L_p^{1,835} & r^2 &= 0,716 \end{aligned}$$

- Période blanche ($n = 84$)

$$\begin{aligned} L_r &= 0,101 R - 0,509 & r^2 &= 0,453 \\ L_r &= 1,9 \cdot 10^{-3} L_p^{1,874} & r^2 &= 0,210 \end{aligned}$$

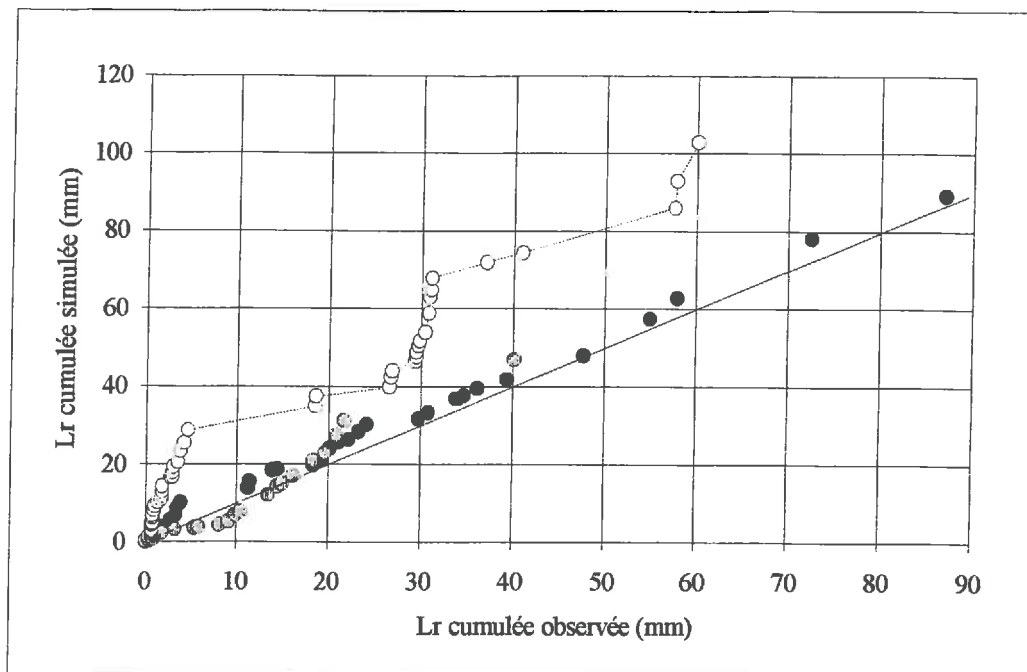


Figure 84 : Ajustement entre les lames ruisselées observées et simulées à partir du modèle d'écoulement établi avant aménagement. (●) : période noire, (◐) : période grise, (○) : période blanche. Bassin versant S4.

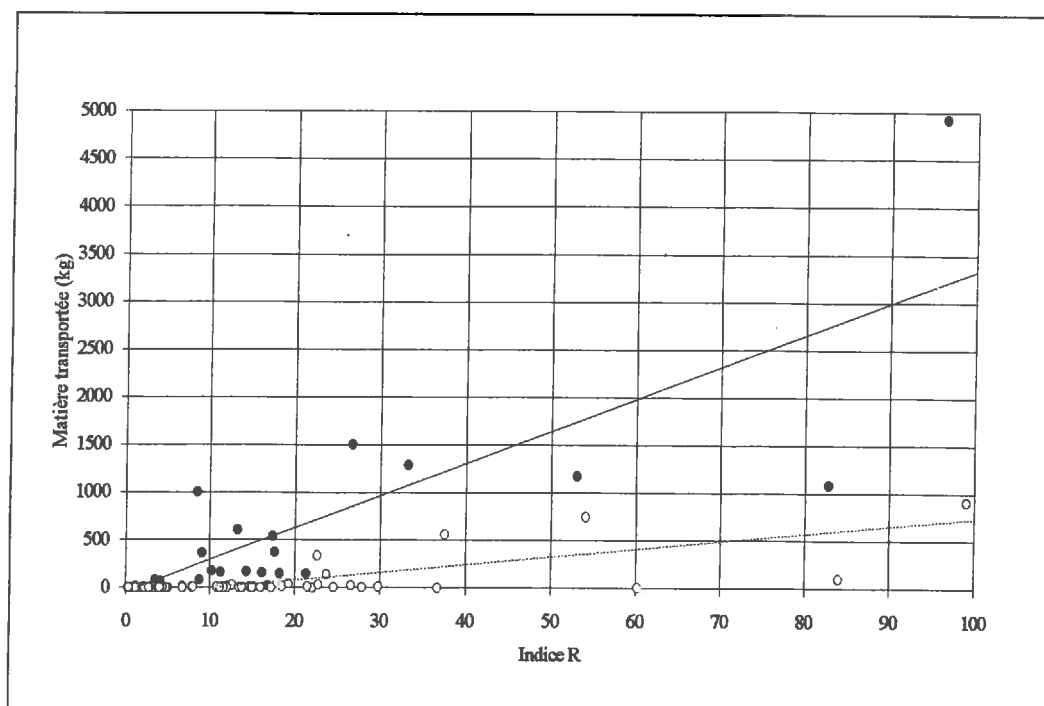


Figure 85 : Relation entre la masse de matière transportée et l'indice d'agressivité (R) de l'averse correspondante. (●) : période noire, (○) : période blanche. Bassin versant S4.

. La qualité de la prédiction est satisfaisante en période noire ; les deux formulations sont équivalentes, compte-tenu de la relation qui existe entre l'indice d'agressivité et la hauteur de pluie (Chapitre 6.2). En période blanche, la réponse hydrologique du bassin versant n'est pas reproductible du fait de la très forte dispersion des résultats. Après aménagements, les écoulements semblent régis par une loi du "tout ou rien".

. Nous avons utilisé la première relation établie en période noire ($L_r = f(R)$) pour simuler les écoulements durant les deux périodes suivantes (Figure 84). Les valeurs globales de ruissellement sont alors successivement de 89,4, 46,9 et 102,9 mm pour les périodes noires, grises et blanches. Toutes les conditions étant égales par ailleurs, l'aménagement a théoriquement permis de ramener le coefficient de ruissellement de 4,4 % à 2,6 %.

. En résumé, un gain de 1,8 % sur le coefficient de ruissellement se traduit par une réduction de 42 % des volumes écoulés, après aménagement. L'essentiel des pertes de surface (83 %) est enregistré lors des dix averses les plus violentes de la période blanche.

- Mesures de transports solides :

. Les résultats de transports solides dont nous disposons sont fragmentaires. Durant la période noire, les données concernant essentiellement le charriage de fond et de nombreuses crues ne sont pas échantillonnées, seules 25 observations fiables sont disponibles. Durant la période blanche, des prélèvements au fil de l'eau permettant d'estimer les courbes du débit solide d'un certain nombre de crues (28). Il est illusoire d'espérer établir des bilans annuels ou périodiques précis. Cependant, les ordres de grandeur en jeu et le nombre équivalent de crues utilisées permettent de comparer succinctement les deux périodes (Tableau 75).

. On passe de quatorze tonnes de charriage à moins de trois tonnes de matières solides transportées après aménagement. Le charriage représente un minorant de la masse réelle de matières transportées pendant la période noire. L'écart constaté, qui avoisine 80 %, constitue donc une valeur minimale de la réduction de l'érosion. Contrairement aux lames ruisselées, les averses violentes n'engendrent pas une recrudescence de l'érosion (Figure 85). Les obstacles filtrants mis en place jouent parfaitement leur rôle de pièges à sédiments. Il sera donc intéressant, dans un deuxième temps, d'étudier la redistribution des sédiments à l'intérieur du bassin et ses conséquences agronomiques.

. En extrapolant nos données à l'ensemble des périodes, l'érosion est ramenée de 1,9 t/ha/an à moins de 0,3 t/ha/an grâce à l'aménagement.

8.3.2 Le bassin versant S5 :

. Nous disposons de deux années d'étude avant aménagement (1986 et 1987) que nous appellerons période noire. Les aménagements ont été mis en place en 1988 (période grise). Les quatre années suivantes constituent la période blanche caractéristique de la phase aménagée. Le mauvais dimensionnement du dispositif de mesure, de 1986 à 1988, ne permet pas d'établir des comparaisons fiables des temps de montée, des temps de base ou des débits spécifiques de crues.

- Données pluviométriques :

. Durant la période noire 88 pluies ont été enregistrées, 49 pendant la période grise et 154 pendant la période blanche. Malgré la différence de taille entre les échantillons, les fréquences d'apparition par classes de hauteur de pluie présentent des distributions équivalentes avant et après aménagement. Les averses de hauteur supérieure à $L_p = 8$ mm pour lesquelles les données pluviographiques sont complètes, sont au nombre de 46, 28 et 93 en périodes noire, grise et blanche respectivement. Les courbes de distribution des intensités pluviométriques en dix minutes (I_{10}) sont nettement différenciées (Figure 86). Pendant la période noire 80 % des pluies présentent une valeur I_{10} inférieure à 40 mm/h, contre 55 % pendant la période blanche.

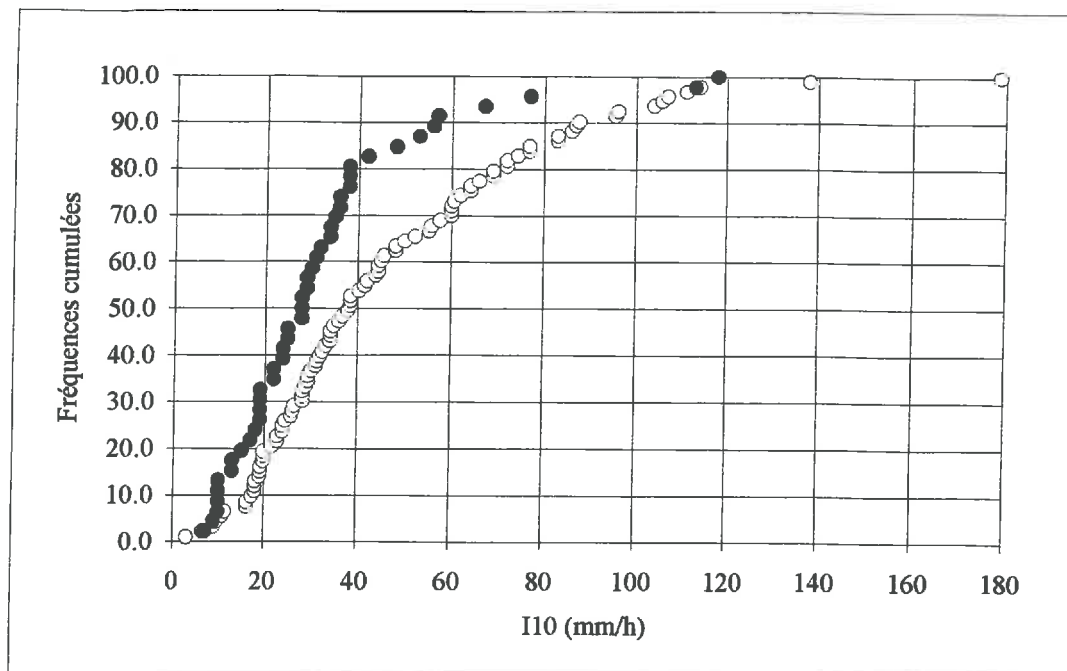


Figure 86 : Distribution des intensités pluviométriques en dix minutes (I10). (●) : période noire , (○) : période blanche. Bassin versant S5.

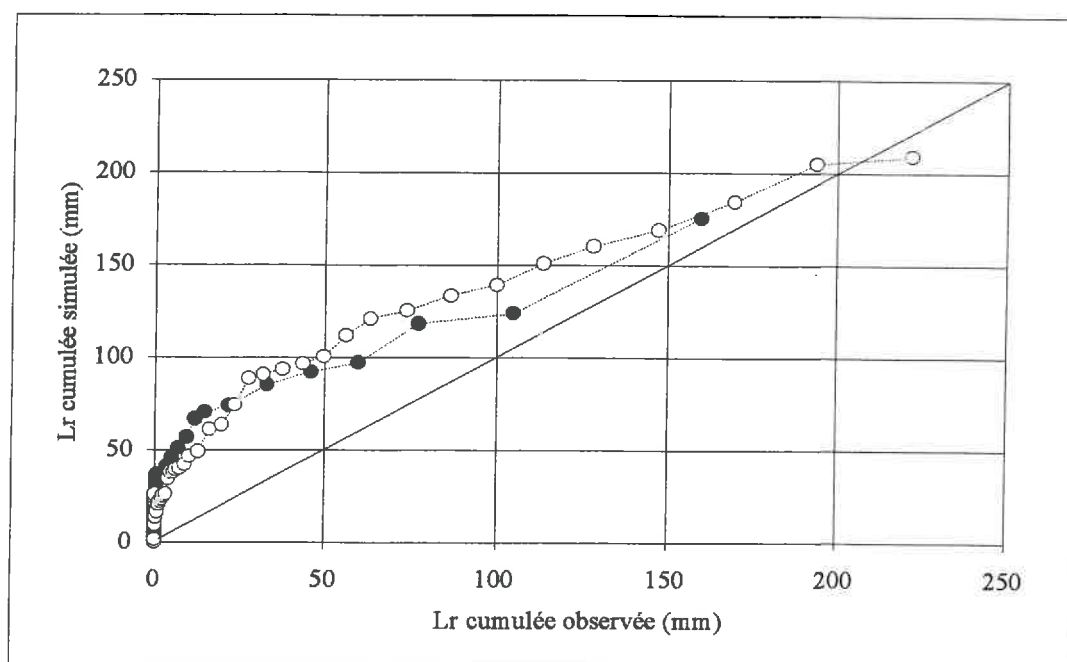


Figure 87 : Ajustement des lames ruisselées observées et simulées par un modèle d'écoulement établi avant aménagement. (●) : période noire , (○) : période blanche. Bassin versant S5.

. L'absence de données correspondant à l'année 1985 se traduit par une diminution du nombre d'averses violentes durant la période noire. L'analyse comparative devient plus délicate et tend à sous-estimer l'effet de l'aménagement. En revanche, les distributions de l'indice des pluies antérieures (IK) sont identiques pour les deux échantillons.

- Données hydrométriques :

. Sur un total de 36 crues en période noire, 20 en période grise et 45 en période blanche seules 33, 13 et 36 crues ont été enregistrées pour chaque période, respectivement. Les écoulements cumulés avoisinent 160 mm avant aménagement, soit un coefficient de ruissellement global (K_r) de 12 %. Entre 1989 et 1992, le coefficient de ruissellement global représente 10 % des hauteurs d'eau précipitées (Tableau 76). Cependant, comme dans le cas du bassin versant S4, la variabilité interannuelle est forte. Elle est conditionnée par l'occurrence d'orages violents qui déclenchent un ruissellement important.

. A l'échelle de l'averse, la relation entre les hauteurs d'eau précipitées et ruisselées est très lâche et n'offre pas de différences entre les périodes noires et blanches. En revanche, la réponse aux intensités pluviométriques semble modifiée malgré le faible nombre d'observations disponibles pendant la première période. Ceci est confirmé par l'établissement des seuils de pluie (L_{Plim}), d'intensité (I_{10lim}) et d'agressivité (R_{lim}) à partir desquelles le ruissellement prend naissance (Tableau 77). A nouveau, comme sur S4, le seuil d'intensité pluviométrique est modifié alors que le seuil de hauteur de pluie reste stable. Ces résultats permettent d'établir que :

- A l'échelle de l'hectare, la zone de glacis (S5) conserve une meilleure aptitude au ruissellement. L'aménagement, quasi-identique sur les deux bassins versants, ne semble pas modifier de manière équivalente les réponses hydrologiques. Durant la période noire, les écoulements observés à l'exutoire du bassin versant S5 sont plus élevés que sur le bassin versant S4. Le rapport des lames ruisselées globales (L_r(S4)/L_r(S5)) avoisine 41 %. Durant la période blanche, ce rapport est légèrement inférieur à 27 %.

- Pour une même période, les écoulements à l'exutoire représentent de 40 % à 50 % des lames ruisselées enregistrées sur les parcelles de ruissellement (1 x 1 m²). Ces proportions sont plus élevées que celles mesurées sur la terrasse colluvio-alluviale. Ceci découle d'une topographie plus uniforme et d'une perméabilité moyenne plus faible du bassin versant S5 (Bader, 1990 ; Guillobez, 1990 ; Rodier, 1992).

- L'aménagement ne modifie pas de manière décisive le comportement hydrologique du bassin versant S5. Ramenée à des hauteurs d'eau précipitées identiques, la diminution de la lame ruisselée globale est supérieure à celle obtenue sur S4. Néanmoins les écoulements demeurent importants. Ceci est la conséquence d'une gestion partielle de l'eau grâce à un réseau d'obstacles filtrants.

- Modélisation des lames ruisselées :

. Plusieurs modèles simplifiés ont été ajustés aux données expérimentales afin d'obtenir une relation prédictive de la lame ruisselée. Les équations les plus satisfaisantes sont les suivantes :

- Période noire (n = 45) :

$$\begin{aligned} L_r &= 0,415 R + 0,0031 L_{pIK} - 1,985 & r^2 &= 0,712 \\ L_r &= 0,00143 L_p^{2,299} & r^2 &= 0,804 \end{aligned}$$

Tableau 76 : Bilans hydrologiques globaux du bassin versant S5 pendant les trois périodes successives.

Période	nb pluies	nb crues	Lp (mm)	R	Lr (mm)	Kr (%)
noire (1986-1987)	88	33	1361.4	541.9	159.8	11.7
grise (1988)	49	13	917.3	434.5	68.3	7.4
blanche(1989-1992)	154	36	2282.5	1046.2	221.7	9.7

Tableau 77 : Seuils de hauteur de pluie (Lplim), d'intensité pluviométrique (I10lim) et d'indice d'agressivité (Rlim) durant les trois périodes. Bassin versant S5.

Période	Lplim (mm)	I10lim (mm/h)	Rlim
noire (1986-1987)	14	19	2.3
grise (1988)	20	28	6
blanche(1989-1992)	12	24	2.7

Tableau 78 : Principaux paramètres statistiques et géostatistiques caractérisant la variabilité des stocks hydriques en période noire. g1 : coefficient d'asymétrie, g2 : coefficient d'aplatissement. Bassin versant S4.

Variable	Analyse statistique				Analyse géostatistique		
	moyenne (mm)	variance	g1	g2	C0	C1	a (m)
stock (0-105 cm) le 10.06.1987	83.7	206.3	0.04	2.76	0.31	0.92	96
stock (0-105 cm) le 02.07.1987	145	482.3	0	2.59	0.38	0.83	106
variation de stock entre les 2 dates	61.3	196.9	0.03	3.36	0.78	0.24	79

Tableau 79 : Tableau de contingence entre classes d'humidité du sol et classes d'états de surface. Bassin versant S4.

Etat de surface	classe d'humidité			total
	sec	intermédiaire	humide	
type C1	3	5	5	13
type C1/C2	5	18	6	29
type C2	5	4	2	11
total	13	27	13	53

- Période blanche (n = 80) :

$$\begin{aligned} L_r &= 0,229 R + 0,0076 L_{pIK} - 0,830 & r^2 &= 0,488 \\ L_r &= 0,00212 L_{p^{2,191}} & r^2 &= 0,501 \end{aligned}$$

. L'hétérogénéité de la réponse hydrologique après aménagement gêne les tentatives de modélisation du ruissellement. En revanche, pendant la première période la fonction puissance permet d'obtenir une représentation correcte de la relation entre lames précipitées et ruisselées.

. Cette relation est utilisée pour simuler les lames ruisselées qui auraient existé pendant la période blanche, en l'absence de tout aménagement. La différence entre lames ruisselées simulées et observée est de 47 mm. Cet écart est du même ordre de grandeur que l'erreur d'estimation observée sur les données de la période noire ; le modèle ne permet donc pas de conclure quand à la modification de la réponse hydrologique du bassin versant (Figure 87).

. **Ce résultat confirme la faible influence de l'aménagement sur la réponse hydrologique du bassin versant S5.**

- *Matières solides transportées :*

. Le bassin versant S5 n'a fait l'objet de prélèvements de matières solides transportées qu'à partir de 1989. Les données antérieures concernant les charriages de fond sont trop incomplètes pour être utilisées dans cette étude. Il est donc impossible d'établir un bilan comparatif des pertes en terre entre les périodes noires et blanches.

. Durant la dernière période, la masse totale de sédiments exportées est estimée à 11 096 kg, soit une érosion spécifique voisine de 1,1 t/ha/an. Ces pertes sont quatre fois plus importantes que sur le bassin versant S4, après aménagement. Malgré notre ignorance du potentiel d'érodabilité initial, il devient clair que les techniques mises en oeuvre dans la zone de glaciais ont un rôle limité sur la stabilisation des parcelles agricoles. Contrairement, aux bons résultats observés sur la terrasse colluvio-alluviale.

8.3.3 Conclusion partielle :

. **Le bassin versant S4**, situé sur la terrasse colluvio-alluviale, est caractérisé par une bonne perméabilité et un réseau de rigoles bien différencié dans sa partie aval. En condition naturelle (période noire), le coefficient de ruissellement global est faible (4 %) et souligne un important déficit d'écoulement par rapport aux valeurs enregistrées à l'échelle du mètre carré. L'aménagement parvient à réduire le ruissellement de 42 % et à diviser par six les pertes en terre.

. **Le bassin versant S5**, situé sur le glaciais, est caractérisé par une faible perméabilité et une topographie uniforme. En condition naturelle (période noire), le coefficient de ruissellement global avoisine 12 % et représente environ 40 % des pertes enregistrées à l'échelle du mètre carré. Malgré une diminution apparente du ruissellement après aménagement, les pertes en eau et en terre demeurent importantes.

. **L'efficacité du dispositif de lutte contre le ruissellement est donc satisfaisante au niveau de la terrasse colluvio-alluviale mais elle trouve ses limites sur les terres de glaciais. Si l'influence sur le ruissellement découle du choix d'une maîtrise partielle de l'eau, le maintien d'une érosion spécifique conséquente implique que l'aménagement ne joue pas pleinement son rôle de filtre.**

8.4 Analyse de la redistribution de l'eau à l'intérieur du bassin versant :

. Cette analyse porte essentiellement sur le cas du bassin versant S4 qui a fait l'objet d'un suivi plus rapproché. Dans un premier temps, on a cherché à cartographier la variabilité spatiale des stocks hydriques et à la mettre en relation avec la description des états de surface et leur aptitude au ruissellement. Ces études, menées entre 1986 et 1988 (période noire), ont permis de définir trois zones homogènes au sein du bassin versant (Audin, 1987 ; Ruelle et al., 1989 ; Albergel et al., 1989). Durant la période blanche, nous avons cherché à savoir si l'aménagement mis en place influençait la répartition spatiale initiale des stocks hydriques. Enfin, nous avons étudié le devenir des matières solides transportées par le ruissellement et piégées à l'intérieur du bassin versant.

8.4.1 Relation entre les variabilités spatiales des stocks hydriques et des états de surface :

. A partir des descriptions des états de surface réalisées par Audin (1987) et complétées par nos observations, il a été possible d'affecter une valeur d'état de surface (VES) à chaque noeud d'une grille de maille élémentaire 20 x 20 m² superposée au bassin versant. Cette grille a été utilisée pour tous les échantillonnages géostatistiques, sans modification essentielle, durant toute la période d'étude.

. En 1987, des échantillonnages par prélèvements à la tarière sont effectués à quatre dates successives (10/06/87 ; 02/07/87 ; 30/07/87 ; 10/08/87) et les données sont analysés en assimilant les stocks hydriques à des variables régionalisées et en y appliquant les concepts correspondants (Burgess et Webster, 1980 ; Vauclin, 1982 ; Ruelle et al., 1986). Les principaux résultats, issus des travaux de Ruelle et al. (1989) et Albergel et al. (1989), sont les suivants :

- **La variabilité des stocks hydriques n'est pas aléatoire.** Ceux-ci présentent une structure spatiale isotrope qui peut être modélisée par un semi-variogramme sphérique normalisé avec une portée de l'ordre de 100 m :

$$\begin{aligned}\gamma(h)/\sigma^2 &= C0 + C1 (1,5(h/a) - 0,5 (h^3/a^3)) && \text{pour } h < a \\ \gamma(h)/\sigma^2 &= C0 + C1 && \text{pour } h > a\end{aligned}$$

et
$$2\gamma(h) = E [(Z(r) - Z(r+h))^2]$$

avec $\gamma(h)$: semi-variogramme de la variable $Z(r)$
 h : distance entre deux points d'observation (r) de la variable $Z(r)$
 σ^2 : variance expérimentale de la variable $Z(r)$
 $C0$: effet de pépité
 $C0+C1$: plateau
 a : portée

- **Cette structure présente une bonne stabilité temporelle.** Les sites les plus secs (ou les plus humides) au début de la saison des pluies, restent les plus secs (ou les plus humides) tout au long de l'hivernage (Tableau 78). La portée apparaît également stable avec le temps.

- Cette information a été utilisée pour cartographier par krigeage la distribution spatiale des stocks hydriques. Afin de pouvoir comparer les cartes entre elles, le krigeage est effectué, pour chaque série de données, sur les valeurs centrées réduites. Des zones de comportement homogène ont ainsi été identifiées (Figure 88) :

- * **une zone humide** située à l'amont du réseau de rigoles ;
- * **une zone sèche** située dans l'axe central du bassin versant et prolongeant vers l'exutoire ;
- * **une zone d'humidité intermédiaire** située au sud-est du bassin versant et en position intercalaire au nord.

Tableau 80 : Principaux paramètres hydrologiques des essais de simulation de pluie. Deuxième averse (type décennal). Bassin versant S4.

Zone d'implantation	parcelle	Lp (mm)	Lr (mm)	Lpi (mm)	Fn (mm/h)	Kr (%)
humide	1	95.1	41.8	9	27	44
	2	95.6	31.8	10.8	34	33
intermédiaire	3	95	45.6	8	31	48
	4	95.2	63.2	9.1	23	66
sèche	5	95.7	67.8	5.8	12	71
	6	93.1	62.2	4.6	15	67

Tableau 81 : Principaux paramètres statistiques et géostatistiques de la variabilité des stocks hydriques en période noire. Bassin versant S4.

Variable	Analyse statistique				Analyse géostatistique		
	moyenne (mm)	variance	g1	g2	C0	C1	a (m)
stock (0-150 cm) le 16.08.1988	295.7	750.8	-0.89	4.09	-	-	-
stock (0-150 cm) le 25.10.1989	240.5	998.6	-0.38	2.52	0.35	0.72	50
stock (0-100 cm) le 24.10.1990	97.8	372.5	0.17	1.76	variogramme non stationnaire		
stock (0-150 cm) le 20.11.1991	152.7	906	0.54	3.53	0.33	0.75	50
stock (0-150 cm) le 20.10.1992	220.2	891.7	0.45	3.15	0.34	0.75	55

Tableau 82 : Termes du bilan hydrique calculés dans les unités "champs" et "haie-vive" durant les campagnes 1991 et 1992. Bassin versant S4.

Campagne 1991	Lp (mm)	Unité "champs"			Unité "haie-vive"		
		Li (mm)	stock (mm)	ETR (mm)	Li (mm)	stock (mm)	ETR (mm)
10.07 au 13.08	147	120	33	87	178	72	106
14.08 au 16.09	219	188	43	145	249	75	174
17.09 au 21.11	136	128	-69	197	128	-94	222
Total	502	436	7		555	53	
Campagne 1992							
01.06 au 30.06	145	117	52	65	144	63	81
01.07 au 28.07	64	62	-2	64	60	-24	84
29.07 au 15.09	211	173	37	136	216	39	177
16.09 au 2.11	130	108	-24	132	124	-48	172
Total	550	460	63		544	30	

- La relation entre les classes d'humidité et les classes d'états de surface, est mise en évidence grâce à un tableau de contingence croisant les deux variables (Tableau 79). Les observations sont constituées de l'ensemble des noeuds du maillage (53). **Les zones les plus sèches correspondent, en grande partie, aux états de surface les plus aptes à l'encroûtement superficiel.** A l'inverse, les zones les plus humides sont très peu associées à ces mêmes états de surface. Sans ignorer l'influence de la topographie ou du profil pédologique, ces résultats confirment le rôle essentiel des organisations pelliculaires dans la redistribution spatiale des eaux de pluie.

8.4.2 Relation entre les zones krigées et leur aptitude au ruissellement :

- *Apports de la simulation de pluie :*

. Afin de confirmer la relation qualitative établie plus haut, une campagne de simulations de pluie a été organisée. Sur chaque zone d'humidité homogène, déterminée à partir de la carte krigée des stocks hydriques, deux parcelles (1 x 1m²) sont implantées. L'objectif est de vérifier la concordance entre l'infiltrabilité relative d'une zone et sa classe d'humidité.

. Le protocole expérimental prévoit deux pluies simulées, de type décennal (Chapitre 4.1), séparées par une journée de ressuyage. Nous présentons les résultats concernant la seconde pluie (Tableau 80). On constate que les parcelles situées dans une même unité cartographique ont un comportement voisin. Les parcelles les plus filtrantes correspondent à la zone la plus humide et les parcelles les plus ruisselantes à la zone la plus sèche. Les valeurs des différents paramètres hydrologiques correspondent à celles qui ont été mesurées sous pluies naturelles (Chapitre 6.4.1).

. **Cette concordance entre les aptitudes à l'infiltration mesurées sous pluies simulées et les zones d'humidité homogène, définies en saison des pluies, confirme l'hypothèse d'une recharge du stock hydrique par l'infiltration directe de la pluie qui n'a pas ruisselée. Elle valide également notre approche, fondée sur une étude des processus à l'échelle de la surface élémentaire. Les sites de suivi du bilan hydrique en conditions naturelles sont représentatifs des différentes situations rencontrées sur le bassin versant S4.**

- *Validation des mesures du bilan hydrique dans les parcelles de ruissellement :*

. Les stocks hydriques (0-100 cm ou 0-150 cm) mesurés par humidimétrie neutronique ont été comparés à ceux obtenus par prélèvements à la tarière lors des échantillonnages géostatistiques. Chaque site neutronique est mis en correspondance avec le noeud du maillage le plus proche ; en cas d'équidistance entre deux noeuds, la valeur du stock est interpolée. Lorsque la mesure neutronique n'a pas été effectuée le jour de l'échantillonnage, la valeur du stock hydrique est diminuée (ou augmentée) de l'évaporation moyenne pendant la période considérée. Cependant, lorsque l'écart est trop important nous avons préféré abandonner les données (cas de l'année 1988). Nous disposons des résultats de quatre échantillonnages et de six sites d'humidimétrie neutronique. Quatre sites sont équipés de parcelles de ruissellement (S41, S43, S44, S46), les deux autres sont implantés librement (S42 et S45). La concordance entre les valeurs obtenues par les méthodes gravimétriques et neutroniques est excellente (Figure 89). Le calcul de régression linéaire fournit la relation suivante:

$$\text{Stock}_{\text{grav}} = 0,936 \text{ Stock}_{\text{neut}} + 7,644$$

$$n = 24 \quad s(y) = 16,1 \quad r^2 = 0,93$$

avec $\text{Stock}_{\text{grav}}$: stock hydrique obtenu par prélèvements gravimétriques (mm)
 $\text{Stock}_{\text{neut}}$: stock hydrique obtenu par la méthode neutronique (mm)

. L'écart type résiduel ($s(y)$) est de même ordre de grandeur que la précision d'estimation du stock hydrique par la méthode neutronique (Chapitre 3.2.2). La présence ou l'absence d'une parcelle de ruissellement sur le site de mesure ne semble pas affecter les stocks hydriques mesurés.

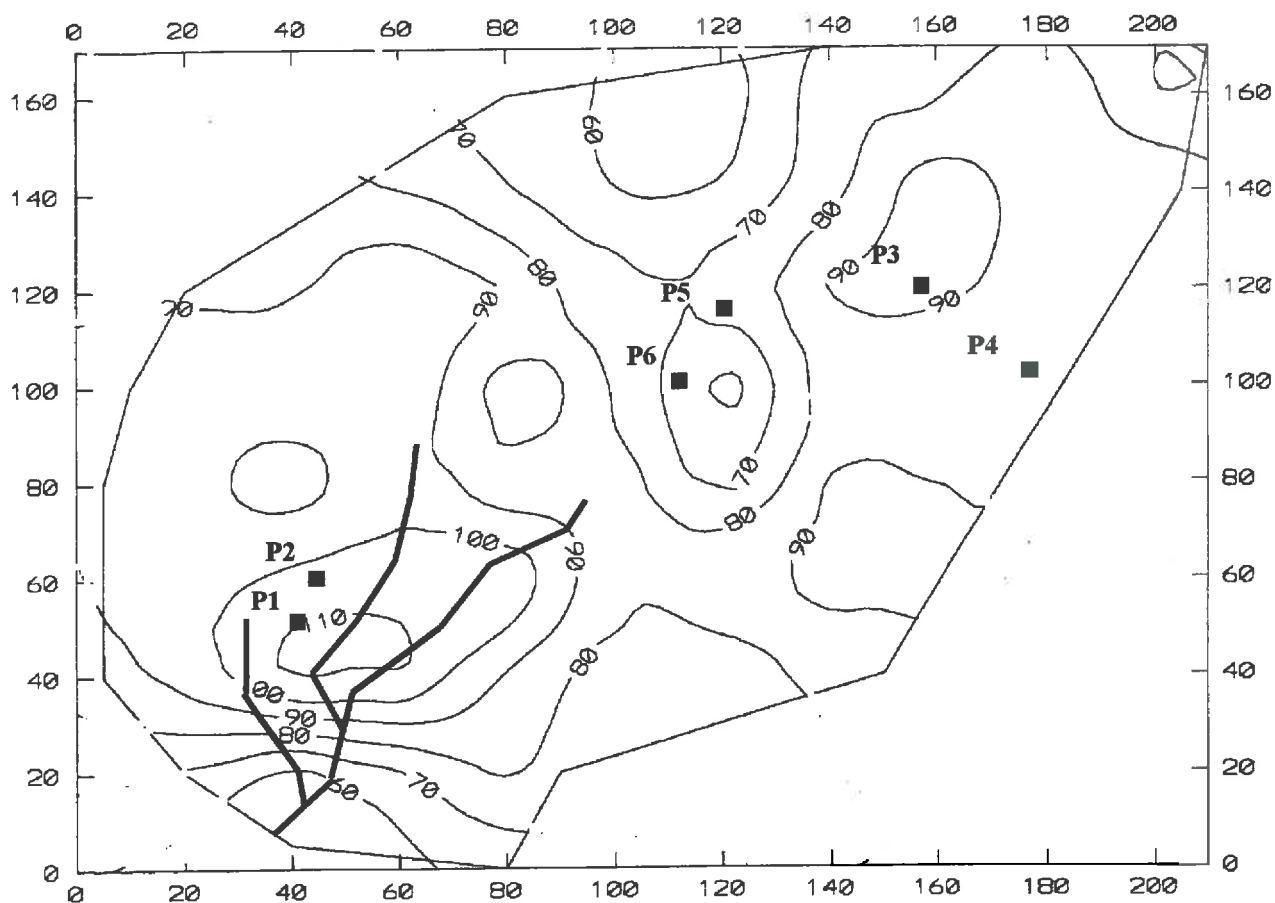


Figure 88 : Variabilité spatiale des stocks hydriques avant aménagement. Maillage geostatistique du 10.06.87. Bassin versant S4.

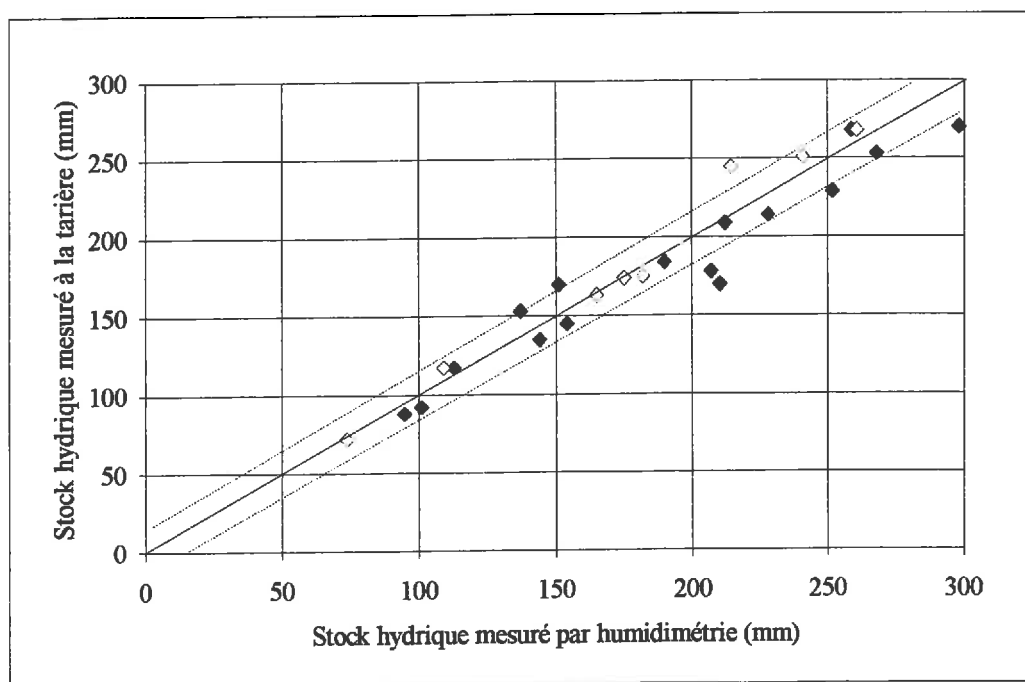


Figure 89 : Relation entre les stocks hydriques mesurés par humidimétrie neutronique ou par prélèvements à la tarière. (■) : site équipé d'une parcelle de ruissellement, (□) : site non équipé. Bassin versant S4.

. En conclusion, le dispositif de mesure du ruissellement à l'échelle de la surface élémentaire ne perturbe pas les termes du bilan hydrique. Les valeurs du stock hydrique obtenues au niveau de ces sites sont représentatives des valeurs mesurées alentour. L'essentiel du déficit d'écoulement constaté lorsqu'on passe du mètre carré à l'exutoire du bassin versant, qui est de l'ordre de 80 %, n'est donc pas lié à un biais métrologique. Il existe au sein du bassin versant des puits hydrologiques, diffus ou concentrés, qui absorbent la majorité du ruissellement en nappe. La zone de confluence des rigoles est un de ces puits.

8.5 Influence de l'aménagement sur la redistribution de l'eau au sein du bassin versant :

8.5.1 Variabilité spatiale des stocks hydriques après aménagement :

. L'échantillonnage a été répété tous les ans de 1988 à 1992, sur la même grille de prélèvements. Cependant, les perturbations provoquées par les pluies parasites, en 1988, nous ont conduit à réaliser le maillage en fin de saison des pluies, juste après les récoltes. L'analyse des stocks hydriques résiduels intègre, de ce fait, le rôle du couvert végétal dans le bilan hydrique.

. Les paramètres statistiques montrent que les stocks hydriques suivent une loi de distribution normale, à l'exception de la série échantillonnée en 1988. Celle-ci est écartée de l'étude géostatistique (Tableau 81). Les coefficients des semi-variogrammes théoriques normalisés sont stables entre les différentes dates de prélèvement. Les valeurs de palier ($C_0 + C_1$), légèrement supérieures à 1, mettent en évidence l'existence de variances finies, à l'exception de la série échantillonnée en 1990 qui présente une semi-variogramme non stationnaire au 2ème ordre. Concernant les autres années, les stocks hydriques présentent une structure spatiale isotrope avec une portée de l'ordre de 50 m, de moitié inférieure à celle observée en 1987. Cependant, la modification des dates de prélèvement ne nous autorise pas à attribuer cette diminution de distance à un effet quelconque de l'aménagement.

. L'examen de la figure 90 permet de constater que les zones homogènes définies avant l'aménagement demeurent, en grande partie, identiques. La zone de confluence des rigoles est le siège d'infiltrations importantes, alors que l'axe central du bassin versant présente des stocks hydriques déficitaires. Dans le premier cas, le rôle de la topographie est évident ; dans le second, il doit exister un critère lié aux états de surface qui explique ce déficit. Nous avons donc réalisé une analyse granulométrique des échantillons de sol prélevés en 1991. On affecte à chaque noeud de la grille la valeur de l'indice granulométrique de l'horizon superficiel (0-5 cm) :

$$IG = 10^3 (Lg + Sg) (Lg + Sg + Sg)^{-1}$$

avec IG : indice granulométrique

Lg : fraction des limons grossiers (%)

Sg : fraction des sables fins (%)

Sg : fraction des sables grossiers (%)

. Cet indice caractérise l'étalement granulométrique du squelette qui conditionne l'aptitude du sol à l'encroûtement (Chapitre 7.1.1). Les valeurs s'étendent de 413 à 508 et suivent une loi normale de distribution. La structure spatiale de la variable est isotrope avec un effet de pépite élevé ($C_0 = 0,67$) qui traduit une forte variabilité à une échelle inférieure à celle de l'échantillonnage. La cartographie des indices granulométriques superficiels confirme la présence d'une zone sensible à l'encroûtement dans l'axe central du bassin versant. Cette zone est également caractérisée par des états de surfaces instables (Type C2) est un déficit hydrique chronique du sol (Figure 91).

. En résumé, l'aménagement n'a pas d'effet spectaculaire sur la variabilité spatiale de stock hydrique du sol qui dépend dans une large mesure de la topographie et des caractéristiques intrinsèques des états de surface.

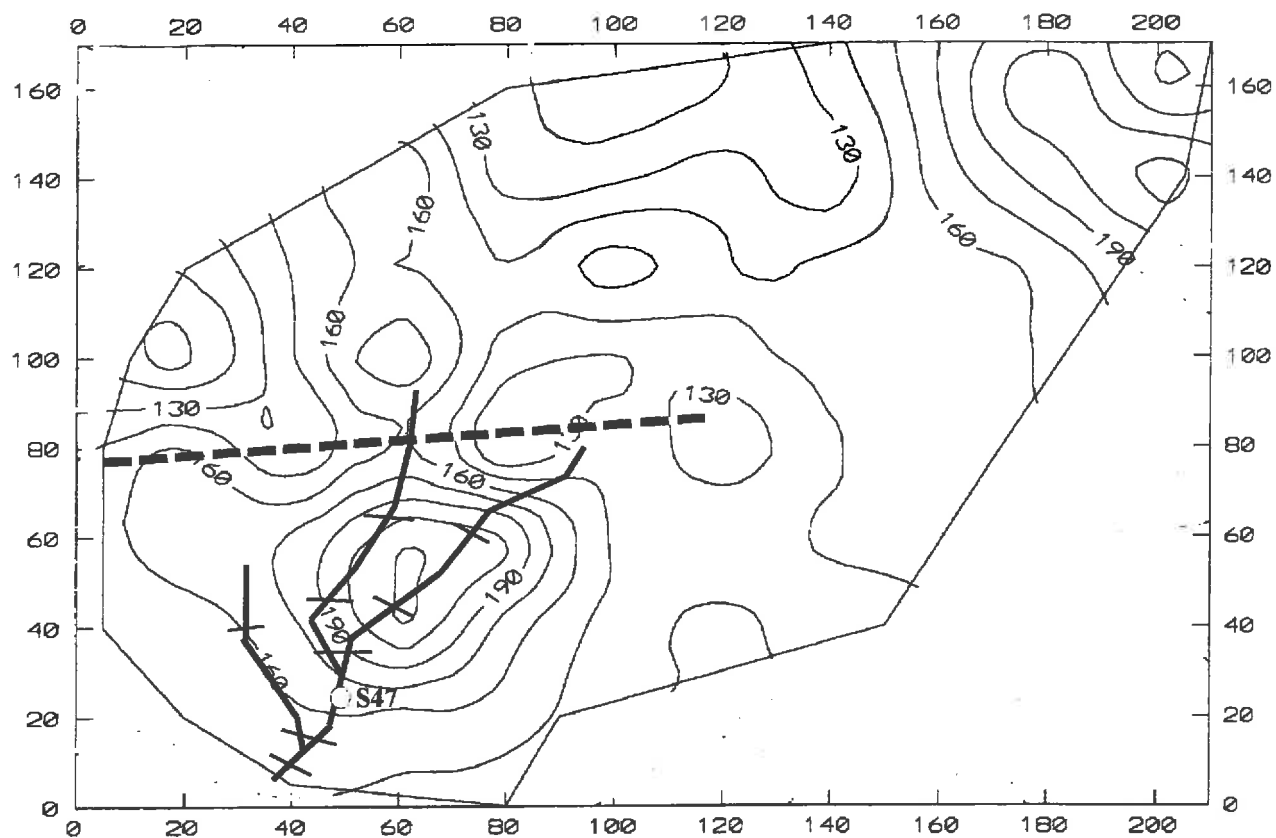


Figure 90 : Variabilité des stocks hydriques après aménagement. Maillage geostatistique du 02.11.91. Bassin versant S4.

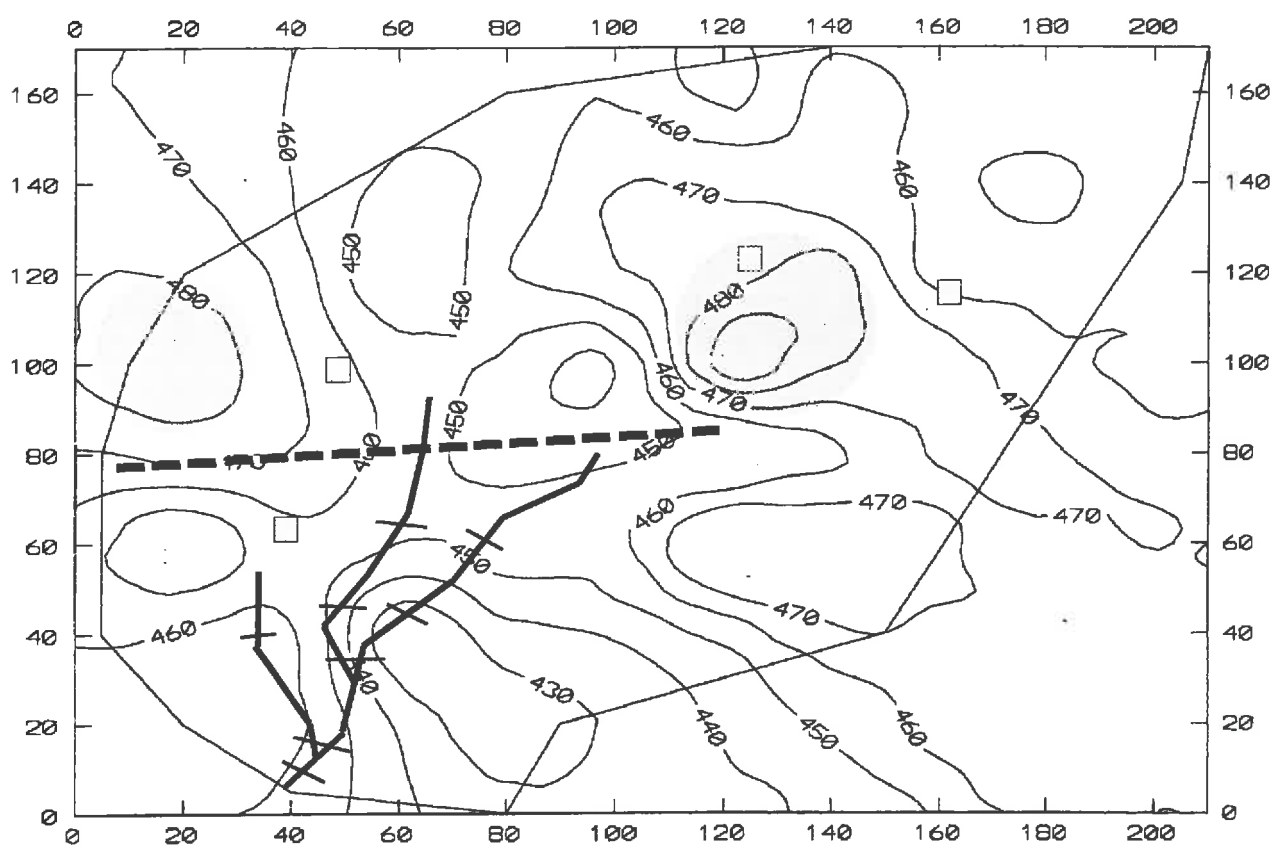


Figure 91 : Variabilité spatiale de l'indice granulométrique IG. Maillage geostatistique du 02.11.91. Bassin versant S4. (□) : parcelle de ruissellement.

Cependant, ces résultats acquis à partir d'une grille d'échantillonnage assez lâche ($20 \times 20 \text{ m}^2$) sont infirmés par nos observations de terrain. Après une averse importante, des aires de décantation apparaissent en amont de la haie-vive et dans les principaux axes d'écoulement. Leur extension spatiale est limitée et souvent inférieure à la maille de prélèvement. Ce constat nous a conduit à étudier plus précisément les influences respectives de la haie-vive et des seuils filtrants.

8.5.2 Influence de la haie vive sur l'infiltration :

. En 1991 puis 1992, des prélèvements à la tarière ont été réalisés le long de trois transects perpendiculaires à la haie vive et espacés d'une vingtaine de mètres. Les sites de prélèvements sont symétriques par rapport à l'axe de la haie et sont distants de 5 m, 2 m, 1 m et 0,5 m du point central (Figure 92). En règle générale, les échantillonnages sont réalisés tous les quinze jours. L'analyse porte sur les valeurs moyennes d'humidité à une cote donnée, les transects étant considérés comme des répétitions. Le stock hydrique est calculé sur une épaisseur de sol de 1 mètre.

. En 1991, les pluies violentes du début de campagne entraînent un ruissellement important dont une partie est infiltrée en amont de la haie vive. Au delà de 5 m de distance l'influence de la haie vive est négligeable comme en témoigne la symétrie des stocks hydriques mesurés aux abscisses $x = -5 \text{ m}$ et $x = +5 \text{ m}$. Sous la haie-vive et légèrement à l'aval, les consommations des arbustes et des graminées ont un effet dépressif sur la réserve en eau du sol. L'aire de détention et d'infiltration de la lame ruisselée se limite à une bande de terrain de deux mètres de large en amont de la haie.

. Le bilan hydrique de cet "hydrosystème" ne peut être résolu qu'à l'aide d'hypothèses simplificatrices, parfois hardies, qui nous permettent de percevoir les ordres de grandeur en jeu. Les hypothèses suivantes ont été appliquées aux données collectées en 1991 et 1992 :

- Le continuum spatial est divisé en deux unités, l'une appelée "champs" et l'autre "haie-vive". La première est caractérisée par la moyenne des variations de stocks hydriques mesurées aux abscisses $x = -5 \text{ m}$ et $x = 5 \text{ m}$; la pluie journalière est diminuée de la valeur moyenne des lames ruisselées sur les parcelles S41 et S43. La seconde unité est caractérisée par les variations de stocks mesurées aux abscisses $x = -1 \text{ m}$ et $x = -0,5 \text{ m}$.

- Pour une période donnée, l'évapotranspiration de l'unité "champs" est calculée par différence entre la lame infiltrée et la variation de stock correspondante. A partir de quelques périodes indemnes de ruissellement, nous avons établi que l'évapotranspiration de l'unité "haie-vive" représente de 1,2 à 1,3 fois celle du "champs". Ce ratio est appliqué aux autres périodes.

- Le drainage profond est négligé. Cette hypothèse tend à sous-estimer la lame infiltrée au niveau de la haie, en particulier en 1991. En 1992, le drainage ne se manifeste que tardivement et de manière peu intense.

. Le tableau 82 résume les principales informations délivrées par ce modèle de fonctionnement. Le gain d'infiltration avoisine 118 mm en 1991 et 84 mm en 1992. Dans le premier cas, les variations annuelles des stocks hydriques sont conformes à cette augmentation de l'offre en eau, bien que les écarts soient faibles. L'année suivante, en revanche, la simple étude des variations de stocks ne permet pas de mettre en évidence le rôle de filtre joué par la haie-vive. Le gain d'infiltration est en grande partie utilisé pour les besoins des espèces arbustives et herbacées.

. Les faibles dimensions de sa zone d'influence et le bilan hydrique annuel globalement identique à celui des cultures avoisinantes expliquent l'absence d'impact de la haie-vive sur la variabilité spatiale des stocks hydriques mesurés en fin de campagne. Les hauteurs d'eau piégées sont proches de 100 mm, dans les conditions étudiées.

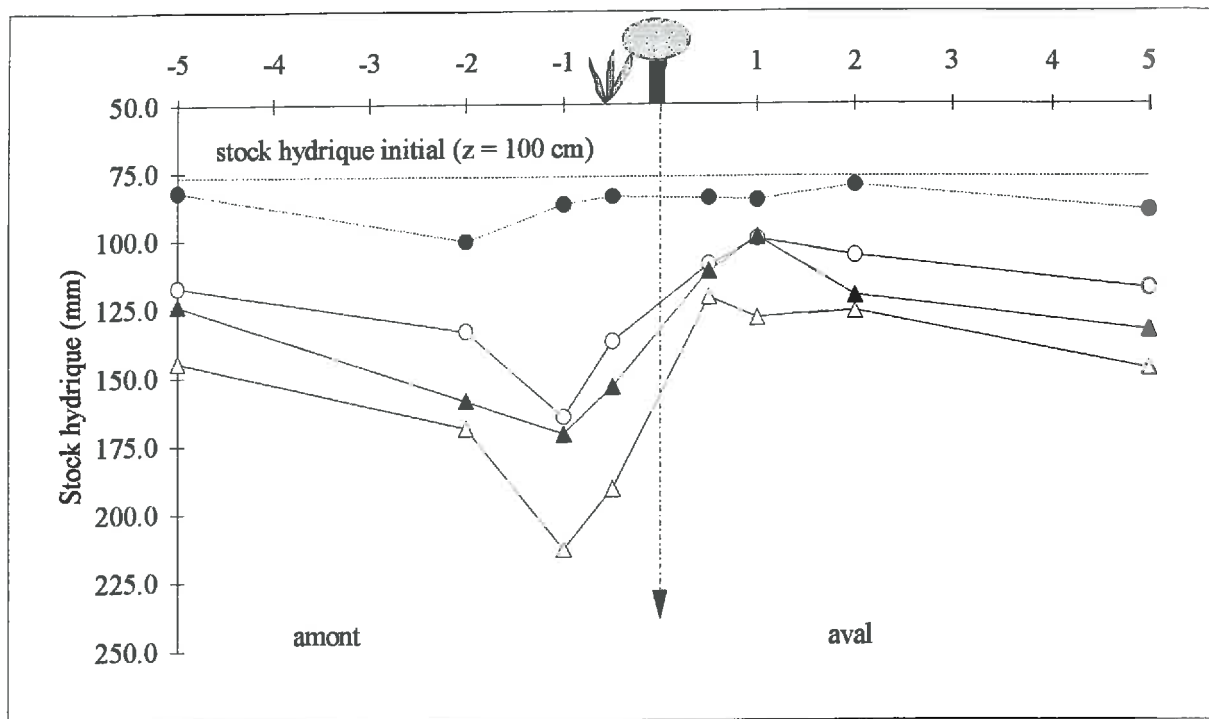


Figure 92 : Evolution des stocks hydriques (0-100) avec le temps, le long d'un transect perpendiculaire à la haie.
 (○) : stocks le 26.07.91, (△) : stocks le 27.08.91, (▲) : stocks le 01.10.91, (●) : stocks le 21.11.91.

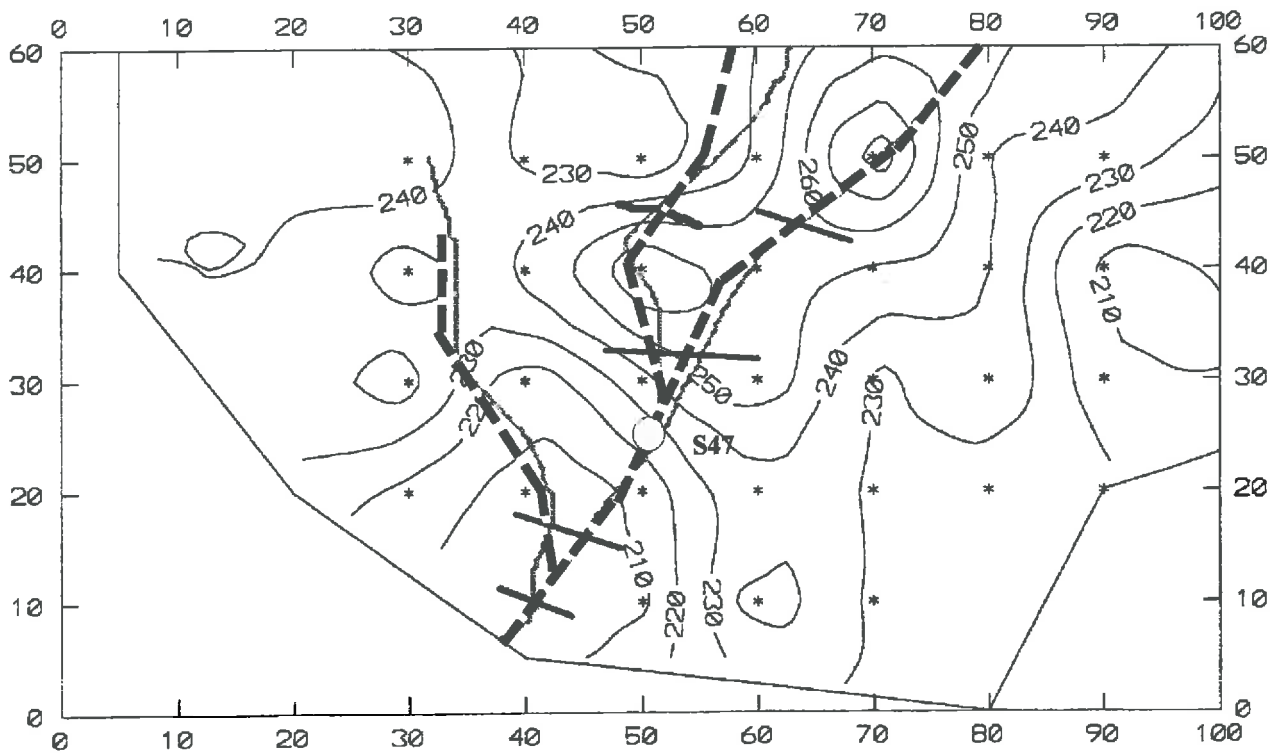


Figure 93 : Variabilité spatiale des stocks hydriques (0-150 cm) dans le secteur aval du bassin versant S4.
 Maillage geostatistique du 25.10.89.

8.5.3 Influence des seuils filtrants sur le ruissellement et les atterrissements :

- Influence sur le ruissellement :

. Dès 1989, il est apparu que la grille d'échantillonnage de maille $20 \times 20 \text{ m}^2$ n'était pas adaptée à l'étude de la zone aval du bassin versant. Le système de rigoles induit une variabilité des stocks hydriques sur des distances nettement inférieures aux écartements des sites de prélèvements. Aussi, avons-nous juxtaposé une seconde grille de maille $10 \times 10 \text{ m}^2$ sur la première afin d'obtenir un pas d'observations plus serré. Les échantillonnages sont réalisés en même temps sur les deux grilles de prélèvement.

. La cartographie des stocks hydriques permet de constater que les axes d'écoulement correspondent à des zones humides en fin de campagne. En amont des premiers obstacles filtrants, l'infiltration est favorisée alors que la partie aval de la ravine principale est plutôt sèche (Figure 93). Ce contraste est lié au fort développement d'adventices à l'exutoire du bassin versant qui consomment une grande partie de la réserve en fin de campagne. A l'aide de ces cartes de stocks hydriques et de nos observations de terrain après certains événements pluvieux, nous avons délimité la zone d'infiltration préférentielle et planimétré sa surface de manière approximative. Celle-ci varie de $2\,000$ à $2\,400 \text{ m}^2$ selon les estimations.

. En 1988, un tube d'accès neutronique a été implanté dans l'axe de la ravine, à 20 m de l'exutoire (S47). Nous avons pu suivre l'évolution de l'humidité du sol pendant la saison des pluies, entre 1989 et 1992. L'évolution des stocks hydriques a été comparée à celle des tubes d'accès les plus proches (S41 et S42). L'augmentation de l'infiltration au centre du talweg peut être calculée jusqu'à ce que la cote de mesure maximale ($z = 250 \text{ cm}$) soit atteinte par le front d'humectation. En fait, la plus grande partie du ruissellement est piégé en début de saison des pluies, lorsque le sol est peu couvert et que la haie-vive est encore en phase de développement. Durant les quatre années d'observations, les hauteurs d'eau supplémentaires infiltrées sur le site S47 varient de 101 à 127 mm (Tableau 83). Ces estimations ponctuelles ne correspondent pas aux valeurs maximales probables. En effet, si on se réfère à la carte krigée des stocks hydriques, le tube d'accès S47 est situé en aval de la zone de stockage maximal.

. En résumé, la zone des seuils filtrants correspond à une surface d'infiltration préférentielle qui joue le rôle de puits hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Les hauteurs d'eau piégées sont proches de 100 mm dans les conditions étudiées.

- Influence sur les atterrissements :

. Les fascines et les seuils en pierres contribuent également au dépôt des matières solides transportées en ralentissant la vitesse de la lame ruisselée. Les mesures d'atterrissement qui ont été réalisées de 1989 à 1992 permettent d'estimer la sédimentation en amont des ouvrages. Ces derniers sont équipés de 3 à 4 plaquettes installées transversalement à l'axe d'écoulement. Ne sont considérés comme atterrissements que les dépôts de terre ; les débris végétaux grossiers qui s'accumulent au dessus ne sont pas comptabilisés.

. Pour l'analyse, nous avons séparé les observations provenant des plaquettes situées en amont de la haie vive (7), les fascines (13) et les seuils en pierres (14). Dans chaque groupe, nous avons calculé la valeur moyenne de l'épaisseur de sédiments à une date donnée. Cette méthode est naturelle dans le cas de la haie-vive car les plaquettes peuvent être considérées comme des répétitions d'un même dispositif. Les seuils filtrants sont situés dans des axes de ruissellement concentré et les profils de sédimentation transversaux ne sont pas uniformes, du fait de la topographie. Notre méthode confère à toutes les plaquettes un poids identique qui est loin d'être légitime. Cependant, une analyse plus détaillée des processus de sédimentation demanderait des développements hors de propos dans le cadre de notre étude. Enfin, il est important de souligner que l'année 1988 n'est pas prise en compte ; or, il est fort probable que les atterrissements les plus importants se sont déposés pendant la première année d'aménagement. Nos résultats correspondent donc à un

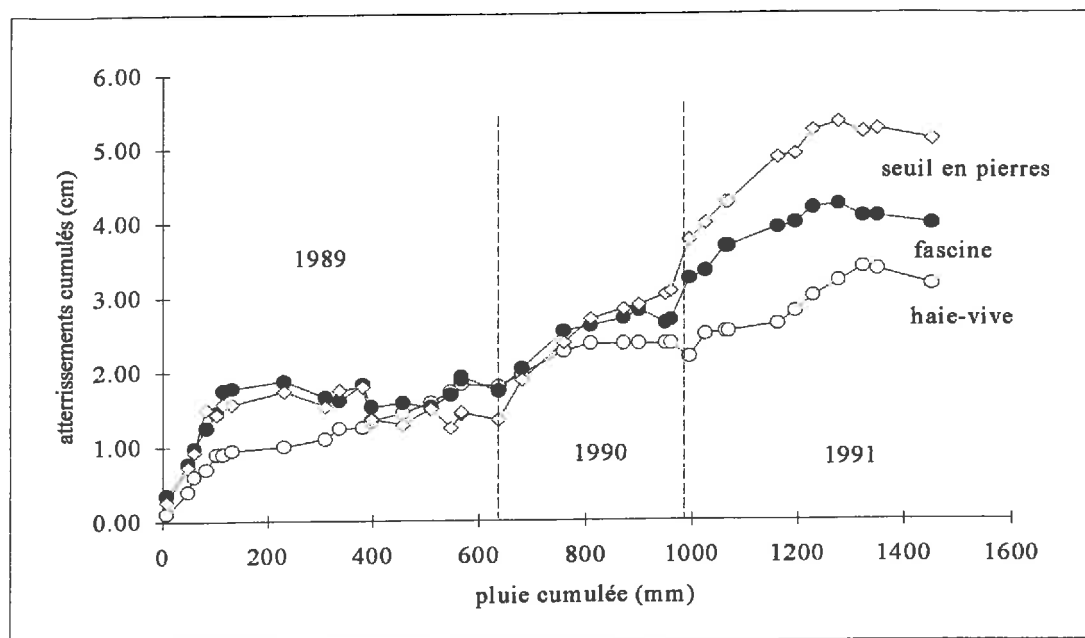


Figure 94 : Augmentation de l'épaisseur des atterrissements avec le cumul pluviométrique. Période 1989-1991. Bassin versant S4.

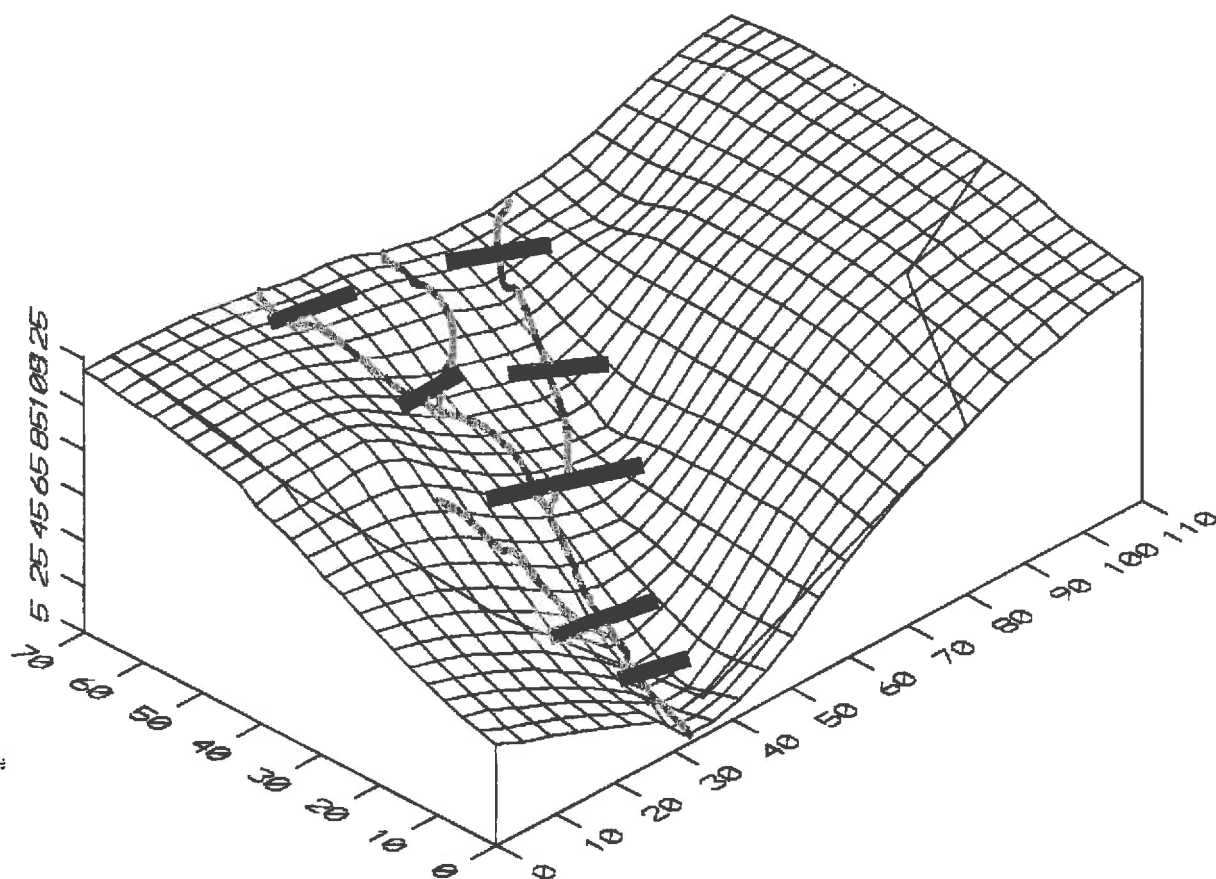


Figure 95 : Représentation 3D du relevé topographique du 20.11.91. Secteur aval du bassin versant S4.

régime de sédimentation en voie de stabilisation.

. En 1989, les atterrissements avoisinent 1,8 cm quelque soit le type d'obstacle. Par la suite, la haie-vive accumule en moyenne 0,8 cm de sédiments par an, les fascines 1,1 cm et les seuils en pierre 1,7 cm (Tableau 84). Ces sédiments sont principalement constitués de sables grossiers charriés auxquels s'ajoutent des éléments fins déposés par décantation à proximité des ouvrages. Sur l'ensemble de la période d'observation, de 4 à 6 cm de sédiments se sont accumulés dans les dépressions (Figure 94). **L'ensemble des ouvrages, y compris la haie-vive, assure donc un piégeage satisfaisant des particules solides transportées. Nos ordres de grandeurs sont en accord avec les résultats présentés par Ruelle et al. (1990).**

. Au delà du simple effet mécanique, ce rôle de filtre permet d'améliorer les états de surface dans toute cette zone. Avant aménagement, l'axe principal d'écoulement subissait un décapage intense accompagné du développement de solides croûtes de ruissellement. Cette situation avait entraîné un abandon progressif de cette zone, d'une superficie de 2 500 m², par l'exploitant agricole. A l'heure actuelle, la mise en culture s'effectue sur la totalité de la parcelle et les rendements deviennent homogènes (Tableau 85).

. D'un point de vue topographique, la comparaison entre deux relevés réalisés en 1986 et 1991 montre que le profil du secteur aval s'est aplani par arrasement progressif des versants et comblement du talweg, entre les seuils en pierres, sur une épaisseur de 20 à 30 cm. Ce processus spectaculaire s'est probablement déroulé pendant la première année, après aménagement (1988) (Figure 95).

8.5.4 Discussion :

. **L'aménagement mis en place sur le bassin versant S4 satisfait aux objectifs fixés. L'association de techniques culturales améliorées et d'un réseau d'obstacles filtrants entraîne une diminution du ruissellement et des pertes en terre.** La redistribution de l'eau à l'intérieur du bassin versant n'est pas profondément modifiée, si on se réfère à la variabilité spatiale des stocks hydriques. Cependant, il existe des zones d'infiltration privilégiée en amont des obstacles filtrants qui piègent une partie du ruissellement et des matières solides transportées. En conséquence, la topographie et les états de surface du secteur aval du bassin versant sont modifiés durablement.

. **Dans le cas du bassin versant S5, la réponse hydrologique est peu modifiée et les pertes en terre restent importantes malgré l'aménagement.** En l'absence d'une étude spatiale aussi détaillée que celle du bassin versant S4, quelques éléments peuvent nous informer des contraintes propres à ce type d'unité morphopédologique :

- La topographie du glacis est uniforme, elle favorise l'apparition de larges bandes de ruissellement, au détriment - serait-on tenté de dire ! - d'axes d'écoulements plus concentrés. Les seuils filtrants sont exposés, de ce fait, à des contournements incessants par les eaux de surface.

- Les épaisseurs de sédiments mesurées en amont des obstacles filtrants sont inférieures à celles présentées précédemment (haie-vive : 0,5 cm ; fascine : 0,8 cm ; seuil en pierre : 1,4 cm), pour la même période. Les matières solides transportées sont donc naturellement plus importantes à l'exutoire.

- Les techniques culturales utilisées sont moins bien maîtrisées que sur les parcelles de la terrasse colluvio-alluviale. Ainsi, la profondeur moyenne de travail atteinte lors du décompactage en sec avoisine 7 cm contre 10 cm dans les sols plus sableux de S4. Les états de surface, de type C2, évoluent rapidement et provoquent un ruissellement généralisé.

- Les espèces arbustives qui composent la haie-vive ont du mal à s'implanter dans les sols de glacis gravillonnaire. Leur développement est lent et les taux de reprise sont modérés (Rautureau et al., 1991).

Tableau 83 : Comparaison des variations de stocks hydriques des sites de mesures S41 et S47.

Année	Période	Variation de stock hydrique	
		S41 (mm)	S47 (mm)
1989	12.06 au 27.06	28	98
	28.06 au 11.07	32	77
	12.07 au 02.08	29	54
	02.08 au 15.08	25	12
	Total	114	241
1990	19.06 au 17.07	16	28
	18.07 au 31.07	29	67
	01.08 au 16.08	16	33
	17.08 au 31.08	2	36
	Total	63	164
1991	12.06 au 16.07	20	51
	17.07 au 31.07	14	13
	01.08 au 13.08	-7	-4
	14.08 au 27.08	41	118
	Total	68	178

Tableau 84 : Atterrissements annuels moyens en amont des trois types d'obstacles filtrants. Bassin versant S4.

Année	Atterrissements annuels moyens (cm)		
	haie-vive	fascines	seuils en pierres
1989	1.8	1.7	1.4
1990	0.6	0.9	1.7
1991	0.8	1.3	2
1992	1.1	1.2	1.4
cumul	4.3	5.1	6.5

Tableau 85 : Rendement en grain d'une culture de mil (var Souna III) en fonction de l'année et de la position de la placette par rapport à la haie-vive.

Année	secteur	Rendement grain (kg/ha)		
		moyenne	σ	cv (%)
1988	amont	1143	397	34.7
	aval	897	388	43.3
1990	amont	915	239	26.1
	aval	635	250	39.4
1992	amont	816	252	30.1
	aval	1177	419	35.6

. Il existe peu de références comparatives d'un tel aménagement, en Afrique de l'Ouest, il est donc difficile d'élargir notre discussion. Les exemples issus d'Afrique de l'Est (Moeyersons, 1989 ; Ndayizigiye, 1993) sont trop éloignés pour être pris en compte. Serpantié et Lamachère (1990) soulignent l'effet bénéfique sur l'infiltration d'une association entre un labour et un réseau de cordons de pierres, dans le nord du Burkina Faso. Van Duijn et al. (1994) confirment, toujours au Burkina Faso, l'intérêt des cordons de pierres pour améliorer l'infiltration dans un système céréalier. Cependant, tous les auteurs s'accordent pour penser que la réponse agronomique des cultures à l'aménagement est beaucoup plus nuancée. L'augmentation de l'offre en eau ne doit pas être excessive, sous peine de drainage, et doit s'accompagner d'une offre correspondante en éléments minéraux afin de valoriser ce surplus hydrique (Reyniers et Forest, 1990). Dans notre cas, il faut ajouter que le traitement du ruissellement diffus par une haie-vive se solde par une "opération blanche" si on tient compte de la consommation des espèces arbustives.

. les surfaces cultivées de manière satisfaisante ont progressé grâce à l'aménagement du bassin versant S4. L'objectif de stabilisation des terres agricoles est donc atteint. Le préalable à une gestion rationnelle de la fertilité est levé.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

. Au terme de cette étude, il convient de rappeler que nos travaux s'inscrivent dans le cadre d'un programme de recherche plus vaste et plus ambitieux. Aussi, est-il naturel, après avoir présenté les principaux acquis scientifiques, de proposer des éléments de réflexion concernant la gestion agricole de l'eau sur les versants. Enfin, nous évoquerons les applications concrètes qui peuvent découler de nos travaux.

. Les acquis scientifiques :

. Sur la base d'études existantes, nous avons montré que le milieu naturel du sud Saloum subit actuellement une dégradation sans précédent. Le ruissellement généralisé le long des versants fait partie des principaux processus qui entretiennent cette situation. Notre apport a permis de quantifier les flux en présence à l'échelle de la surface élémentaire ou de la parcelle de culture.

. Nous avons adopté la démarche proposée par Casenave et Valentin (1989) afin d'appréhender la variabilité du milieu naturel caractérisé par ses états de surface. Nos résultats sous pluies simulées valident, en partie, les équations fournies par le catalogue des états de surface de la zone sahélienne. Cependant, quelques problèmes sont apparus :

- La faible durabilité des croûtes superficielles sur les sols cultivés et le faible développement de la porosité vésiculaire associée aux pellicules plasmiques. Cela limite fortement les possibilités de description.

- Le protocole de simulation de pluies utilisé s'adapte mal aux sols peu ruisselants. Ceux-ci ne satisfont pas l'hypothèse de linéarité de la relation entre les lames précipitée et ruisselée. L'introduction de l'énergie cinétique des pluies, sous la forme d'un indice d'agressivité (R), permet d'améliorer la prédiction.

. Nous avons mis au point un protocole expérimental qui permet l'étude, en contre saison, d'un couvert cultivé à plusieurs stades phénologiques. Les résultats sous pluies simulées montrent qu'il faut distinguer stade végétatif et stade cultural. En effet, la rugosité du sol et le taux de couverture sont corrélés au sein d'un même itinéraire technique. Cela introduit un biais dans le modèle univoque de prédiction de la lame ruisselée que nous avons proposé. A l'avenir, il semble utile de concevoir des protocoles expérimentaux qui décorrèlent plus fortement les deux variables.

. La mise en place de parcelles de ruissellement sous pluies naturelles a permis de confirmer les ordres de grandeurs fournis par les expériences précédentes. En particulier le rôle du couvert végétal dans l'amortissement du ruissellement. On distingue nettement l'influence d'une jachère enherbée ou d'une culture d'arachide bien développée par rapport à une culture de mil peu efficace. Il existe une forte variabilité de l'aptitude des sols au ruissellement, même à faible distance. Selon nos premières observations, cette aptitude pourrait être liée à un éventail granulométrique important, dans l'horizon supérieur du sol.

. Malgré leur faible développement morphologique, les croûtes sableuses qui ont été étudiées constituent de puissantes barrières hydrauliques dont la conductivité est dix à cinquante fois inférieure à celle du sol sous-jacent. La rapidité de leur mise en place, pour un événement climatique donné, est liée à leurs caractéristiques d'infiltration finales. Le fait de perturber la surface, par un sarclage notamment, a une action positive éphémère sur la pluie d'imbibition. Cependant la morphologie de la croûte qui se forme alors est nettement plus complexe. L'intérêt du décompactage du sol est alors évident puisqu'on favorise une infiltration localisée en profondeur et l'apparition de grosses mottes en surface.

. L'ensemble des ces résultats, obtenus à l'échelle du mètre carré sont bien représentatifs des comportements naturels. Les parcelles de ruissellement n'influencent pas de manière significative les stocks hydriques mesurés en profondeur. Il n'existe donc pas de biais métrologique rédhibitoire. Ce résultat est rassurant dans l'optique d'une modélisation des lames ruisselées destinée à alimenter un modèle de bilan hydrique. Cependant, il existe indéniablement un puissant facteur d'échelle lorsqu'on passe du mètre carré à l'hectare puisque les écoulements sont réduits de 50 à 80 %.

. La gestion agricole de l'eau sur les versants :

. Nous avons montré que le ruissellement prend naissance à tous les niveaux de la toposéquence et que les sols de plateau et de glacis sont beaucoup plus ruisselants que ceux de terrasse. La gestion agricole du ruissellement doit donc se concevoir de manière globale. Ceci n'exclut pas une approche individuelle, au contraire, mais souligne que la solution passe par un véritable maillage du paysage. Ce dernier doit renforcer la capacité d'absorption naturelle de la lame ruisselée le long du versant. Ce cloisonnement doit être accompagné, dans les parcelles de culture ou les zones de brousse, de techniques qui favorisent l'infiltration de manière temporaire car il y a peu de chance qu'on puisse améliorer durablement la structure des sols de la zone d'étude.

. A l'échelle de la parcelle, les deux exemples qui ont été traités sont représentatifs des modes d'occupation du sol actuels. Les sols de glacis ont une forte aptitude au ruissellement et ne sont pas favorables à l'implantation des cultures ou des jeunes plantations. Ils demandent également des efforts de traction élevés. Souvent éloignés du village et prêtés à des dépendants, les champs situés sur le glacis déclencheront peu d'enthousiasme pour leur mise en valeur. En revanche, les sols de terrasse présentent plus d'avantages pour l'exploitant et permettent une mise en place rapide des aménagements dont les résultats sont largement positifs. A partir d'un tel schéma il est fort probable qu'apparaisse progressivement une ceinture aménagée le long des bas-fonds, dominée par des glacis de plus en plus dégradés en amont.

. Ce risque a motivé l'équipe de recherche qui a procédé à l'aménagement d'un versant complet (bassin versant S2). Pour les raisons évoquées précédemment, cette action ne peut aboutir sans un large consensus villageois. Cette dynamique a permis de réaliser un maillage satisfaisant du versant dont les premiers effets hydrologiques apparaissent. En revanche, les techniques culturales aptes à améliorer l'infiltration sont diversement adoptées, la logique individuelle reprenant le dessus. C'est à ce stade que le couplage avec la gestion de la matière organique devient prépondérant. Il faut valoriser l'effort consenti ainsi que l'eau infiltrée.

. Applications concrètes :

. Le modèle univoque de prédiction des lames ruisselées est en phase de couplage avec un modèle de bilan hydrique fonctionnel. Sous sa forme actuelle le modèle nécessite d'être alimenté par un référentiel du type de celui des états de surface de la zone sahélienne. On peut imaginer de passer à un modèle plus mécaniste si on parvient à décorrélérer suffisamment les évolutions du couvert et de la surface du sol.

. La prise en compte de l'évolution du couvert végétal et de la rugosité du sol, associée à une analyse spatialisée des états de surface doit permettre d'améliorer les modèles de production hydrologique annuelle à l'échelle du bassin versant. Cependant, l'existence de puits hydrologiques nécessite qu'on améliore la notion d'aire contributive utilisée de manière traditionnelle en zone sahélienne.

. L'approche de la gestion agricole de l'eau a suscité de nombreuses réactions de la part du développement. Les équipes de recherche sont impliquées dans le principal programme de développement agricole du Sénégal (PNVA) et participent à de nombreuses sessions de formation sur ce thème.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABOUJAOUDE A., BELLEUDY P., VAUCLIN M. (1991) : A numerical study of infiltration through crusted soils : flat and other surface configurations . Soil technologie, 4 : 1-18.
- ABRAHAM A.D., PARSONS A.J., LUK S.H. (1990) : Field experiments on the resistance to overland flow on desert hillslopes. In : Walling D.E., Yair A., Berkowicz S. (Eds), Erosion, transport and deposition processes (Proceedings of the Jerusalem workshop, March-April 1987). IASH Publ. n°189, 1-18.
- AHUJA L.R. (1973) : A numerical and similarity analysis of infiltration into crusted soils. Water Resour. Res., 9 : 987-994.
- ALBERGEL J., CARBONNEL J.P., GROUZIS M. (1984) : Péjoration climatique au Burkina Faso. Incidences sur les ressources en eau et sur les productions végétales. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°1 : 3-19.
- ALBERGEL J. (1987) : Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat sc. nat., université Paris-VI, 341 p.
- ALBERGEL J., BERNARD A., RUELLE P., TOUMA J. (1989) : Hydrodynamique des sols. Bassins versants expérimentaux de Thyse-Kaymor. ORSTOM-Dakar, 29 p.
- ALBERGEL J., PEREZ P., VAKSMANN M. (1991) : Amélioration des modèles de bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proc of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 483-496.
- ALBERGEL J., PEREZ P. (1993) : Fonctionnement hydrologique et aménagement des bas-fonds des formations sédimentaires du Continental Terminal : exemple du bassin arachidier du Senegal. In : Raunet M. (Ed), Bas-fonds et riziculture (Actes du séminaire de Antananarivo, Décembre 1991). CIRAD-CA Publ., 155-164.
- ANGE A. (1987) : Rapport d'identification du projet FAO d'agriculture pluviale au Senegal. Vol.2 : documents de travail. CIRAD-CA, Montpellier, 50p.
- ANGE A. (1990) : Stratification de l'espace rural et diagnostic des contraintes du milieu à la production végétale. In : Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales (Actes des Journées de Montpellier, Septembre 1989). IRAT Montpellier, 35-65.
- ANGE A. (1991) : Gestion de la fertilité des sols et stratégies de mise en valeur des ressources naturelles. Exemple du mil dans les systèmes de culture du sud du bassin arachidier sénégalais. In : Terres de savanes, terres fertiles ? (Actes du séminaire de Montpellier, Décembre 1990). CIRAD-CA Publ., 25-50.
- ANNEROSE D. (1990) : Recherche sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée au Senegal. Thèse de doctorat sci. nat., Paris VII, 200 p.
- ARYA L.M., FARREL D.A., BLAKE G.R. (1975) : A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots. I : Determination of hydraulic properties of the soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39 : 424-430.
- ASSELIN J., VALENTIN C. (1978) : Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XV, n°4 : 321-348.
- ATTERBERG S. (1912) : Die konsistenz und die bündigkeit der boden. Inter. Mitt. Bodenkunde, 2, 149-189.
- AUDIN P. (1987) : Etude expérimentale et modélisation du bilan hydrique avec ruissellement. Mémoire d'ing. agri., ESA Angers, 71p. + annexes.
- BADER J.C. (1990) : Extrapolation des mesures ponctuelles de ruissellement à l'échelle d'un versant homogène. ORSTOM-Togo, 56 p.
- BENOIT-CATTIN M. (1986) : Les unités expérimentales du Senegal. CIRAD, Montpellier, 500 p.

- BERNARD A. (1987) : Un nouveau simulateur de pluie. Gouttes et Splash, vol.3 n°2, ORSTOM Abidjan, 12-16.
- BERTRAND R. (1972) : Morphopédologie et orientations culturelles des régions soudaniennes du Sine-Saloum (Senegal). Agron. Trop., vol. XXVII n°11 : 1115-1190.
- BERTUZZI P., RAWES G., COURAULT D. (1990) : Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall. Soil & Tillage Research, 17 : 87-99.
- BOIFFIN J. (1984) : La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Paris INA-PG, 320 p. + annexes.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBERCK M. (1988) : Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I : Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. Agronomie, 8(8), 663-673.
- BOIFFIN J. (1989) : La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. In : Sebillotte M. (Ed), Fertilité et systèmes de production. INRA, coll. Ecologie et aménagement rural, 369 p.
- BROUWERS M. (1987) : Etudes morpho et hydropédologiques dans la région de Thyse-Kaymor (Sine-Saloum, Senegal). CIRAD, DRN/L-PM/n°5, 40 p.
- BRUNET-MORET Y. (1963) : Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Haute-Volta. ORSTOM-Paris, 23 p.
- BRUAND A. (1986) : Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral, utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. Sc. du sol, 24 (4) : 351-362.
- BRYAN R.B. (1968) : The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. Geoderma, 2, 1 : 5-26.
- BRYAN R.B. (1981) : Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory : variability of erosion under controlled conditions. In : Erosion and sediment transport measurements (Proc. of Florence symposium). IAHS Publ. n°135 : 391-403.
- BULLOCK P., FEDOROFF N., JUNGIERUS A., STOOPS A., TURSINA T., BABEL U. (1985) : Handbook for soil thin section description. Waine Research Publ., Wolverhampton, England.
- BURGESS T.M., WEBSTER R. (1980) : Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I : The semi-variogram and punctual kriging. J. of Science, 31 : 315-331.
- BUSACKER D. (1990) : L'analyse socio-économique des systèmes d'exploitation agricole et de la gestion du terroir dans le Bas-Saloum. Seminar für landwirtschaftliche entwicklung. Technische Universität Berlin, FIA Berlin, 132, 225 p.
- CASENAVE A. (1982) : Le mini-simulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX n°4 : 207-227.
- CASENAVE A., GUIGUEN N., SIMON J.M. (1982) : Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX n°4 : 229-252.
- CASENAVE A., VALENTIN C. (1989) : Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM Ed, coll. Didactiques, 226 p.
- CASENAVE A., VALENTIN C. (1991) : Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 99-108
- CASENAVE A., VALENTIN C. (1992) : Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. Soil Sci. Soc. Am. J., 56 : 1667-1673.
- CASTA P., CHOPART J.L., JANEAU J.L., VALENTIN C. (1989) : Mesure du ruissellement sur un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire après six ans de culture continue avec ou sans labour. Agron. Trop. 44 (4) : 255-262.

- CASTANIER C. (1993) : Caractérisation des états de surface par télédétection pour une meilleure connaissance du ruissellement en milieu soudano-sahélien. Mémoire d'Ing., ENGEES Strasbourg, 87 p. + annexes.
- CHARREAU C., NICOU R. (1971) : L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Agron. Trop.* 26 (9): 903-978 (11): 1183 1247
- CHAUVEL A. (1966) : Etudes physiques des sols de Sefa. ORSTOM-Dakar, 36 p.
- CHAUVEL A. (1977) : Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance (Senegal). ORSTOM Ed, coll. Trav. et Doc. n°62, 532 p.
- CHEVALLIER P. (1982) : Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX n°4 : 253-297.
- CHEVALLIER P. (1983) : L'indice de précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX n°3,4 : 179-190.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A. (1985) : Pluies et crues au sahel. *Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso)*. ORSTOM Ed, coll. Trav. et Doc. n°190, 251 p.
- CHOPART J.L., NICOU R., VACHAUD G. (1976) : Le travail du sol et le mulch pailleux. Influence comparée sur l'économie de l'eau dans le système arachide mil au Senegal. *IAEA Publ.*, 235/22 : 199-221.
- CHOPART J.L., SIBAND P. (1988) : PROBE : Programmes de bilan de l'eau. IRAT- Montpellier, Mém. et Travaux n°17.
- CHOPART J.L., NICOU R. (1989) : Vingt ans de culture avec ou sans labour au Senegal. *Agron. Trop.* 44 (4), 269-281.
- CHOPART J.L., VAUCLIN M. (1990) : Water balance estimation model : field test and sensitivity analysis. *Souil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 1377-1384.
- CHORLEY R.J. (1978) : The hillslope hydrological cycle. In : Kirkby M.J.(Ed), *Hillslope hydrology*. John Wiley and Sons, 1-41.
- CHRETIEN J. (1986) : Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et terrasses fluviales. Thèse de doctorat, Univ. Dijon, 360 p. + annexes.
- COLLINET J., VALENTIN C. (1985) : Evaluation of factors influencing water erosion in West Africa using rainfall simulation. In : *Challenges in african hydrology and water resources*. IAHS Publ., n°144, 451-461.
- COLLINET J. (1988) : Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulations de pluies. Thèse de doctorat géol./pédo., Univ.Louis Pasteur Strasbourg, 513 p. + annexes.
- COMBEAU A., QUANTIN P. (1963) : Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cah. ORSTOM,sér. Pédol.*, 2 : 3-11.
- DACOSTA H. (1992) : Economie de l'eau et DRS sur les bassins versants de Thyse-Kaymor. Synthèse hydrologique 1983-1988. ORSTOM-Dakar, 67 p. + annexes.
- DANCETTE C. (1984) : Contrariétés pédoclimatiques et adaptation de l'agriculture à la sécheresse en zone intertropicale. In : *La sécheresse en zone intertropicale. Pour une lutte intégrée*. (Actes du colloque de Dakar, Septembre 1984). CIRAD-CILF, Paris, 27-41.
- DELHOUME J.P. (1989) : Contribution à l'étude des relations eau-sol-végétation en zone aride du nord du Mexique. In : Vachaud G. (Ed), *Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols*. IMG, Grenoble, 197-218.

- DELWAULLE J.C. (1973) : Résultats de six années d'étude de l'érosion au Niger. Bois et Forêts des Tropiques, 150 : 15-37.
- DE PLOEY J., MUCHER H.J. (1981) : A consistency index and rainwash mechanisms on belgian loamy soils. Earth Surface Processes and Landforms, 6, 319-330.
- DE VLEESCHAUVER D., LAL R., DE BOODT M. (1978) : Comparison of detachability in relation to soil erodibility for some important nigerian soils. Pedologie 28 : 5-20.
- DOORENBOS J., KASSAM A.H. (1980) : Réponse des rendements à l'eau. FAO Publ., Bulletin d'irrigation et de drainage n°33, 233 p.
- DUCREUX A. (1984) : Caractérisation mécanique des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche de l'Afrique de l'Ouest. Etude d'un prototype d'outil permettant de les travailler en période sèche. Thèse de doctorat sci. agro., USTL Montpellier, 134 p. + annexes.
- DUIVENBOODEN N., CISSE L. (1993) : Fertilization of millet cv. Souna III in Senegal : dry matter production and nutrient uptake. Fertilizer Research 35 : 217-226.
- DUMAS J. (1965) : Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. III (4), 307-333.
- DUNNE T., DIETRICH W.E. (1980) : Experimental study of Horton overland flow on tropical hillslopes. II : Sheetflow hydraulics and hillslope hydrographs. Z. Geomorphol. Suppl., 33, 40-80.
- DUNNE T., ZHANG W., AUBRY B.F. (1991) : Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. Water Resources Research, vol.27 (9), 2271-2285.
- DUTARTRE P., BARTOLI F., ANDREUX F., PORTAL J.M., ANGE A. (1993) : Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa. Geoderma (à paraître).
- EIMBERCK M. (1989) : Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV n°1-2 : 81-94.
- ELLISON W.D. (1945) : Some effects of raindrops and surfaceflow on soil erosion and infiltration. Trans. Am. Geophys. Union, 26 : 415-429.
- EPEMA G.F., RIEZEBOS H.T. (1983) : Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. In : De Ploey J. (Ed), Rainfall simulation, runoff and soil erosion. Catena Suppl. 4, 6-13
- ELWEL H.A., STOCKING M.A. (1976) : Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. Geoderma 15 : 61-70.
- ELWEL H.A., STOCKING M.A. (1982) : Developing a simple yet practical method of soil loss estimation. Tropical Agriculture (Trinidad), 59 (1) : 43-48.
- EMERSON W.W. (1967) : Aclassification of soil aggregates based on their coherence in water. Austr. J. Soil Res., 5 (1) : 47-57.
- FARRES P.J. (1978) : Role of aggregate size and time in the soil crusting process. Earth Surface Processes, 5 (3) : 243-254.
- FAURE A. (1978) : Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquence sur l'arrangement des grains. Thèse de doctorat sci., Univ. Grenoble, 179 p.
- FAYE A., NIANG L., SARR D.Y., THIAM A. (1985) : Etude monographique de la communauté rurale de Thyse-Kaymor. ISRA , Dakar Senegal, 100 p.
- FIES J.C., ZIMMER D. (1982) : Etude expérimentale de modifications de l'assemblage textural d'un matériau sablo-argileux sous l'effet des pressions. Bulletin du GFHN n°12, INRA Avignon, 40-54.

- FIES J.C. (1984) : Analyse de la répartition des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4 (9), 891-899.
- FELLER M., MILLEVILLE P. (1977) : Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Senegal). I : Présentation de l'étude et évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 12 (3) : 199-211.
- FLORET C., MTIMET A., PONTANIER R. (1989) : Régime hydrique et sensibilité à l'érosion de systèmes écologiques de la zone aride (Tunisie). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV n°1-2 : 81-94.
- FONTANEL P. (1986) : Etats des végétations de parcours dans la communauté rurale de Kaymor (sud Saloum Senegal). CIRAD, Montpellier, DSP n°28, 41 p.
- FOREST F. (1983) : Evolution de la pluviométrie en zone soudano-sahélienne au cours de la période 1940-1979. Conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales au Senegal. *Agron. Trop.*, vol XXXVII-1, 17-23.
- FOREST F. (1984) : Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Modèle BIP4. IRAT-DEVE, Montpellier, 30 p.
- FOSTER G.R., MEYER L.D. (1972) : Transport of soil particles by shallow flow. *Trans. Am. Soc. Agri. Eng.* 15, 99-102.
- FRANQUIN P., FOREST F. (1977) : Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 32 (1) : 7-11.
- FREEBAIRN D.M., GUPTA S.C., RAWLS W.J. (1991) : Influence of aggregate size and microrelief on development of surface soil crusts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 55 : 188-195.
- FRITSCH J.M. (1992) : Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. ORSTOM Ed, coll. Etudes et Thèses, 392 p.
- GARIN P. (1989) : Eléments d'analyse de la gestion des moyens de production au sein d'une communauté villageoise du Sine-Saloum. Le cas de Ndimb-Taba. CIRAD-SAR, Montpellier, 51p. + annexes.
- GIFFORD R.O., THRAN D.F. (1974) : Bonding mechanisms for soil crusts. II : Strength of silica conservation. In : Cary J.W., Evan D.D. (Ed), *Soil crusts*. Univ. of Arizona, Tucson, Techn. Bulletin 214 : 28-30.
- GILLIER P., SYLVESTRE P. (1969) : L'arachide. Maisonneuve et Larrose ed., Paris.
- GOVERS G. (1990) : Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. In : Walling D.E., Yair A., Berkowicz S. (Eds), *Erosion, transport and deposition processes (Proceedings of the Jerusalem workshop, March-April 1987)*. IASH Publ. n°189, 45-64.
- GRESILLON J.M. (1991) : Pour un modèle d'infiltration adapté à l'échelle d'un bassin. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), *Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991)*. IASH Publ. n°199, 121-130.
- GRIMALDI M., BOULET R. (1990) : Relation entre l'espace poral et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur socle de Guyane française. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV n°3 : 263-275.
- GUERIF J. (1979) : Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage : matières organiques libres et liées. *Ann. Agron.*, 30 (6), 469-480.
- GUERIF J., FAURE A. (1979) : Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. I : Etude statistique. *Ann. Agron.*, 30 (5), 387-399.
- GUERIN H., SALL C., FRIOT D., AHOKPE B., NDOYE A. (1986) : Ebauche d'une méthodologie de diagnostic de l'alimentation des ruminants domestiques dans un système agro-pastoral : l'exemple de Thyse-Sonkorong au Senegal. In : *Relation agriculture-élevage (Actes du séminaire de Saly, Décembre 1985)*. CIRAD, Montpellier.

- GUILLOBEZ S. (1990) : Réflexions théoriques du ruissellement et de l'érosion. Bases d'un contrôle. Bois et forêts des Tropiques, n°226 (4) : 37-46.
- GUILLOBEZ S., ZOUGMORE R. (1994) : Etude du ruissellement et de ses principaux paramètres à la parcelle. In : Reyniers F.N., Netoyo L. (Eds), Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale (Actes du séminaire international de Bamako, Décembre 1991). AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext Ed., Montrouge, 319-330.
- HAINES W.B. (1923) : The volume changes associated with variations of water contents in soil. J. Agric. Sci., 13 : 296-310.
- HAVERKAMP R., VAUCLIN M., VACHAUD G. (1984) : Error analysis in estimating soil water content from neutron moisture meter readings. I : Local standpoint. Soil Sci., 137 : 78-90.
- HENIN S. (1938) : Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse de doctorat sci., Paris.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G. (1969) : Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Masson et Cie Ed, Paris, 332 p.
- HILLEL D., GARDNER W.R. (1970) : Transient infiltration into crusted-topped profiles. Soil Sci., 109 : 69-76.
- HILLEL D., KRENTOS V.D., STYLIANOU Y. (1972) : Procedure and test of internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. Soil Sci., 114 : 395-400.
- HILLEL D. (1988) : L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Academia Ed, coll.Pedasup, 288 p.
- HOOGMOED W.B., KIEVIT D.T. (1981) : The activities of a farmer in the Niono region of Mali. In : Rawitz E., Hoogmoed W.B., Morin Y. (Eds), Development of criteria and methods for improving the efficiency of soil management and tillage operations, with special reference to arid and semi-arid regions. Agric. Univ., Wageningen, and Hebrew Univ., Rehovot, Appendix 4, 31 p.
- HOOGMOED W.B., STROOSNIJDER L. (1984) : Crust formation on sandy soils in the Sahel (Part I and II). Soil and Tillage Research, 4 : 5-23 et 321-337.
- HOOGMOED W.B., KLAIJ M.C., BROUWER J. (1991) : Infiltration, runoff and drainage in the Soudano-Sahelian zone. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 85-98.
- HORTON R.E. (1940) : An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 5 : 399-417.
- HUDSON N.W. (1973) : Soil conservation. B.T. Bastsford limited, London, 320 p.
- IBRAHIMA A., SCHMITT A. (1991) : Bilan hydrique à la parcelle : cas d'une étude réalisée sur le plateau Mossi au Burkina Faso. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 289-298.
- JANEAU J.L., VALENTIN C. (1987) : Relations entre les termitières Trinervitermes s.p. et la surface du sol : réorganisations, ruissellement et érosion. Rev. Ecol. Biol. Sol, 24 (4) : 637-647.
- JUNCKER E., SENE M. (1990) : Comparaison de plusieurs dents pour le travail en sec en traction bovine. ISRA, Kaolack Senegal, 27 p.
- KINNEL P.I.A. (1974) : Splash erosion : some observations on the splash-cup technique. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 38 : 657-660.
- KIRKBY M.J. (1988) : Hillslope runoff processes and models. Journal of Hydrology, 100 : 315-339.
- KNISEL W.G., FOSTER G.R. (1981) : CREAMS : a system for evaluating best management practices. In : Economics, ethics, ecology : roots of productive conservation. Soil Cons. Soc. Am., Ankeny Iowa, 285-295.

- KOSTIAKOV A.N. (1932) : On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans. Comm. Int. Soil Sci. Soc., Moscow 67th, 17-21.
- KUIPERS H. (1957) : A reliefmeter for soil cultivation. Studies Neth. J. Agric. Sci., 5 : 255-62.
- LAFFORGUE A. (1977) : Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIV n°4, 299-344.
- LAL R. (1975) : Role of mulching techniques in tropical soil and water management. Tech. Bull., IITA Ibadan, 1, 38 p.
- LAL R. (1976) : Soil erosion problems on an Alfisol in western Nigeria and their control. Monograph 1. IITA Ibadan, 208p.
- LAL R. (1988) : Erodibility and erosivity. In : Lal R. (Ed), Soil erosion research methods. Soil and Water Cons. Soc., Ankeny Iowa, 141-160.
- LAMACHERE J.M. (1991) : Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 109-120.
- LASCANO R.J. (1991) : Review of models for predicting soil water balance. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 443-458.
- LAWS J.O., PARSONS D.A. (1943) : The relation of raindrop size to intensity. Trans. Am. Geophys. Union, 24 : 452-459.
- LE BISSONNAIS Y. (1987) : Etude des mécanismes de mobilisation et de redistribution des particules sous l'action des pluies à la surface du sol. INRA, Orléans, 11 p.
- LE BISSONNAIS Y. (1988) : Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Univ. Orléans, 225 p.
- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A., JAMAGNE M. (1989) : Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodibilité des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV n°1-2 : 31-40.
- LE THIEC G., BORDET D. (1990) : Etude de deux outils de traction animale visant à réduire les contraintes de travail du sol en zones sèches. In : Starkey P.H., Faye J. (Eds), Animal traction for agriculture development (Proc. of WAATN workshop, Saly, July 1988). WAATN Publ.
- LINDEN D.R., VAN DOREN D.M. (1986) : Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. Soil Sci. Soc. Am. J., 52 : 311-319.
- LUC J.P. (1978) : Caractérisation hydrique des sols. Utilisation des mesures d'humidité et de charge in situ. Comparaison avec les mesures de laboratoire. Thèse de doctorat sci., USTL Montpellier, 163 p.
- LUDWIG B. (1992) : L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de doctorat Géo. Phys., ULP Strasbourg, 201 p.
- MAERTENS C. (1964) : Résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. Ann. Agron., 15 (5) : 539-554.
- MAERTENS C., MORIZET J., STUDER R. (1965) : Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. Ann. Agron., 16 (1) : 5-23.

MANIERE G. (1973) : Contribution à l'étude des zones compactées des horizons superficiels d'un sol complanté de vignes et désherbé chimiquement; utilisation de la méthode Proctor. Thèse de doctorat, USTL Montpellier.

MARCHAL J.Y. (1987) : Vingt ans de lutte anti-érosive au nord du Burkina Faso. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII n°2 : 173-180.

MARCHAND D. (1988) : Modélisation fonctionnelle du bilan hydrique sur sol cultivé : approche déterministe ou stochastique. Thèse de doctorat, Univ. Joseph Fourier Grenoble, 246 p.

McGREGOR K.C., MUTCHLER C.K. (1976) : Status of R-factor in North Mississippi. In : Soil erosion : Prediction and control. Soil Conc. Soc. Am., Ankeny Iowa, 135-142.

McINTYRE D.S. (1958) : Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. Soil Sci., 85 : 185-189.

MICHEL P. (1973) : Les bassins des fleuves Senegal et Gambie. Etude géomorphologique (tome 1). ORSTOM, coll. Mémoires ORSTOM n°63, 365 p.

MIETTON M. (1988) : Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso : l'érosion en zone de savane. Thèse de doctorat Géog., Univ. Grenoble, 511 p.

MILLER S.T. (1992) : How important are losses from farmers' fields in Botswana ? Proc. of Sci. Conf. of SADCC land and water management research program, Gaborone Botswana, 206-216.

MILVILLE F. (1991) : Etude hydrodynamique et quantification de la recharge des aquifères en climat soudano-sahélien : application à un bassin expérimental au Burkina Faso. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 311-328.

MOEYERSONS J. (1989) : La nature de l'érosion des versants au Rwanda. Recherches sur la colline de Rwaswa (Runyinya-Butare). Musée Royal de l'Afrique Centrale, Ann. Sci. Eco. vol.19, Tervuren.

MOLINIER M., AUDRY P., DESCONNETS J.C., LEPRUN J.C. (1989) : Dynamique de l'eau et des matières dans un écosystème représentatif du Nordeste Brésilien. Conditions d'extrapolation spatiale à l'échelle régionale. In : Vachaud G. (Ed), Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. IMG, Grenoble, 159-178.

MONIMEAU A. (1992) : Projet d'aménagement de la ravine de Sonkorong. Perspectives pour un aménagement intégré d'un bassin versant (Sine-Saloum Senegal). Mémoire d'ing., CNEARC-ESAT Montpellier, 65 p + annexes.

MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C. (1973) : Une méthode de mesure de la densité apparente des petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 24 (5), 533-545.

MONNIER G., STENGEL P. (1982) : La composition granulométrique des sols: un moyen de prévoir leur fertilité physique. Bull. Tech. Inf. n°370/372, 503-512.

MONNIER G., BOIFFIN J., PAPY F. (1987) : Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXII n°2 : 123-132.

MORIN J., BENYAMINI Y. (1977) : Rainfall infiltration into bare soils. Water Res. Research, vol.13 n°5, 813-817.

MORIN J., BENYAMINI Y., MICHAELI A. (1981) : The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. Journal of Hydrol., 52 : 321-335.

MUCHER H.J., DE PLOEY J. (1977) : Experimental and micromorphological investigation of erosion and redeposition of loess by water. Earth Surface Processes, 2 : 117-124.

MUTCHLER C.K., MURPHREE C.E., McGREGOR K.C. (1988) : Laboratory and field plots for soil erosion studies. In : Lal R. (Ed), Soil erosion research methods. Soil and Water Cons. Soc., Ankeny Iowa, 9-38.

- NDAYIZIGIYE F. (1993) : Effet des haies arbustives (*Calliandra* et *Leucaena*) sur l'érosion et les rendements des cultures en zone de montagne (Rwanda). Réseau Erosion Bull. n°13, ORSTOM Montpellier, 41-49.
- NICOU R. (1974) : Contribution à l'étude et à l'amélioration de la porosité des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche. Conséquences agronomiques. *Agron. Trop.*, XXIX (11) : 1101-1126.
- NICOU R., CHARREAU C., CHOPART J.L. (1987) : Tillage and soil physical properties in semi-arid West Africa. *Soil and Tillage Research*, 27 : 125-147.
- OUATTARA B., SEDOGO M.P., LOMPO F., OUATTARA K. (1993) : Evolution des modifications de l'espace poral d'un sol ferrugineux lessivé sous monoculture intensive de sorgho : effet des labours d'enfouissement de fumier. Actes de l'Atelier Gestion durable des terres en régions semi-arides et sub-humides (à paraître).
- PARLANGE J.Y., HOGARTH W.L., PARLANGE M.B. (1984) : Optimal analysis of the effect of a surface crust. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 494-497.
- PELISSIER P. (1966) : Les paysans du Senegal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. Imp. Fabiéque, Saint Yriex, 940 p.
- PELLERIN F.M. (1980) : La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bull. Liais. Lab. des Ponts et Chaussées*, 106 : 105-116.
- PIERI C. (1969) : Etude pédologique de la région de Nioro du Rip. IRAT-CNRA, Bambey Senegal, 131 p.
- PIERI C. (1989) : Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. CIRAD-IRAT, Montpellier, 444 p.
- PLANCHON O., FRITSCH E., VALENTIN C. (1987) : Rill development in a wet savannah environment. *Catena Suppl.*, 8 : 55-70.
- POESEN J. (1986) : Surface sealing on loose sediments : the role of texture, slope and position of stones in the top layer. In : Callebaut F., Gabriels D., De Boodt M. (Eds), Assessment of soil surface sealing and crusting. Flanders Center for Soil Erosion and Soil Conservation, 354-362.
- POESEN J., BRYAN R.B. (1989) : Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV n°1-2 : 71-80.
- POSS R., SARAGONI H., FORGET A. (1988) : La pénétration de l'eau dans les Terres de Barre : Analyse des comportements sous simulation de pluie et interprétation morphologique. ORSTOM, Lomé Togo, 72 p.
- POSS R. (1991) : Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les Terres de Barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse de doctorat sci. pédol., Univ. Paris VI, 335 p.
- PRAT C. (1989) : Relation entre érosion et systèmes de production dans le bassin versant sud du lac de Managua (Nicaragua). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV n°1-2 : 171-182.
- RAUTUREAU J., PEREZ P., DIATTA M. (1991) : Implantation et gestion de haies-vives. Quelques résultats de recherche au Sine-Saloum. CIRAD-CA, Montpellier, 52 p.
- RAWITZ E., HOOGMOED W.B., MORIN Y. (1981) : Development of criteria and methods for improving the efficiency of soil management and tillage operations, with special reference to arid and semi-arid regions. *Agric. Univ.*, Wageningen, and Hebrew Univ., Rehovot.
- RAWS G., GOVERS G. (1988) : Hydraulic and soil mechanical aspects of rill erosion. *J. Soil Sci.*, 39 : 111-124.
- REYNIERS F.N., FOREST F. (1990) : La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. les flux hydriques dans le système sol-culture-atmosphère en zone intertropicale. *Sécheresse*, n°1 vol.1, 36-39.
- RICHARDS S.J. (1965) : Soil suction measurements with tensiometers. In : Methods for soil analysis. *Am. Soc. Agron.*, Monograph. 9, 153-163.

ROCHETTE R.M. (1989) : Le Sahel en lutte contre la désertification. Leçons d'expérience. CILSS/GTZ, Margraf Ed., Weikersheim, 592 p.

RODIER J.A., AUVRAY C. (1965) : Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. ORSTOM/CIEH, Paris, 46 p.

RODIER J.A. (1992) : Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahéliens. ORSTOM, coll. Etudes et Thèses, Paris, 76 p.

ROGNON P. (1991) : Les sécheresses au Sahel replacées dans l'évolution climatique des vingt derniers millénaires. Sécheresse, n°3 vol.2, 199-210.

ROOSE E. (1977) : Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM, coll. Travaux et Documents n°78, 108 p.

ROOSE E., SARRAILH J.M. (1989) : Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV n°1-2 : 7-30.

ROOSE E., DUGUE P., RODRIGUEZ L. (1992) : La GCES, une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. Bois et Forêts des Tropiques, n°233 : 49-63.

ROSE C.W., ROBERTS B.R., FREEBAIRN D.M. (1983) : Soil conservation policy and a model of soil erosion. In : Byth D.E., Foale M.A., Mungomery V.E., Wallis E.S. (Eds), New technology in field crop protection. Australian Inst. Agric. Sci., Melbourne, 212-226.

ROSE C.W. (1988) : Research progress on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices. In : Lal R. (Ed), Soil erosion research methods. Soil and Water Cons. Soc., Ankeny Iowa, 119-139.

RUBIN J. (1966) : Theory of rainfall uptake by soils initially dryer than their field capacity and its applications. Water Resources Res., 2 : 739-749.

RUELLE P., BEN SALAH D., VAUCLIN M. (1986) : Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale d'une parcelle agronomique. Application à l'échantillonnage. Agronomie, 6 (6) : 529-539.

RUELLE P., SENE M., PEREZ P. (1989) : Etude expérimentale et modélisation du bilan hydrique d'un bassin versant en zone soudano-sahélienne. In : Vachaud G. (Ed), Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. IMG, Grenoble, 31-56.

RUELLE P., SENE M., JUNCKER E., DIATTA M., PEREZ P. (1990) : Défense et restauration des sols. ISRA/ CIRAD, coll. Fiches Techniques, Unival Dakar, 6 fiches + photos.

SARR P.L. (1981) : Analyse des effets induits par l'intensification des cultures sur quelques caractéristiques physico-chimiques d'un sol ferrugineux tropical du Senegal (Nioro du Rip). Thèse de doctorat, ENSA/USTL Montpellier, 100 p. + annexes.

SAVAT J., POESEN J. (1981) : Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. I : The calculation of absolute data on detachability and transportability. Catena, 8 : 1-17.

SAVAT J., DE PLOEY J. (1982) : Sheetwash and rill development by surface flow In : Bryan R., Yair A. (Eds), Badland geomorphology and pipping. Geo Book, Norwich, 113-126.

SEGUIS L. (1986) : Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière (lame précipitée, lame écoulée). Thèse de doctorat, USTL Montpellier, 326 p.

SENE M., PEREZ P. (1994) : Contraintes et possibilités de valorisation des ressources naturelles dans le sud du bassin arachidier (Sine-Saloum, Senegal). In : Reyniers F.N., Netoyo L. (Eds), Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale (Actes du séminaire international de Bamako, Décembre 1991). AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext Ed., Montrouge, 217-234.

- SERPANTIE G., LAMACHERE J.M. (1990) : Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne. Actes du colloque AUPELF-UREF, Ouagadougou Mars 1990.
- SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., VALENTIN C. (1992) : La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions. In : Le Floc'h E., Grouzis M., Cornet A., Bille J.C. (Eds), L'aridité : une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés. ORSTOM Ed, coll. Didactiques, Paris, 419-448.
- SESSAY M.F., STOCKING M.A. (1993) : Soil productivity and fertility maintenance of a degraded oxisol in Sierra Leone. Actes de l'Atelier Gestion durable des terres en régions semi-arides et sub-humides (à paraître).
- SHARMA K.D., GUPTA R.N., PANWAR K.S. (1976) : Concept of crop protection factor evaluation in soil erosion. Indian Jour. Agric. Res., 10 (3) : 145-152.
- SHARMA K.D. (1987) : Modified runoff Curve Numbers for bare crust-forming sandy soils. Aust. J. Soil Res., 25 : 541-545.
- SHARMA M.L., GANDER G.A., HUNT C.G. (1980) : Spatial variability of infiltration in a watershed. Jour. Hydrol., 45 : 101-122.
- SIBAND P. (1974) : Evolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance. Agron. Trop., 27 (5) : 574-591.
- SMITH R.E. (1972) : The infiltration envelope : results from a theoretical infiltrometer. Jour. Hydrol., 17 : 1-22.
- SMITH H.J.C., LEVY G.J., SHAINBERG I. (1990) : Water- droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. Soil Sci Am. J., 54 : 1084-1087.
- STOCKING M.A. (1988) : Assessing vegetative cover and management effects. In : Lal R. (Ed), Soil erosion research methods. Soil and Water Cons. Soc., Ankeny Iowa, 163-186.
- THEBE B. (1987) : Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse de doctorat sci. hydrol., USTL Montpellier, 306 p.
- TOUMA J., ALBERGEL J. (1992) : Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments. A comparison. J. Hydrol., 135 : 73-86.
- TOUMA J. (1992) : Simulation numérique de l'infiltration dans les sols encroûtés : croûte établie et en formation. Hydrol. Continent., vol.7 n°2, 143-156.
- TROCHAIN J. (1940) : Contribution à l'étude de la végétation du Senegal. Mémoire IFAN, Larose Paris, 433 p.
- TRUMAN C.C., BRADFORD J.M., FERRIS J.E. (1990) : Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. Soil Sci. Am. J., 54 : 1385-1392.
- VACHAUD G., VAUCLIN M., CISSE L. (1991) : Mesure in situ de la consommation en eau de cultures pluviales par humidimétrie neutronique. In : Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Renard C. (Eds), Soil water balance in the soudano-sahelian zone (Proceedings of the Niamey workshop, February 1991). IASH Publ. n°199, 275-288.
- VAKSMANN M. (1988) : Etude du fonctionnement hydrique des andosols de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat, ENSAM/USTL Montpellier, 156 p.
- VAKSMANN M., TRAORE S. (1989) : BIPODE logiciel de simulation du bilan hydrique des cultures. CIRAD/EIER, Montpellier.
- VALENTIN C. (1981) : Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse de doctorat, Univ. Paris VII, 259 p.
- VALENTIN C. (1986) : Surface crusting of arid sandy soils. In : Callebaut F., Gabriels D., De Boodt M. (Eds), Assessment of soil surface sealing and crusting. Flanders Center for Soil Erosion and Soil Conservation, 9-17.

- VALENTIN C., RUIZ-FIGUEROA J.F. (1987) : Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In : Feodoroff N., Bresson L.M., Courty M.A. (Eds), *Micromorphologie des sols*, AISS/AFES, Paris, 401-408.
- VALENTIN C., JANEAU J.L. (1989) : Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide (Côte d'Ivoire). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXV n°1-2 : 41-52.
- VALENTIN C. (1990) : Les états de surface des bassins versants de Thyssse-Kaymor (Senegal). ORSTOM, Dakar Senegal, 10 p.
- VALENTIN C. (1991) : Surface crusting in two alluvial soils of northern Niger. *Geoderma*, 48 : 201-222.
- VALET S. (1985) : Notice explicative de la carte d'occupation comparative des sols en 1970 et 1983. Région de Thyssse-Kaymor (Sine-Saloum, Senegal). CIRAD-CA, Montpellier, 52 p.
- VAN BAVEL C.H.M., UNDERWOOD M., SWANSON R.W. (1956) : soil moisture measurement by neutron moderation. *Soil Sci.*, 82 : 29-42.
- VAN DUIJN H.J.W., VAN DRIEL W.F., KABORE O. (1994) : Influence des cordons pierreux sur la relation entre le bilan hydrique et le rendement dans le bassin versant de Oualaga à Namsigua (Burkina Faso). In : Reyniers F.N., Netoyo L. (Eds), *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale (Actes du séminaire international de Bamako, Décembre 1991)*. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext Ed., Montrouge, 275-288.
- VAUCLIN M. (1982) : Méthode d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. In : *Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols (Actes du colloque, Avignon, Juin 1982)*. INRA Ed, Les colloques de l'INRA n°15, 9-43.
- VLAAR J.C.J. (1992) : Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel. CIEH/UAW, Univ. Agro. Wageningen, 99 p. + annexes.
- VOLTZ M., BORNAND M., GOULARD M. (1989) : Estimation spatiale des paramètres hydrodynamiques du sol à l'échelle d'une plaine alluviale. In : Vachaud G. (Ed), *Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols*. IMG, Grenoble, 81-109.
- WILLIAMS J.R., JONES C.A., DYKE P.T. (1984) : A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 27 (1) : 129-144.
- WILSON B.N., BARFIELD B.J., WARNER R.G. (1984) : A hydrology and sedimentology watershed model. II : Sedimentology component. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 27 : 1378-1384.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1958) : Rainfall energy and its relation to soil loss. *Trans. Am. Geophys. Union*, 39 (2) : 285-291.
- YODER R.E (1936) : A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.*, 28 : 337-351.
- YU B., NEIL D.T. (1993) : Long-term variations in regional rainfall in the south-west of western Australia and the difference between average and high intensity rainfalls. *International Journal of Climatology*, vol. 13, 77-88.
- ZOBECK T.M., ONSTAD C.A. (1987) : Tillage and rainfall effects on random roughness. A review. *Soil Tillage Res.*, 9 : 1-20.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : cartes de situation du sud Saloum. (Source : Bertrand, 1972).

Figure 2 : Esquisse morphopédologique d'une toposéquence dans le sud Saloum. (Source : Bertrand, 1972).

Figure 3 : Comparaison entre les pluies et la demande climatique (ETPen) décennales. Nioro du Rip 1983-1987. (Source: Dacosta, 1992).

Figure 4 : Hyétoigrammes des pluies de récurrence biennale ou décennale. Ndiarguene 1983-1988. (Source: Dacosta, 1992).

Figure 5 : Comparaison des différents modes d'occupation du sol entre 1970 et 1983, en fonction de la qualité agronomique des terres. (Source: Valet, 1985).

Figure 6 : Le système agraire wolof traditionnel. T.F : transferts de fertilité. (Source : Angé, 1990; d'après Pelissier, 1966)

Figure 7 : Schéma général de dégradation de l'écosystème du sud Saloum. (Source: Sene et Perez, 1994).

Figure 8 : Processus hydrodynamiques superficiels le long de la toposéquence (sud Saloum, Senegal). (d'après Angé, 1991).

Figure 9 : Influence de l'humidité du sol ($w\%$) sur la densité (γ_d) obtenue par compactage Proctor (600 J dm^{-3}). (Source: Monnier et al., 1989).

Figure 10 : Modèle de colmatage interstitiel de la surface. P_v : taux de recouvrement des motifs par le matériau interstitiel; P_{v_0} : taux limite de recouvrement; D : calibre des motifs; D_{lim} : calibre limite; S_p : surface de plaque continue. (Source: Boiffin, 1989).

Figure 11 : Hydrogrammes théoriques de ruissellement ($R(t)$) et d'infiltration ($F(t)$) sous averse d'intensité pluviométrique constante (I). (D'après Lafforgue, 1977).

Figure 12 : Modèle d'infiltration en régime permanent à travers une croûte saturée. (D'après Hillel et Gardner, 1970).

Figure 13 : Intensités d'infiltration (a) et profils hydriques à $t = 1$ heure (b) obtenus pour une infiltration sous flux constant ($23,5 \text{ mm/h}$) et différentes hypothèses sur la vitesse de formation de la croûte (p). (Source: Touma, 1992).

Figure 14 : Relation entre le stock hydrique mesuré dans l'horizon 0-20 cm (S_{20}) et l'indice de pluie (IK). (Source: Thebe, 1987).

Figure 15 : Application d'un modèle de discrétisation spatiale à deux bassins versants du Burkina Faso et principaux résultats obtenus pour l'année 1985. (Source: Albergel, 1987).

Figure 16 : Niveaux critiques de matière organique pour le maintien des propriétés physiques des sols. (Source: Pieri, 1989).

Figure 17 : Evolution du critère D_{min} en fonction du cumul de pluies. Influence du calibre initial des fragments. (Source: Eimberck, 1989).

Figure 18 : Clefs de détermination des micro-organisations pelliculaires de surface (croûtes). (Source: Casenave et Valentin, 1989).

Figure 19 : Influence de l'hétérogénéité du comportement hydrique d'une parcelle (K_h) sur la relation liant l'intensité minimale d'infiltration (F_n) et l'intensité pluviométrique (I_m). (Source: Collinet, 1988).

Figure 20 : Relation entre le taux de recouvrement (%) et l'érosion relative (% sol nu). (Source: Stocking, 1988; d'après Elwell et Stocking, 1974).

Figure 21 : Schéma d'un dispositif expérimental théorique visant à évaluer l'impact d'un aménagement intégré sur les processus de ruissellement et d'érosion.

Figure 22 : Courbe d'étalonnage du simulateur de pluie EID 330 (Delta Lab), pour un gicleur installé à quatre mètres de hauteur. (Source: Bernard, 1987).

Figure 23 : Schéma de fonctionnement du simulateur de pluie 2^e génération. (Source: Bernard, 1987).

Figure 24 : Dispositif expérimental utilisé pour tester les tensiomètres modifiés. 3 répétitions. TS: tensiomètre standard, TR: tensiomètre raccourci, TC: tensiomètre à plaque poreuse.

Figure 25 : Evolution des mesures de succion en fonction du temps pour différents modèles de tensiomètres. 34a: conditions initiales sèches, 34b: conditions initiales humides.

Figure 26 : Influence du type de relief (R_x) sur la valeur de l'indice de rugosité statistique (IR_1) ou de l'indice de rugosité géométrique (IR_2).

Figure 27 : Diagramme de rugosité présentant quelques valeurs moyennes d'indices correspondant à différentes pratiques culturales. 3 répétitions.

Figure 28 : Caractéristiques morphopédologiques (A) et évolution de l'occupation des sols 1983-1990 (B). Bassin versant S2 (0.6 km²). (Source: Sene et Perez, 1994).

Figure 29 : Schéma d'aménagement du bassin versant S2 (0,6 km²). (Source: Sene et Perez, 1994).

Figure 30 : Dispositifs de mesure mis en place sur le bassin versant S2 (0,6 km²). Mini-pièges à ruissellement () et sites de simulation de pluie ().

Figure 31 : Caractéristiques morphopédologiques (A) et évolution de l'occupation des sols 1983-1990 (B). Bassin versant S3.

Figure 32 : Relevé topographique et dispositif expérimental du bassin versant S4 (2,5 ha).

Figure 33 : Cartographie des états de surface (1987). Bassin versant S4. (Source: Ruelle et al., 1989).

Figure 34 : Schéma d'aménagement du bassin versant S4 (2,5 ha) et positionnement des transects de mesure.

Figure 35 : Station hydrographique du bassin versant S4 (2,5 ha). (Source: Dacosta, 1992).

Figure 36 : Relevé topographique et dispositif expérimental du bassin versant S5 (2,5 ha).

Figure 37 : Variations de la teneur mesurée en gravillons (> 2 mm) dans le profil, en fonction de la date de prélèvement. Bassin versant S5, site S51.

Figure 38 : Cartographie des états de surface (1987). Bassin versant S5. (Source: Ruelle et al., 1989).

Figure 39 : Schéma d'aménagement du bassin versant S5 (2,5 ha).

Figure 40 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier le rôle d' un couvert d'arachide sur le ruissellement. Utilisation simultanée de deux simulateurs de pluie (1 m²).

Figure 41 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier l'influence du décompactage du sol, en sec, sur le ruissellement.

Figure 42 : Hyétoigrammes comparés des pluies simulées de types a et b et des pluies naturelles de récurrence décennale et biennale. Sud-Saloum. (Source: Dacosta, 1992).

Figure 43 : Relations entre les lames ruisselées (Lr) et précipitées (Lp) cumulées sur l'ensemble du protocole. Sites de bas-fond (a), de terrasse (b), de glacis (c) et de plateau (d).

Figure 44 : Détermination des valeurs de pluie d'imbibition pour chaque pluie du protocole. Parcelle KD22.

Figure 45 : Détermination des intensités limites de ruissellement (Il) à partir de la droite $F = I$, pour chaque pluie du protocole. Parcelle KD22.

Figure 46 : Evolutions des intensités d'infiltration (F en mm/h) en fonction des lames précipitées cumulées (Lp en mm), pour les premières () et dernières () pluies du protocole. Parcelles KD21, KD33, KD42, KD22, KD32 et KD43.

Figure 47 : Evolutions des valeurs d'intensité d'infiltration stabilisée (F50) en fonction des hauteurs d'eau cumulées (a) ou des indices de pluies antérieures (b). F50 correspond à la valeur de Fs à la fin de chaque pluie ($I = 50$ mm/h).

Figure 48 : Relations entre les stocks hydriques mesurés à différentes profondeurs et l'indice de pluie antérieure (IK). Parcelles KD22 () et KD32 ().

Figure 49 : Relations entre les lames ruisselées (Lr) et précipitées (Lp) pour chaque pluie du protocole. Influence du type de pluie (A ou B) sur la réponse des parcelles KD21 et KD31.

Figure 50 : Analyse en composantes principales, plan principal 1-2. Parcelles de Keur Dianko.

Figure 51 : Représentation du couvert d'arachide sur la parcelle N11 et calcul de l'indice de végétation (IV) correspondant.

Figure 52 : Evolution du taux de couverture de l'arachide en fonction de la somme des températures moyennes. Hiver 91/92 à Sonkorong () et hiver 92/93 à Nioro du Rip (), comparaison avec la courbe théorique estivale.

Figure 53 : Profils hydriques initiaux mesurés à proximité des différentes parcelles de simulation de pluie. Sonkorong (a) et Nioro du Rip (b).

Figure 54 : Relations entre le ruissellement (Lr) et la hauteur de pluie (Lp) cumulés sur l'ensemble du protocole. Influence du stade culturel. Sites de Sonkorong et de Nioro du Rip.

Figure 55 : Relations entre l'indice de rugosité (IR1) et la lame précipitée cumulée (Lp) pour les différents stades cultureux étudiés. Sites de Sonkorong (a) et Nioro (b).

Figure 56 : Influence du stade culturel sur les profils de surface observés après la première pluie du protocole. Valeurs indicatives de l'indice de rugosité (IR1). Site de Sonkorong.

Figure 57 : Evolution schématisée du profil de surface d'un sol non sarclé (S22) ou sarclé (S32).

Figure 58 : Ajustement des lames ruisselées simulées aux valeurs observées. (a) : utilisation de l'équation (3) ; (b) : utilisation de l'équation (4) à Sonkorong et (5) à Nioro.

Figure 59 : Fréquences cumulées des hauteurs de pluie journalières. Nioro du Rip () durant la période 1969-1992 et bassin versant S4 () durant la période 1988-1992.

Figure 60 : Relation entre l'indice d'agressivité (R) et la hauteur de pluie (Lp en mm). Période 1983 - 1992.

Figure 61 : Courbes de doubles cumuls des écoulements. La parcelle S41 est prise comme référence. Période 1988-1992.

Figure 62 : Relation entre les lames précipitées (Lp) et ruisselées (Lr). Influence de l'indice d'agressivité (R). Parcelle S41, période 1988-1992.

Figure 63 : Analyse factorielle des correspondances, plan factoriel 1-2. Parcelles S41 et S46.

Figure 64 : Influence du type de culture sur l'évolution des lames ruisselées. (a) : S41 semée en mil et S46 en arachide, (b) : S41 semée en arachide et S46 en mil.

Figure 65 : Courbes de doubles cumuls des écoulements. La parcelle S51 est prise comme référence. Période 1989-1992.

Figure 66 : Influence du mode d'occupation du sol sur l'évolution des lames ruisselées. (a) : 1989, (b) : 1990.

Figure 67 : Analyse factorielle des correspondances, plan factoriel 1-2. Parcelles S51 et S57.

Figure 68 : Evolution de l'indice de rugosité (IR1) en fonction du cumul de pluies. Sonkorong 1990-1992.

Figure 69 : Evolution simulée de l'indice de rugosité (IR1) en fonction des hauteurs de pluie cumulées. Parcelle S41, années 1989 et 1991.

Figure 70 : Ajustement des lames ruisselées simulées aux valeurs observées et distribution des résidus. Parcelle S41.

Figure 71 : Relations entre les écarts cumulés (ΔL_r) et les hauteurs de pluie (Lp); avec $\Delta L_r = (L_{r_{obs}} - L_{r_{sim}})$. Parcelles S41 et S51: (a) en début de cycle; (b) en fin de cycle. Période 1988-1992.

Figure 72 : Evolution du taux de couverture (CV en %) en fonction du nombre de jours après semis. Ajustement d'une fonction logistique aux observations de terrain (arachide 7333; année 1991).

Figure 73 : Evolutions simulées des indices de végétation (IV) et de rugosité (IR1) en fonction du nombre de jours après semis (jas). Les hauteurs de pluie journalières (Lp) sont indiquées par des triangles. Parcelles S43 et S55.

Figure 74 : Evolutions observées et simulées des lames ruisselées (Lr) en fonction du temps. (a) : S41 en 1989; (b) : S51 en 1992.

Figure 75 : Evolution chronologique du stock hydrique, simulée par le logiciel BIPODE. (Lr0) : ruissellement observé, (Lr1) : ruissellement simulé par (C1), (Lr2) : simulé par (NIO), (Lr3) : simulé par (KD22). Parcelle S41.

Figure 76 : Influence de l'humidité du matériau (w en %) sur la densité apparente sèche (γ_d) obtenue par compactage Proctor modifié (70 J/dm³).

Figure 77 : Répartition des pentes des courbes d'intrusion en fonction du diamètre équivalent (Deq en μm). Influence de l'humidité initiale (wi en %) lors d'un compactage Proctor modifié (70 J/dm³).

Figure 78 : Répartition des pentes des courbes d'intrusion en fonction du diamètre équivalent (Deq en μm). Influence de l'intensité pluviométrique (I) sur la géométrie de l'espace poral d'une croûte superficielle.

Figure 79 : Profils de charge hydraulique (H en hPa) mesurés, in situ, sous des croûtes superficielles. Méthodes d'extrapolation de la valeur Hu.

Figure 80 : Evolutions des intensités de ruissellement (R) et d'infiltration (F) lors de la seconde pluie simulée.
(T1) : parcelle travaillée, (T3) : parcelle non travaillée.

Figure 81 : Répartition spatiale des croûtes superficielles en fonction de l'état de surface initial.

Figure 82 : Distribution des hauteurs de pluie enregistrées pendant la période noire (), puis la période blanche ().
Bassin versant S4.

Figure 83 : Relation entre la lame ruisselée (Lr) et l'intensité pluviométrique en dix minutes (I10). () : période noire, () : période grise, () : période blanche. Bassin versant S4.

Figure 83 : Relation entre la lame ruisselée (Lr) et l'intensité pluviométrique en dix minutes (I10).
() : période noire, () : période grise, () : période blanche. Bassin versant S4.

Figure 84 : Ajustement entre les lames ruisselées observées et simulées à partir du modèle d'écoulement établi avant aménagement. () : période noire, () : période grise, () : période blanche. Bassin versant S4.

Figure 85 : Relation entre la masse de matière transportée et l'indice d'agressivité (R) de l'averse correspondante.
() : période noire, () : période blanche. Bassin versant S4.

Figure 86 : Distribution des intensités pluviométriques en dix minutes (I10). () : période noire, () : période blanche. BV S5

Figure 87 : Ajustement des lames ruisselées observées et simulées par un modèle d'écoulement établi avant aménagement. () : période noire, () : période blanche. Bassin versant S5.

Figure 88 : Variabilité spatiale des stocks hydriques avant aménagement. Maillage geostatistique du 10.06.87. B.V S4.

Figure 89 : Relation entre les stocks hydriques mesurés par humidimétrie neutronique ou par prélèvements à la tarière. () : site équipé d'une parcelle de ruissellement, () : site non équipé. Bassin versant S4.

Figure 90 : Variabilité des stocks hydriques après aménagement. Maillage geostatistique du 02.11.91. Bassin versant S4.

Figure 91 : Variabilité spatiale de l'indice granulométrique IG. Maillage geostatistique du 02.11.91. Bassin versant S4.

Figure 92 : Evolution des stocks hydriques (0-100) avec le temps, le long d'un transect perpendiculaire à la haie.
() : stocks le 26.07.91, () : stocks le 27.08.91, () : stocks le 01.10.91, () : stocks le 21.11.91.

Figure 93 : Variabilité spatiale des stocks hydriques (0-150 cm) dans le secteur aval du bassin versant S4.
Maillage geostatistique du 25.10.89.

Figure 94 : Augmentation de l'épaisseur des atterrissements avec le cumul pluviométrique. Période 1989-1991. B.V S4.

Figure 95 : Représentation 3D du relevé topographique du 20.11.91. Secteur aval du bassin versant S4.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Hauteurs pluviométriques annuelles de récurrences remarquables. Analyse fréquentielle 1932-1992.

Tableau 2 : Hauteurs pluviométriques journalières de récurrences remarquables. Analyse fréquentielle 1932-1992.

Tableau 3 : Calendriers culturels observés lors d'un hivernage précoce (a) ou d'un hivernage tardif (b).

Tableau 4 : Influence de la pente sur l'érosion et le ruissellement pour deux sites d'Afrique de l'ouest.
(Source: Roose, 1977).

Tableau 5 : Valeurs moyennes de R pour différents sites d'Afrique de l'ouest et plusieurs hauteurs de pluie.
(Source: Roose, 1977).

Tableau 6 : Influence des divers types de couverture sur le ruissellement et l'érosion annuels pour deux sites d'Afrique de l'ouest. (Sources: Charreau et Nicou, 1971; Roose, 1977).

Tableau 7 : Influence du couvert végétal sur les principales caractéristiques du ruissellement pour deux types de surface définis selon les critères proposés par Casenave et Valentin (1989). (Source: Casenave et Valentin, 1991).

Tableau 8 : Répartition pondérale des agrégats de farine par classes de diamètres équivalents, pour différentes intensités pluviométriques. $s(\%)$: écart-type expérimental. 3 répétitions.

Tableau 9 : Diamètres médians, vitesses de chute et énergies cinétiques unitaires pour différentes intensités pluviométriques testées.

Tableau 10 : Humidités pondérales (w), écart-types ($s(w)$) et coefficients de variation (CV) moyens obtenus par prélèvements gravimétriques à différentes profondeurs. 3 répétitions. (Source: Juncker et Sene, 1989).

Tableau 11 : Densités apparentes sèches (γ_d), écart-types ($s(\gamma_d)$) et coefficients de variation (CV) moyens obtenus avec des cylindres de prélèvement (100 cm^3). 4 répétitions.

Tableau 12 : Comptages neutroniques standards obtenus pour quelques tubes d'accès en PVC. 10 répétitions. Les valeurs correspondent à un comptage standard égal à 1540 pour un tube en aluminium.

Tableau 13 : Temps de réponse (en mn) des différents tensiomètres pour atteindre la valeur $h = -10 \text{ hPa}$. 3 répétitions.

Tableau 14 : Ecart-types expérimentaux pour différentes valeurs de succion (h) et trois modèles de tensiomètres testés. Trois répétitions. Valeurs exprimées en hPa.

Tableau 15 : Influence de l'inclinaison du profilographe sur les indices de rugosité IR1 et IR2. 3 répétitions.

Tableau 16 : Influence des erreurs de transcription sur les indices de rugosité IR1 et IR2. 3 répétitions.

Tableau 17 : Occupation des sols sur les différentes unités morphopédologiques. Bassin versant S2. 1987 et 1990.

Tableau 18 : Caractéristiques d'étalonnage multilocal. Bassin versant S4. $\theta = a_1 N/N_0 + a_0$ (θ en cm^3/cm^3).

Tableau 19 : Descriptions des états de surface initiaux des parcelles de ruissellement (1 m^2). Bassin versant S2.

Tableau 20 : Protocole de simulations de pluies adopté. Hauteurs d'eau précipitées (L_p) et temps de ressuyage (Tr).

Tableau 21 : Lames ruisselées (L_r en mm) et coefficients de ruissellement (K_r en %) obtenus pour chaque averse du protocole.

Tableau 22 : Matrice des corrélations entre caractéristiques physiques initiales et la lame infiltrée totale (Li).

Tableau 23 : Pluies d'imbibition (L_{pi} en mm) obtenues pour chaque averse du protocole de simulation.

Tableau 24 : Intensités limites de ruissellement en conditions sèches (I_{ls}) et humides (I_{lh}), correspondant, respectivement, aux premières et dernières pluies du protocole.

Tableau 25 : Valeurs des paramètres d'ajustement de la fonction $F = F_f + (F_i - F_f)e^{-\gamma \cdot L_p}$ pour les premières (état sec) et les dernières pluies (état humide) du protocole. Parcelles KD21, KD22, KD32, KD33, KD42 et KD43.

Tableau 26 : Paramètres de régression calculés pour l'ensemble des parcelles étudiées, à partir de l'équation (3). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles de Keur Dianko.

Tableau 27 : Valeurs de l'indice d'agressivité (R) pour différentes lames précipitées (L_p) et deux types de pluies simulées.

Tableau 28 : Paramètres de régression calculés pour l'ensemble des parcelles étudiées, à partir de l'équation (4). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles de Keur Dianko.

Tableau 29 : Description des états de surface finaux. Les valeurs du coefficient d'infiltration (K_{i20} : $L_p = 50$ mm et $IK = 20$), de l'intensité limite de ruissellement (I_{lh}) et de la pluie d'imbibition (L_{pih}) issues du catalogue des états de surface (Casenave et Valentin, 1989) sont comparées aux valeurs expérimentales (en gras).

Tableau 30 : Matrice des corrélations entre caractéristiques hydrologiques et la variable OPS.

Tableau 31 : Propriétés physiques et chimiques de l'horizon de surface (0-5 cm). Sites de Sonkorong et de Nioro.

Tableau 32 : Principaux paramètres descriptifs des états de surface initiaux observés. Sites de Sonkorong et de Nioro.

Tableau 33 : Densités apparentes sèches (γ_d) initiales, mesurées au densitomètre à membrane (1 000 cm³).
Horizon 0-5 cm, 2 répétitions.

Tableau 34 : Lames ruisselées (L_r en mm) et coefficients de ruissellement (K_r en %) obtenus pour chaque averse du protocole. Sites de Sonkorong et Nioro du Rip.

Tableau 35 : Analyse de la variance et test de comparaison des moyennes au seuil de signification 90% (Newman-Keuls).
Variable utilisée: lame ruisselée cumulée (L_r totale).

Tableau 36 : Pluies d'imbibition (L_{pi} en mm) obtenues pour chaque averse du protocole. Sites de Sonkorong et Nioro du Rip.

Tableau 37 : Analyse de la variance et test de comparaison des moyennes au seuil de signification 90 % (Newman-Keuls).
Variable utilisée: pluie d'imbibition de la 1^{re} averse (L_{pi1}).

Tableau 38 : Intensités limites de ruissellement en condition sèche (I_{ls}) ou humide (I_{lh}). Valeurs en mm/h. Sites de Sonkorong et Nioro du Rip.

Tableau 39 : Analyse de la variance et test de comparaison des moyennes au seuil de signification 90% (Newman-Keuls).
Variable utilisée: intensité limite de ruissellement en condition humide (I_{lh}).

Tableau 40 : Paramètres descriptifs des états de surface finaux observés. Indice de végétation (IV), indice de rugosité ($IR1$), densité apparente sèche de surface (γ_d) et écart-type associé ($s(\gamma_d)$). 4 répétitions. Sites de Sonkorong et Nioro.

Tableau 41 : Paramètres de régression calculés, pour l'ensemble des traitements, à partir de l'équation (1). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles de Sonkorong et Nioro.

Tableau 42 : Paramètres de régression calculés, pour l'ensemble des traitements, à partir de l'équation (2). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles de Sonkorong et Nioro.

Tableau 43 : Description des états de surface finaux. Les valeurs du coefficient d'infiltration (K_{i20} : $L_p = 50$ mm et $IK = 20$), de l'intensité limite de ruissellement (I_{lh}) et de la pluie d'imbibition (L_{pih}) issues du catalogue des états de surface (Casenave et Valentin, 1989) sont comparées aux valeurs expérimentales (en gras).

Tableau 44 : Paramètres de régression calculés, pour chaque site étudié, à partir de l'équation (3). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles de Sonkorong et Nioro.

Tableau 45 : Paramètres de régression calculés, pour chaque site étudié, à partir des équations (4) et (5). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles de Sonkorong et Nioro.

Tableau 46 : Calendriers culturels des parcelles situées dans le bassin versant S4. Période 1988-1992.

Tableau 47 : Description des états de surface. Les appréciations synthétisent l'ensemble des observations effectuées sur une parcelle. Bassin versant S4.

Tableau 48 : Calendriers culturels des parcelles situées dans le bassin versant S5. Période 1988-1992.

Tableau 49 : Description des états de surface. Les appréciations synthétisent l'ensemble des observations effectuées sur une parcelle. Bassin versant S5.

Tableau 50 : Bilan annuel des lames précipitées (L_p), des indices d'agressivité (R) et des lames ruisselées (L_r). Parcelles situées sur le bassin versant S4.

Tableau 51 : Seuils interannuels de naissance du ruissellement pour les lames précipitées (L_{plim}), les intensités pluviométriques (I_{10lim}) et les indices d'agressivité (R_{lim}).

Tableau 52 : Valeurs de la lame ruisselée moyenne ($\langle L_r \rangle$) et de la lame ruisselée cumulée ($L_r \text{ cumul}$) par classes de lames précipitées.

Tableau 53 : Bilan annuel des lames précipitées (L_p), des indices d'agressivité (R) et des lames ruisselées (L_r). Parcelles situées sur le bassin versant S5.

Tableau 54 : Seuils interannuels de naissance du ruissellement pour les lames précipitées (L_{plim}), les intensités pluviométriques (I_{10lim}) et les indices d'agressivité (R_{lim}).

Tableau 55 : Valeurs de la lame ruisselée moyenne ($\langle L_r \rangle$) et de la lame ruisselée cumulée ($L_r \text{ cumul}$) par classes de lames précipitées.

Tableau 56 : Valeurs des paramètres d'ajustement de la fonction $y = a + b.e^{-ax}$ qui relie l'indice de rugosité (IR_1) à la lame précipitée cumulée (L_p). Décompactage en sec (DS), sarclage en sec (SS) et sarclage en humide (SH).

Tableau 57 : Paramètres de régression calculés à partir de l'équation (1). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles sur S4 et S5.

Tableau 58 : Paramètres de régression calculés à partir de l'équation (2). L'absence de valeur signifie que la variable est rejetée au seuil de signification ($F = 4$). Parcelles sur S4 et S5.

Tableau 59 : Lames ruisselées annuelles (L_r en mm) observées et calculées à partir de différentes équations de référence. Bassin versant S4, période 1988-1992.

Tableau 60 : Lames ruisselées annuelles (L_r en mm) observées et calculées à partir de différentes équations de référence. Bassin versant S5, période 1988-1992.

Tableau 61 : Taux de recouvrement (CV en %) observés sur les différentes parcelles cultivées en arachide.
Jas : nombre de jours après semis.

Tableau 62 : Paramètres de régression calculés à partir des équations (1) ou (2) pour les parcelles x années semées en arachide. Valeurs indicatives du coefficient de corrélation multiple (r^2) et de l'écart-type d'estimation ($s(y)$).

Tableau 63 : Lames infiltrées (L_i), stocks hydriques les 31/07 et 31/10, évapotranspirations réelles (ETR) calculées par le logiciel BIODE pour différentes estimations des lames ruisselées. Valeurs en mm. Parcelles S41 et S44.

Tableau 64 : Composition granulométrique en huit fractions (en %). 2 répétitions.

Tableau 65 : Densité apparente sèche (γ_d) avant et après retrait, variation de volume (en %) et humidité pondérale à la limite de retrait (w_r en %). Moyennes de 12 répétitions.

Tableau 66 : Influence de l'intensité pluviométrique (I) sur le volume d'intrusion (V_p en $\text{cm}^3/100\text{g}$), le diamètre équivalent médian (Deq en μm), la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et la porosité (n_{Hg} en %) mesurés par porosimétrie au mercure.

Tableau 67 : Influence du sarclo-binage sur le volume d'intrusion (V_p en $\text{cm}^3/100\text{g}$), les diamètres équivalents médian et modal (Deq en μm), la densité apparente sèche (γ_{dHg}) et la porosité (n_{Hg} en %) mesurés par porosimétrie au mercure.

Tableau 68 : Influence du mode d'apport d'eau sur l'humidité maximale (θ_{max} en cm^3/cm^3) et de la succion minimale (h_{min} en hPa) mesurées. (Source : Albergel et al., 1989).

Tableau 69 : Intensité d'infiltration stabilisée (Fs), gradient de charge hydraulique (dH/dz) et conductivité hydraulique à la cote $z = 10$ cm (Ku). Conductivité hydraulique de la croûte (Kc) calculée avec $z_c = 2$ mm et deux valeurs probables de la charge hydraulique sous la croûte (Hu).

Tableau 70 : Influence du décompactage du sol sur les principaux paramètres hydrologiques mesurés sous pluies simulées. 2 répétitions. Site de Sonkorong.

Tableau 71 : Influences du décompactage et du précédent cultural sur les états de surface initiaux et finaux.

Tableau 72 : Bilans hydrologiques globaux du bassin versant S4 pendant les trois périodes successives.

Tableau 73 : Bilans hydrologiques annuels et caractéristiques des événements pluviométriques les plus forts. B. V S4.

Tableau 74 : Seuils de hauteur de pluie (L_{plim}), d'intensité pluviométrique (I_{10lim}) et d'indice d'agressivité (R_{lim}) durant les trois périodes. Bassin versant S4.

Tableau 75 : Bilans globaux par périodes des pertes en terre. Bassin versant S4.

Tableau 76 : Bilans hydrologiques globaux du bassin versant S5 pendant les trois périodes successives.

Tableau 77 : Seuils de hauteur de pluie (L_{plim}), d'intensité pluviométrique (I_{10lim}) et d'indice d'agressivité (R_{lim}) durant les trois périodes. Bassin versant S5.

Tableau 78 : Principaux paramètres statistiques et géostatistiques caractérisant la variabilité des stocks hydriques en période noire. g_1 : coefficient d'asymétrie, g_2 : coefficient d'aplatissement. Bassin versant S4. (Source : Ruelle et al., 1989).

Tableau 79 : Tableau de contingence entre classes d'humidité du sol et classes d'états de surface. Bassin versant S4.

Tableau 80 : Principaux paramètres hydrologiques des essais de simulation de pluie. Deuxième averse (type décennal). Bassin versant S4.

Tableau 81 : Principaux paramètres statistiques et géostatistiques de la variabilité des stocks hydriques en période noire. Bassin versant S4.

Tableau 82 : Termes du bilan hydrique calculés dans les unités "champs" et "haie-vive" durant les campagnes 1991 et 1992. Bassin versant S4.

Tableau 83 : Comparaison des variations de stocks hydriques des sites de mesures S41 et S47.

Tableau 84 : Atterrissements annuels moyens en amont des trois types d'obstacles filtrants. Bassin versant S4.

Tableau 85 : Rendement en grain d'une culture de mil (var Souna III) en fonction de l'année et de la position de la placette par rapport à la haie-vive.

ANNEXE 1

Etude de la précision de l'estimation d'une humidité volumique ou d'un stock hydrique par humidimétrie neutronique.

Pour certains sites d'étude, la faible variabilité spatiale des caractéristiques pédologiques (sols ferrugineux tropicaux profonds) permet de définir des horizons d'étalonnages communs à plusieurs tubes d'accès, plus ou moins éloignés. La régression d'étalonnage est alors calculée de manière multilocale, l'intérêt d'une telle méthode étant d'augmenter le nombre de couples de valeurs, en particulier pour les horizons superficiels. En contre partie, les variances associées aux mesures de θ et n s'enrichissent d'une composante spatiale. Aucune des variables θ et n n'étant connue sans erreur, l'utilisation d'une méthode de régression classique conduit à des valeurs biaisées de A_0 et A_1 dans l'équation (1). Haverkamp et al. (1984) ont développé une approche qui permet d'estimer sans biais les coefficients de régression et leurs erreurs associées :

$$\begin{aligned} \text{on a:} \quad n &= n + u \\ \theta &= \theta + v \\ \theta &= a_1 n + a_0 \end{aligned} \quad (2)$$

avec n et θ : estimateurs de n et θ
 u et v : erreurs de mesure sur n et θ

Estimateurs des coefficients d'étalonnage :

$$\begin{aligned} a_1 &= s(n, \theta) [s^2(n) - (m - 2)(m - 1)s^2(u)]^{-1} \\ a_0 &= \bar{\theta} - a_1 \bar{n} \end{aligned}$$

avec $s(n, \theta)$: estimateur de la covariance de n et θ
 $s^2(n)$: estimateur de la variance de n
 m : nombre de couples de mesures
 $\bar{\theta}$ et \bar{n} : moyennes de θ et n

Les coefficients a_0 et a_1 ainsi que leurs variances associées $s^2(a_0)$ et $s^2(a_1)$, leur covariance $s(a_0, a_1)$ et la variance résiduelle $s^2(e)$ sont calculées à l'aide du logiciel CARHYD (Vachaud et al., 1991). Le tableau A présente les résultats obtenus sur un site d'étude, le bassin versant S4, où 7 tubes ont été utilisés pour l'étalonnage. Les horizons de référence correspondent aux profondeurs 0-15 cm (n°1), 15-25 (n°2), 25-55 (n°3) et 55-200 (n°4) d'un sol ferrugineux tropical appauvri de terrasse.

Horizon	Tubes	Couples	r	a ₁	a ₀	s ² (a ₁)*	s ² (a ₀)*	s(a ₀ ,a ₁)*	s ² (e)*
1	1	5	0.988	0.592	0.004	290.5	26.9	-75.9	35.5
	2	8	0.989	0.597	0.006	138.1	12.9	-36.7	25.2
	7	31	0.989	0.638	-0.014	31.0	2.9	-8.1	23.9
2	1	3	0.997	0.636	-0.035	215.4	23.6	-65.3	11.3
	2	6	0.997	0.630	-0.035	54.8	4.7	-14.2	6.0
	7	28	0.991	0.595	-0.032	24.5	2.5	-7.0	14.1
3	1	11	0.988	0.647	-0.060	105.3	14.8	-37.6	15.7
	2	23	0.987	0.637	-0.060	52.6	6.0	-16.6	17.4
	7	100	0.987	0.612	-0.052	9.7	1.1	-3.1	14.8
4	1	51	0.982	0.669	-0.088	33.6	5.7	-13.6	8.4
	2	96	0.982	0.674	-0.090	17.6	2.7	-6.8	8.3
	7	263	0.982	0.656	-0.083	5.8	0.9	-2.2	7.9

* valeur x 100 000

Tableau A : Paramètres d'étalonnage pour chaque horizon de référence et un nombre de tubes d'accès utilisés croissant. Bassin versant S4.

Lorsqu'on passe de un à deux sites de mesure, les coefficients de régression varient peu, par contre, les variances associées diminuent nettement et d'autant plus que le nombre de couples augmente. La prise en compte de l'ensemble des 7 tubes d'accès influence les valeurs de a_0 et a_1 et leurs variances associées, la variance résiduelle $s^2(e)$ est peu affectée puisque le nombre de couples n'intervient pas de manière décisive dans son estimation (Haverkamp et al., 1984). Si on calcule les valeurs de θ , pour n variant de 0,1 à 0,5 en fonction des diverses équations de régression, on s'aperçoit que les écarts, quelque soit l'horizon concerné, sont de l'ordre de $0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Or, le tube pris comme référence (S41) possède la meilleure série de valeurs d'étalonnage. D'autres sites de mesure subissent une forte dispersion des résultats, surtout en surface. De plus, comme nous allons le montrer, l'erreur due à l'étalonnage multilocal est du même ordre de grandeur que la précision attendue sur la détermination de l'humidité, à une profondeur et à une date donnée.

Pour ce faire, nous utilisons la formule proposée par Haverkamp et al. (1984) puis Poss (1991) pour calculer un estimateur non biaisé de la variance de l'humidité volumique $s^2(\theta)$; à partir de l'équation (2) :

$$s^2(\theta) = s_e^2(\theta) + s_m^2(\theta) \quad (3)$$

$$s_e^2(\theta) = s^2(a_0) + s^2(e) + 2n s(a_0, a_1) + n^2 s^2(a_1) \quad (4)$$

$$s_m^2(\theta) = (a_1^2 - s^2(a_1)) s^2(n) \quad (5)$$

avec $s_e^2(\theta)$: composante d'étalonnage de la variance de θ

$s_m^2(\theta)$: composante de mesure de la variance de θ

D'après Kendall et Stuart (1963), cités par Poss (1991):

$$s^2(n) = s^2(N/No) = (N/No)^2 (s^2(N)/N^2 + s^2(No)/No^2)$$

$$s^2(n) = s^2(N)/No^2 + n^2 s^2(No)/No^2 \quad (6)$$

Ne connaissant pas de manière exacte la loi reliant la variance instrumentale au comptage, nous avons essayé de trouver des majorants pour $s^2(N)$ et $s^2(No)$. D'après le tableau B, les variations interannuelles des comptages standards moyens sont peu élevées au regard des écarts-types $ET(<No>)$ enregistrés, hormis l'année 1989, perturbée par des problèmes d'alimentation de l'humidimètre. L'écart-type associé aux 10 répétitions nécessaires à l'obtention de No , noté $s(No)$, varie peu annuellement et la valeur moyenne $<s(No)>$ peut être considérée comme stable sur une base inter-annuelle. Une estimation de la variance de comptage standard est fournie par la valeur : $s^2(No) = (9,7)^2$.

Année	couples	$<No>$	$ET(<No>)$	$<s(No)>$	$ET(<s(No)>)$
1987	42	1540	6.5	9.1	1.8
1988	66	1526	8.4	9.5	2.6
1989	83	1497	13.5	9.7	2.1
1990	52	1492	6.6	9.4	2.3
1991	95	1538	6.2	9.7	2.2
1992	76	1537	6.4	9.6	2.3

Tableau B : Evolution inter-annuelle des comptages standards moyens ($<No>$), de leurs écart-types annuels ($ET(<No>)$), des écart-types d'estimation moyens ($<s(No)>$) et de leurs écart-types annuels ($ET(<s(No)>)$). Humidimètre Troxler 3320. 10 répétitions.

Afin de trouver un majorant à la variance de comptage $s^2(N)$ nous avons adopté la méthode proposée par Poss (91). Nous avons repris les enregistrements de l'année 1991, pour plusieurs tubes d'accès et étudié la dispersion des mesures à des niveaux situés sous le front d'humectation, pouvant être considérés comme secs (Tableau C).

Horizon (cm)	couples	S41 $<N>$	$ET(<N>)$	couples	S42 $<N>$	$ET(<N>)$
100	24	338	5.2	33	337	7.1
130	24	306	6	36	307	6.2
150	38	292	7.4	36	293	8.6
170	38	304	5.6	36	290	6.1
200	38	314	6.9	36	301	6.8

Tableau C : Dispersion des mesures autour de la valeur moyenne, pour des horizons situés sous le front d'humectation. Exemples des tubes d'accès S41 et S42. Valeurs rapportées à un comptage standard $No = 1540$ dans

On observe que les fluctuations de comptage moyen (N) sont du même ordre de grandeur que celles trouvées pour le comptage standard. En première approximation, la valeur de $s^2(N_0)$ fournit un majorant de l'estimateur de la variance $s^2(N)$, dans le cas où le comptage standard est défini pour 10 répétitions, et le comptage sol pour 2 répétitions. On a :

$$\text{Maj}(s^2(N)) = s^2(N_0) = (9,7)^2$$

On obtient alors, d'après (5) et (6) :

$$s^2(n) = 0,4 \cdot 10^{-5}(1 + n^2)$$

$$s_m^2(\theta) = 0,4 \cdot 10^{-5}(1 + n^2)(a_1^2 - s^2(a_1))$$

En remplaçant les différents paramètres d'étalonnage par leurs valeurs dans (3), on aboutit à quatre équations de variance associées aux horizons de référence :

- horizon 1 : $s^2(\theta) = 27,0 \cdot 10^{-5} - 16,2 \cdot 10^{-5} n + 31,2 \cdot 10^{-5} n^2$

- horizon 2 : $s^2(\theta) = 16,7 \cdot 10^{-5} - 14,0 \cdot 10^{-5} n + 24,6 \cdot 10^{-5} n^2$

- horizon 3 : $s^2(\theta) = 16,0 \cdot 10^{-5} - 6,2 \cdot 10^{-5} n + 9,8 \cdot 10^{-5} n^2$

- horizon 4 : $s^2(\theta) = 10,0 \cdot 10^{-5} - 4,4 \cdot 10^{-5} n + 6,0 \cdot 10^{-5} n^2$

Dans tous les cas, la variance d'étalonnage est nettement supérieure à la variance de mesure. Ce résultat justifie, à posteriori, le choix d'un étalonnage multilocal qui minimise les valeurs de $s^2(a_0)$, $s^2(a_1)$ et $s(a_0, a_1)$.

L'amélioration de la précision d'étalonnage avec l'augmentation du nombre de couples se traduit par un aplatissement de la courbe de réponse et une diminution de la valeur $\text{Min}(s(\theta))$. La gamme de rapports de comptage utilisée ($0,1 < n < 0,5$) correspondant à celle rencontrée sur le terrain, nous pouvons estimer un majorant de l'écart-type pour chaque horizon, les valeurs sont consignées dans le tableau D:

Horizon	$s(\theta)$ (cm ³ cm ⁻³)	Intervalle de confiance (cm ³ cm ⁻³)
1	0.016	+/- 0.03
2	0.013	+/- 0.03
3	0.012	+/- 0.02
4	0.01	+/- 0.02

Tableau D : Précision de la détermination de l'humidité pour un tube d'accès donné (intervalle de confiance au seuil 95%).

Les valeurs d'humidité volumique estimées à chaque profondeur pour un site de mesure et une date donnée, permettent de calculer la valeur du stock hydrique sur une épaisseur de sol variable. Les erreurs enregistrées lors du calcul de l'humidité volumique déterminent, en grande partie, la précision qu'on peut attendre du stock ainsi estimé. En effet :

$$S_{0-z} = \int_0^z \theta(z) dz$$

avec S_{0-z} : stock hydrique entre la surface et la profondeur z . Pratiquement, on ne dispose que d'un estimateur S_{0-z} du stock hydrique, tel que :

$$S_{0-z} = \sum_0^z \theta_i \Delta z$$

avec θ_i : estimateur de θ à la profondeur i (cm)
 Δz : écart entre deux profondeurs de mesure, soit 100 mm.

D'après Poss (1991) :

$$s^2(S) = s_1^2(S) + s_2^2(S)$$

avec $s_1^2(S)$: variance liée à l'estimation des humidités volumiques
 $s_2^2(S)$: variance liée à la méthode d'intégration

Reprenant l'exemple du tube d'accès S41 et de l'étalonnage multilocal présenté précédemment, nous pouvons écrire pour une tranche de sol de 2 m d'épaisseur:

$$S_{0-200} = \theta_{10} \Delta z + \theta_{20} \Delta z + \sum_{30}^{50} \theta_i \Delta z + \sum_{60}^{200} \theta_i \Delta z$$

Sous l'hypothèse d'indépendance entre deux mesures successives sur une même verticale, alors :

$$s_1^2(S) = \sum_{10}^{200} s^2(\theta_i) \Delta z^2$$

$$s_2^2(S) = s^2(\theta_{10}) \Delta z^2 + s^2(\theta_{20}) \Delta z^2 + \sum_{30}^{50} s^2(\theta_i) \Delta z^2 + \sum_{60}^{200} s^2(\theta_i) \Delta z^2$$

Nous connaissons les variances maximisées $s^2(\theta_i)$:

$$s^2(\theta_{10}) = 2,67 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2(\theta_{20}) = 1,59 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2(\theta_{30 \text{ à } 50}) = 1,54 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2(\theta_{60 \text{ à } 200}) = 0,94 \cdot 10^{-4}$$

d'où: $s_1^2(S) = 23,0$

Le calcul de la variance $s_2^2(S)$, associée à l'intégration par la méthode des trapèzes sur une profondeur Z , s'appuie sur la formulation donnée par Poss (91) :

$$s_2^2(S) = Z^2 \Delta z^4 m^{-2} (\delta^2(\theta)/\delta(z)^2)_{\max}^2$$

$(\delta^2(\theta)/\delta(z)^2)$ représente la courbure de la fonction $\theta = f(z)$, à une côte donnée. Le calcul de $s_2^2(S)$ nécessite donc d'évaluer la courbure maximale autorisée sur un profil hydrique. Si on utilise le développement de Taylor en négligeant le terme du 4^{ème} degré, il vient :

$$\theta(z + \Delta z) = \theta(z) + \Delta z (\delta(\theta)/\delta(z)) + \Delta z^2/2 (\delta^2(\theta)/\delta(z)^2) + \Delta z^3/6 (\delta^3(\theta)/\delta(z)^3)$$

$$\theta(z - \Delta z) = \theta(z) - \Delta z (\delta(\theta)/\delta(z)) + \Delta z^2/2 (\delta^2(\theta)/\delta(z)^2) - \Delta z^3/6 (\delta^3(\theta)/\delta(z)^3)$$

d'où :

$$(\delta^2(\theta)/\delta(z)^2) = [\theta(z + \Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z - \Delta z)] \Delta z^{-2}$$

La décomposition a été faite pour 39 profils mesurés sur le site S41 en 1991 et 1992. Les valeurs de courbure maximale rencontrées sont reportées dans le tableau E, les plus fortes valeurs sont atteintes au niveau de l'horizon n°3, caractérisé par des densités apparentes plus élevées et un taux d'argile croissant. Pour $Z = 2000$ mm, $\Delta z = 100$ mm et $m = 20$, on obtient:

$$s^2_2(S) = (2000)^2(100)^4(20)^{-2}(4,9 \cdot 10^{-6})^2 = 24,0$$

La variance totale d'estimation du stock est :

$$s^2(S) = s^2_1(S) + s^2_2(S) = 47,0$$

On peut en déduire l'écart-type d'estimation et l'intervalle de confiance au seuil 95 % :

$$s(S) = 6,9$$

$$S = S \pm 13,5 \text{ mm}$$

Nous retiendrons, pour la suite de cette étude, que l'intervalle de confiance (Seuil 95 %) associé à l'estimation de l'humidité volumique avoisine $\pm 0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ et que celui associé au calcul du stock hydrique vaut $\pm 13,5$ mm.

Profondeur	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\delta^2(\theta)/\delta(z)^2$ *	3.1	4.9	4.5	3	4.2	3	1.6	2.4	1.4	1.1

(* valeurs x 10^6)

Tableau E : Courbure maximale des profils hydriques. Tube d'accès S41, 39 profils enregistrés.

NOM : PEREZ

PRENOM : PASCAL

TITRE : GENESE DU RUISSELLEMENT SUR LES SOLS CULTIVES DU SUD SALOUM.
Du diagnostic à l'aménagement de parcelle.

RESUME :

. L'analyse des différents facteurs de dégradation du milieu naturel dans le sud Saloum (Senegal) met en évidence le rôle majeur du ruissellement dans les processus actuels. Des études, menées en mode synchronique ou diachronique, permettent de quantifier les flux en présence à l'échelle de la surface élémentaire ou de la parcelle de culture.

. La variabilité spatiale des états de surface le long d'une toposéquence représentative explique, en grande partie, les différentes conditions de genèse du ruissellement rencontrées. Cependant, l'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent l'aptitude du sol au ruissellement. Les observations sous pluies naturelles confirment les résultats des expérimentations sous pluies simulées. Un modèle empirique de détermination des lames ruisselées est élaboré mais son utilisation est limitée par la forte variabilité spatiale des caractéristiques des croûtes sableuses superficielles. Leur comportement physique et hydraulique est décrit à l'aide de quelques exemples.

. Ces éléments de diagnostic permettent d'établir les principaux objectifs dévolus à une gestion du ruissellement à l'échelle de la parcelle agricole. Des techniques d'aménagement sont mises en place sur deux bassins versants élémentaires (2,5 ha). Leur influence est étudiée grâce à une analyse comparative des paramètres hydrologiques et agronomiques avant et après aménagement.

MOTS CLEFS : aptitude au ruissellement ; bassin versant élémentaire ; état de surface ; gestion agricole de l'eau ; Senegal ; simulateur de pluie ; terres agricoles.