

n° 165
3 microfiches

Nilza Maria
DOS REIS CASTRO

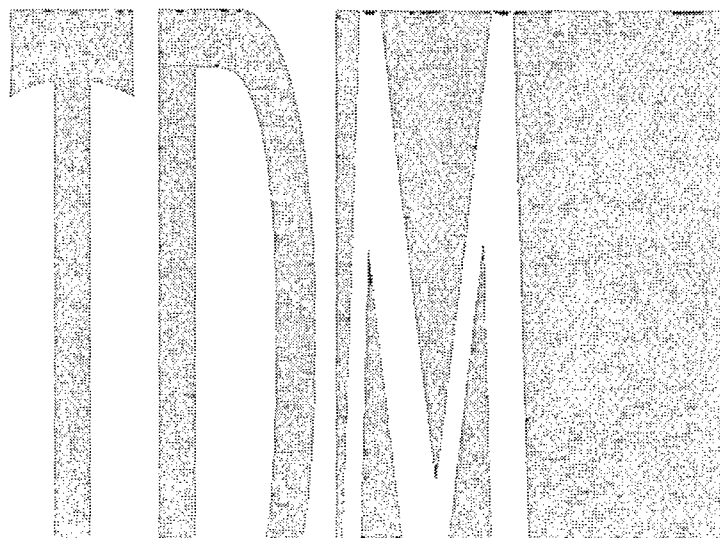
Thèses et documents microfichés

Ruissellement et érosion
sur des bassins versants de grandes cultures
du plateau basaltique du Sud du Brésil
(Rio Grande do Sul)

CRISTOM
éditions

n° 165

3 microfiches



Thèses et documents microfichés



Orstom, l'Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© ORSTOM éditions 1997, Paris

ISSN : 0767-922X

ISBN : 2-7099-1341-0

AVANT-PROPOS

Alors que cet avant-propos est situé au tout début du mémoire, sa rédaction intervient à la fin de ce travail qui m'a occupée entièrement durant plusieurs années au Brésil et durant près de trois années de ma vie en France. Au moment de remettre le manuscrit, j'ai maintenant un peu de temps pour penser à tous ceux qui m'ont aidée tout au long de ces années en même temps si intenses et denses dans l'effort et déjà si plaisantes dans le souvenir. Le système des thèses, dites « sandwich », dont la partie terrain s'effectue au Brésil et la partie traitement, interprétation et rédaction sont réalisées en France, est intéressant et utile, mais il exige de n'avoir rien oublié au départ, car il ne permet pas, excepté participation personnelle, de revenir entre temps. Or, il est excessivement difficile de quitter le Brésil avec toutes les données nécessaires et, au cours de l'avancement du travail, bien des points intéressants découverts sont mis de côté et non traités par manque de compléments d'informations. A cela s'ajoutent, au moment des acquisitions de données de terrain, les difficultés de gestion des crédits locaux de recherche, dont on ne sait jamais, l'inflation et la mouvance gouvernementale aidant, s'ils seront assurés et suffisants durant le temps des opérations. Malgré ces aléas, et grâce à l'aide et à la bonne volonté de certaines personnes et organismes, ce travail a pu être mené à son terme de manière satisfaisante. Aussi, ai-je le devoir et également le grand plaisir de rétribuer, par mes remerciements sincères, tous ceux, et ils sont nombreux, qui m'ont aidée.

Je voudrais tout d'abord, faire part de ma très grande reconnaissance à la personne qui, la première, m'a orientée vers ce travail et m'a ouvert la voie qui a conduit jusqu'à cette thèse, je veux parler du professeur Marc Bordas. Cela a commencé dès mon arrivée à l'IPH, Institut de Recherches Hydrauliques de l'Université Fédérale do Rio Grande do Sul, en 1989. Le professeur M. Bordas m'a de suite conseillée dans la poursuite de mes études de *Mestrado* et a été mon orientateur tout au long de mon cursus à l'IPH. C'est par son intermédiaire que je suis entrée dans le projet « Potiribu » du CNPq-ORSTOM et que j'ai fait la connaissance de Pierre Chevallier, chercheur hydrologue de cet Institut. Le professeur Bordas est brésilien et français. Il personnifie donc les accords et les liens particuliers qu'ont, entre eux, ces deux pays. Il a bien voulu faire partie de mon jury, malgré la gravité de son état de santé et je l'en remercie de tout mon coeur ainsi que son épouse Mérian.

Je voudrais ensuite chaleureusement remercier Pierre Chevallier. C'est lui qui est à l'origine de cet amour du terrain, survenu à la suite des nombreuses tournées sur le plateau basaltique du sud-ouest « gaúcho », et ce malgré les piquûres de « borrachudos », insectes tenaces, la terre rouge et glaiseuse des terras roxas, dont aucune machine ni poudre à laver arrivent à effacer les traces, les températures proches de zéro, au petit matin des mesures hivernales et les chaleurs accablantes des étés continentaux. C'est P. Chevallier qui a eu l'idée du sujet de cette thèse et qui est au départ de ce long séjour strasbourgeois. Il fait également partie du jury, car il a dédié une grande partie de son temps durant quatre années au Brésil à la constitution des données dans le cadre du projet et une partie de son temps disponible, une fois rentré en France, à l'encadrement de ce travail. J'ai, envers lui, une dette que la réalisation de ce mémoire, n'efface pas. Qu'il soit assuré de mon amitié.

Le professeur Michel Mietton a accepté, malgré ses lourdes charges, d'être le directeur de cette thèse, et m'a donné, au CEREG, les moyens à sa disposition pour la mener à bien. Qu'il en soit, ici, sincèrement remercié.

Véronique Auzet a été depuis le premier jour de mon arrivée en France où elle m'a accueillie, hébergée, guidée dans le labyrinthe des démarches administratives si compliquées, jusqu'à aujourd'hui, la conseillère, l'orientatrice et la résolution assurée des problèmes de tous ordres. Que de difficultés résolues, tant en ce qui concerne les éternelles corrections de français, que des recentrages du travail de thèse. Avec P. Chevallier c'est la véritable orientatrice de ce travail, c'est à elle que je dois d'avoir pu mener à terme ce mémoire. Je la remercie

également d'avoir été à l'origine de mon amour pour la cuisine alsacienne, dont les précieuses recettes, vont pouvoir, au delà des traditionnels « feijoadas » et « churrascos », agrémenter les soirées d'invitation à mon retour au pays.

Je ne pourrais pas oublier de remercier Jean Claude Leprun, pédologue de l'ORSTOM. Sa connaissance et son amour pour le Brésil, où il a passé 14 ans, m'ont été d'un grand bénéfice. J. C. Leprun m'a encouragée depuis sa première visite sur le terrain de cette thèse et j'ai eu la chance qu'il soit à Strasbourg pendant mon séjour. J'ai pu bénéficier de sa précieuse bibliographie, des ses conseils, de la compréhension et de la correction de mon français-brésilien et surtout de sa bonne humeur contagieuse. Je lui sais aussi gré de sa présence lorsque la *saudade* m'a rattrapée. Il a accepté de faire partie de mon jury et je lui en suis reconnaissante.

Le professeur Joël Humbert, hydrologue expérimenté, a accepté de faire partie du jury, et je l'en remercie vivement

Une place spéciale doit être réservée à Daniel Blumenroeder du CEREG qui m'a accueilli très gentiment dès mon arrivée et à qui je dois, outre l'essentiel de ce que je sais aujourd'hui en informatique pratique, les premières corrections de mes balbutiements en français, un libre accès à son bureau de travail, le prêt aimable de divers meubles et matériel et la découverte d'une de ses spécialités, le délicieux lapin à la moutarde. Qu'il sache que son souvenir restera toujours vivace en moi.

C'est avec beaucoup de plaisir, que je tiens à remercier tous mes amis de l'IPH, interlocuteurs de fréquentes discussions, collaborateurs de nombreux travaux de terrain et de publications, pour leur constant soutien, et leur amitié durant toute la préparation brésilienne et les fréquents appels au secours ultérieurs. Je pense particulièrement aux collègues chercheurs Mario Mendiondo, Fernando Genz, Javier Tomazela et Alfonso Risso, et aux techniciens Cesar Gonsalves, Agustim Sanches y Vacas, Raup, Bruno, Cleonei (Chicão), Pedrinho, Marino, Barbosa (décedé), pour le temps et la qualité de leur travail sur le terrain et au laboratoire et aussi, et combien cela est important, pour leur amitié et leur présence attentive de tous les instants partagés. A ces remerciements je joins les chauffeurs de l'IPH, Orlando, Carlinhos et Mario pour leur disponibilité au volant et à la cuisine. Je n'oublierai pas les stagiaires de l'IPH, compagnons de terrain et artisans du dépouillement des données : Lavitor, Denise, Domingos, Adelmira. J'ai une pensée toute spéciale pour les agriculteurs du bassin du Donato : Antoninho Zambra, Fatima Zambra, Carlos Zambra; Neldo Costa Beber, Chico Turcato, qui ont accepté que les manipulations lourdes soient effectuées sur leurs terres et qui nous ont toujours très bien accueillis, en particulier la famille Zambra. A ces remerciements, je joins les agriculteurs qui ont bien voulu répondre à mon enquête de terrain en décembre 1994 : Edemar, Darlan, Scarpeline, João, Fátima Zambra, Euzébio, Sadi.

Merci à tous les observateurs bénévoles qui ont travaillé pour nous : Carlos Zambra, Fátima Zambra, Maurício, Picolé, Sadi, et tous les nombreux autres que je pourrais oublier. Que la famille Miller de l'Hôtel de Pejuçara soit remerciée pour leur accueil toujours très chaleureux et pour leur aide.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui m'ont consacré une partie de leur temps précieux. Je pense tout particulièrement à François Delclaux (ORSTOM), qui, malgré ces occupations, m'a initiée aux logiciels ANSWERS et GRASS durant près de trois semaines à Montpellier. Je pense également à Christian Roth (Université de Berlin), Jawdat Touma (ORSTOM), Eric Roose (ORSTOM), Hélène Lubès (ORSTOM) statisticienne, Yann L'Hôte (ORSTOM) pour m'avoir appris le programme POH 126 et enfin à Pedro Luis de Freitas chercheur de l'EMBRAPA en accueil à Montpellier.

A tous mes amis de France et du Brésil : André, Miriam et Patrícia à Montpellier pour leur soutien moral, et les discussions scientifiques communes et les constants hébergements à Montpellier; à toute la communauté brésilienne de Strasbourg : Rita, Vilmar et Martina, Marlene et Moura, Monica, Maria et Fernando, Rosana et Guines, Omar et Raquel, et tout spécialement mes amies et compagnons quotidiens de vie et de philosophie, Lucila et Lindi. A mes voisins Pagona, Uries et Lucien qui m'ont si bien accueillie. Aux collègues du CEREG Jose, Brahim et une mention toute spécialement à Philippe, Hamid et Boutheina, qui m'ont consacré beaucoup de leur temps de travail et dont je n'oublierai pas l'amitié.

- qui ont en partie financé cette recherche : CNPq pour la concession de la bourse d'étude et le financement du Projet Potiribu; FAPERGS pour le financement du Projet Potiribu; IPH pour le financement du Projet Potiribu; l'UR 24 (ORSTOM) pour les missions en France, en Allemagne et au Sénégal et le financement du Projet Potiribu; l'Ambassade de France et la Représentation de l'ORSTOM à Brasília pour la mission au Brésil de Véronique Auzet ;

- au CEREG pour son accueil durant trois ans à Strasbourg ;

- à l'IPH pour le soutien apporté aux travaux de terrain et pour l'appui moral constant de ces directeurs, Lawson Beltrami et Raul Dorfman ;

- à l'ORSTOM pour son accueil et l'ouverture de ses laboratoires à Montpellier ;

- à l'UNIJUI, pour l'utilisation du laboratoire des sols et le soutien de Leonir ; la COTRIJUI et en particulier Rivaldo Dhein et le technicien Cesar ; la COTICRUZ et son directeur José de Vargas ;

- à la Préfecture de Pejuçara pour son soutien au projet entre 1989 et 1995 ;

- et enfin à la Préfecture de Porto Alegre durant l'administration de Olivio Dutra pour l'octroi de la bourse intégrale d'étude auprès de l'Alliance Française.

Enfin, mis en fin de liste, mais situés tout au fond du coeur, un grand merci à ma famille pour tant d'efforts consentis et d'affection donnée et à Cristiano, dont le séjour strasbourgeois a tant souffert de mon travail de thèse. Qu'ils sachent que leurs encouragements au travers de leurs lettres et des conversations téléphoniques nocturnes, car moins chères, mais toujours trop brèves, ont été pour moi un réconfort dans les moments difficiles et l'assurance d'un avenir confiant et partagé à mon retour au Brésil.

RESUME

Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique du Sud du Brésil (Rio Grande do Sul)

Au nord-ouest du Rio Grande do Sul, l'érosion, consécutrice à un défrichement intense et à une mécanisation agricole particulièrement importante depuis le développement de la production du soja, se manifeste par la couleur rouge foncée sans équivoque des cours d'eau et par l'apparition de ravines très importantes, de section plurimétrique, formant de véritables saignées dans le paysage.

Les objectifs de cette étude, menée dans le cadre du projet POTIRIBU (ORSTOM, IPH, CNPq), sont de préciser le fonctionnement hydro-sédimentologique d'un bassin versant représentatif et de comparer différents types de préparation du sol du point de vue de leurs effets sur le ruissellement et l'érosion.

L'étude a été menée principalement à deux échelles, celle de microparcelles et celle des bassins versants emboîtés d'Anfiteatro et du Donato. Les données ont été acquises de décembre 1989 à décembre 1994.

A l'échelle de la parcelle, des mesures de ruissellement et de perte en sol ont été réalisées sous pluies simulées, à différentes périodes du cycle cultural et pour trois types de préparations du sol (labour profond à la charrue à soc, labour à la charrue à disques, *semis direct*) et sous pluies naturelles de août 1992 à septembre 1993.

Les trois préparations se distinguent nettement pour le ruissellement et suivant la période du cycle cultural. Juste après le semis, les coefficients de ruissellement à cette échelle sont supérieurs à 50% dans le cas de la préparation à la charrue à disques et du semis direct, et de 25% dans le cas du labour profond à la charrue à soc. En revanche, trois mois plus tard, les valeurs sont supérieures à 50% quel que soit le type de préparation. Ces différences sont à imputer principalement aux états de surface, et leur évolution éventuelle à la dégradation sous l'effet des pluies et à leur diminution de rugosité. Les résultats des simulations de pluie montrent que, dans des conditions de taux de couverture végétale identiques, les pertes en sol sont les plus faibles (3 g/m²) dans le cas du semis direct, les plus fortes dans le cas des préparations à la charrue à disques (82 g/m²) ou à soc (79 g/m²). L'effet du couvert végétal paraît ainsi surtout net sur les pertes en sol.

Les résultats obtenus sont utilisés pour évaluer l'infiltrabilité du sol et en ébaucher une typologie en fonction de la préparation du sol, de la durée écoulée depuis le semis, de l'état hydrique initial et des états de surface du sol. Cette typologie, qui doit pouvoir être complétée et précisée, est conçue pour permettre l'extrapolation de l'infiltrabilité, variable d'entrée importante des modèles d'érosion (qui ne tiennent souvent pas compte de l'influence des interactions cultures/climat/sol).

A l'échelle du bassin, trois aspects sont abordés : des bilans hydro-sédimentologiques classiques pour lesquels on ne dispose malheureusement que de peu de données de qualité, une évaluation de la contribution de la principale ravine aux pertes en sol et le test de deux modèles, l'un empirique « MUSLE » dérivé de l'équation de Wischmeier, l'autre à bases physiques « ANSWERS », disponible sur le SIG GRASS.

Les résultats concernant l'évolution de la ravine entre juillet 1991 et novembre 1993 témoignent de l'importance de ce type d'érosion, qui peut être évaluée à 7 t/ha/an si on rapporte les volumes érodés à la surface en amont. C'est loin d'être négligeable, particulièrement si l'on considère que ce type de ravine est aussi un collecteur directement relié au réseau hydrographique.

Les tests des modèles amènent à rejeter le modèle empirique MUSLE, qui ne prend pas en compte le fonctionnement. Le test du modèle ANSWERS est davantage intéressant pour l'aspect ruissellement, car il permet de prendre en compte, à partir de la typologie, les effets liés à la préparation du sol. Pour les pertes en sol, les données dont nous disposons à l'échelle du bassin sont insuffisantes.

RESUMO

Escoamento e erosão em bacias vertentes de grandes culturas do planalto basáltico do Sul do Brasil (Rio Grande do Sul)

Ao noroeste do Rio Grande do Sul, a erosão, associada a um deflorestamento intenso e a uma mecanização agrícola particularmente intensa desde o desenvolvimento da produção da soja, se manifesta pela cor vermelho-escura dos cursos d'água e pela aparição de grandes voçorocas.

Os objetivos deste estudo, situado no quadro do projeto POTIRIBU (ORSTOM, IPH, CNPq), são de precisar o funcionamento hidro-sedimentológico de uma bacia vertente representativa e de comparar os efeitos sobre o escoamento e a erosão dos diferentes preparos do solo.

O estudo foi feito em duas escalas : microparcels e duas bacias embutidas, Anfiteatro e Donato. Os dados foram coletados de dezembro de 1989 a dezembro de 1994.

Na escala da parcela, foram realizadas medidas de escoamento e perda de solo sob chuvas simuladas, em diferentes períodos do ciclo cultural (soja e aveia) e para três tipos de preparo de solo (escarificação com pé-de-pato à 50 cm de profundidade, lavração com grade de discos à 20 cm de profundidade e plantio direto), e sob chuvas naturais.

Os três preparos se diferenciam nitidamente pelo escoamento, e segundo o período do ciclo cultural. Logo após o plantio, os coeficientes de escoamento nesta escala são superiores a 50% no caso do preparo com grade de discos, e do plantio direto; e de 25% no caso do preparo com pé-de-pato. Por outro lado, três meses após o plantio, os valores são superiores a 50% para todos os tipos de preparos de solo. Estas diferenças são explicadas principalmente devido ao estado de superfície do solo e de sua evolução (maior degradação da superfície do solo e diminuição da rugosidade). Os resultados de simulação de chuvas mostra que, nas condições de mesma cobertura do solo, as perdas de solo são menores (3 g/m²) para as parcelas preparadas com o sistema plantio direto, mais fortes no caso do preparo com a lavração a discos (82 g/m²) ou com o pé-de-pato (79 g/m²). Esses resultados mostram que o efeito da cobertura vegetal é nítido sobre as perdas de solo.

Os resultados obtidos são utilizados para avaliar a infiltrabilidade do solo (utilizando a equação de Green e Ampt) e fazer uma tipologia desta variável baseada no tipo de preparo de solo, na data das operações agrícolas, no estado inicial de umidade e no estado superficial do solo. Esta tipologia, que deve ser completada e verificada, é feita com o objetivo de permitir uma extrapolação da infiltrabilidade do solo, variável de entrada importante nos modelos de erosão que geralmente não consideram a influência das interações culturais/clima/sol.

Na escala da bacia, três aspectos são abordados : os balanços hidro-sedimentológicos clássicos dos quais, infelizmente, dispomos de um número reduzido de dados, uma avaliação da contribuição às perdas de solo da principal voçoroca e o teste de dois modelos, um empírico a MUSLE derivado da equação de Wischmeier, outro a base física ANSWERS, disponível sobre o sistema SIG-GRASS.

Os resultados referentes a evolução da voçoroca entre julho de 1991 e novembro de 1993 ressaltam a importância deste tipo de erosão, que pode ser avaliada à 7 ton/ha por ano se consideramos a área à montante da voçoroca. Este resultado não pode ser negligenciado, principalmente se considerarmos que este tipo de voçoroca é também um canal diretamente ligado à rede de drenagem.

O teste dos modelos nos levam a rejeitar o modelo empírico, MUSLE, que não leva em conta as interações culturais/clima/sol. O teste do modelo ANSWERS é mais interessante para estimar o escoamento. Este modelo utilizado a partir da tipologia estabelecida, permite-se levar em consideração os efeitos ligados ao preparo do solo. Para as perdas de solo, os dados que nos são disponíveis na escala da bacia são insuficientes para permitir uma comparação.

ABSTRACT

Runoff and erosion in cultivated catchments of the basaltic plateau in the South of Brazil (Rio Grande do Sul)

Located on basaltic plateau with deep ferralitic soils, the south of Brazil is one of the most important agricultural regions of the country. A major problem in this region is soil erosion which, amongst other effects, causes sedimentation in the reservoirs of hydroelectric barrages. This study, which focuses on nested catchments at Pejuçara, not far from the town of Ijuí, was done within the framework of the POTIRIBU Project, an international collaboration between the Brazilian IPH and CNPq and the French ORSTOM.

This soil erosion, which affects the *latossolos roxos*, takes place in agricultural fields through sheet erosion on terraces and is associated with deposits in drains, rills and gully networks. The erosion system, which is located near drain outlets, farm boundaries, track and road sides and in the upper parts of thalwegs, is connected to the river system.

The results obtained for the 3 types of soil preparation at plot scale were fairly different for the 3 types of soil preparation. Just after sowing, the runoff coefficients were >50% in the cases of disc plow preparation and no-tillage, and 25% in the case of chisel plow. Nevertheless, the runoff coefficient values were >50% in all cases three months later. These differences depend mainly on the state of the soil surface, their evolution on the degradation under rainfall and on the decreasing surface roughness. The effect of the vegetation cover appears principally on the soil loss: in the same condition of the vegetation cover, it was of the order of 3 g/m² in case of no-tillage and about 80 g/m² in case of chisel or disc plow.

The rainfall simulation results were used to propose a typology of soil infiltrability based on soil preparation, time since the sowing, initial soil moisture status and stages of the soil surface. This classification should be completed and precised, in order to allow an estimation of the infiltrability, a very important factor in erosion models.

At basin scale, three aspects are considered: the classic hydro-sedimentologic budget, for which we have unfortunately only few data, an evaluation of the soil loss contribution of the main gully, and the test of two erosion models, MUSLE and the ANSWERS version available on the GIS GRASS.

The evolution of the main gully from July 1991 to November 1993 shows the importance of this type of erosion, which is of the order of 7 t ha⁻¹ yr⁻¹. It is very important to take it into account, particularly if we consider that such a gully is also a collector connected to the hydrologic system.

According to the test, the empirical MUSLE model should be rejected. The test ANSWERS gives interesting results for runoff evaluation when we introduce the previous typology. For the soil loss, we have not enough data available at the basin scale.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
LISTE DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES PHOTOS	8
LISTE DES ANNEXES.....	8
INTRODUCTION	9

PARTIE 1

MISE EN VALEUR AGRICOLE ET ÉROSION AU SUD DU BRÉSIL.....	15
1.1 INTRODUCTION	17
1.2 LE CADRE PHYSIQUE RÉGIONAL.....	19
1.2.1 <i>Le climat</i>	19
1.2.2 <i>Le relief</i>	23
1.2.3 <i>Le substratum</i>	23
1.2.4 <i>Les sols</i>	23
1.2.5 <i>La végétation</i>	25
1.3 LE CADRE HISTORIQUE : MODES DE COLONISATION ET CONSEQUENCES SUR LES STRUCTURES AGRAIRES	25
1.3.1 <i>Guaranis et portugais</i>	25
1.3.2 <i>Colonisations italienne et allemande</i>	26
1.4 LE CADRE AGRAIRE ACTUEL.....	29
1.4.1 <i>L'occupation du sol</i>	29
1.4.2 <i>Les deux systèmes de préparation du sol</i>	29
1.5 CONCLUSION	35

PARTIE 2

SITES ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	37
2.1 LES BASSINS.....	39
2.1.1 <i>Localisation</i>	39
2.1.2 <i>Les bassins emboîtés</i>	40

2.1.3	<i>Topographie et réseau hydrographique</i>	40
2.1.4	<i>Les sols</i>	43
2.1.5	<i>La végétation et l'occupation du sol</i>	43
2.1.6	<i>Les pluies</i>	45
2.2	LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL	47
2.2.1	<i>Mesure des précipitations</i>	49
2.2.2	<i>Choix des sites</i>	49
2.2.3	<i>Mesure d'infiltration et d'érosion sous pluie simulée</i>	50
2.2.4	<i>Mesure d'infiltration et d'érosion sur microparcelles sous pluies naturelles</i>	56
2.2.5	<i>Caractérisation de la surface du sol</i>	56
2.2.6	<i>Stations de mesure</i>	58
2.2.7	<i>La grande ravine</i>	59

PARTIE 3

ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION À L'ÉCHELLE DE MICROPARCELLES DE 1 M², SOUS PLUIES SIMULÉES ET SOUS PLUIES NATURELLES.....61

3.1	LES MICROPARCELLES SOUS PLUIE SIMULEE	63
3.1.1	<i>Résultats globaux</i>	63
3.1.2	<i>Analyse détaillée des différentes campagnes de simulations de pluie</i>	73
3.1.3	<i>Analyse de l'infiltrabilité</i>	81
3.1.4	<i>Principaux facteurs influençant le ruissellement et l'érosion</i>	86
3.1.5	<i>Synthèse et discussion : proposition d'une approche typologique</i>	95
3.2	LES MICROPARCELLES SOUS PLUIES NATURELLES	99
	3.2.1 <i>Evolution du ruissellement et de la concentration en sédiments durant l'année agricole 1992/1993</i>	99
	3.2.2 <i>Comparaison avec la pluie simulée</i>	103
	3.2.3 <i>Conclusion</i>	107

PARTIE 4

ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION À L'ÉCHELLE DES BASSINS VERSANTS EMBOÎTÉS : ANFITEATRO (14 HA) ET DONATO (1,1 KM²)109

4.1	PLUVIOMETRIE	111
4.1.1	<i>Analyse des pluies mensuelles et journalières entre novembre 1989 et décembre 1994</i>	111
4.1.2	<i>Analyse des intensités de pluie de décembre 1989 à décembre 1994</i>	114
4.2	ÉCOULEMENTS SUR LES BASSINS D'ANFITEATRO ET DE DONATO	117
4.2.1	<i>Traitement des données hydrologiques</i>	117
4.2.2	<i>Bilan hydrologique annuel partiel (1990 - 1994)</i>	118
4.2.3	<i>Bilan hydrologique mensuel partiel</i>	120

4.2.4	<i>Bilan hydrologique journalier</i>	125
4.2.5	<i>Discussion relative au fonctionnement hydrologique du bassin</i>	127
4.3	EROSION	131
4.3.1	<i>Description détaillée des formes d'érosion dans le bassin d'Anfiteatro et de Donato</i>	131
4.3.2	<i>Observation de la voçoroca grande entre 1991 et 1993</i>	139
4.3.3	<i>Mesures du débit solide de la rivière Donato pour deux crues</i>	147
4.3.4	<i>Mesures du débit solide de la rivière Anfiteatro pour une crue</i>	151
4.3.5	<i>Relation entre débit liquide et concentration en sédiment</i>	151
4.4	APPLICATION DU MODELE MUSLE	155
4.5	APPLICATION DU MODELE DISTRIBUE ANSWERS	157
4.5.1	<i>Description du modèle ANSWERS</i>	157
4.5.2	<i>Variables d'entrées</i>	161
4.5.3	<i>Variables du SIG</i>	161
4.5.4	<i>Premiers résultats</i>	163
	CONCLUSION	177
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	183
	ANNEXES	191

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les cinq régions du Brésil, les états et leurs capitale (Théry, 1989)	13
Figure 2. Régionalisation de la prédisposition aux risques sédimentologiques au Brésil (Bordas <i>et al.</i>)	14
Figure 3. Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations à Cruz Alta (1945-1985), minimum et maximum estimé pour une fréquence décennale	20
Figure 4. Courbe Intensité-Durée-Fréquence (Poste Ijuí-IPAGRO, 1963-1988) (Chevallier, 1991)	20
Figure 5. Formes d'événements pluvieux (Poste Ijuí-IPAGRO, 1963-1988) (Chevallier, 20)	24
Figure 6. Régions physiographiques du Rio Grande do Sul (Brasil, 1973)	24
Figure 7. Superficie de la forêt originelle du début du siècle jusqu'en 1965 dans l'Etat du Paraná (Maak, 1968)	25
Figure 8. Localisation de la région d'étude	39
Figure 9. Distribution des exploitations de Pejuçara selon leur taille (source : Secretaria da Fazenda de Pejuçara, 1993)	40
Figure 10. Carte des bassins d'Anfiteatro et du Donato	41
Figure 11. Toposéquence et description sommaire des sols d'Anfiteatro (Boulet <i>et al.</i> 1993)	44
Figure 12. Hauteurs mensuelles des pluies sur le bassin de Donato de 1989 à 1994 (pluviographe 11) et moyenne (Poste de Cruz Alta, 1945 à 1985)	46
Figure 13. Localisation des dispositifs expérimentaux sur le bassin de Donato	47
Figure 14. Simulateur ORSTOM	52
Figure 15. Schéma du protocole des campagnes de pluies simulées	54
Figure 16. Séquence des intensités et durées de pluie simulée	54
Figure 17. Stations de mesures d'Anfiteatro et du Donato	60
Figure 18. Relation entre le couvert végétal et la concentration en sédiments	65
Figure 19. Relation entre le couvert végétal et sédiments les pertes en sol	65
Figure 20. Evolution de l'intensité du ruissellement et de la concentration en sédiments de la troisième campagne de simulation de pluie (microparcelle B)	74
Figure 21. Relation entre la succion du sol et l'humidité volumique - θ (ψ) - sur le bassin d'Anfiteatro de 0 à 20 cm de profondeur (31/03/1992)	77
Figure 22. Profils de teneurs en eau avant chaque pluie simulée pour les six campagnes de simulations de pluie	79
Figure 23. Ajustement des paramètres de Green et Ampt, K_{GA} et h	84
Figure 24. Relation entre lame d'eau ruisselée et hauteur totale de pluie (pluie simulée)	88
Figure 25. Relation entre K_{GA} et coefficient d'infiltration (pluie simulée)	88
Figure 26. Relation entre K_{GA} et coefficient d'infiltration (Chevallier, 1990) (pluie simulée)	88
Figure 27. Relation entre hauteur de la lame d'eau ruisselée et ruissellement retardé	88
Figure 28. Relation entre hauteur de la lame d'eau ruisselée et pluie d'imbibition	93
Figure 29. Relation entre hauteur de la lame d'eau ruisselée estimée et celle mesurée pour les pluies simulées.	93

Figure 30. Relation entre concentration totale en sédiments et coefficient de ruissellement	93
Figure 31. Relation entre concentration totale en sédiments estimée et celle mesurée pour les pluies simulées	93
Figure 32. Typologie de l'infiltrabilité du sol	97
Figure 33. Distribution des hauteurs de l'eau précipitée et ruisselée et du taux de couverture des microparcelles sous pluies naturelles (1992/1993)	101
Figure 34. Relation entre concentration en sédiments et coefficients de ruissellement pour les pluies simulées et naturelles	104
Figure 35. Relation entre hauteur de la lame d'eau estimée et mesurée pour les pluies naturelles	105
Figure 36. Relation entre K_{GA} et coefficient de ruissellement pour les pluies naturelles	105
Figure 37. Relation entre concentrations en sédiments estimée et mesurée pour les pluies naturelles	105
Figure 38. Relation entre la hauteur moyenne mensuelle de pluie (série de 16 ans) et de l'ETP moyenne	113
Figure 39. Distribution de la hauteur mensuelle de pluie pour la période de 11/1989 à 12/1994	113
Figure 40. Distribution de (P-ETP) sur la période étudiée (11/1989 à 12/1994)	113
Figure 41. Distribution de la hauteur journalière de la pluie pendant la période étudiée (11/1989 à 12/1994)	113
Figure 42. Distribution des hauteurs de pluie par classes d'intensités	116
Figure 43. Séparation des écoulements. Exemple de la cure du Donato 25/04/1994	118
Figure 44. Distribution de l'écoulement de base mensuel et l'ETP au cours de la période étudiée (01/1990 à 12/1992)	122
Figure 45. Relation entre lame d'eau mensuelle ruisselée et hauteur mensuelle de pluie	122
Figure 46. Distribution des hauteurs de la lame journalière écoulée dans le bassin d'Anfiteatro	126
Figure 47. Distribution des hauteurs de la lame journalière écoulée dans le bassin du Donato	126
Figure 48. Relation entre hauteur de la lame d'eau journalière ruisselée et hauteur journalière de pluie	126
Figure 49. Relation entre lame ruisselée journalière sur les bassins et celle ruisselée sur la microparcelle	126
Figure 50. Cartographie du réseau des rigoles (50a d'Anfiteatro, 50b du Donato)	132
Figure 51. Relief de la ravine le 17/07/1991 en courbe de niveau	141
Figure 52. Relief de la ravine le 13/07/1992 en courbe de niveau	143
Figure 53. Relief de la ravine le 18/11/1993 en courbe de niveau	145
Figure 54. Hyétogramme, hydrogramme et concentration en sédiments lors de l'événement du 18 et 19/06/1991 au bassin du Donato	152
Figure 55. Hyétogramme, hydrogramme et concentration en sédiments lors de l'événement du 06/03/1991 au bassin du Donato	152
Figure 56. Hyétogramme, hydrogramme et concentration en sédiments lors de l'événement du 18 et 27/04/1993 au bassin d'Anfiteatro	152

Figure 57. Relation débit liquide - concentration en sédiments pour le bassin du Donato	153
Figure 58. Listes des principales relations utilisées par le modèle ANSWERS (d'après Beasley et Huggins, 1982)	159
Figure 59. Variables d'entrées du modèle ANSWERS (source: De Roo <i>et al.</i> , 1989)	161
Figure 60. Division des parcelles (Bassin de Donato)	166
Figure 61. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement b	171
Figure 62. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement c	171
Figure 63. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement d	171
Figure 64. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement f	172
Figure 65. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement g	172
Figure 66. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement h	172
Figure 67. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement i	173
Figure 68. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement j	173
Figure 69. Concentration en sédiment mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement b	173
Figure 70. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement c	174
Figure 71. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement d	174
Figure 72. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement f	174
Figure 73. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement g	175
Figure 74. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement h	175
Figure 75. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement i	175
Figure 76. Concentration en sédiments mesurée et estimée par ANSWERS pour l'événement j	176

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.	Valeurs des indices d'érosivité des pluies R pour différents climats	20
Tableau II.	Variations saisonnières de la durée des pluies (Poste Ijuí-IPAGRO, 1943-1976) (Chevallier, 1991)	45
Tableau III.	Caractéristiques des pluviographes et des pluviomètres du bassin du Donato	49
Tableau IV.	Caractéristiques de différents simulateurs de pluie	51
Tableau V.	Protocole des pluies simulées	53
Tableau VI.	Résultats globaux de chaque campagne de simulation de pluie	65
Tableau VII.	Informations sur les différentes campagnes de simulation de pluie	65
Tableau VIII.	Résultats de la troisième campagne de simulation de pluie	76
Tableau IX.	Résultats des paramètres K_{GA} et h estimées par l'équation de Green et Ampt (1911)	85
Tableau X.	Caractéristiques des microparcelles utilisées	89
Tableau XI.	Variabilité des paramètres utilisées dans le modèle statistique pour les microparcelles sous pluies simulées	90
Tableau XII.	Analyse de la variance de la régression globale du ruissellement total	91
Tableau XIII.	Analyse de la variance de la régression globale de la concentration totale en sédiments	92

Tableau XIV.	Bilan annuel des coefficients de ruissellement et pertes en sol pour les microparcelles sous pluies naturelles (22/08/1992 - 18/09/1993)	99
Tableau XV.	Coefficients de ruissellement et pertes en sol sur des parcelles de 77 m ² , Ijuí (1978-1981)	99
Tableau XVI.	Distribution des hauteurs de pluie journalières (01/12/1989 à 19/12/1994)	114
Tableau XVII.	Bilans hydrologiques annuels (partiels) des bassins versants de Donato et d'Anfiteatro (mm)	119
Tableau XVIII.	Bilan hydrologique partiel sur le bassin versant de Donato e d'Anfiteatro en pourcentage de la hauteur de pluie tombée	119
Tableau XIX.	Classification des débits maximums du bassin de Donato (hors lacunes)	123
Tableau XX.	Classification des débits maximums du bassin d'Anfiteatro (hors lacunes)	123
Tableau XXI.	Coefficient de ruissellement, bilan annuel pour les différentes échelles sous pluies naturelles	128
Tableau XXII.	Volumes de référence et pertes en terre de la <i>voçoroca grande</i>	139
Tableau XXIII.	Caractéristiques des événements pluvieux de Donato et d'Anfiteatro	148
Tableau XXIV.	Caractéristiques des écoulements de Donato et d'Anfiteatro	148
Tableau XXV.	Caractéristiques des débits solides de Donato et d'Anfiteatro	149
Tableau XXVI.	Caractéristiques des événements mesurées <i>in situ</i> et estimées par la MUSLE	156
Tableau XXVII.	Lames ruisselées calculées par ANSWERS en tenant compte des différents types de sols et mesurées (Bassin de Donato)	164
Tableau XXVIII.	Lames ruisselées calculées par ANSWERS en tenant compte des types et dates de préparations du sol et en adaptant les paramètres d'infiltration à la structure particulière des sols et lames ruisselées observées (Bassin du Donato)	165
Tableau XXIX.	Observation concernant l'OPS sur le bassin du Donato à l'occasion des événements simulés par ANSWERS	167
Tableau XXX.	Lames ruisselées calculées par ANSWERS en tenant compte des types de préparations et des OPS et lames ruisselées mesurées (Bassin de Donato)	168
Tableau XXXI.	Pertes en sol calculées par ANSWERS sur le Bassin de Donato	170

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 :	Campagne 3 avant la première pluie	69
Photo 2 :	Campagne 3, 20 minutes après la 1 ^{ère} pluie	69
Photo 3 :	Campagne 3, 30 minutes après la 1 ^{ère} pluie	69
Photo 4 :	Campagne 3, 40 minutes après la 1 ^{ère} pluie	71
Photo 5 :	Campagne 3 après la 1 ^{ère} pluie	71
Photo 6 :	Campagne 3 avant la 2 ^{ème} pluie	71
Photo 7 :	Campagne 3, 30 minutes après la 2 ^{ème} pluie	71
Photo 8 :	Campagne 3 après la 2 ^{ème} pluie	71
Photo 9 :	Dépôt de sédiments dans un drain en amont de bourrelet, traces de ruissellement diffus sur la parcelle	135
Photo 10 :	Ravinement en sortie des banquettes en bord de piste	135
Photo 11 :	Détail de la chute en sortie de banquette en bord de piste	135
Photo 12 :	Aval d'Anfiteatro, partie amont de la grande ravine	137
Photo 13 :	Section principale de la grande ravine (<i>voçoroca grande</i>)	137
Photo 14 :	Grande ravine (17/12/1994)	137

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 :	Analyses chimiques et granulométriques de trois sites au bassin du Donato	193
Annexe 2 :	Fiche standardisée de l'observation des états de surface du sol	195
Annexe 3 :	Liste des jaugeages et des méthodes utilisées pour l'établissement de la courbe de tarage des bassins d'Anfiteatro et de Donato (extrait de Chevallier, 1993)	197
Annexe 4 :	Méthode manuelle simple pour collecter et analyser les échantillons en suspension dans des petites rivières	209
Annexe 5 :	Exemple de calcul des pertes en sol en suspension instantanées et totales	211
Annexe 6 :	Evolution de l'intensité de ruissellement et de la concentration en sédiments des campagnes de simulations de pluie 1, 2, 4, 5 et 6	213
Annexe 7 :	Courbes pour des profondeurs variées du profil d'Anfiteatro	219
Annexe 8 :	Matrice de corrélation des paramètres explicatifs du ruissellement et de l'érosion	221
Annexe 9 :	Données de précipitations de l'année culturale 1992/1993, lame d'eau ruisselée et concentration en sédiments des microparcelles sur pluie naturelle	223

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le contexte et la nature du problème

La région sud du Brésil, constituée par les états du Paraná, de Santa Catarina et du Rio Grande do Sul (fig.1), se caractérise par une grande activité agricole, traditionnelle depuis le IX^{ème} siècle avec les premiers habitants de la région, les Indiens guaranis. La bonne qualité physique des sols et la disponibilité de l'eau pendant toute l'année grâce à une distribution des pluies très homogène (entre 120 et 150 mm par mois) ont sans doute été les raisons principales de l'établissement dans cette région des émigrants européens, en particulier italiens et allemands, au début du XIX^{ème} siècle.

Aujourd'hui, le Rio Grande do Sul est l'un des états du Brésil les plus développés et ce développement s'est fait en grande partie grâce à l'agriculture maïs, malheureusement, de manière non planifiée. Le défrichement a été tel qu'aujourd'hui il ne reste plus que quelques îlots de la forêt originelle, *Mata* intérieure et à *Araucarias*.

Du fait de ce défrichement excessif et de la mécanisation agricole lourde et croissante, des processus érosifs se sont rapidement manifestés, attestés par la couleur rouge foncée sans équivoque des cours d'eau et par l'apparition de ravines profondes qui forment de véritables saignées dans le paysage. Pour remédier à ce problème, les agriculteurs ont recouru à des méthodes de conservation des sols empiriques, souvent issues des pratiques agricoles indiennes (talus et billons appelés « murundus »). Ce n'est que dans les années 60 que des études abordant les processus d'érosion et de ruissellement ont été entreprises.

Ce travail se propose d'étudier le fonctionnement hydrologique et sédimentologique d'un bassin versant de 1 km², choisi pour être représentatif d'une région agricole importante de l'Etat, le plateau basaltique à sols homogènes. De ce fait, nous avons entrepris une analyse des variabilités spatiale et temporelle des paramètres qui jouent un rôle important sur l'infiltration et l'érosion des sols (pluies, préparation du sol, états de surface, couverture et nature des cultures). Deux systèmes de préparation du sol sont utilisés dans cette région : le *système conventionnel*, dans lequel le semis est fait après un labour à l'aide d'une charrue à disques suivi d'un ou de deux hersages, et le *semis direct*, dans lequel le semis est fait sans labour du sol. Une comparaison entre ces deux systèmes est tentée, pour vérifier lequel est le plus efficace face à l'érosion, sans pour autant nuire à la production agricole.

Le choix de la zone d'étude

Une évaluation des risques d'érosion a été faite par Bordas *et al.* (1988) pour l'ensemble du Brésil (8 500 000 km²). Cette classification est fondée sur les mesures de matières en suspension des stations hydro-sédimentologiques des principales rivières, au total 441 stations. Les auteurs distinguent 8 classes, de 0 à 300 t/km²/an. Dans ce classement, la zone S4 qui comprend le plateau basaltique ainsi que le littoral sud du Brésil (figure 2) appartient à la 4^{ème} classe, avec des valeurs comprises entre 75 et 100 t/km²/an, soit une concentration moyenne en matières en suspension de 100 mg/l.

A la suite de ce travail réalisé à l'IPH (Institut de Recherches Hydrauliques) de Porto Alegre, des financements ont permis d'entreprendre des études plus détaillées sur les processus érosifs. L'établissement de la carte de l'érosion potentielle sur 75% du plateau basaltique, soit 300 000 km² (Bordas et Borges, 1990), a permis d'identifier à partir de trois critères - l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies et le relief - treize zones climato-physiographiques homogènes.

Deux types de zones critiques du point de vue de la conservation des sols ont été distinguées :

1. l'une au relief accentué (pente moyenne supérieure à 50 %) appartenant à la bordure du plateau,
2. l'autre au relief modéré (pente moyenne comprise entre 3 et 20%) appartenant à la partie centrale du plateau.

Le bassin versant expérimental du Forquetinha (463 km²) appartient à la première zone. Il a été étudié à la fin des années 70 et le rôle prépondérante joué par les précipitations dans l'explication des pertes en sol a été mise en évidence (Silveira, 1982). Les propriétés sont de petite taille, quelques dizaines d'hectares au maximum.

Pour étudier la seconde zone occupée par les grandes cultures, le bassin versant du Rio Potiribu (563 km²) a été choisi. Ce choix a été fait pour pouvoir bénéficier de l'appui des puissantes coopératives agricoles de la région (Cotrijuí et Cotricruz), des autorités municipales locales (municipe de Pejuçara, en particulier), de l'Université d'Ijuí (UNIJUI) et de la motivation des agriculteurs et de la population en général.

Ce projet Potiribu, qui a débuté en 1989, est le fruit d'une collaboration entre le Brésil (IPH-UFRGS) et la France (ORSTOM) (Leprun, coord., 1994).

L'objectif initial était d'analyser la production de ruissellement et de sédiments dans le bassin hydrographique du Rio Potiribu (563 km²), presque intégralement en zone agricole et composé de plusieurs bassins hydrographiques emboîtés (0,14 km², 1 km², 19 km² et 563 km²) permettant d'évaluer les effets de transfert d'échelle. Ce projet a connu plusieurs difficultés : manque de crédits puis financement décalé par rapport aux besoins, manque de personnel, destruction de 4 stations de mesures équipées de limnigraphes en mai 1992 lors d'une crue exceptionnelle provoquée par une pluie de 379 mm en 26 heures (Chevallier et Dhein, 1993), coïncidence malheureuse entre les dates des campagnes intensives pour les mesures de débits liquides et solides avec des périodes sèches. Ces faits, ajoutés à la distance (500 km) entre le bassin et le centre de recherche de l'IPH/UFRGS, sont en grande partie responsables du petit nombre de données de charges solides à mettre en relation avec celles du ruissellement. De ce fait, les recherches ont été focalisées sur le bassin du Donato (1 km²), dont l'équipement n'a pas été emporté par la grande crue de mai 1992. Le choix d'un petit bassin versant a rendu possible le suivi détaillé des opérations.

Ce mémoire est composé de la manière suivante :

- une première partie, intitulée *Mise en valeur agricole et érosion au sud du Brésil*, présente après une introduction sur le Brésil et la région sud, le cadre physique et humain régional ;

- une deuxième partie, intitulée *Les bassins versants de Donato et d'Anfiteatro* localise le secteur d'étude, analyse de façon plus détaillée le cadre physique des bassins et présente les méthodes d'études ;

- les deux dernières parties sont consacrées aux résultats, la troisième traite des phénomènes à l'échelle du m² sous des pluies simulées et naturelles. La quatrième présente une analyse à l'échelle des bassins et essaie d'intégrer les résultats obtenus à l'échelle du m². Un chapitre traite de la modélisation des processus de ruissellement et d'érosion à travers le modèle conceptuel distribué ANSWERS.

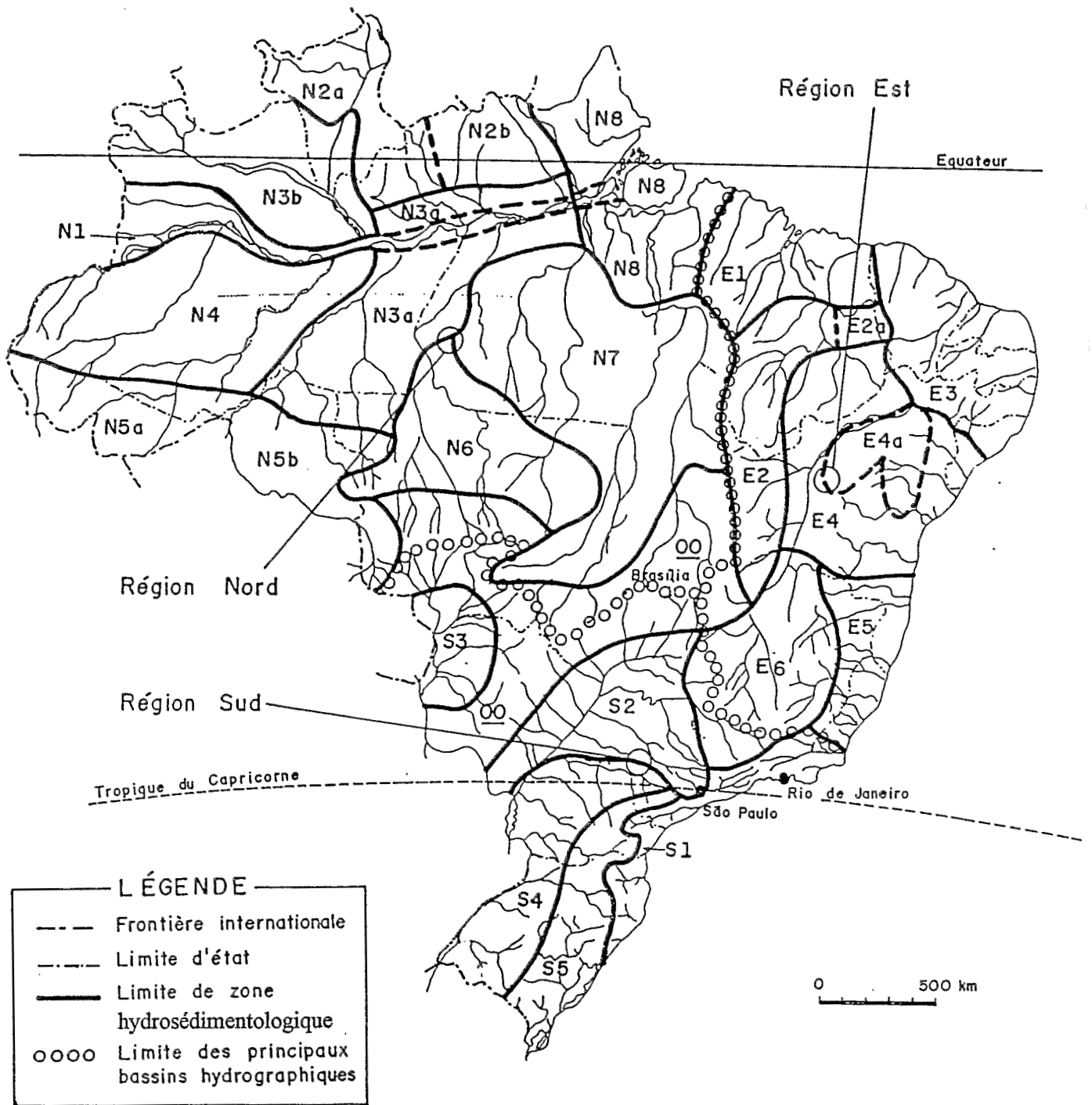


Figure 2. Régionalisation de la prédisposition aux risques sédimentologiques au Brésil (Bordas et al. 1988)

PARTIE 1

**MISE EN VALEUR AGRICOLE ET ÉROSION
AU SUD DU BRÉSIL**

MISE EN VALEUR AGRICOLE ET EROSION AU SUD DU BRÉSIL

1.1 INTRODUCTION

Le Brésil est constitué de cinq grandes régions : Nord, Nord-Est, Centre-Ouest, Sud-Est et Sud (fig. 1).

La région Sud, constituée par les états du Paraná, de Santa Catarina et du Rio Grande do Sul, représente, avec la région Sud-est, le « coeur » économique du Brésil.

Ces deux régions concentrent en effet, sur moins de 18% de la superficie, 58% de la population, 65% de la production agricole, 80% de la production minière, 85% de la production industrielle de l'ensemble du pays. Ce sont les régions les plus développées, reconnues pour leur dynamisme par opposition aux régions Nord et Nord-Est (Théry, 1989). La région Sud se différencie du reste du Brésil par son climat qui, avec une pluviométrie moyenne annuelle située entre 1200 et 2000 mm et avec quatre saisons bien définies, est classé suivant les auteurs comme subtropical (Péguy, 1970), ou tempéré humide type cfa (Köppen-Geiger in Strahler, 1984) ou encore comme « mésothermique de type tempéré » par Nimmer (1979). Elle se distingue également par son histoire, la composition de sa population et le type de société mise en place.

C'est en effet dans cet espace que les civilisations indigènes, portugaise et espagnole se sont rencontrées aux XVI et XVII^{ème} siècles, puis ont été mises en contact au XIX^{ème} siècle avec la civilisation des autres pays européens lors des colonisations italienne, allemande, slave et polonaise. De ce mélange de cultures et de traditions est née une société brésilienne originale, plus diverse, plus égalitaire et d'un niveau socio-économique plus élevé que dans la partie nord du pays. La qualité de vie peut être comparée à celle de l'Europe du Sud (Théry, 1989).

L'agriculture de cette région est particulièrement attentive au marché mondial et capable d'évolution rapide. Cela est dû en grande partie au travail des nombreuses coopératives agricoles, dont chacune compte plusieurs milliers d'adhérents bien informés et prompts à l'innovation. Mais ce dynamisme de l'agriculture du sud du Brésil n'aurait pas été possible sans les conditions morfo-pédologiques et climatiques favorables de cette région, qui permettent le développement de nombreuses productions agricoles en particulier du soja, dont l'exportation est actuellement rentable. Ces conditions favorables permettent deux cultures par an, l'une en hiver, l'autre en été, un intervalle d'une semaine à 2 mois séparant la première récolte du semis suivant.

Cependant, une érosion importante affecte les zones d'agriculture intensive : érosion de type diffus sur les parcelles aménagées jusqu'à une date récente en banquettes, érosion par ruissellement concentré accompagnée de sédimentation sur les drains, en amont des bourrelets, et formation de rigoles et ravines parfois impressionnantes en aval des banquettes, le long des pistes ou des routes et à la limite des propriétés.

Avant d'aborder la présentation des bassins versants et des mesures qui font l'objet de cette thèse, nous passerons en revue, dans cette première partie, les éléments du cadre physique et humain utiles à la compréhension du développement de l'érosion, en concentrant l'exposé sur la région d'Ijuí.

1.2 LE CADRE PHYSIQUE RÉGIONAL

1.2.1 Le climat

Le rythme climatique à quatre saisons thermiques (printemps, été, automne et hiver) traduit l'appartenance de cette région à un domaine tempéré. Les paramètres climatiques présentés sont ceux de la station de Cruz Alta (IPAGRO, 1989) pour la période de référence 1943-1976. Les températures moyennes mensuelles s'échelonnent de 14°C, durant le mois le plus froid en juillet, à 24°C en janvier mais il n'est pas rare que les températures extrêmes soient inférieures à 0°C ou supérieures à 35°C.

Le rayonnement solaire est le plus intense d'octobre à mars, atteignant ses valeurs maximales de novembre à janvier et coïncidant avec les maxima d'évaporation (moyennes mensuelles respectives de 150,3 et 140 mm). L'évaporation moyenne potentielle mesurée se situe entre 2,3 mm/jour en juin et 4,2 mm/jour en décembre pour un total annuel proche de 1 200 mm.

L'humidité relative reste élevée toute l'année, comprise entre 65% en décembre et 80% en juin. En mai, juin et juillet, l'humidité relative de l'air est importante (80%) et l'évaporation faible (2,3 mm).

Le régime des précipitations est réglé principalement par la confrontation de l'anticyclone polaire, froid et sec, avec l'anticyclone de l'Atlantique Sud, chaud et humide. La discontinuité frontale, active toute l'année, se déplace avec une grande régularité du sud vers le nord provoquant des averses généralement longues et d'intensité modérée (pluies frontales) avec une périodicité comprise entre 4 et 10 jours. Cette circulation privilégiée crée un régime local de précipitations, dont la distribution est pratiquement uniforme tout au long de l'année (Nimmer, 1979).

Les précipitations moyennes annuelles établies sur une série de 40 années (série de 1945 à 1985) et mesurées au Cruz Alta (à 15 km de Pejuçara) sont de l'ordre de 1 700 mm, avec des moyennes mensuelles situées comprises entre 110 et 160 mm (fig. 3). Les précipitations journalières de fréquence annuelle calculées pour ce postes sont de 89 mm et celles de fréquence décennale sont de 130 mm (Chevallier et Castro, 1991).

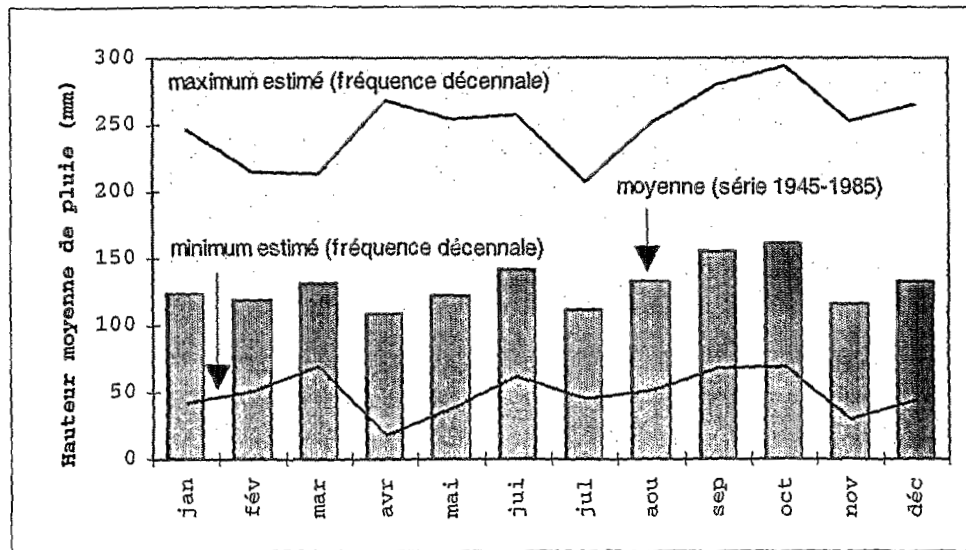


Figure 3. Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations à Cruz Alta (1945-1985), minimum et maximum estimé pour une fréquence décennale.

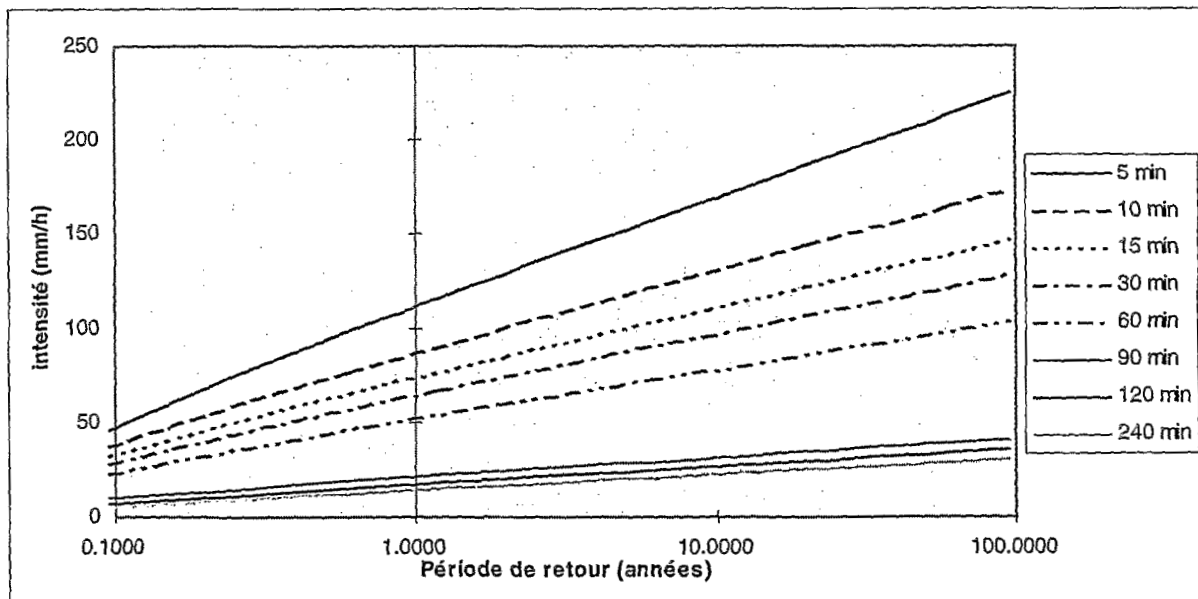


Figure 4. Courbe intensité-durée-fréquence à Ijuí (1963-1988).

L'étude détaillée des averses observées pendant 21,73 ans (1963-1988) au poste d'Ijuí-IPAGRO donne, pour une fréquence annuelle, une intensité de 115 mm/h en 5 minutes et de 68 mm/h en 30 minutes (fig. 4). L'indice d'érosivité annuel moyen R de Wischmeier (1962) a été établi à partir de 16 années de données au poste d'Ijuí présentant moins de 5% de lacunes. Cet indice varie de 258 t.m/ha.h à 759 t.m/ha.h (soit respectivement 2531 et 7445,8 MJ mm/ha.h en unités internationales).

Ces valeurs peuvent être comparées à celles établies pour d'autres régions. (tabl. I). On constate qu'elles se situent entre les valeurs des zones sèches et des zones très humides du Brésil et de l'Afrique, mais qu'elles sont bien supérieures à celles des climats tempérés français ou américains.

Tableau I. Valeurs des indices d'érosivité des pluies R pour différents climats.

R (t.m/ha.h)	Pays	Climat	Référence
104 à 590	France	tempéré	Masson (1971)
50 à 650	USA		Wischmeier (1959)
868 à 2429	Côte d'Ivoire	tropical humide	Roose (1973)
347 à 1128	Burkina Faso	tropical sec	Roose, Arrivets et Poulain (1974)
90 à 450	Nordeste du Brésil	tropical sec	Leprun (1981)
230 à 1000		tropical humide	
805	Centre-ouest du Brésil (Brasília)	tropical chaud humide	Dedecek <i>et al.</i> (1986)
648	Sud du Brésil (Porto Alegre)		Eltz <i>et al.</i> 1981, 1984
748	Sud du Brésil (Passo Fundo)	tempéré humide/ subtropical	EMBRAPA, n.p.
250 à 760	Sud du Brésil (Ijuí)		Chevallier et Castro (1991)

sources : Roose (1977) et Leprun (1986).

La forme des événements pluvieux (fig. 5) a été analysée en considérant tous les événements enregistrés au poste d'Ijuí-IPAGRO (1963-1988) de plus de 20 mm possédant un unique pic d'intensité. Au total, 310 événements ont été traités (Chevallier, 1991). Les enseignements sont les suivants :

- en général, les averses présentent la même forme avec un pic d'intensité situé dans le premier quart du hyétogramme;
- les événements les plus importants ($P > 50$ mm) ont une durée de 20% supérieure à la moyenne, mais c'est surtout leur intensité maximale qui fait la différence : 62% des événements ont une intensité supérieure à la moyenne en 10 minutes et 76% à celle en 30 minutes;
- au printemps et en été, ces événements pluvieux sont en moyenne plus courts (-10%) et plus intenses (+ 10 à 20%) qu'en automne et en hiver, sans que les différences soient significatives.

Les pluies de plus de 50 mm ont ainsi, généralement, une intensité supérieure à celle des autres événements et sont de ce fait les plus dangereuses. Elles se produisent principalement au printemps et en été. Le pic d'intensité, en début d'averse, peut entraîner aussitôt une dégradation du sol en surface et ainsi modifier le régime d'infiltration.



1.2.2 Le relief

La région se localise sur le plateau moyen (*planalto médio*, fig. 6), qui s'étend entre 420 et 700 m d'altitude.

Les paysages de la région centrale du Rio Grande do Sul sont ceux de plateaux aux pentes généralement comprises entre 3 et 10% (atteignant parfois 15%) presque entièrement cultivées et aménagées en banquettes orientées selon les courbes de niveau. Bien davantage que les limites de propriétés qui s'étendent sur plusieurs hectares, voire plusieurs dizaines d'hectares, ce sont ces banquettes qui délimitent aujourd'hui, dans le paysage, les unités spatiales élémentaires.

1.2.3 Le substratum

Le substratum est constitué par une succession d'épanchements basaltiques continentaux et de couches de grès ou de sables (grès *Botucatu*) subhorizontales, épaisses de quelques mètres à une centaine de mètres (Leinz, 1949 ; IBGE, 1986). L'eau s'accumule et peut circuler horizontalement dans ces sables. Ces épanchements volcaniques datés de 120 millions d'années (Crétacé inférieur/Jurassique supérieur, Sartori *et al.*, 1975) constituent la formation *Serra Geral* (Geologia do Brasil, 1984). Ils se sont épanchés depuis l'Etat de São Paulo, où ils ont une épaisseur supérieure à 1500 m, jusqu'au sud du Brésil et vers l'Uruguay, l'Argentine et le Paraguay, où elle se réduit à une cinquantaine de mètres. Ils couvrent 1 200 000 km² et sont ainsi les plus étendus au monde (Maak, 1952 ; Leinz, 1949). Un bel exemple de cette formation est donné par les célèbres chutes d'Iguaçu, proches du point triple Brésil/Argentine/Paraguay.

Dans l'Etat du Rio Grande do Sul, ces formations basaltiques sont datées de la fin du Trias au début du Jurassique et proviennent des deux zones fracturées (Torres à l'ouest et Santa Maria à l'est, fig. 6) (Leinz, 1949). L'épaisseur du basalte décroît progressivement de 1200 m à l'est à 250 m à l'ouest (Pébayle, 1977). Elle décroît également vers le nord et le sud où elle dépasse rarement 100 m (IBGE, 1986).

1.2.4 Les sols

Sur ce plateau, le sol est constamment humide en raison des précipitations abondantes, ce qui contribue à accélérer les processus pédogénétiques. Les sols sont par conséquent bien développés et épais d'une quinzaine de mètres parfois (Oliveira *et al.*, 1992). Selon la classification brésilienne, la plus grande partie (60%) des sols du plateau basaltique du Rio Grande do Sul appartient à la classe des *latossolo roxo*, ou sols ferrallitiques rouge-violet. Malgré la forte teneur en argile (60 à 90%) essentiellement des kaolinites, ces sols sont très bien drainés. Cela est dû à leur porosité élevée (50% selon Oliveira *et al.*, 1992; entre 57 et 69% selon Derpsch *et al.*, 1991), liée à l'organisation en microagrégats très stables, de la taille des sables fins (structure en poudre de café). Les caractéristiques physiques des sols du plateau basaltique (épaisseur importante, bon drainage, stabilité des agrégats) les rendent très favorables à l'agriculture, malgré une acidité des horizons de surface du sol (pH de 4,5), qui peut être corrigée par des amendements calcaires.

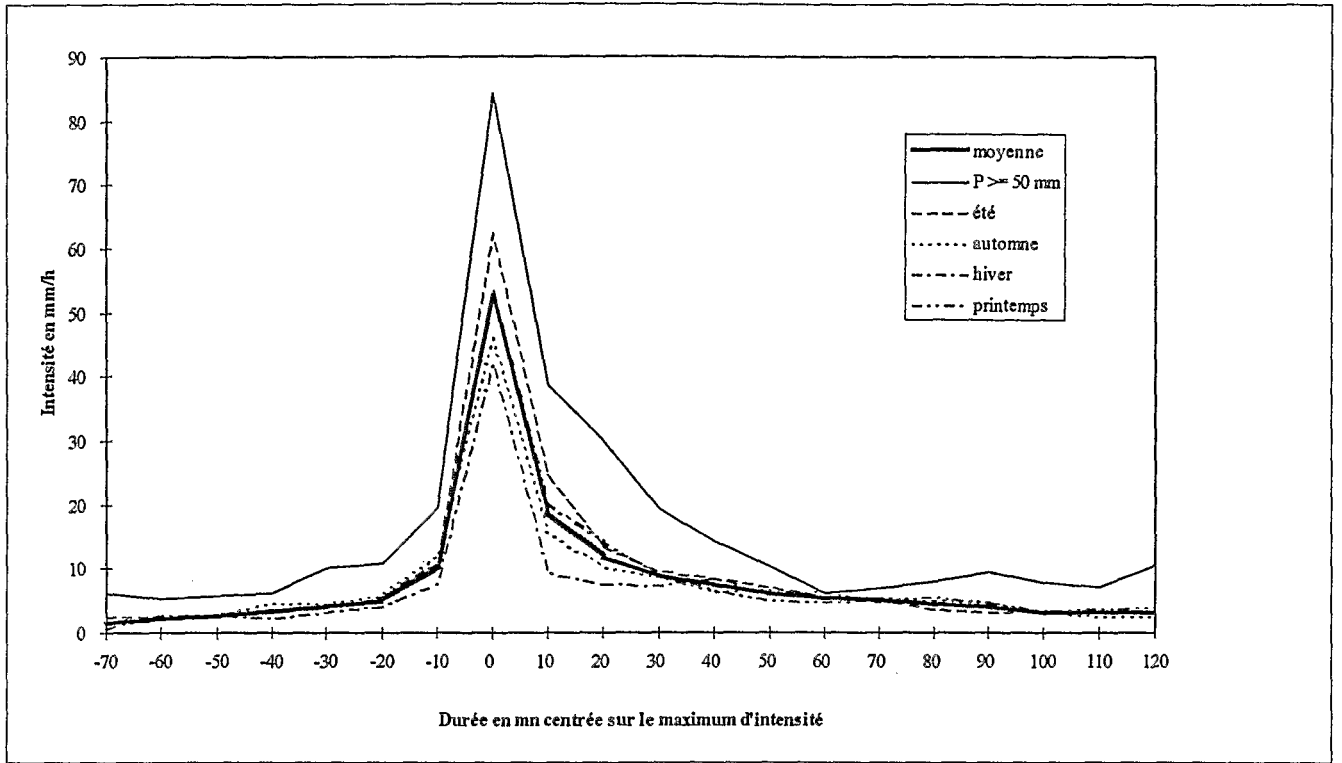


Figure 5. Formes d'événements pluvieux (Chevallier, 1991)

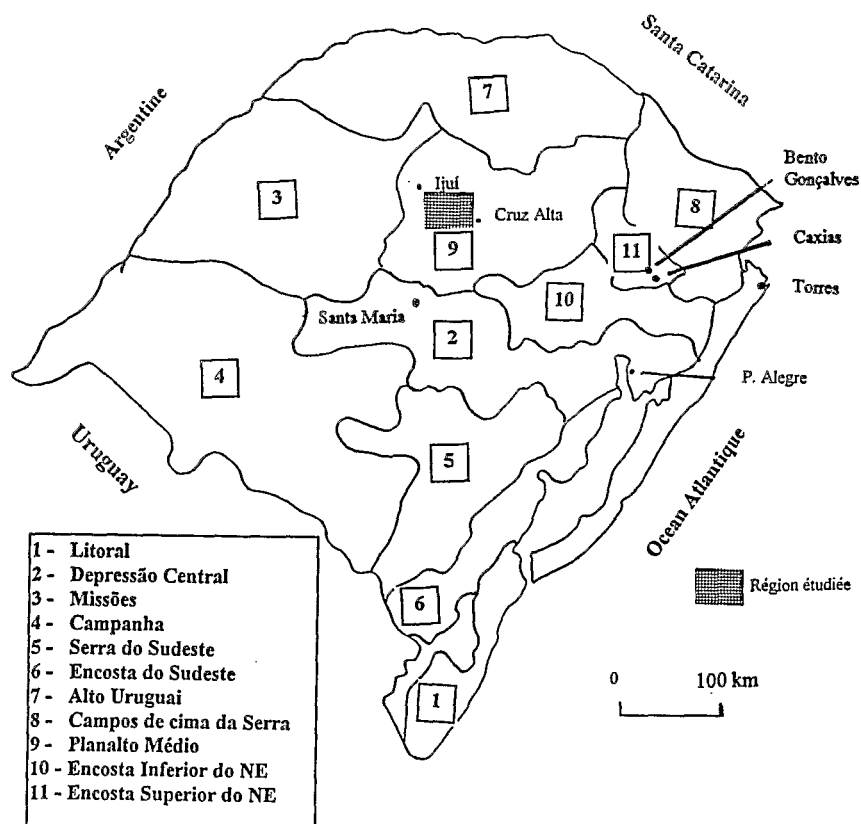


Figure 6. Régions physiographiques du Rio Grande do Sul (Brasil, 1973)

1.2.5 La végétation

La forêt primitive, ou *Mata Atlântica* intérieure et la forêt à *Araucarias*, a presque totalement disparu. Maak (1968) indique que le défrichement dans l'Etat du Paraná a fait passer la superficie des forêts de 167 824 km² à 48 136 km² entre le début du siècle et 1965 (fig. 7). Aujourd'hui, au sud du Brésil, à côté des quelques 5 à 8% de végétation naturelle arborée restante, on trouve des steppes de graminées sans arbres, les *campos*.

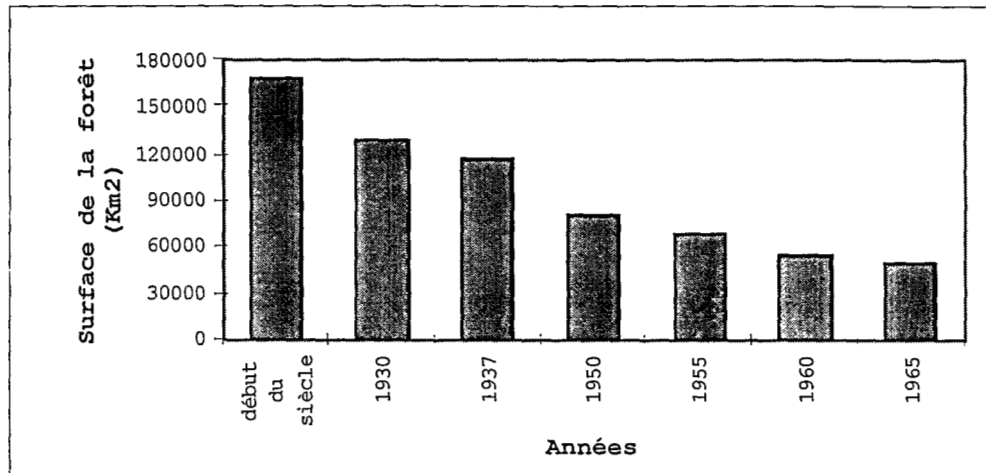


Figure 7. Superficie de la forêt originelle du début du siècle jusqu'en 1965 dans l'Etat du Paraná (Maak, 1968).

1.3 LE CADRE HISTORIQUE : MODES DE COLONISATION ET CONSEQUENCES SUR LES STRUCTURES AGRAIRES

1.3.1 Guaranis et portugais

Les premiers habitants de la région sont les Indiens *Guaranis*, installés à partir du IX^{ème} siècle (Melatti, 1938). Traditionnellement, ils pratiquent la chasse, la pêche et une agriculture sommaire (maïs, pomme de terre, haricots). Les Portugais entrent en contact avec eux dès le XVI^{ème} siècle sans grand succès, leur intention réelle étant de les capturer afin de les réduire en esclavage dans les plantations de canne à sucre de la région de São Paulo.

Au début du XVII^{ème} siècle, les Espagnols arrivent dans le nord de l'état actuel du Rio Grande do Sul, où des missionnaires jésuites sont déjà installés. Le système d'occupation de la terre est alors l'*encomienda* : le roi d'Espagne donne de grandes surfaces de terre en récompense de services rendus et le nouveau propriétaire utilise les indiens autochtones pour les travaux, en échange de la subsistance, et assure leur instruction religieuse.

A la fin du XVII^{ème} siècle, les Jésuites créent les *reduções ou missões* (Lugon, 1968 ; Lacouture, 1992) qui consistent à isoler les Indiens des colons blancs, en respectant leur culture et leurs traditions. Dans ces missions, les Jésuites introduisent de nouvelles techniques, en particulier la machette en fer qui sert à défricher, et de nouvelles activités agricoles : culture du coton, du blé, des arbres fruitiers, du maté et élevage bovin. Ils vivent et travaillent la terre en communauté. Ce système porte le nom de *tupamboé* (terre de *Tupa* ou de la communauté, Puhl, 1990). Les Indiens défrichent en respectant les plus grands arbres et brûlent les résidus. Sur cet espace, ils sèment à l'aide du *saraqua* (bâton à l'extrémité pointue utilisé pour ouvrir de petits trous dans

lesquels sont mises les graines). Cette pratique de brûlis partiel et localisé assure une bonne protection au sol. Les *Guaranis* changent fréquemment de lieu de culture, ce qui permet une reconstitution naturelle des espaces affectés par les brûlis (jachères).

En 1750, le gouvernement de Madrid décide la fermeture des missions au profit du système colonial. Les Indiens et les Jésuites refusent et tentent de résister pendant plusieurs années (cet épisode a fait l'objet du célèbre film de R. Joffé : *Mission*). Les survivants migrent alors vers les villages portugais les plus proches ou vers l'Argentine ; quelques-uns restent dans la région, dispersés dans la campagne et la forêt (Puhl, 1990, Lacouture, 1992).

Entre 1850 et 1890, la région est principalement habitée par des *caboclos* (Portugais nés au Brésil et métis) qui exploitent le maté et pratiquent des cultures vivrières (maïs, manioc et haricots), en utilisant les mêmes pratiques agricoles que celles des Indiens *guaranis* (Reichardt Filho et Dhein, 1990).

1.3.2 Colonisations italienne et allemande

L'arrivée et l'installation

En 1824, les premiers émigrés allemands arrivent dans l'Etat du Rio Grande do Sul et s'installent près des grandes rivières Sino, Caí et Taquarí dans le nord-est. A partir de 1850, ils commencent à migrer vers l'ouest, jusqu'à Santa Maria. Selon Zamberlam et Zamberlam (1991), entre 1875 et 1877, de nouveaux migrants, d'origine italienne, forment trois colonies dans la partie nord-est du Rio Grande do Sul (Garibaldi, Bento Gonçalves, et Caxias do Sul ; c.f. figure 6). Santa Maria, la quatrième colonie, la plus grande, située plus à l'ouest (c.f. fig. 6), est occupée entre 1877 et 1882. En 1888, la cinquième colonie, celle d'Ijuí, est créée au nord de Santa Maria. Entre 1890 et 1940, des migrants d'origine italienne, déjà installés dans les premières colonies, viennent s'installer au nord de l'Etat et participent à la construction du chemin de fer entre Porto Alegre et Ijuí. Les colons occupent ainsi à ce moment là tout le nord de l'Etat (Reichardt Filho et Dhein, 1990 ; Zamberlam et Zamberlam, 1991).

La région d'Ijuí est divisée par l'administration locale en parcelles rectangulaires de 25 ha (250 m de largeur pour 1000 m de longueur) appelées *colonnes*. Ces divisions sont tracées selon les directions nord-sud et est-ouest (appelées *lignes*) sans tenir compte de la topographie. Seules les rivières les plus importantes sont respectées et servent de lignes de démarcation (Reichardt Filho et Dhein, 1990).

Cette division, au découpage quadrillé en petites propriétés, subsiste encore très largement aujourd'hui, ce qui ne facilite pas les aménagements cohérents à l'échelle des bassins versants.

Dans la région de Pejuçara et de Cruz Alta, la distribution des terres s'opère différemment. Le gouvernement brésilien charge une société belge de la construction du chemin de fer reliant Porto Alegre à Ijuí. Cette société, incapable de remplir seule son contrat, a dû engager une entreprise brésilienne pour l'aider. Les intermédiaires de cette transaction reçoivent alors en paiement les terres de la région, revendues à un petit nombre de familles. Ces terres constituent encore aujourd'hui les grandes propriétés de la région.

Les colons construisent leurs fermes près des sources et points d'eau potable. Les parcelles agricoles aménagées près des maisons, à proximité de l'eau, sont donc préférentiellement situées dans la partie aval des versants. Le système d'occupation de la terre est *familial*. Même si les méthodes de cultures sont héritées des Indiens *guaranis* et des *caboclos*, les défrichements s'intensifient avec la coupe des grands arbres vers les parties amont des versants et la pratique de la jachère est progressivement abandonnée.

L'apparition d'une agriculture commerciale

Au début de la colonisation, une agriculture de subsistance est pratiquée. Les colons travaillent à la construction du chemin de fer pour acheter ce qu'ils ne produisent pas. A partir de 1911, avec la mise en service de la voie ferrée qui relie la région aux grands centres de consommations et aux ports d'exportation (Santa Maria, Porto Alegre, Pelotas et Rio Grande), la situation change très vite. Les parcelles agricoles s'agrandissent et la traction animale se généralise pour la préparation du sol.

L'agriculture s'intensifie dans un but commercial. Le brûlis se développe et s'opère sur les mêmes parcelles à plusieurs reprises, détruisant la matière organique et la vie microbienne de la surface du sol. L'érosion s'intensifie et une réduction notable de la fertilité du sol est enregistrée. Callai (1987) mentionne une chute de la productivité moyenne du maïs et du haricot qui passe à certains endroits de 2 300 à 600 kg/ha et de 1 200 à 200 kg/ha respectivement.

L'agriculture mécanisée et le boom du soja

Avec les nouvelles perspectives commerciales, c'est une culture mécanisée, principalement celle de la canne à sucre, qui se développe. Dans la région de Pejuçara, elle commence en 1930 et est destinée à la production d'eau de vie (*cachaça*). La mécanisation à l'aide de tracteurs et de machines lourdes devient systématique dans les années 50 avec l'introduction du blé et, plus tard, dans les années 60, celle du soja. La canne à sucre disparaît totalement au bénéfice du blé et de l'avoine pour les cultures d'hiver, du maïs et du soja pour les cultures d'été. En 1960, il existe encore une dizaine de distilleries artisanales sur la commune de Pejuçara, alors qu'il n'en subsiste qu'une en 1994 (Zambra, comm. orale, 1993)

L'année 1973 constitue précisément le début d'un nouveau cycle bien caractérisé dans l'agriculture de la région. Le prix du soja, à la bourse de Chicago qui détermine son cours international, atteint 520 dollars la tonne en juin 1973 alors qu'il n'était que de 132 dollars en 1972. L'euphorie des agriculteurs se manifeste par un défrichage frénétique pour agrandir leurs parcelles et étendre cette culture. Ce défrichage est fait partout, de l'amont à l'aval des parcelles. Seules d'étroites forêts galeries sont conservées au bord des cours d'eau.

A ce jour encore, le soja, dont le Brésil est le second exportateur mondial, est la culture la plus importante de la région. Les agriculteurs sont assurés de le vendre aux grandes coopératives agricoles, qui s'occupent de le traiter et de le commercialiser au niveau national et international.

La conséquence de cette euphorie sur l'érosion des sols est immédiate, avec notamment l'apparition de grandes ravines ou *voçorocas* (Reichardt Filho et Dhein, 1990).

1.4 LE CADRE AGRAIRE ACTUEL

1.4.1 L'occupation du sol

Actuellement, dans la région, les zones non cultivées sont rares. Les fonds des vallons, lorsqu'ils ne sont pas aménagés en retenues d'eau¹, sont souvent des zones humides, rapidement saturées en surface par les précipitations et peu ou pas exploitées. L'élevage, essentiellement bovin pour la production laitière et la boucherie, est pratiqué le plus souvent sur les zones impropres à l'agriculture mécanisée : fortes pentes, zones humides et zones ravinées. Les agglomérations de petite et moyenne importance (population inférieure à 5 000 habitants) sont presque toujours situées sur le haut des reliefs. Les rares bosquets forestiers, précieux reliquats de la végétation originelle ou petites réserves de bois de chauffe et/ou de construction, se retrouvent ainsi presque systématiquement localisés sur les sommets des versants.

Une quasi monoculture du soja en culture d'été est pratiquée depuis une vingtaine d'années. Le semis intervient en novembre et la récolte en avril-mai. Plusieurs traitements phyto-sanitaires (engrais, fongicides, pesticides) sont pratiqués au cours du cycle végétatif. Il existe une tendance actuelle chez certains producteurs, liée aux conditions économiques récentes de commercialisation du soja, à substituer chroniquement à cette production celle du maïs dont les dates de semis et de récolte sont identiques à celles du soja.

La pratique de cultures d'hiver et de printemps est moins systématique et dépend plus des possibilités financières conjoncturelles du producteur que de considérations agronomiques. Il s'agit principalement de blé ou d'avoine ; cette dernière étant souvent réenfouie dans le sol comme engrais vert juste avant le semis du soja. Le semis est réalisé en juin ou juillet et la moisson se situe immédiatement avant le semis de soja en novembre. Le semis d'hiver n'est pas effectué tous les ans mais seulement lorsque de bonnes conditions climatiques permettent, l'hiver suivant, une repousse rapide de l'avoine et/ou du blé après la récolte du soja, sans intervention de l'agriculteur. Dans ce dernier cas, le sol reste bien couvert par les repousses et par les résidus de récolte du soja qui protègent davantage le sol que lorsqu'il est systématiquement cultivé.

1.4.2 Les deux systèmes de préparation du sol

Les deux systèmes les plus pratiqués sont le *conventionnel* et le *semis direct*.

1.4.2 a Le système conventionnel

Le système *conventionnel* traditionnel consiste à travailler le sol par un labour mécanique à la charrue à disques, qui retourne la couche superficielle du sol et enfouit d'éventuels résidus de culture, suivi d'un ou généralement deux hersages pour niveler le sol avant le semis. Ce travail est fait le plus souvent dans le sens de la pente. Le sol est ainsi très affiné en surface et la rugosité est faible.

Les banquettes apparaissent au Brésil dans les années 30 dans l'Etat de São Paulo. Elles ont été rapidement adoptées et développées entre 1950 et 1980 quand le *Departamento de Engenharia Mecânica de Agricultura* (DEMA) et plus tard la *Coordenadoria da Assistência técnica integral* (CATI) ont projeté, délimité et construit des millions de kilomètres de banquettes dans cet Etat (Bellinazzi Jr. *et al.* 1981). C'est en 1965 que cette technique atteint le Rio Grande do Sul, lorsqu'une entreprise de la région d'Ijuí, l'IMASA, met sur le marché une machine (*terraceador*) pour construire des banquettes à base étroite d'environ 3 m de large. A ce moment là, les directeurs et les employés de cette entreprise lancent une grande campagne de publicité pour

¹ En portugais, on emploie le mot générique *açudes* pour désigner les retenues collinaires de quelques dizaines à plusieurs millions de m³, sans considération de volume.

les nouvelles machines agricoles. En 1965, 75 machines de ce type sont vendues dans la région d'Ijuí (Reichardt Filho et Dhein, 1990).

En 1967, cette entreprise propose un nouveau modèle pour la construction de banquettes à base large (bourrelet et fossé de 6 à 12 m de large). La principale différence entre ces deux types de banquettes est que le bourrelet, plus large et moins haut, permet de cultiver mécaniquement toute la surface, y compris le bourrelet lui-même. A partir de cette date, la technique des banquettes de base étroite ou de base large, est peu à peu appliquée à toutes les propriétés agricoles et modère le paysage de la région. L'association de la technique traditionnelle de travail du sol (1 labour + 1 ou 2 hersages) avec le semis selon les courbes de niveau et l'utilisation des banquettes correspond au système *conventionnel*, selon l'expression des agriculteurs eux mêmes. Les coopératives et le gouvernement généralisent cette pratique en fournissant un appui technique important favorisant sa diffusion.

Dans les grandes et moyennes exploitations (> 50 ha), ce sont les techniciens qui délimitent les banquettes. La largeur des bandes cultivées selon les courbes de niveau dépend de la pente du terrain². L'agriculteur ou ses employés construisent ensuite les banquettes et effectuent les travaux d'entretien nécessaires. En revanche, les petits propriétaires délimitent et construisent eux mêmes les banquettes.

Dans la région étudiée, ce système a été utilisé pendant une vingtaine d'années. Les banquettes exercent un frein au ruissellement et diminuent l'érosion dans les parcelles. Lors des averses particulièrement fortes, les banquettes sont entamées et parfois détruites. Les agriculteurs les reconstruisent aussitôt, ce qui peut arriver plusieurs fois par an. L'autre problème de ce système correspond aux ravines, parfois très importantes, qui sont formées à partir de l'eau concentrée par les banquettes aux limites de propriétés. Cette situation a conduit les agriculteurs eux-mêmes à trouver une technique plus efficace, consistant à mettre en place des bourrelets et hauts billons de terre appelés du nom indien de « murundus » qui aboutira ensuite au système de *semis direct*, équivalent au terme anglo-saxon « zero-tillage » et du travail simplifié du sol appelé également *semis direct* en France.

1.4.2 b Le système du *semis direct*

Le *semis direct* est une technique fondée sur le non labour qui a pour caractéristique principale le maintien des résidus (racines et pieds) de la culture antérieure. Le semis de la nouvelle culture se fait sur cette culture antérieure, par simple incision d'un mince sillon aussitôt rebouché. Des produits chimiques (désherbants) sont utilisés avant le semis, pour combattre les adventices.

Une évolution postérieure du *semis direct* est le *semis direct sur paillage* qui consiste à effectuer un *semis direct* sur la totalité des résidus de la culture antérieure (racines et tiges). Une technique améliorée incorpore une rotation des cultures qui prend en compte l'équilibre chimique et physique du sol. L'une des rotations préconisée est la suivante :

- première année : avoine puis soja
- deuxième année : blé puis soja
- troisième année : légumineuse (vesce, lupin) puis maïs.

Cette rotation permet d'utiliser le maïs, dont les racines fasciculées permettent de décompacter le sol, et les légumineuses pour l'apport d'azote et l'agrégation.

Cette technique culturale nécessite des machines spéciales :

- le *rouleau hacheur* (*rolo-faca* : littéralement *rouleau-couteau*) qui après la récolte coupe les résidus et les laisse en surface. Le semis est fait en suite avec un *semoir* grâce à une lame qui ouvre des

2 La formule la plus utilisée au Brésil pour calculer l'espacement entre les banquettes a été développée par Bertoni (1959) à partir des formules empiriques américaines. Il a utilisé des données des pertes en sol et en eau pour plusieurs types de sol pendant plus de 10 ans. L'espacement entre les banquettes est calculé par la formule: $ev = 0,4518 k d^{0,58}$ et $eh = 100 ev/D$, où ev = distance verticale entre les banquettes, k = indice variable pour chaque type de sol, d = pente du terrain en % et eh = distance horizontale entre les banquettes.

lignes de 5 à 6 cm de profondeur, où sont déposées les graines. Une petite roue arrière ferme alors la ligne. Les adventices et les ravageurs sont contrôlés par des voies chimiques et également par des rotations appropriées (par exemple, le lupin est semé avant le maïs, jamais avant le soja parce que cela entraîne des maladies).

- Le *semoir à disques (disco de corte)* effectue le *semis directement* sans passer par le rouleau hacheur. Des disques ouvrent des sillons de 5 cm de profondeur et de 1 à 2 cm de largeur qui sont refermés immédiatement après la mise en place des graines.
- Le *semoir en ligne (sulcador)*, qui ouvre des lignes au sol de 5 cm de profondeur et de 2 cm de largeur où les graines sont déposées. Les lignes sont refermées en formant des petits billons qui protègent davantage les graines.

Au Brésil, le premier agriculteur à pratiquer le *semis direct* a été Herbert Bartz en 1972 à Rolândia (Etat du Paraná). Le chercheur de l'IAPAR, Rolf Derpsch, qui à la même époque débutait une recherche sur ce thème, l'a encouragé. Les premiers résultats ont été concluants et Herbert Bartz a continué. En 1973, il a importé deux machines, l'une d'Angleterre et l'autre des Etats Unis, pour faire le semis selon ce nouveau procédé (Borges, 1993).

Selon Herbert Bartz, « au début il s'agissait de combattre l'érosion, aujourd'hui il s'agit d'une philosophie de travail » (Bartz, 1994).

Les agriculteurs voisins, sceptiques, observent cette technique. En 1976, un agriculteur, Manoel Henrique Pereira (connu sous le surnom de *Nonô*), après avoir lu un article dans la revue américaine « Business Week » sur le *semis direct* et avoir visité la propriété de Herbert Bartz, a expérimenté cette technique sur 20 ha de ses terres à Palmeira (Paraná). A l'occasion d'une averse, des rigoles d'érosion sont apparues dans toutes ses parcelles préparées selon le système *conventionnel* alors que les 20 ha en *semis direct* sont restés intacts. L'année suivante, il adopte définitivement le système du *semis direct* sur toute sa propriété (200 ha).

Dès 1971, Rolf Derpsch et d'autres chercheurs commencent à Londrina (Paraná) des recherches sur le *semis direct*. L'année suivante, ils créent une station expérimentale utilisant cette technique à Ponta Grossa (Paraná). La même année (1972), un travail comparatif entre le système du *semis direct* et le système *conventionnel* démarre à Cruz Alta (Rio Grande do Sul) mené par la Fundacep-Fecotrigo. En 1973, à Passo Fundo (Rio Grande do Sul), le Centre National de Recherche sur le Blé (CNPT) associé à l'EMBRAPA (Organisme brésilien de recherche agro-pastorale) s'engage lui aussi dans la recherche sur ce nouveau procédé de conservation.

Dans l'Etat du Paraná, la recherche progresse à partir de 1977 grâce à la collaboration entre l'IAPAR (Institut Agronomique du Paraná) et le *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)*.

La région du Paraná a le même type de sols que le Rio Grande do Sul ainsi qu'une topographie et un climat également tout à fait comparables. Calquées sur l'exemple du Paraná, les techniques du *semis direct* arrivent au Rio Grande do Sul et de nouveaux essais culturaux se développent dans les coopératives régionales, les universités et les organismes gouvernementaux. La recherche est d'abord menée sur des parcelles expérimentales puis à l'échelle de bassins versants. Les résultats obtenus sur l'érosion par plusieurs chercheurs comparant le type de pratique, *semis direct* ou préparation conventionnelle, montrent une très grande réduction de l'érosion du sol dans les parcelles sous *semis direct* (Derpsch *et al.*, 1991). Les chercheurs l'expliquent essentiellement par l'action des résidus végétaux qui assurent une protection contre l'impact des gouttes de pluies et l'entraînement des particules par écoulement superficiel.

Cette nouvelle technique a cependant fait l'objet de nombreuses critiques de la part des agriculteurs. Elles concernent surtout les aspects suivants :

- 1) l'absence ou la difficulté d'équipement des petits propriétaires ;
- 2) le compactage de la couche superficielle du sol, en particulier dans les cas de texture argileuse.

A ces questions, Ciro Petrere, agronome de la Fundacep (comm. orale, 1993), donne les réponses suivantes:

- 1) les machines à traction animale peuvent être facilement adaptées, à bas coût, pour le *semis direct*³;
- 2) le problème de compactage du sol est résolu en adoptant une rotation appropriée des cultures de façon à équilibrer chimiquement et physiquement le sol (« *semis direct* sur paillage »).

Le *semis direct* présente les avantages suivants par rapport au système de culture *conventionnel* :

- 1) une meilleure protection de la surface du sol contre l'effet de l'impact des gouttes des pluies ;
- 2) un meilleur stockage de l'eau dans la couche superficielle grâce aux résidus végétaux ;
- 3) une réduction du nombre de passages des machines sur le terrain, qui conduit à une économie en carburant et en heures de travail ;
- 4) une augmentation de la teneur en matière organique dans la couche superficielle du sol, d'où une amélioration de la structure du sol.

Depuis une vingtaine d'années, ce sont les coopératives agricoles et les associations qui sont le principal moteur de diffusion et même de recherche sur le système du *semis direct*. Plusieurs associations sont créées dans ce but : *Clube da Minhoca* (littéralement : Club du ver de terre) ; *Clube Amigos da Terra* (littéralement : club des Amis de la Terre) ; les coopératives agricoles, qui dans ces régions sont puissantes et bien organisées ; *ABC*, centrale d'assistance technique de coopératives d'origine hollandaise installée dans l'Etat de Paraná ; *Fundacep-Fecotrigo* (Fédération des Coopératives Céréalières du Sud du Brésil) d'où 75 coopératives de la région y sont associées et participent au financement de la recherche (Bonetti, 1991) et finalement la Fédération brésilienne du *semis direct sur paillage* : cet organisme a été créé en 1992 et réunit toutes les associations pour le développement du *semis direct sur paillage* au Brésil.

Au moment de la quatrième rencontre nationale sur le *semis direct sur paillage*, qui s'est tenue en mars 1994 à Cruz Alta, il a été mentionné qu'en un an, de 1993 à 1994, les superficies cultivées en *semis direct* autour de la zone d'étude étaient passées de 40 à 90% de la surface total cultivée, démontrant ainsi la rapidité de l'adoption de ces nouveaux concepts de conservation du sol.

Le démarrage d'une fabrication brésilienne de nouvelles machines spécialement conçues pour le *semis direct* dans de petites propriétés et la créativité des agriculteurs qui ont adapté eux-mêmes leurs anciennes machines, expliquent ainsi ce succès.

³ Le coût moyen d'une machine neuve pour le *semis direct* est de 20 000 dollars, le coût d'adaptation est de 2 000 dollars et chute à 500 US\$ lorsqu'elle est faite par l'agriculteur lui-même (entretien avec les agriculteurs, 1994).

Les premiers résultats :

Une enquête menée auprès de sept agriculteurs (2 très petits⁴ producteurs, 2 petits, 2 moyens et 1 grand) et trois agronomes de la région, a été réalisée en décembre 1994. Cinq questions ont été posées à chaque agriculteur :

- Quelle méthode utilisez vous pour la préparation du sol et depuis combien de temps ?
- Pourquoi avez vous opté pour cette méthode ?
- Quel est l'intérêt de cette pratique ?
- Avez vous constaté une différence de productivité ?
- Que pensez vous faire dans l'avenir ?

Tous les agriculteurs interrogés pratiquent le *semis direct*; depuis 2 à 4 ans. Ils ont opté pour cette méthode après avoir pris connaissance directement (coopérative, agriculteurs voisins) ou indirectement de son effet contre l'érosion. Le principal facteur de décision a été d'ordre économique, mais également écologique (pollution de l'eau en aval, selon les agriculteurs eux-mêmes). Même si les chiffres de productivité ne sont pas probants, tous pensent qu'ils continueront à cultiver de cette manière. Les principaux acquis obtenus par le *semis direct* cités sont : la modification quantitative et qualitative du ruissellement, la disparition des rigoles et griffes d'érosion, la réapparition des vers de terre, le meilleur enracinement du soja plus profond et plus droit.

Il nous paraît clair que les agriculteurs sont maintenant enthousiastes vis-à-vis du *semis direct*, cet optimisme a un effet peut être exagéré sur les réponses à l'enquête.

⁴ classification de la taille de propriété au Sud du Brésil : très petite: jusqu'à 15 ha, petite: de 15 à 60 ha, moyenne: de 60 à 200 ha, grande : plus de 200 ha.

1.5 CONCLUSION

La présentation générale de la zone étudiée permet de mieux comprendre l'intérêt de notre recherche :

- du fait du caractère homogène de la couverture pédologique développée sur basaltes à travers les Etats du Sud-Ouest et Sud du Brésil (*São Paulo, Paraná, Santa Catarina et Rio Grande do Sul*), les résultats de notre travail devraient être extrapolables à toute cette région ;

- la connaissance du comportement hydrodynamique de cette couverture est particulièrement importante puisqu'il s'agit de sols riches, intensément cultivés et qui placent le Brésil parmi les premiers exportateurs mondiaux de blé et surtout de soja. Ce capital est d'autant plus à préserver que l'agressivité climatique n'est pas négligeable sur cette région de marge sub-tropicale ;

- enfin, le milieu humain (les agriculteurs eux-mêmes) est original, dynamique et prêt à tester différentes pratiques pour concilier rendements et conservation des sols.

Le cadre physique et humain régional étant dressé, il convient maintenant d'aborder l'étude détaillée des sites et des méthodes utilisées.

PARTIE 2

SITES ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

SITES ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Cette deuxième partie est fondée sur le travail de *mestrado* et doctorat réalisé de 1990 à 1993 au Brésil, dans le cadre du projet Potiribu ainsi que sur les recherches de P. Chevallier effectuées dans ce même projet. Les éléments du cadre local de l'étude y ont été précisés. Les deux bassins versants emboîtés choisis, dont la taille du plus grand est de l'ordre du km², sont situés et exposés. Les sols étudiés sous la forme d'une toposéquence sont décrits, ainsi que la couverture végétale, la structure agraire et les méthodes culturales. Une étude détaillée des pluies naturelles et du mini-simulateur de pluies permet de définir le protocole utilisé pour les pluies simulées. Les différents traitements sur petites parcelles cultivées sont examinés et les dispositifs de mesure décrits et discutés. Les sites concernent des bassins versants emboîtés. Leur localisation et caractéristiques sont détaillées ci-dessous

2.1 LES BASSINS

2.1.1 Localisation

Le bassin du Donato est localisé dans le municípe (commune) de Pejuçara au nord-ouest de l'Etat du Rio Grande do Sul au sud du Brésil (fig. 8). Pejuçara est le centre géométrique des trois villes importantes de cette région: Ijuí, Cruz Alta et Panambi. Ses coordonnées géométriques sont 28° de latitude S et 53° de longitude O.

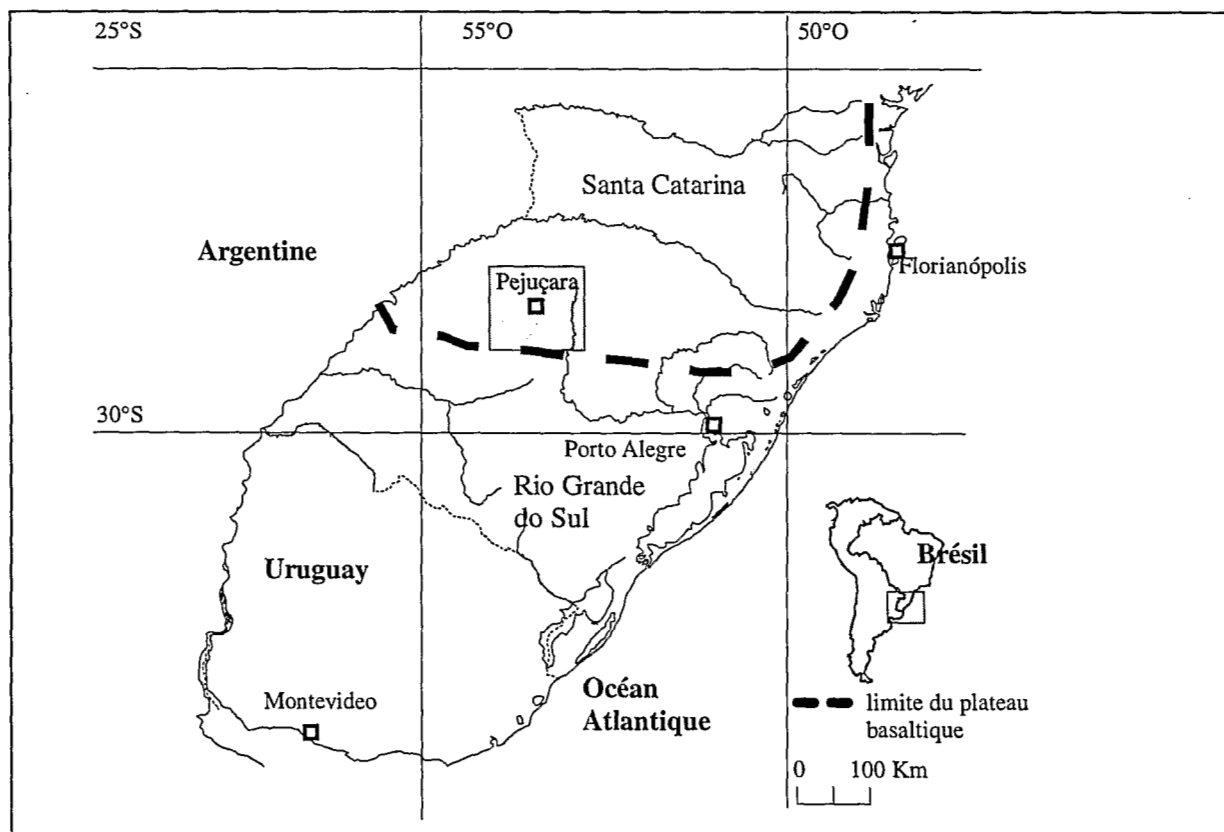


Figure 8. Localisation de la région d'étude

Le territoire de la commune s'étend sur 44 400 ha. Sa population d'un peu plus de quatre mille habitants, principalement d'origine italienne, est fortement rurale (44%). La taille des 853 exploitations recensées varie fortement entre moins de 3 ha et plus de 1200 ha (fig. 9).

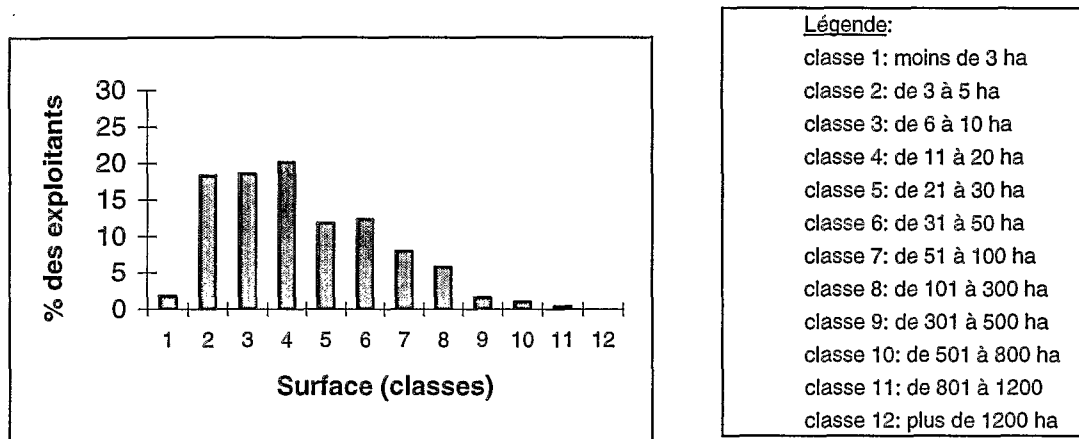


Figure 9. Distribution des exploitations de Pejuçara selon leur taille (source : Secretaria da Fazenda de Pejuçara, 1993, n.p.).

2.1.2 Les bassins emboîtés

Le sous-bassin du Donato (1 km²) fait partie du bassin du Potiribu (563 km²) lui même dans le grand bassin du rio de la Plata qui couvre d'importantes surfaces au Brésil (1 415 000 km²), en Argentine (920 000 km²), au Paraguay (410 000 km²), en Bolivie (205 000 km²) et en Uruguay (150 000 km²) (Secretaria général de la organisation de los Estados Americanos, 1969).

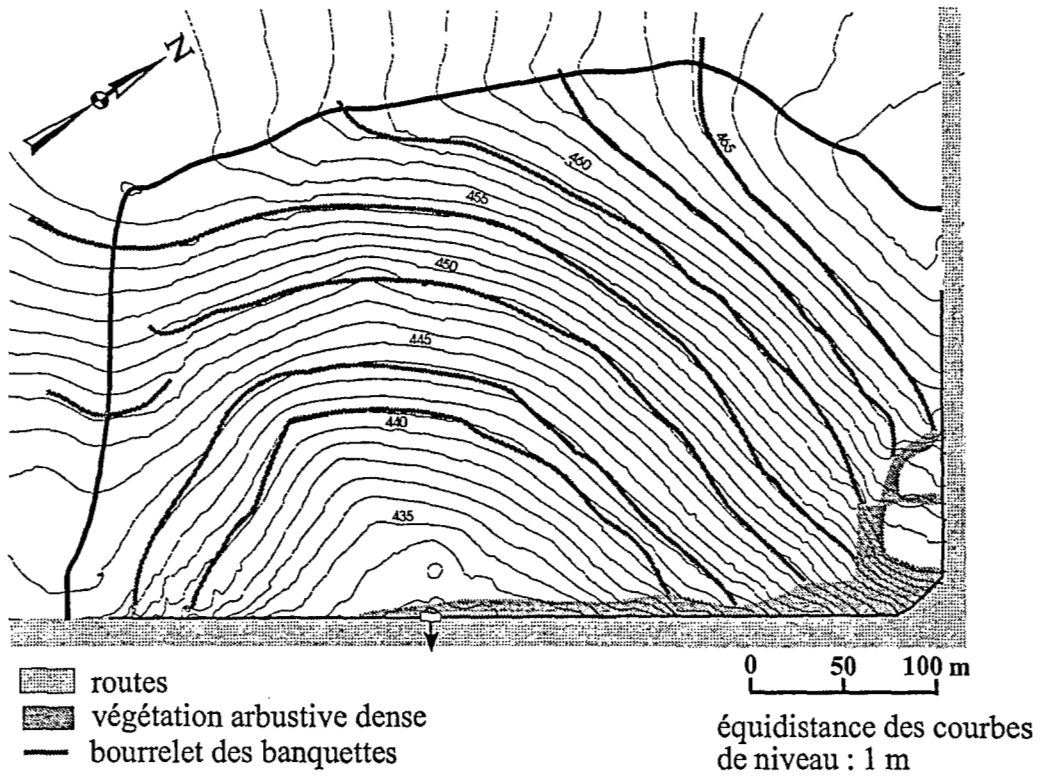
Le sous-bassin d'Anfiteatro de 14 ha est emboîté dans le bassin du Donato. Il est localisé au nord-ouest en amont de ce bassin, entre 469 m et 431 m d'altitude (fig.10).

2.1.3 Topographie et réseau hydrographique

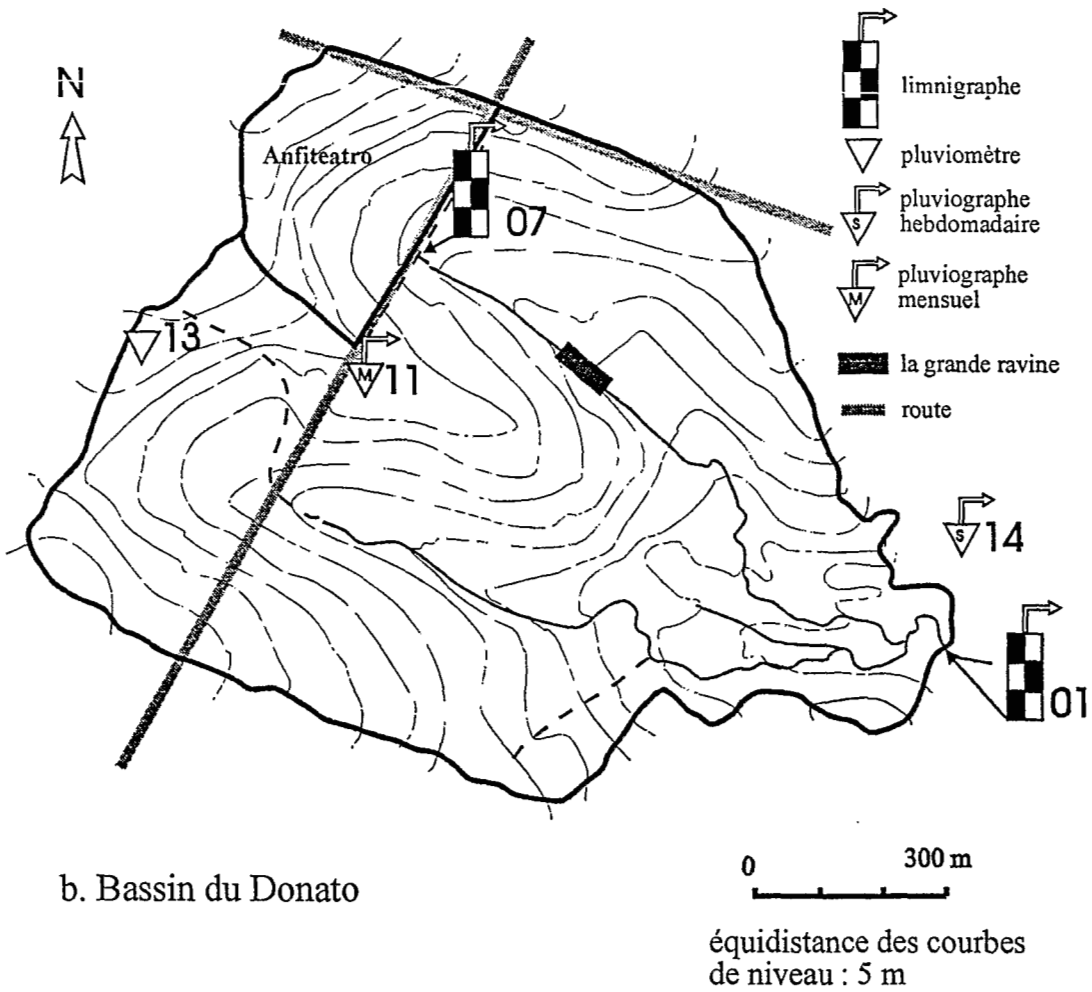
L'altitude maximale du bassin de Donato est de 469 m; son exutoire se situe à 397 m. La longueur de pente moyenne (distance du sommet de l'interfluve au cours d'eau en suivant la ligne de plus grande pente) varie entre 200 et 300 m. Le bassin a une pente moyenne de 5%. Les versants, de forme convexe aux limites du bassin et concave au centre, ont des pentes comprises entre 3 et 10%.

Le bassin de Donato est drainé par deux cours d'eau qui s'écoulent parallèlement, l'un au nord-est et l'autre au sud-est, et qui ont respectivement leur source à 435 et 455 m d'altitude. Ils confluent à une altitude de 400 m formant alors la rivière Donato. Entre ces deux drains, un troisième très court rejoint le cours d'eau de nord-est à 200 mètres de l'aval du bassin. Ces deux cours d'eau présentent le plus souvent un encaissement profond (jusqu'à 7 mètres) qui rend les débordements quasi impossibles. Ces cours d'eau partagent le bassin en 3 parties à peu près équivalentes (fig. 10).

Le bassin d'Anfiteatro est situé entre 469 et 431 m. Il a 320 m de large et une pente moyenne de 9%. Sa forme concave en demi-cercle évoque celle d'un amphithéâtre. Il est aménagé de sept banquettes en courbes de niveau qui ont entre 15 et 50 m de largeur et entre 250 et 500 m de longueur (fig. 10).



a. Bassin d'Anfitreatro



b. Bassin du Donato

Figure 10. Carte des bassins d'Anfitreatro et du Donato

2.1.4 Les sols

Une toposéquence de 6 profils pédologiques implantés suivant la ligne de plus grande pente a été étudiée sur le bassin d'Anfiteatro par Boulet *et al.* (1993), choisie de manière à recouper le site de simulation de pluie. Elle est présentée par la figure 11.

La couverture pédologique est très homogène dans son ensemble. Les sols, classés comme *latossolos roxos* distrophes lors de la reconnaissance cartographique (Brasil, 1973), ont localement des caractères de *terras roxas estruturadas*. Leur couleur est rouge foncé (2,5 YR en sec) et ils présentent une structure polyédrique bien développée, un arrangement en microagrégats et une cérosité caractéristiques. Les variations le long de chaque profil sont essentiellement limitées à l'épaisseur des horizons, à la porosité inter-agrégats, et à la présence d'un horizon plus compact (entre 20 et 40 cm) sans doute provoqué par les machines agricoles (semelle de labour). La porosité inter-agrégats est bien développée dans l'horizon de surface et diminue un peu au-delà de 50 cm. Dans le quart inférieur de la pente, l'épaisseur du profil augmente brusquement et passe alors de 3 à plus de 8 m. Une description sommaire des horizons est donnée (fig. 11). Une couche humide et plastique, qui retient l'eau et a donc un rôle important à jouer dans l'hydrodynamique du versant, a été observée dans les horizons (3) et (4) en les recoupant et a été mise en évidence tout au long de la séquence. Des analyses granulométriques et chimiques réalisées sur des échantillons collectés à la verticale des parcelles de simulation de pluies sont regroupées dans l'annexe 1. Les analyses granulométriques indiquent une texture franchement argileuse de l'ensemble des profils (toujours > 50%) qui croît en profondeur pour atteindre jusqu'à 80%.

2.1.5 La végétation et l'occupation du sol

Trois agriculteurs cultivent le sol dans le bassin du Donato : Antoninho, Neldo et Chico. Antoninho utilise la technique du *semis direct* depuis 1992 ; les deux autres ont utilisé le système *conventionnel* jusqu'en mai 1994.

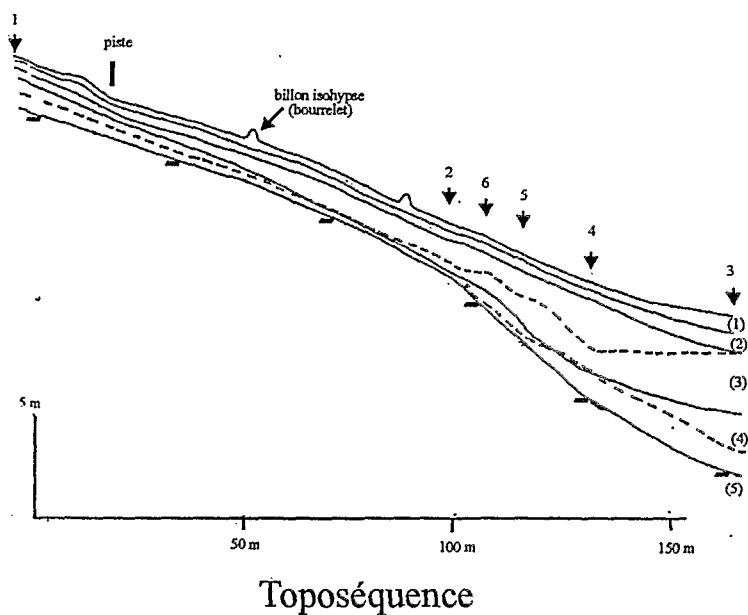
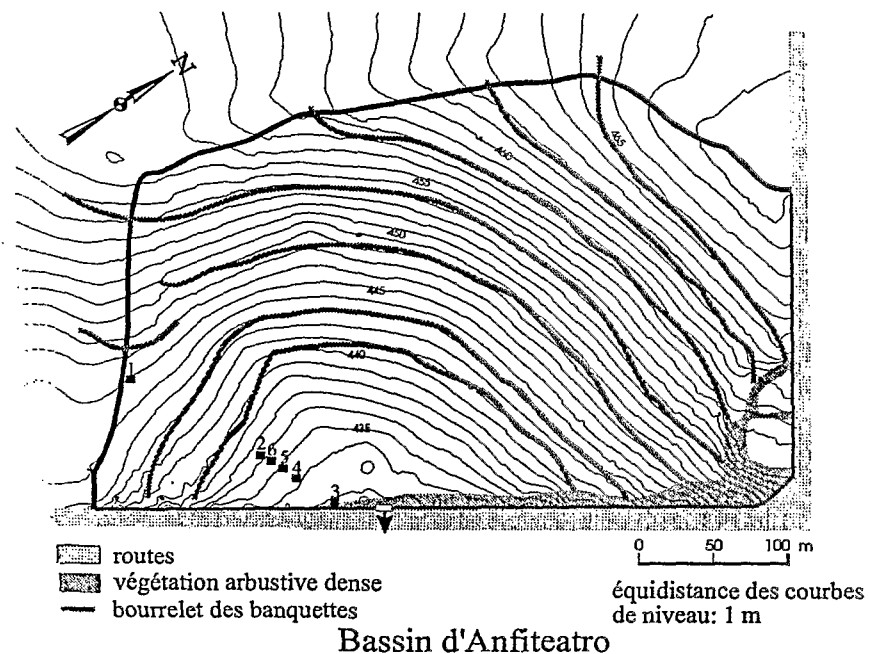
Le bassin du Donato est entièrement cultivé à l'exclusion d'une habitation couvrant 1000 m² avec ses dépendances (jardin, hangar et grange), d'une mince bordure, de 1 à 5 m de large, située le long du réseau hydrographique, et de quelques petits bosquets d'arbres isolés, ultimes témoins de la couverture végétale originelle. Les forêts galeries existent lorsque le réseau hydrographique est d'un accès difficile, en général à cause d'un encaissement profond (entre 3 et 7 m). Elles disparaissent lorsque le talweg s'élargit ou présente une large zone inondable.

Le bassin du Donato est aménagé en banquettes (système *conventionnel*) à base étroite suivant les courbes de niveau (fig. 10), excepté chez Antoninho qui pratique le *semis direct* et a supprimé récemment les banquettes.

Le bassin d'Anfiteatro comporte 7 banquettes, qui -via les drains de rebord- concentrent le ruissellement des parcelles dans le chemin de direction nord-est/sud-ouest qui limite le bassin vers l'aval. Le ruissellement passe sous le chemin à travers une buse de 1 m de diamètre et s'écoule jusqu'à la rivière du Donato, en passant par la grande ravine (fig. 10).

Les autres parcelles fonctionnent de la même manière. Le ruissellement est drainé via les banquettes jusqu'au Donato en passant par l'un des deux cours d'eau qui drainent le bassin.

Trois petites routes traversent ou longent le bassin et permettent l'accès aux parcelles, aux bâtiments agricoles et à l'habitation d'Antoninho.



(1) - Horizon cultural argileux rouge foncé (2,5 YR 3/4 à 3/3 sec).

A l'amont, profil 1, structure à tendance prismatique 15 cm, à sous-structure polyédrique 2 cm peu nette, cohésion faible. Abondants volumes microagrégés. Porosité intermicroagrégats bien développée, porosité tubulaire présente.

A l'aval, profil 2; structure polyédrique très mamelonnée, 0,5 cm à 1 cm très bien développée, cohésion faible. Les polyèdres et intermicroagrégats bien développée.

Cet horizon contient la majeure partie des racines.

(2) - Horizon nettement plus cohésif que ses encadrants, à la tarière et au couteau. La transition inférieure se fait sur 5 cm. Couleur légèrement plus vive que 1 (2,5 YR 3/4 sec). Argileux, structure polyédrique 1 à 2 cm, très développée, en assemblage compact. Les agrégats polyédriques sont anguleux et présentent des faces lisses, leur cohésion est moyenne. Porosité tubulaire des agrégats, moyenne à faible.

(3) - Horizon de même couleur, mais moins dur au couteau et à la tarière que 2. Argileux. Même structure qu'en (2). Structure polyédrique plus grossière (2 à 4 cm) et à faces plus lisses que (2).

Porosité tubulaire un peu plus développée qu'en 2. Présence de petits grains (mm) blancs (silice ?), à forme mamelonnée augmentant lentement vers le bas. Rares taches et concrétions noire (Mn).

(4) - Dans cet horizon, apparaissent de petits fragments de basalte altéré, augmentant irrégulièrement en nombre et en taille vers le bas. Les grains blancs augmentent légèrement en nombre et en taille (1 à 2 mm).

(5) - Basalte altéré dominant. rouge violacé à petits domaines blancs ou ocre, parfois rouge à taches gris brunâtre.

Matériel très humide, plastique. A l'aval, lui fait suite vers le bas un matériel nettement plus sec. A l'amont, profils 1 et 2, on n'a pas rencontré la base de ce matériel très humide.

Figure 11. Toposéquence et description sommaire des sols d'Anfiteatro (Boulet et al. 1993)

2.1.6 Les pluies

Le poste d'Ijuí-IPAGRO, fournit des données depuis 1943, mais les séries de données ne sont pas complètes. Elles ont été traitées par Chevallier (1911) de 1943 à 1976, soit 34 ans, et de 1963 à 1988, soit 26 ans. Pour les postes de Cruz Alta, Santo Angelo et Santa Clara do Ingai, une série plus complète de 1943 à 1988 a été analysée (Chevallier, 1991). Dans le cadre de cette étude, les données issues d'un pluviographe installé dans le bassin de Donato de septembre 1989 à décembre 1994 ont été également utilisées. La comparaison de ces données montre que :

- il n'y a pas de tendance saisonnière dans la distribution mensuelle des hauteurs de pluies, que ce soit sur la période du 01/09/1989 au 20/12/1994 (fig.12) ou sur celle des séries plus longues (Chevallier,1991). Les hauteurs mensuelles des précipitations sont généralement importantes, même s'il peut y avoir des alternances de mois secs et mois humides;

- la durée des événements de la série de 1963 à 1988 du poste d'Ijuí-IPAGRO (Tabl. II) est systématiquement plus élevée en automne et en hiver. Les intensités sont les plus élevées en été et les plus faibles en hiver, celles d'automne et de printemps étant intermédiaires (Chevallier, 1991).

Tableau II. Variations saisonnières de la durée des pluies.
(Poste Ijuí-IPAGRO, 1943-1976) (Chevallier, 1991).

saison	durée moyenne (minutes)
été (décembre à mars)	190
automne (mars à juin)	234
hiver (juin à septembre)	239
printemps (septembre à décembre)	213

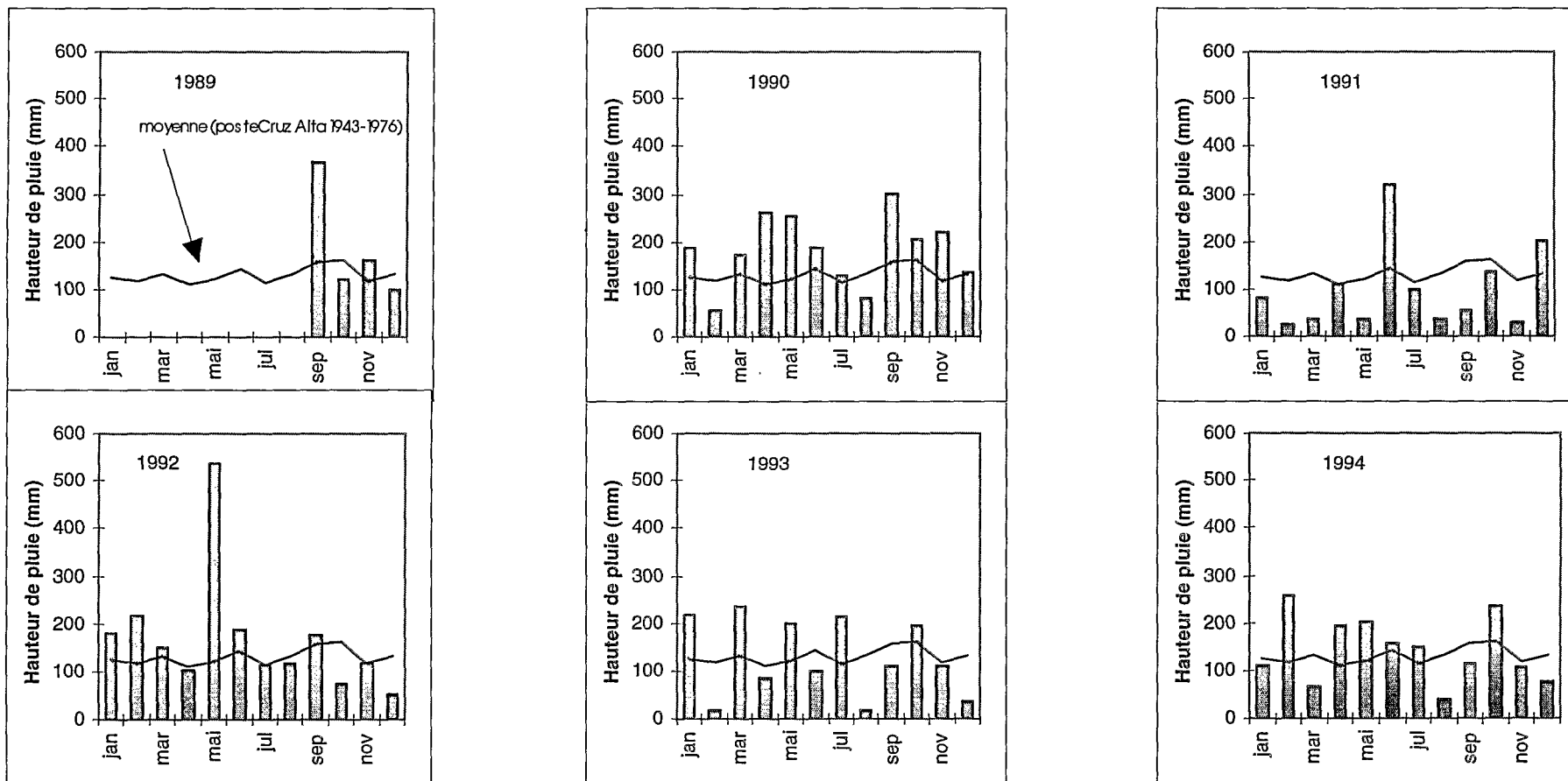


Figure 12. Hauteurs mensuelles des pluies sur le bassin de Donato de 1989 à 1994 (pluviographe 11) et moyenne (Poste de Cruz Alta, 1945 à 1985).

2.2 LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La localisation des différents dispositifs sur le bassin est présentée sur la figure ci-dessous.

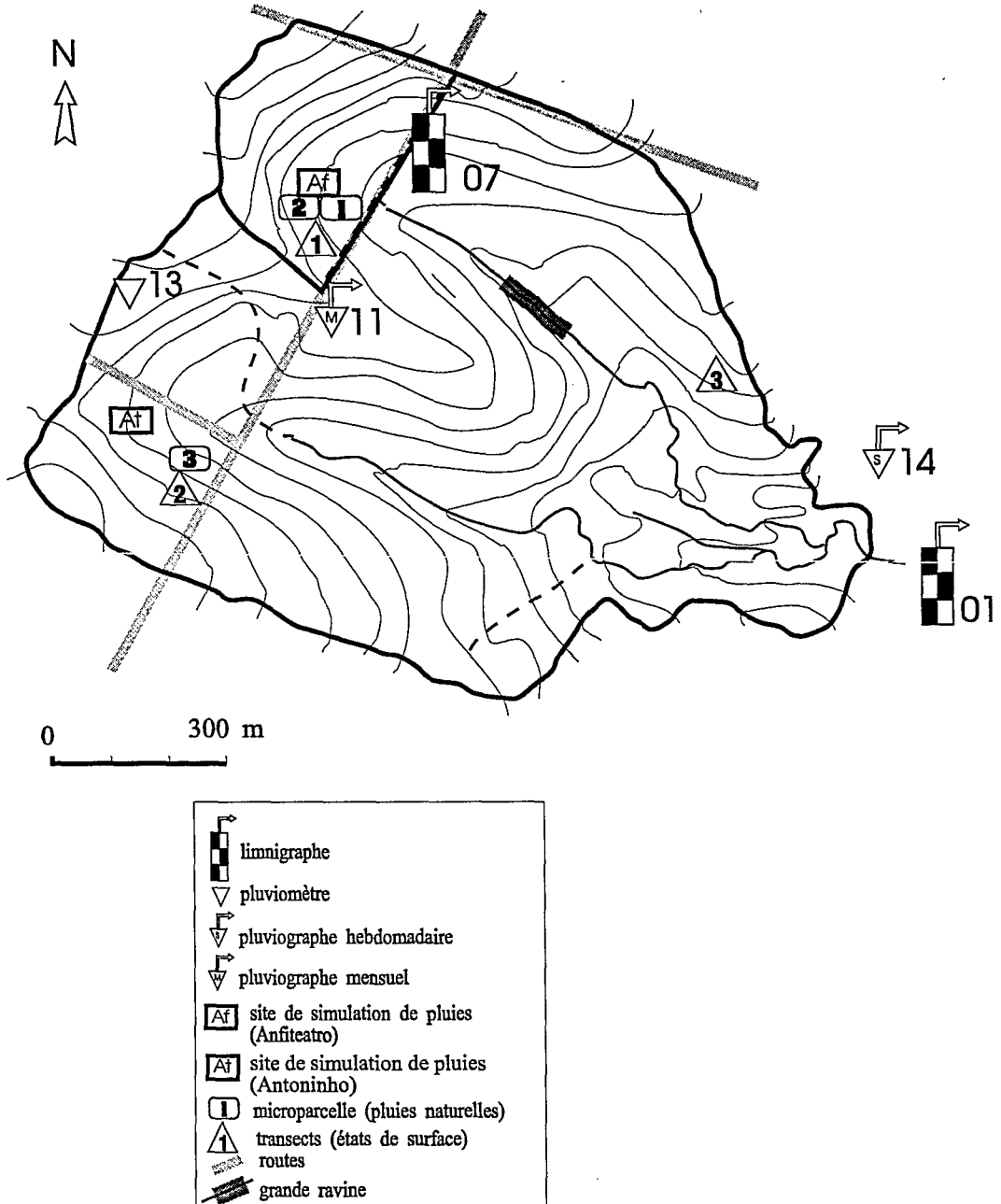


Figure 13. Localisation des dispositifs expérimentaux sur le bassin de Donato

2.2.1 Mesure des précipitations

Dans le bassin du Donato, deux pluviographes (11 et 12) et un pluviomètre (13) ont été installés (fig. 13 et tabl. III) en novembre 1989 (début du projet) et juin 1990 respectivement. Le pluviomètre a été installé à proximité de la maison de l'exploitant Antoninho, chargé des relevés. La du pluviomètre est faite tous les jours à 8 heures du matin. Le pluviographe hebdomadaire est sous la responsabilité d'un observateur bénévole et le pluviographe mensuel est relevé par l'IPH. Le pluviographe 11 (Lambrecht) a été remplacé par un autre de même précision (IH Hidromec 3) en raison de problèmes techniques.

Tableau III. Caractéristiques des pluviographes et du pluviomètre du bassin du Donato.

code	type	nom	appareil	date début	date fin	période.	vitesse (mm/h)
13	pluviomètre	Alto Donato		27/06/90			
11	pluviographe	Donato central	Lambrecht	29/11/89	25/04/91	mensuel	10
11	pluviographe		IH Hidromec3	25/04/91		mensuel	10
12	pluviographe	Baixo Donato	IH PLG 7S	07/11/89	14/12/90	hebdomad aire	2,3
14	pluviographe	Baixo Donato	IH PLG 7S	14/12/90		hebdomad aire	2,3

2.2.2 Choix des sites

Microparcelle sous pluie simulée

La simulation de pluie a été choisie comme méthode pour nous permettre de calculer et d'interpréter les résultats hydro-sédimentologiques en fonction des états de développement de la surface du sol et de la plante cultivée tout au long du cycle cultural.

La couverture pédologique, la couverture végétale (cultivée) pour une culture donnée et les pluies sont relativement homogènes dans le bassin. Pour une même plante cultivée sur un même sol, c'est la préparation du sol qui est le principal facteur déterminant de la variation de l'état de surface du sol et c'est donc le principal paramètre qui a été pris en compte dans le choix des sites de mesure.

Au début de notre étude, nous avons choisi de provoquer des pluies simulées sur une seule parcelle agricole du bassin d'Anfiteatro travaillée de manière *conventionnelle*, ce qui était la pratique la plus répandue sur la commune de Pejuçara. Le rapide développement de la technique du *semis direct* dans cette région nous a conduit ensuite à sélectionner une parcelle agricole voisine préparée selon ce système.

Un second critère d'accessibilité a présidé au choix précis de l'emplacement de chacune des microparcelles. L'expérimentation, à l'aide du simulateur de pluie, nécessite en effet un accès aisé vers les microparcelles et vers le point d'approvisionnement en eau. Les microparcelles sont donc à proximité immédiate (une cinquantaine de mètres) de l'un des chemins du bassin.

Microparcelles sous pluies naturelles

Des microparcelles sous pluies naturelles ont été installées à proximité des sites de simulation de pluies (mais dans une zone non piétinée lors de mesures précédentes) pour essayer de comparer la production du ruissellement et l'érosion de cette parcelle avec celles sous pluies simulées. Deux microparcelles ont été installées sur le bassin d'Anfiteatro, préparées selon le système *conventionnelle*, une trois mètres en aval d'un bourrelet d'une banquette et l'autre trois mètres en amont. La troisième microparcelle a été installée chez Antoninho, sur un champ cultivé en *semis direct*. Un suivi de l'état de surface du sol a été fait sur ces microparcelles à l'aide des fiches standardisées décrites plus loin.

Transects de suivi des états de surface du sol

Des transects de 20 m de longueur ont été décrits de manière à effectuer les mêmes suivis que sur les microparcelles à l'aide des mêmes fiches standardisées. Ces transects sont disposés sur trois sites dans le bassin du Donato (fig. 13). Les emplacements des trois transects se trouvent dans des parcelles agricoles qui appartiennent à divers propriétaires, afin de vérifier s'il y a des différences importantes. Le premier transect se situe chez Antoninho. Les deux autres sont placés en amont et en aval du bassin, dans des parcelles travaillées conventionnellement. Ces transects permettent d'avoir une idée de la variabilité spatiale des états de surface du sol et du couvert végétal dans le bassin du Donato.

2.2.3 Mesure d'infiltration et d'érosion sous pluie simulée

La simulation de pluie consiste à produire une pluie (P , mm) sur un espace restreint en respectant au mieux les caractéristiques majeures des pluies naturelles : intensité, durée, énergie cinétique des gouttes. Le ruissellement (R , mm) est mesuré et l'infiltration (I , mm) est obtenu par différence ($I = P - R$).

Son principal intérêt pour l'étude du ruissellement et de l'érosion est la possibilité de faire varier un seul paramètre. On peut par exemple fixer les caractéristiques de la pluie ou le type de sol, la pente, le traitement appliqué (préparation et plante) et simuler la pluie à différents moments du développement de cette plante.

Il faut avoir en mémoire que la simulation de pluie est pratiquée sur une surface réduite et que ses résultats ne peuvent donc pas être directement transposés à l'échelle du bassin versant. Cependant, pour les études comparatives entre les paramètres de même échelle, elle peut constituer un outil précieux.

Parmi les différents simulateurs (tableau IV), nous avons opté pour le simulateur ORSTOM (Asseline et Valentin, 1978), mis à la disposition du Projet, qui appartient au type asperseur. Ce type de simulateur a l'avantage de nécessiter moins de hauteur que les simulateurs à gouttes, parce que les gouttes sortent des buses avec une vitesse initiale qui leur permet d'atteindre plus rapidement leur vitesse terminale, facteur de l'énergie cinétique. Ce simulateur a été choisi pour simuler les pluies sur le terrain avec une simplicité d'opération appréciable. De plus, automatisé électroniquement, il permet une pré-programmation d'une pluie continue comportant jusqu'à dix intensités-durées. Son choix a été facilité par la collaboration de l'ORSTOM au Projet Potiribu.

Tableau IV. Caractéristiques de différents simulateurs de pluies.

Référence	Type	Site	Contrôle d'intensité	Ecs/Ecn (%)
Roth <i>et al.</i> (1985)	à goutteur	terrain	charge d'eau	55 à 81 pour intensité de 60 mm/h
Bertrand et Parr (1961)	à asperseur	terrain	type de buse	
Swanson (1965)	à asperseur	terrain	rotation	
Asseline et Valentin (1978)	à asperseur	terrain	oscillation	57 à 90 pour des intensités entre 37 et 140 mm/h
Viani (1986)	à asperseur	labo	oscillation	80 à 97 pour des intensités entre 30 et 120 mm/h

Ecs : Energie cinétique des pluies simulées

Ecn : Energie cinétique des pluies naturelles

Le dispositif (fig. 14) permet de reproduire des averses sur une microparcelle carrée de 1 m², délimitée par un cadre métallique dont le coté aval est percé d'orifices de 10 mm de diamètre tous les 20 mm. Au dessous, une gouttière en V avec une double pente de 3 % collecte les eaux du ruissellement et les déverse dans la cuve d'un limnigraphe à tambour. Le déroulement du papier est de 6,4 mm par minute ; 1 cm d'ordonnée correspondant à un ruissellement de 1 l/m², c'est à dire 1 mm de lame ruisselée. On peut ainsi connaître les ruissellements pour des pas de temps très fins.

Asseline et Valentin (1978), qui ont conçu l'appareil utilisé, en décrivent ainsi le principe : "L'arrosage de la parcelle est assuré par un balancier asservi par un moteur commandé. L'intensité de pluie est réglée par l'angle du balancier. L'ensemble est supporté par une tour démontable en forme de pyramide tronquée, susceptible de recevoir une bâche pour la protection contre le vent. Un dispositif permet de maintenir l'axe d'oscillation du gicleur au-dessus du centre de la parcelle d'expérimentation".

La pluie est réglable à tout moment, sans interruption dans une gamme d'intensités comprises entre 30 et 140 mm/h. On peut pré-programmer jusqu'à dix séquences d'intensités constantes durant des intervalles de temps compris entre 1 et 99 minutes. Le changement d'intensité durant la pluie est automatique. L'eau est fournie sous pression par une pompe. La pression est contrôlée par 2 manomètres, l'un au sommet de la tour, juste avant le gicleur, l'autre à la sortie de la pompe, pour les réglages fins.

Choix des dates des simulations

Les dates des simulations de pluies ont été choisies de manière à couvrir les différents états de la surface du sol dans la rotation culturale avoine - soja. Le premier facteur décisif pour le choix de la date a été le calendrier de travail du propriétaire (dates de semis et dates de récolte). Le délai de déblocage des crédits de recherche par le gouvernement brésilien, qui ne coïncide malheureusement pas toujours avec les choix techniques, nous a contraint à moduler les dates retenues.

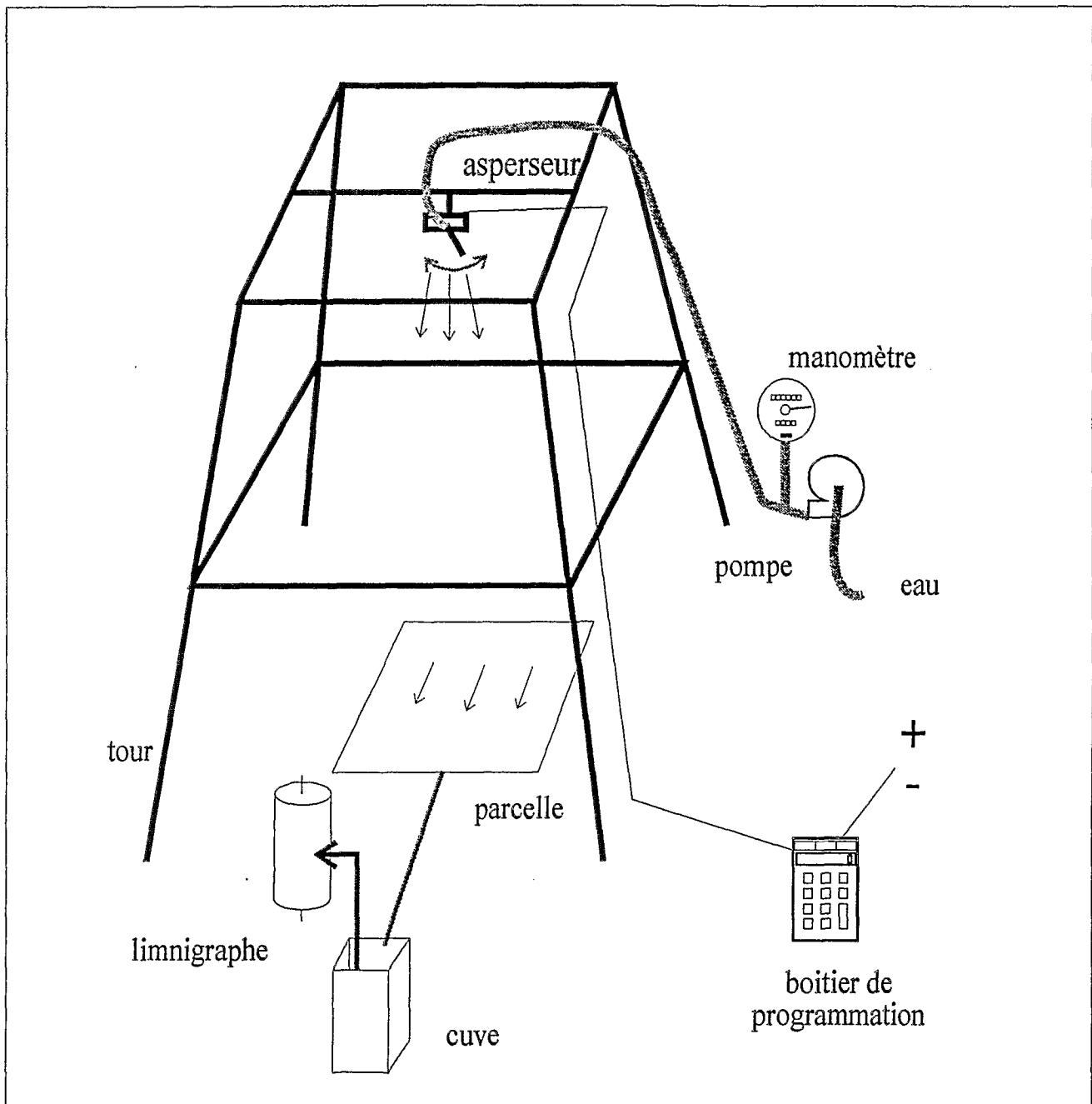


Figure 14. Simulateur ORSTOM.

Protocole

Au total, six campagnes de mesure ont été effectuées : quatre sur le sous-bassin d'Anfiteatro, préparé de façon *conventionnelle* et deux sur le bassin du Donato sur une parcelle cultivé en *semis direct* (fig. 15, tabl. V). Pour l'organisation des données, les six campagnes sont repérées par des chiffres (1, 2, 3, 4, 5, et 6) et les trois microparcelles par des lettres (A, B et C).

Un épisode de pluie simulée est constitué de 5 séquences successives, d'intensités et durées différentes (fig. 16). Le protocole utilisé a été choisi en fonction du diagramme intensité-durée-fréquence du hyétogramme d'une pluie de 80 mm, qui correspond à la pluie de récurrence annuelle évaluée pour la région d'étude (fig. 4).

Lors des différentes campagnes, quatre épisodes de pluies consécutives espacées de 24 heures ont été appliquées sur les microparcelles A, B et C situées les unes à côté des autres et espacées d'environ 2,5 m. En fonction de ce protocole, on peut simuler les mêmes pluies à partir de conditions différentes d'état hydrique initial du sol.

Comme il est difficile, en raison des déplacements successifs du simulateur d'une parcelle à l'autre et des conditions de vent, d'obtenir les mêmes hauteurs de pluie aux mêmes intensités, il est nécessaire de procéder au contrôle de calibrage du simulateur. Celui-ci est réalisé à l'issue de chaque pluie simulée en utilisant un cadre métallique de 1 m² dont le fond couvre totalement la parcelle et qui reçoit intégralement la pluie. Chaque intensité de pluie est étalonnée pendant quatre à cinq minutes par enregistrement par le limnigraphe. Cet étalonnage n'est possible que lorsque la culture est peu développée. Dans le cas contraire, le bac risquant de couler et d'abîmer la culture, l'étalonnage est réalisé à proximité immédiate des microparcelles, ce qui est évidemment moins satisfaisant.

Tableau V. Protocole des pluies simulées.

Campagnes	Date	Culture	Nombre de jours depuis le semis	Localisation et type de pratique
1	29/05 - 01/06/91	avoine	9	
2	27 - 30/08/91	avoine	99	Anfiteatro
3	10 - 13/12/92	soja	8	<i>conventionnel</i>
4	26 - 29/03/93	soja	113	
5	14 - 17/05/93	repousse spontanée d'avoine	37 jours après la récolte de la soja	Antoninho <i>semis direct</i>
6	01 - 04/09/93	avoine	122	

a) Etat hydrique du sol

Pendant les expériences de simulation de pluie, un profil d'humidité du sol a été réalisé quelques minutes avant chaque séquence de pluie, à proximité immédiate de la parcelle, en prélevant trois échantillons de sol par tranche de 10 cm jusqu'à 60 cm de profondeur pour les deux premières campagnes et jusqu'à 90 cm pour les suivantes.

Les échantillons humides sont pesés sur le terrain puis séchés à l'étuve en laboratoire (24 heures à 105 °C) et pesés à nouveau. L'humidité pondérale est calculée par différence entre poids humide et poids sec. La valeur retenue correspond à la médiane des trois échantillons.

La mesure de la densité apparente en place est faite à l'aide de cylindres calibrés de 64 cm³ avec, comme pour les prélèvements d'humidité, trois répétitions à chaque profondeur. Les échantillons sont séchés à l'étuve (24 heures à 105°C). La densité apparente est calculée en faisant le rapport entre le poids sec et le volume. La valeur médiane des trois résultats est retenue. Elles ont été mesurées à plusieurs reprises au cours de l'étude. Le premier prélèvement a été fait au moment de la première campagne de simulation de pluies. Un second prélèvement a été fait pendant la quatrième campagne afin de vérifier les valeurs initiales et ensuite été réalisé systématiquement à l'occasion de chaque campagne.

L'humidité volumique est calculée comme étant le produit de l'humidité pondérale par la densité apparente à la profondeur du prélèvement. Le profil hydrique est établi à partir des humidités volumiques calculées à chaque profondeur.

La recherche d'un indice simple, en relation avec l'état hydrique du sol est nécessaire pour apprécier ce paramètre là pour les périodes pour lesquelles il n'y a pas de mesures. L'indice de précipitations antérieures (IPA) également employé par Casenave (1982) et par Chevallier (1983 et 1990) a été retenu. Cet indice, calculé à partir de données pluviographiques ou pluviométriques présente l'avantage d'être facile à obtenir, mais il a l'inconvénient de ne pas prendre en compte le type de sol et la topographie. Plus le sol est humecté, plus la valeur de l'indice sera élevée.

Cet indice se formule ainsi :

$$IPA_n = (IPA_{n-1} + P_{n-1}) e^{-at} \quad (\text{équation 1})$$

où:

IPA_n : Indice des précipitations antérieures au début de l'averse n (en mm)

P_n : hauteurs des averses n (en mm)

a : coefficient pris égal à 0,5, comme en Afrique de l'Ouest

t : durée (en jours) séparant la fin de l'averse n-1 du début de l'averse n

b) Production du ruissellement et de la charge solide

Le protocole adopté consiste à appliquer des pluies de forte intensité pour provoquer le ruissellement et l'arrachement des particules.

Les débits liquides ont été enregistrés pour les trois microparcelles : A, B et C. Les débits solides n'ont été mesurés que sur la microparcelle B. Les parcelles A et C sont utilisées comme des parcelles de contrôle pour les données concernant le ruissellement.

La principale valeur enregistrée au cours de l'expérience est le ruissellement cumulé. L'infiltration cumulée est obtenue par la différence entre la précipitation cumulée et le ruissellement cumulé. L'intensité de la pluie (IP, mm/h) est calculée par le rapport entre la hauteur de pluie cumulée pendant un intervalle de temps et la durée de cet intervalle. Il en est de même pour le ruissellement. L'intensité d'infiltration (II, mm/h) est obtenue par la différence entre l'intensité de la pluie et l'intensité du ruissellement (IR, mm/h). Nous n'avons pas mesuré l'interception par la végétation et le micro relief ; il faudra en tenir compte dans l'interprétation des résultats.

Les échantillons d'eaux de ruissellement issues de la parcelle B ont été collectés, à des intervalles d'environ 3 minutes pendant toute la phase d'écoulement.

Après la pluie, les dépôts prisonniers dans la gouttière et le canal ont été également collectés. Les échantillons sont ensuite transportés et analysés au laboratoire de sédimentologie de l'IPH. A partir de la charge solide mesurée des échantillons, la concentration instantanée en sédiments au moment du prélèvement (C_{is} , g/l) est calculée. Le dépôt issu de la gouttière après chaque pluie simulée est également mesuré. La courbe de concentration de la totalité des sédiments pendant la durée de la pluie et le ressuyage après la fin de l'averse est ainsi obtenu. L'intégration de cette courbe donne le poids de sédiments transportés à la cuve pour chaque simulation de pluie. Si on additionne le poids des sédiments déposés à la gouttière après chaque pluie simulée on obtient le poids total de sédiments. Pour obtenir la concentration totale en sédiments (C_{ts} , g/l), on fait le rapport entre ce poids total de sédiments (g) et le volume ruisselé total (l).

2.2.4 Mesure d'infiltration et d'érosion sur microparcelles sous pluies naturelles

Trois microparcelles de 1 m² ont été installées sur le terrain (fig. 13). Elles sont délimitées par un cadre identique à celui utilisé pour les expériences de simulation de pluie de 1 m². Le ruissellement est dirigé par un tube en plastique vers un bidon de 40 litres, gradué de litre en litre, où il est stocké. Après chaque pluie, un observateur enregistre le volume écoulé et collecte les échantillons, après avoir homogénéisé le liquide par agitation afin d'analyser ultérieurement la concentration des sédiments en laboratoire. Parfois, le ruissellement mesuré et l'échantillon collecté résultent du cumul de plusieurs événements pendant une journée ou même pendant une durée plus longue. A chaque fois que le propriétaire effectue la préparation de son sol, on enlève le dispositif expérimental et c'est pourquoi il n'y a pas de données pour la période du 06/04/1993 au 04/06/1993.

Le pluviographe 11 (fig. 13), relevé mensuellement, a été installé à proximité de ces trois microparcelles (à moins de 400 m de la parcelle la plus éloignée).

L'évolution de l'état de la surface du sol et du couvert végétal dans ces microparcelles a été suivie avec une fréquence mensuelle pendant la rotation avoine-soja (1992/1993) à l'aide de fiches d'observations standardisées décrites ci-dessous.

2.2.5 Caractérisation de la surface du sol

Une caractérisation des états de surface a été faite avec une fréquence mensuelle pendant la rotation 92/93 pour les microparcelles et les transects sous pluie naturelle et avant chaque épisode de pluie pour les pluies simulées. La grille de caractérisation est celle proposée par Casenave et Valentin (1989) et adaptée aux conditions de la région d'étude. Elle prend en compte la végétation, le microrelief et la formation des organisations pelliculaires superficielles (OPS). Cette caractérisation est fondamentale pour l'interprétation des processus hydro-sédimentologiques. La fiche d'observation type mise au point est présentée en annexe 2.

Les observations peuvent être confrontées avec les photos prises à l'occasion de chaque description des microparcelles et des transects sous pluies naturelles.

A partir de la troisième campagne de simulation de pluie, des photos des microparcelles ont été systématiquement prises avant et après chaque averse. Pour la microparcelle B, des photos ont été prises également pendant les averses avec une périodicité de 10 minutes approximativement. Cependant, c'est au cours de la troisième campagne que les photos sont les plus parlantes du fait d'une couverture végétale de 5% seulement. Les photos montrent l'évolution de l'état de surface du sol. Pour les campagnes suivantes, le couvert végétal étant supérieur à 70%, les photos n'ont pas donné de résultats satisfaisants. Seules sont exploitées ici les observations suivantes.

1) Couverture végétale

La couverture végétale a été considérée en tenant compte des différentes protections qu'elle peut assurer au sol. Ainsi, on a distingué la présence des résidus de la culture antérieure et celle de la culture actuelle par le taux de couverture qu'ils assurent au sol.

La surface de sol couverte par la végétation a été observée et notée en classes de couverture, codées de 0 à 5.

classe 0 - sol nu

classe 1 - de 5 à 20% du sol couvert

classe 2 - de 20 à 40% du sol couvert

classe 3 - de 40 à 60% du sol couvert

classe 4 - de 60 à 80% du sol couvert

classe 5 - de 80 à 100% du sol couvert

2) La rugosité

A l'échelle de la surface élémentaire, ce sont les petits accidents du terrain naturels ou induits par les techniques culturales, qui confèrent au sol une rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau (rétention superficielle) (Casenave et Valentin, 1988).

Les machines agricoles génèrent deux formes de microreliefs à la surface du sol :

1. les mottes à l'occasion du labour
2. les ondulations plus amples organisées et continues dans le sens du travail formées à l'occasion des hersages et des semis. En l'occurrence, elles ont ici la direction des courbes de niveau.

Le degré d'obstruction, qui traduit l'effet de frein vis-à-vis du ruissellement, a été pris en compte, comme le suggèrent Casenave et Valentin (1989). Il peut être nul, faible, moyen ou fort. Il est évalué en fonction de la continuité de l'obstacle considéré. La même notation a été utilisée pour le microrelief et pour les ondulations. La taille des mottes a été notée également.

classe 0 - nulle - les obstacles occupent de 0 à 5% de la surface

classe 1 - faible - les obstacles occupent de 5 à 30% de la surface

classe 2 - moyenne - les obstacles occupent de 30 à 60% de la surface

classe 3 - forte - les obstacles occupent plus que 60% de la surface

3) Les organisations pelliculaires superficielles (OPS)

Les OPS se forment par destruction de la structure du sol, séparation des agrégats, voire des constituants granulométriques sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies. Il y a réorganisation de la structure en surface par effondrement des mottes. Le colmatage des macropores en surface diminue l'infiltration et, par conséquent, augmente le ruissellement. Selon la clef de détermination des principaux types d'OPS proposée par Casenave et Valentin (1989), dans la région étudiée, on rencontre exclusivement les O.P.S. de type « structural ». C'est une O.P.S. continue, très fine, affectant seulement le premier millimètre du sol, formée par l'effondrement partiel de la structure initiale. Les mottes sont moins anguleuses ; la rugosité diminue, mais il n'y a que rarement formation de croûte individualisée plus continue. Dès que le sol est sec, des fentes apparaissent.

Les mêmes classes que celles utilisées dans la description de la végétation ont été considérées. L'OPS a été observée pendant les visites de terrain et, postérieurement, les observations ont été confrontées avec des photos.

classe 0 - aucune OPS

classe 1 - de 5 à 20% de la surface en OPS

classe 2 - de 20 à 40% de la surface en OPS

classe 3 - de 40 à 60% de la surface en OPS

classe 4 - de 60 à 80% de la surface en OPS

classe 5 - de 80 à 100% de la surface en OPS

2.2.6 Stations de mesure

Bassin d'Anfiteatro

Le ruissellement superficiel du bassin d'Anfiteatro est collecté par le drain de bordure de la route qui traverse le bassin du Donato. L'écoulement sous la route est assuré par une buse de diamètre de 1000 mm. Ce remplacement a été fait à la demande du Projet pour éviter l'inondation de la route pendant les fortes crues. Un reprofilage de la chaussée a été réalisé à la niveleuse de façon à ce que l'eau ruisselée sur cette route ou provenant des parcelles n'appartenant pas au bassin d'Anfiteatro, ne transite pas par la section de mesure. En amont de la buse, un ouvrage en béton concentre toutes les eaux qui proviennent du bassin d'Anfiteatro, soit directement, soit par les deux fossés en terre latéraux. En aval de la buse, un petit canal rectangulaire en béton de 2 m de long par 1 mètre de haut, avec un seuil triangulaire, a été construit permettant ainsi de faire des mesures de débits à l'aide d'un moulinet. Le limnigraphe a été installé à droite de ce canal et est relié à celui-ci par un tube en plastique rigide (fig. 17a).

Vingt-quatre mesures de débit liquide ont été effectuées au cours de 3 crues avec un micro moulinet. Ces mesures nous ont permis de calibrer la formule classique de Manning-Strickler et d'obtenir la courbe de tarage (relation hauteur d'eau / débit liquide).

Le débit mesuré le plus important correspond à un niveau d'eau de 7 cm, alors que le niveau le plus haut enregistré a été de 28 cm pendant la crue du 24/10/92, qui correspond à un débit de 443 l/s. La courbe de tarage a été extrapolée jusqu'à 50 cm de hauteur d'eau. Malheureusement, le rapport débit mesuré maximum et débit maximum enregistré est très faible (1/4). Trois quarts de la courbe de tarage ont été extrapolés et cette faible précision ne doit pas être ignorée.

La liste des jaugeages et la méthode utilisée pour établir la courbe d'étalonnage sont données en annexe 3.

Des mesures de débits solides ont été faites au cours de deux crues. Des échantillons ont été prélevés directement dans la station de mesure avec des bouteilles spéciales. Ces bouteilles ont un bouchon traversé par deux tubes fins : l'un pour l'entrée de l'eau, l'autre pour la sortie de l'air. Ce dispositif simple favorise le remplissage de la bouteille lors du prélèvement, en limitant les effets de turbulence et en permettant d'éviter une éventuelle ségrégation des particules solides. La méthode de collecte et d'analyse est présentée en annexe 4.

Bassin du Donato

La station hydrométrique du Donato a été installée dans un bief à peu près rectiligne en aval de la confluence des trois axes de drainage permanents qui drainent le bassin. Une route d'accès a été ouverte par la mairie de Pejuçara.

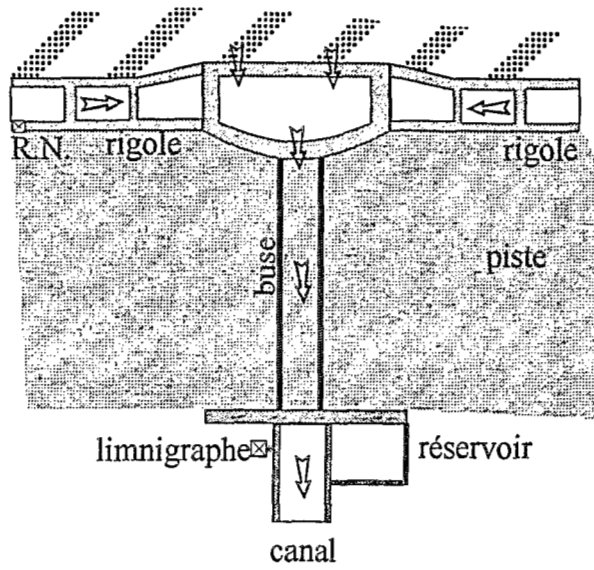
En novembre 1989, un limnigraphe et un petit pont en bois ont été installés pour permettre les mesures de débit. Pendant la première année, le relevé périodique des profils transversaux de la section a montré qu'elle était très instable. Le 10 mars 1991, la section a été stabilisée par la construction d'un canal rectangulaire, en béton, de 2 m de largeur, à seuil triangulaire. Une passerelle a été construite au-dessus du canal pour effectuer les mesures

de débits (fig.17b). Vingt-quatre jaugeages ont été faits, à partir cette date, avec un moulinet monté sur un double système de perches permettant de le déplacer horizontalement et verticalement. Il est contrôlé manuellement par une personne qui fait la mesure depuis le pont. La liste des jaugeages et la méthode sont données en annexe 3.

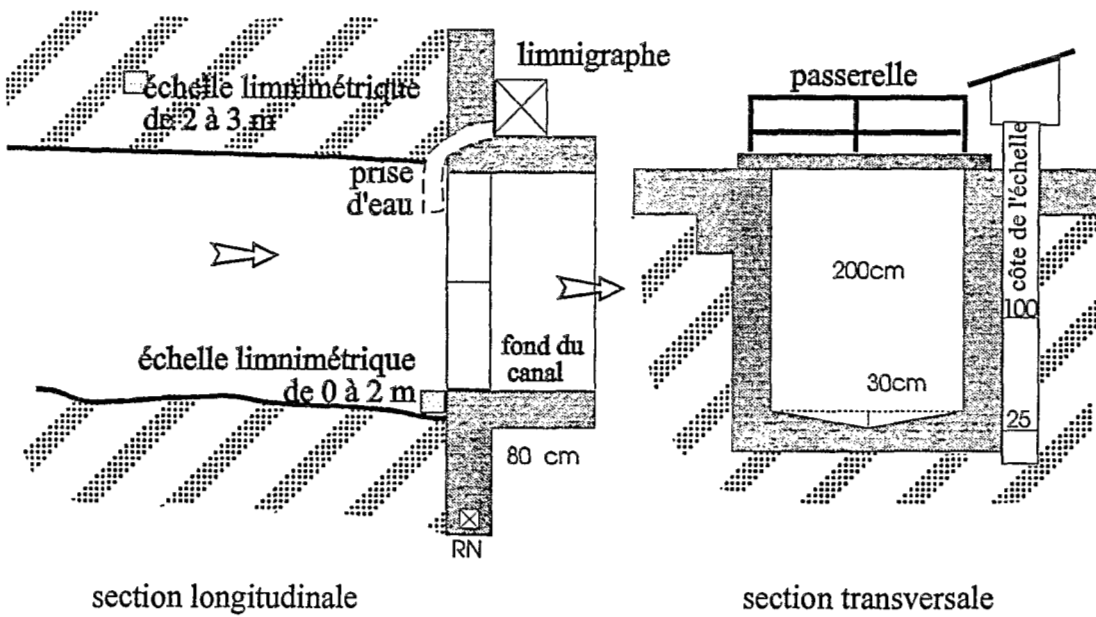
Les échantillons pour l'analyse de la charge solide ont été prélevés à l'aide des mêmes bouteilles que celles utilisées pour Anfiteatro, mais à l'aide d'une perche.

2.2.7 La grande ravine

Une grande ravine s'est formée sur le tributaire gauche du bassin versant de Donato, occasionnée par le ruissellement concentré des eaux provenant des champs cultivés situés en amont (figure 13). Son évolution, notamment du fait des effondrements successifs lors des pluies importantes, est à l'origine d'un accroissement des accumulations déposées tout au long de la ravine et dont une partie constitue les suspensions mesurées à l'exutoire du bassin du Donato. Un suivi continu de l'évolution de la ravine n'a pas pu être fait, mais la variation du volume érodé a pu être estimée à partir de trois nivellements topographiques réalisés en 1991, 1992 et 1993 par A. Sanches y Vacas, technicien de l'IPH, et dont nous avons pu traiter les coordonnées x, y et z sur le logiciel *SURFER*.



a. Bassin d'Anfitreato



b. Bassin de Donato.

Figure 17. Stations des mesures d'Anfitreato et du Donato

PARTIE 3

**ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION
À L'ÉCHELLE DE MICROPARCELLES DE 1 M²,
SOUS PLUIES SIMULÉES ET SOUS PLUIES NATURELLES**

ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION A L'ÉCHELLE DE MICROPARCELLES DE 1 M², SOUS PLUIES SIMULÉES ET SOUS PLUIES NATURELLES

Ce chapitre présente l'interprétation des données relatives au ruissellement et à l'érosion, obtenues au cours de deux cycles culturaux (avoine et soja), pour trois types de préparation du sol (charrue à soc à 50 cm de profondeur, charrue à disque à 20 cm et *semis direct*), sur des microparcelles de 1 m² soumises à des pluies simulées et à des pluies naturelles.

Les objectifs poursuivis sont :

- la recherche des facteurs explicatifs du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de la parcelle,
- le classement des différents préparations du sol en fonction des effets sur le ruissellement et la perte en sol.

Les résultats sont d'abord présentés et discutés de manière globale pour l'ensemble des campagnes de simulation de pluie. Une analyse plus détaillée de chaque campagne de simulation de pluie est ensuite menée en s'appuyant notamment pour la troisième campagne sur une série de photos (photo 1 à 8) témoignant des états de surface du sol.

Ces résultats permettent d'évaluer l'infiltrabilité du sol en utilisant l'équation de Green et Ampt (1911) et de rechercher les principaux facteurs explicatifs du ruissellement et de l'érosion.

Cette analyse conduit à l'ébauche d'une typologie de l'infiltrabilité du sol fondée sur la prise en compte de la structure superficielle et des états hydriques du sol liés aux différents types et dates de préparation du sol.

Enfin, les mesures de ruissellement et de perte en sol effectuées sur le même type de microparcelles de 1 m² mais soumises aux pluies naturelles pendant une année sont présentées et confrontées aux résultats des simulations de pluie.

3.1 LES MICROPARCELLES SOUS PLUIE SIMULÉE

3.1.1 Résultats globaux

La succession voulue des différentes campagnes a été présentée précédemment (§ 2.2.3, figure 15). Les résultats concernant le ruissellement et les pertes en sol de chaque campagne de simulation de pluie sont rassemblés dans le tableau (VI). Le tableau (VII) résume les informations relatives aux cultures et à l'état du sol (rugosité, humidité) pour les six campagnes de simulation de pluie.

Les résultats du tableau VI sont établis de la manière suivante :

- le coefficient de ruissellement est calculé en rapportant la hauteur totale du ruissellement enregistrée par le limnigraphe à la hauteur totale des précipitations. Les valeurs de chacune des six campagnes correspondent à la moyenne des trois microparcelles A, B et C pour les quatre épisodes de pluies consécutives simulées, chaque épisode comprenant cinq séquences d'intensité-durée (fig. 16). Les écarts-types sont donnés pour apprécier la distribution des valeurs obtenues pour les trois microparcelles;
- Les pertes en sol, correspondant aux matières en suspension, sont calculées en intégrant l'ensemble des concentrations en sédiments instantanées, mesurées au pas de temps de trois minutes au cours des différentes simulations. Le détail du calcul est donné en annexe 5. Les pertes en sol correspondant au dépôt accumulé dans la gouttière en aval du dispositif expérimental sont mesurées à la fin de chaque pluie simulée. La perte en sol totale correspond au cumul des deux types de charges. La concentration totale en sédiment (Cts, g/l) est obtenue en divisant les pertes totales en sol (Chs, g) par le volume total de ruissellement (Rt, l). Ce paramètre

est calculé uniquement pour la microparcelle B; la valeur du tableau correspond à la moyenne pour cette microparcelle des valeurs des quatre épisodes de pluies simulées pour chaque campagne.

- La concentration en sédiment est obtenue en divisant les pertes totales en sol par la hauteur d'eau ruissellée sur la microparcelle au cours de pluie simulée. Ces résultats ont été établis pour la microparcelle B (la seule pour laquelle on dispose de mesures de perte en sol), pour les quatre épisodes de pluie simulées pour chaque campagne.

On constate, globalement que :

- les ruissellements les plus importants se sont produits lors des campagnes 4 et 5, le plus faible lors de la campagne 1 ;
- les concentrations en sédiments les plus élevées ont été mesurées lors des campagnes 1 et 3, les plus faibles lors des campagnes 5 et 6.

Certaines particularités propres aux différentes campagnes doivent être mentionnées.

La **campagne de simulation 1** a été faite 9 jours après le semis de l'avoine sur le bassin d'Anfiteatro. Le sol avait été sous-solé à 50 cm de profondeur à l'aide d'une charrue à soc (*pé de pato*), puis hersé pour régulariser la surface du sol. Cette pratique n'est pas très fréquente du fait de son coût. Elle est utilisée environ tous les 5 ans, quand l'horizon B du sol à 20 cm de profondeur est trop compacté en raison des nombreux passages de machines lourdes lors des différentes opérations. Les ruissellements mesurés sont les plus faibles de toutes les campagnes. La rugosité appartient à la classe la plus élevée (tableau VII). Par contre, la concentration en sédiments est élevée (2 g/l en moyenne). La perte globale reste cependant limitée (64 g) en raison du faible ruissellement.

La **campagne de simulation 2** a été faite sur la même parcelle 99 jours après le semis de l'avoine, soit 90 jours après la campagne de simulation 1. Le taux de couverture par la végétation est alors de 75 % et la porosité encore importante. Le ruissellement est plus important qu'à la campagne 1. Les concentrations en sédiments instantanées ont approximativement les mêmes valeurs. Par conséquent, la perte totale en sol (79 g) est nettement plus importante que pour la campagne 1. Ces résultats peuvent être mis en rapport avec l'importante évolution de la surface du sol au cours de ces trois mois. Le sol moins rugueux est devenu également moins poreux.

La **campagne de simulation 3** a été faite 15 mois et demi après la campagne 2. Le sol a été labouré à la charrue à disques à 20 cm de profondeur, puis hersé. La campagne a été réalisée 8 jours après le semis de l'avoine. La rugosité et la macroporosité en surface sont importantes (photo 1). Le coefficient moyen du ruissellement des microparcelles au cours de cette campagne (57 %) est pratiquement le même que celui de la campagne 2 (56 %). En revanche, les charges instantanées sont beaucoup plus élevées. Les pertes en sol sont donc beaucoup plus fortes (190 g). Cette comparaison suggère que l'affinement poussé du sol en surface provoqué par le passage de la charrue à disques facilite l'arrachement et le transport.

Tableau VI. Résultats globaux de chaque campagne de simulation de pluie.

Camp.	Pluie hauteur totale (mm)		Ruissellement hauteur totale (mm)		Coefficient de ruissellement (%)		Matières en suspension (g)		Dépôts (g)		Perte totale en sol (g)		Concentration totale en sédiment (g/l)	
	moyenne	σ	moyenne	σ	moyenne	σ	moyenne	σ	moyenne	σ	moyenne	σ	moyenne	σ
1	83,35	8,17	22,08	18,30	25	21	38,14	20,09	25,57	11,69	63,71	30,97	2,00	0,49
2	89,21	4,23	50,49	23,09	56	25	49,05	29,67	29,52	16,15	78,57	41,37	1,60	0,60
3	72,53	10,10	40,41	19,17	57	26	150,89	102,14	39,06	38,85	189,95	107,26	3,44	1,20
4	78,58	2,53	69,29	5,73	88	8	56,88	9,58	25,01	7,22	81,89	16,80	1,12	0,20
5	80,28	1,86	69,89	10,84	87	12	25,67	6,16	18,49	8,46	44,16	10,07	0,54	0,12
6	84,08	5,79	47,90	18,81	56	21	2,59	1,16	0,23	0,21	2,81	1,15	0,07	0,04

Tableau VII Informations sur les différentes campagnes de simulation de pluie.

Campagne	Date	Culture	Nb jours depuis le semis	Préparation du sol	Couvert végétal (%)	Classe de rugosité (%)	Humidité volumique de 0 à 20 cm (%)			
							Moyenne Pluie 1	σ	Moyenne Pluie 2 3 4	σ
1	29/05 à 01/06/91	Avoine	9	charrue à soc	5	3	29,9	3,7	36,7	1,4
2	27 à 30/08/91		99	sous-solage à 50 cm	75	1	22,1	0,4	35,5	1,7
3	10 à 14/12/92	Soja	8	charrue à disques	5	3	36,8	0,2	44,5	2,0
4	26 à 30/03/92		103	labour à 20 cm	80	1	43,9	2,1	44,7	1,8
5	14 à 18/05/93	Avoine	37*	<i>Semis direct</i>	70	1	42,5	3,8	45,8	2,7
6	01 à 04/09/93		122		90	1	38,7	1,3	47,4	1,9

* A la campagne 5 l'avoine n'avait pas encore été semé. Le couvert végétal est celui qui « assimilé » par les repousses.

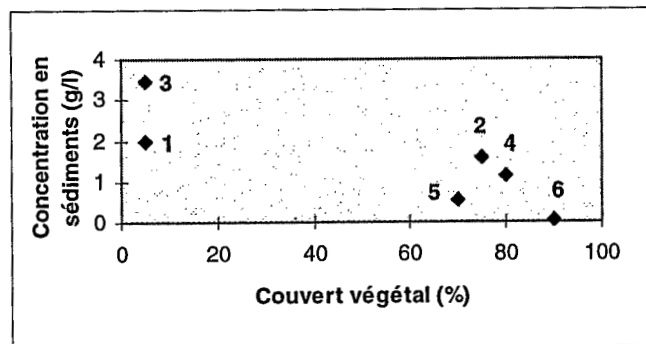


Figure 18. Relation entre la concentration en sédiment et le couvert végétal

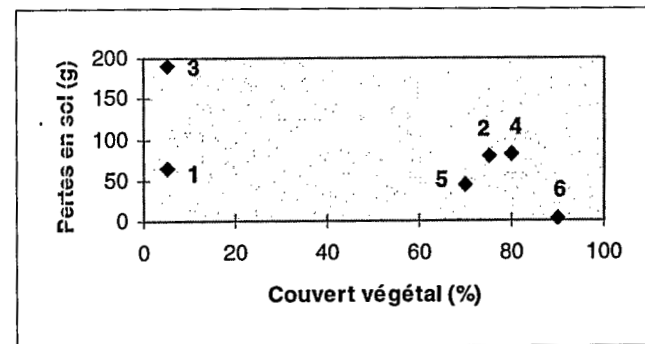


Figure 19. Relation entre les pertes en sol et le couvert végétal

La **campagne de simulation de pluie 4** a été faite 103 jours après le semis de l'avoine, donc 95 jours après la troisième campagne. Cette campagne reflète des conditions atypiques, parce qu'elle est réalisée juste au moment de la chute des feuilles de soja. En effet, lorsqu'elles sont sèches, les feuilles du soja tombent au sol et seule la tige reste debout. Le soja est alors prêt à être récolté. Les larges feuilles de soja tombées à terre forment une couche quasi imperméable interceptant presque toute l'eau précipitée dans les microparcelles, d'où un fort coefficient de ruissellement. En revanche, la concentration en sédiment est faible, parce que les feuilles du soja protègent le sol de l'action des gouttes de pluies mais du fait de l'important volume ruisselé les pertes en sol finissent par être néanmoins importantes, même à l'échelle d'une aussi petite surface.

La **campagne de simulation 5** a été faite 37 jours après la récolte du soja dans une parcelle où *le système conventionnel* a été remplacé par le *semis direct* un an auparavant. Le semis de l'avoine n'est pas encore réalisé. Les repousses et les résidus du soja assurent un taux de couverture de 70%. Cette campagne se distingue en outre des précédentes par l'état hydrique initial. Il est en effet tombé au total plus de 110 mm au cours des trois jours précédant la première pluie simulée le 14/05/1995. Le sol était ainsi déjà très humide, avec des teneurs en eau supérieures à 40 % au moment de la première simulation de pluie, ce qui explique sans doute les ruissellements très importants dans les microparcelles dès le début de la simulation. Il y a en outre eu un problème de calibration de la pluie pour certaines pluies simulées de cette campagne, liée à l'effet du vent : la hauteur totale d'eau ruisselée mesurée dans la microparcelle a été supérieure à la hauteur totale d'eau précipitée. Malgré l'utilisation d'une bâche protectrice telle qu'elle est préconisée pour minimiser l'effet du vent, on a constaté sur le terrain que le vent modifie l'inclinaison du balancier et ainsi l'intensité effective de la pluie sur la microparcelle. Or, le contrôle de l'intensité est fait à la fin de la pluie simulée et l'effet du vent pendant la simulation n'est ainsi pas toujours bien pris en compte. Comme le ruissellement est très important, une légère surestimation de la quantité de la pluie simulée explique ces résultats aberrants.

La **campagne de simulation 6** a été faite 122 jours après le semis de l'avoine dans la même parcelle préparée avec le *semis direct*, soit 3 mois et demi après la campagne de simulation 5. L'avoine et les résidus du soja assurent au total un taux de couverture élevé (90%). Le coefficient de ruissellement (56 %) est pratiquement identique à celui des campagnes 2 et 3 au cours desquelles le sol est bien plus poreux et rugueux en raison d'un travail de préparation du sol récent. Par contre, les concentrations instantanées en sédiments sont les plus faibles, inférieures à 0,2 g/l avec une perte totale de sol de 2,8 g.

On rappelle ci-dessous les principales différences concernant les parcelles au moment de l'application des pluies simulées :

Campagne 1 : labour profond, sol nu

Campagne 2 : labour profond, avoine

Campagne 3 : labour normal, sol nu

Campagne 4 : labour normal, soja

Campagne 5 : *semis direct*, résidus

Campagne 6 : *semis direct*, avoine et résidus

Les figures 18 et 19 présentent la relation entre taux de couverture végétale et, respectivement, concentration en sédiments et perte en sol totale. Les concentrations en sédiments les plus importantes correspondent à des situations où le sol est nu (campagne 1 et 3). Mais il y a une importante différence entre les résultats de ces deux campagnes, probablement due au type d'outil. L'usage de la charrue à disques affine davantage le sol et est sans doute responsable de la plus importante concentration en sédiment. Evidemment, la

différence de profondeur des deux traitements ne permet pas une comparaison sur l'influence du type d'outil sur l'érosion et le ruissellement.

On notera également que, dans le cas du labour à la charrue à soc (campagne 1), le ruissellement, et de ce fait les pertes en sol, ont été relativement limitées. Trois mois après (campagne 2), les résultats de ruissellement ne se différencient plus nettement de ceux obtenus sur la préparation à la charrue à disques (campagne 3). Evidemment, aucun jugement ne peut être ici porté sur les situations intermédiaires.

Ces observations mettent en évidence l'effet du couvert végétal et de la préparation du sol sur les pertes en sol. Quand le sol est très bien couvert, comme pour les campagnes 4, 5 et 6, les concentrations en sédiments sont très faibles. Les concentrations en sédiments sont encore plus faibles pour les microparcelles où le *semis direct* a été pratiqué (campagnes 5 et 6). Cela est peut-être dû à la couverture plus efficace de résidus de soja dans la microparcelle préparée avec le *semis direct*. Ces résidus tombés assurent une importante protection de la surface du sol vis-à-vis des gouttes de pluies, supérieure à celle offerte par la couverture qui se réfère seulement à la culture verte et verticale dans le cas de la préparation *conventionnelle* du sol. Le vent peut en effet facilement coucher les plantes sur un côté, laissant de ce fait l'autre brutalement exposé. L'eau interceptée par les feuilles tombe à la surface du sol. Ainsi, dans le cas des nouvelles cultures, la couverture effective peut être bien moindre que celle que l'on peut estimer à 20 cm du sol. Par contre, dans le cas de résidus au sol, la surface du sol est vraiment bien couverte et n'est pas affectée par les effets du vent et des gouttes des pluies qui tombent sur les résidus. Ainsi, dans le cas du *semis direct* la très importante couverture de résidus protège bien davantage la surface du sol que le même pourcentage de couvert végétal dans les microparcelles préparées avec le *système conventionnel*. Une analyse similaire peut être proposée pour le piégeage des sédiments, qui est probablement beaucoup plus efficace dans le cas du *semis direct*, pour les mêmes raisons.

Si l'on interprète davantage les coefficients de ruissellement, on enregistre exactement les mêmes valeurs pour les campagnes 2, 3 (*système conventionnel*) et 6 (*semis direct*). Une grande différence est seulement constatée pour la campagne 1, durant laquelle le sol a été préparé à 50 cm de profondeur à l'aide d'une charrue à soc. Dans ce cas, l'infiltration devient très importante. Cette infiltration plus importante de la campagne 1 peut provenir de deux facteurs : le type d'outil utilisé (charrue à soc) ou le travail du sol réalisé en profondeur. On n'a pas les moyens de définir lequel de ces deux facteurs joue le rôle le plus important vis-à-vis à l'infiltration. Pour cela, il faudrait faire une simulation de pluie avec cet outil à 20 cm de profondeur et vérifier les résultats du ruissellement et de la concentration en sédiment. Cependant, Roth *et al.* (1986) ont travaillé sur des simulations de pluies au Paraná, sur des sols appartenant également aux *latossolos roxo*. Leurs résultats indiquent que les parcelles préparées par un labour à 20 cm avec le même type de charrue à soc (*pé de pato*) ruissellent moins et ont une concentration en sédiments inférieure à celles préparées avec la charrue à disques à 20 cm. Selon les auteurs, le ruissellement et les concentrations en sédiments sont toujours moindres dans les parcelles préparées avec le *semis direct*.

Ceci mériterait d'être précisé par des expérimentations car si un changement d'outil suffisait à accroître l'infiltration de manière significative, le travail profond, coûteux, ne se justifierait pas nécessairement du point de vue de la gestion de l'eau. En outre, nos résultats semblent indiquer que l'augmentation de l'infiltration dans le cas d'un travail profond n'est réellement sensible qu'au moment du semis et durant quelques semaines.

Il est important de souligner que les campagnes 5 et 6 ont été menées sur des parcelles où le *semis direct* a été adopté depuis un an seulement ; les effets bénéfiques généralement escomptés avec le *semis direct sur paille*, notamment sur la macroporosité du sol associée à l'activité de la microfaune du sol, ne peuvent encore être totalement effectifs.



Photo 1. Campagne 3 avant la première pluie



Photo 2. Campagne 3, 20 minutes après la première pluie



Photo 3. Campagne 3, 30 minutes après la première pluie



Photo 4. Campagne 3, 40 minutes après la première pluie



Photo 5. Campagne 3 après la première pluie



Photo 6. Campagne 3, avant la deuxième pluie



Photo 7. Campagne 3, 30 minutes après la deuxième pluie

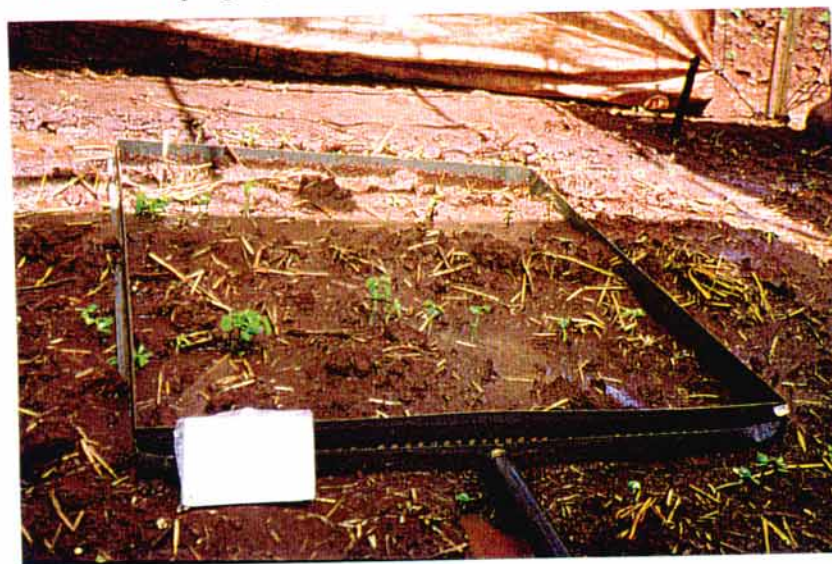


Photo 8. Campagne 3, après la deuxième pluie

3.1.2 Analyse détaillée des différentes campagnes de simulations de pluie

L'analyse s'appuie sur la figure 20 qui présente simultanément l'intensité de la pluie simulée et l'évolution dans le temps de l'intensité du ruissellement et de la concentration en sédiments pour la troisième campagne de simulation. Celle-ci a été retenue ici de manière à pouvoir appuyer également l'analyse sur les séries de photos les plus lisibles, le sol étant nu. Les graphiques correspondant aux autres campagnes sont donnés en annexe 6. Les données utilisées sont celles de la microparcelle B, sur laquelle ont été faites les mesures de concentrations en sédiments et les relevés des masses déposées dans la gouttière du cadre de la microparcelle.

Trois tendances générales se dégagent (figure 20) :

- le ruissellement débute plus tardivement lors de la première pluie que lors des pluies suivantes ;
- l'intensité du ruissellement varie beaucoup avec l'intensité de la pluie ; des paliers d'intensité du ruissellement sont associés aux paliers d'intensité de la pluie ;
- les concentrations en sédiments instantanées varient beaucoup au cours de la simulation de pluie ; il n'y a pas de relation nette avec l'intensité de la pluie ou celle du ruissellement.

Les deux dernières observations sont valables pour les autres campagnes de simulations de pluie (annexe 6). Par contre la première n'est pas valable dans le cas des campagnes 4 et 5, le ruissellement apparaissant aussi vite lors de la première pluie que lors des suivantes. Mais on remarquera pour ces deux campagnes (tableau VI) que les teneurs en eau du sol étaient déjà très élevées avant la première pluie simulée - 43,9% et 42,5% respectivement - soit des valeurs très proches de celles mesurées avant les pluies simulées suivantes.

Le tableau VIII reprend les résultats et les observations d'états de surface du sol concernant les quatre pluies simulées. Il appelle les observations suivantes.

- le ruissellement de la première pluie simulée débute 26 minutes après le début de la simulation, au moment où l'intensité de pluie est maximale (80 mm/h). Pour les trois autres pluies simulées, le ruissellement commence tout de suite après les applications de la première intensité de pluie (40 mm/h) ;
- il y a une différence importante d'humidité volumique initiale du sol dans les 20 premiers centimètres avant l'application de la première pluie (36,6%) et avant l'application des trois autres pluies simulées (45,7%, 48,3% et 44,8%) ;
- les états de surface évoluent pratiquement uniquement au cours de la première pluie. Au moment de l'intensité maximale de pluie (de 20 à 30 minutes avec l'application de 80 mm/h) la rugosité diminue brusquement et la surface du sol se dégrade rapidement.

L'influence de ces deux facteurs sur l'évolution des teneurs en eau et des états de surface peut être précisée.

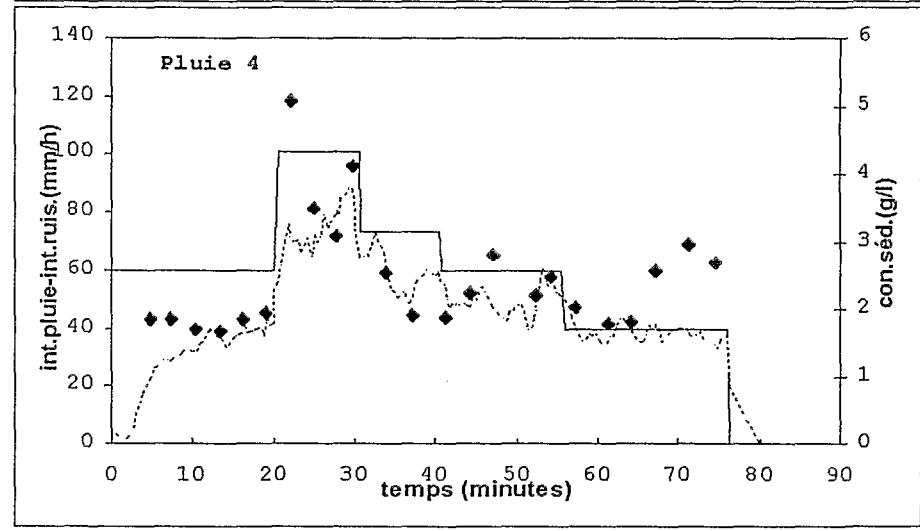
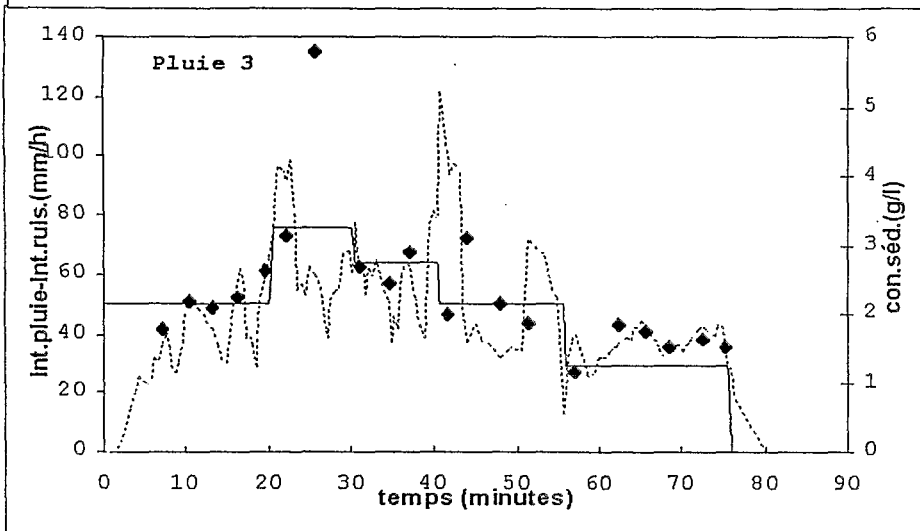
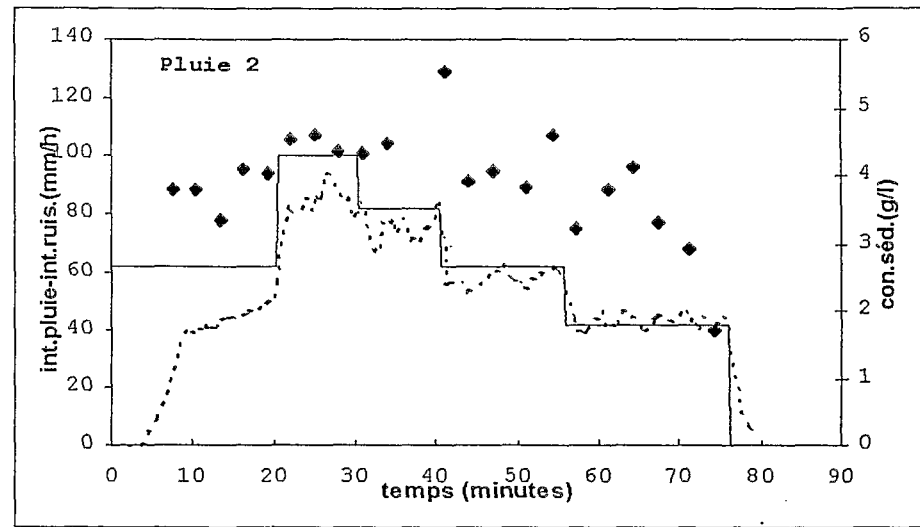
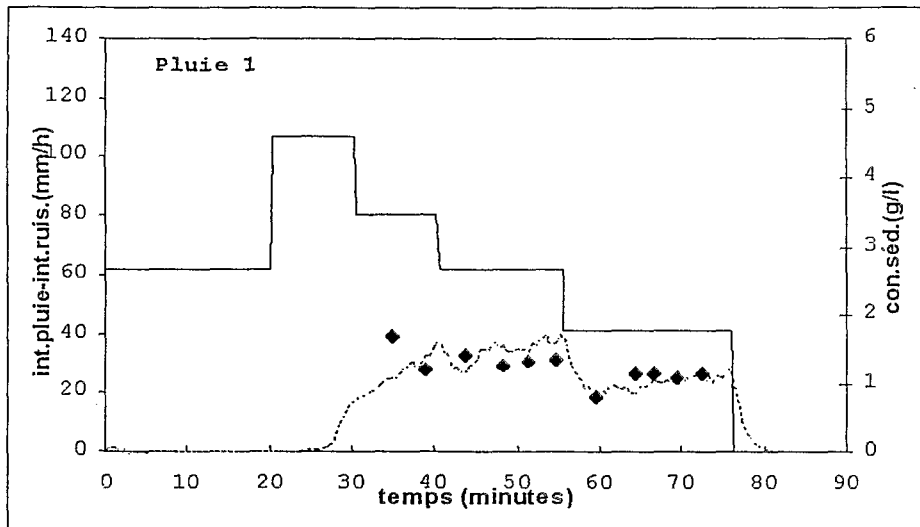


Figure 20. Evolution de l'intensité du ruissellement et de la concentration en sédiment de la troisième campagne de simulation de pluie (microparcelle B)

intensité de pluie (mm/h) —————
 intensité de ruissellement (mm/h)
 (moyenne mobile 5 points)
 concentration en sédiments (g/l) ◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

les teneurs en eau

Le contrôle de la teneur en eau a été effectué par méthode gravimétrique, en effectuant des prélèvements à la tarière avant chaque pluie simulée (cf. § 2.2.3-protocole). Les teneurs en eau volumiques sont calculées en utilisant les valeurs de densité apparente établies lors des campagnes 1, 4, 5 et 6. Cela a permis d'établir les profils présentés pour chacune des campagnes. La différence entre les profils de teneur en eau avant la première pluie et avant les suivantes apparaît nettement pour les campagnes 1, 2, 3 et 6. Elle est bien moins marquée pour les campagnes 4 et 5 (tableau VII).

Les états hydriques peuvent être situés par rapport à la courbe caractéristique $\theta(\psi)$ (figure 21), concernant l'horizon superficiel du sol sur le bassin d'Anfiteatro. Les valeurs comprises entre 35 et 40 %, qui dans d'autres conditions évoqueraient une forte humidité, correspondent bien ici à des succions déjà élevées et à une humidité égale ou inférieure à la capacité au champ. Les relations $\theta(\psi)$ ont été établies au laboratoire sur des échantillons non remaniés, prélevés lors de la quatrième campagne de simulation, soit lorsque les densités apparentes étaient particulièrement élevées ($1,64 \text{ g/cm}^3$). Cette courbe, ainsi que celles concernant les horizons plus profonds données en annexe 7, ne peuvent servir de référence pour les campagnes 1 et 2, les densités apparentes étant alors nettement plus faibles ($1,29 \text{ g/cm}^3$) en raison du type de travail du sol.

Tableaux VIII - Résultats de la troisième campagne de simulation de pluie

Pluie	Ruissellement			Concentration en sédiments		Observations des états de surface		Humidité (0 à 20 cm)
	Début (minutes)	Intensité maximale (mm/h)	Temps après le début de la pluie (minutes)	Maximale (g/l)	Temps après le début de la pluie (minutes)	OPS	Rugosité	(%)
1	25' 05''	47	52	1,65	34	10 minutes: 0% de la surface de la microparcelle couverte. 20 minutes: 10%, 30 minutes: 40% 40 minutes: 60, 55 minutes: 70% 70 minutes: 90%, 76 minutes: 80%	Maximale Diminue brusquement au moment de l'intensité de pluie la plus importante. Atteint son minimale	36,6
2	02' 45''	93	26	6,2	37	80% de la surface couverte	Minimale	45,7
3	03' 35''	121	40	6,7	28	80% de la surface couverte	Minimale	48,3
4	02' 30''	89	29	5	22	80% de la surface couverte	Minimale	44,8

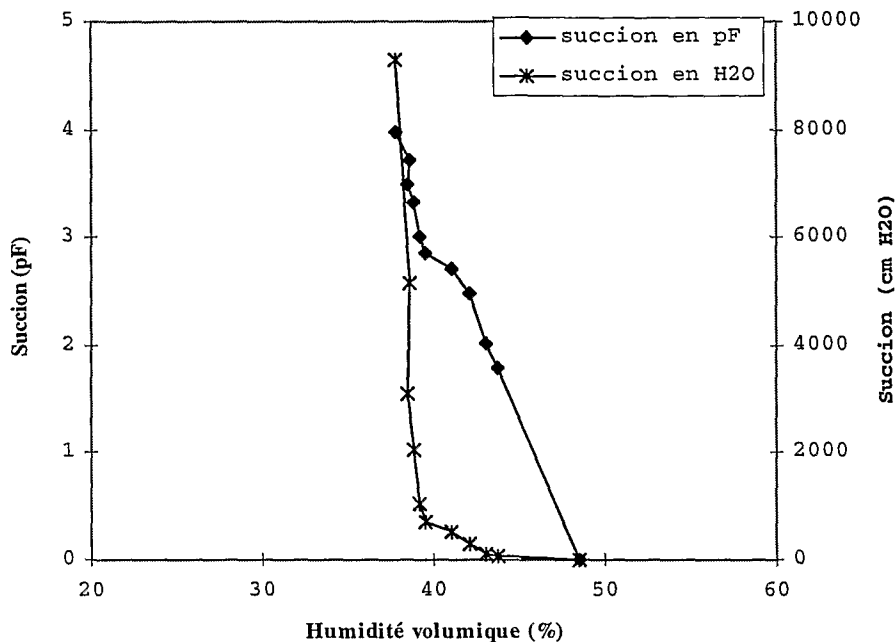


Figure 21. Relation entre la succion du sol et l'humidité volumique - θ (ψ) - sur le bassin d'Anfiteatro de 0 à 20 cm de profondeur (31/03/1992).

Pour les campagnes 1, 2, 3 et 6, on constate une différence relativement importante (de 6,8 à 13,4 %, tableau VIII) entre la teneur en eau initiale, à proximité de la surface avant la première pluie, et celles relevées avant les trois pluies suivantes. Cela n'est pas vrai pour les campagnes 4 et 5, où la différence est respectivement de 0,8 et 3,3 %.

Concernant l'évolution des teneurs en eau à ce niveau, 24h après l'application des pluies simulées qui sont importantes (80 mm), les valeurs ont déjà fortement diminué : ceci confirme la bonne capacité de drainage de ce type de sol, mentionnée lors de la description pédologique (Boulet *et al.*, 1993) ou pour des sols similaires (Roth *et al.*, 1986).

Les profils de teneur en eau en surface (figure 22) montrent une plus grande homogénéité pour les deux premières campagnes et on peut attribuer celle-ci au travail en profondeur qui a décompacté le sol, ce qui n'est pas le cas avec les autres préparations.

On relèvera en outre les différences d'humidité initiale du sol entre les trois parcelles pour les mêmes campagnes. Les préparations sont pourtant identiques et les microparcelles sont espacées seulement de 2m. Cette hétérogénéité souligne la complexité hydrodynamique de sols cultivés : les irrégularités de travail de la machine (labours + ou - profond) les différences de charge appliquée lors du passage suffisent à modifier localement les propriétés du sol (porosité, humidité).

Les états de surface

On sait que, dans le cas des sols cultivés, la structure du sol en surface passe d'un état ouvert, poreux et meuble, éventuellement rugueux après un labour, à un état dégradé, où les macropores sont progressivement obstrués du fait de la désagrégation des mottes et des agrégats sous l'effet des pluies. L'état de la surface évolue au cours du cycle cultural, en relation avec les conditions climatiques. Sous l'effet d'un assèchement, des fentes se forment de manière assez systématique sur les sols étudiés. Evidemment, ces évolutions ne sont pas les mêmes si le sol est nu ou protégé par un couvert (résidus ou culture en cours). Cette dynamique des états de surface du sol se traduit par des variations des conditions hydrodynamiques, en particulier de l'infiltrabilité.

La différence dans le démarrage du ruissellement peut ainsi être également partiellement expliquée par l'évolution de la structure du sol en surface. C'est en début de première pluie que la surface du sol présente la plus importante rugosité et n'est pas encore dégradée (c.f. photo 1). L'eau s'infiltré facilement grâce à l'importante macroporosité du sol ; une partie peut s'accumuler dans les micro-dépressions. Cela retarde le début du ruissellement. Au cours de cette première pluie, la surface se dégrade assez rapidement et la rugosité devient minimale. Elle n'évoluera pratiquement plus au cours des trois pluies simulées suivantes (photos 5, 6, 7 et 8).

Malheureusement il n'y a pas eu de suivi de l'évolution de l'état de surface du sol quand le couvert végétal était bien développé. Nous avons cependant observé que des fentes de dessiccation apparaissent généralement quand le sol s'assèche. Celles-ci redonneraient une certaine macroporosité à proximité de la surface lors de la première pluie.

Il est difficile de faire la part du rôle respectif des deux causes évoquées (différence de teneur en eau initiale, structure du sol en surface) pour expliquer le retard relatif de démarrage du ruissellement lors de la première pluie des campagnes de simulations 1, 2, 3 et 6 par rapport aux autres. Les deux ont un effet qui est probablement plus ou moins marqué suivant les situations. Il est probable que dans le cas du *semis direct*, où les fentes de dessiccation sont moins apparentes, c'est surtout l'état hydrique initial qui doit être évoqué.

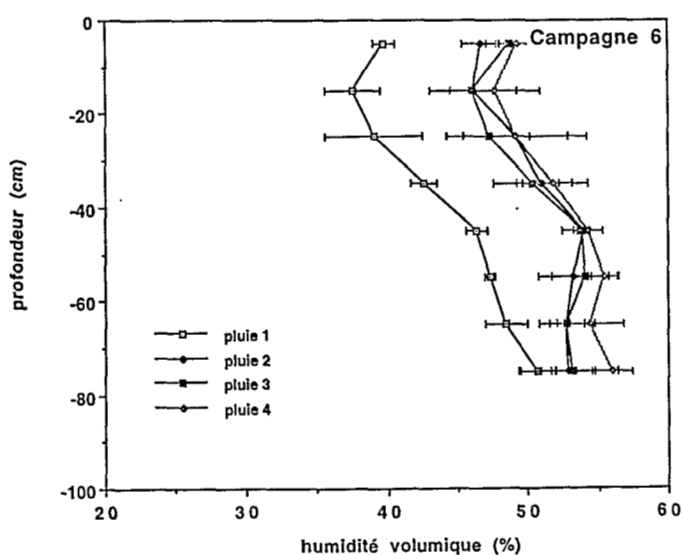
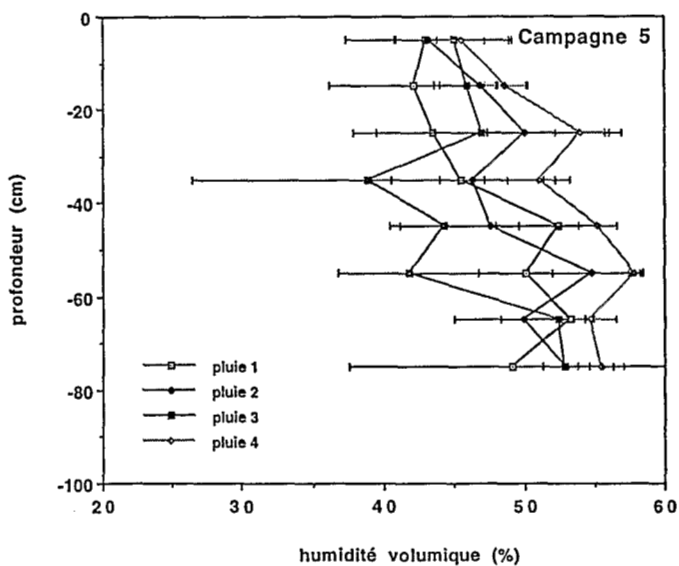
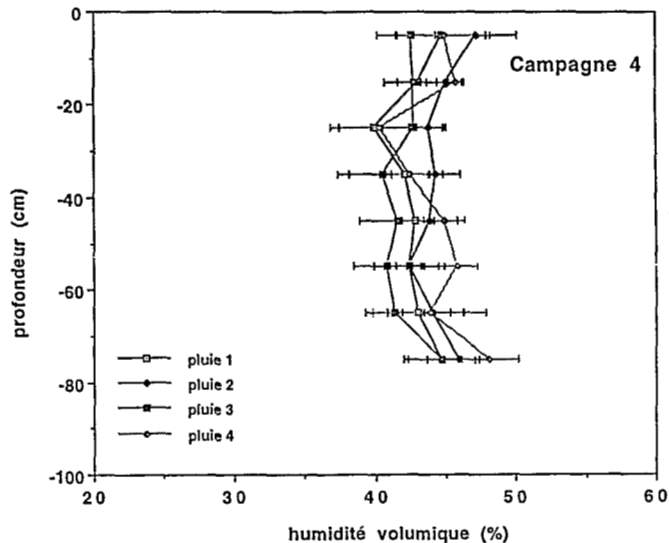
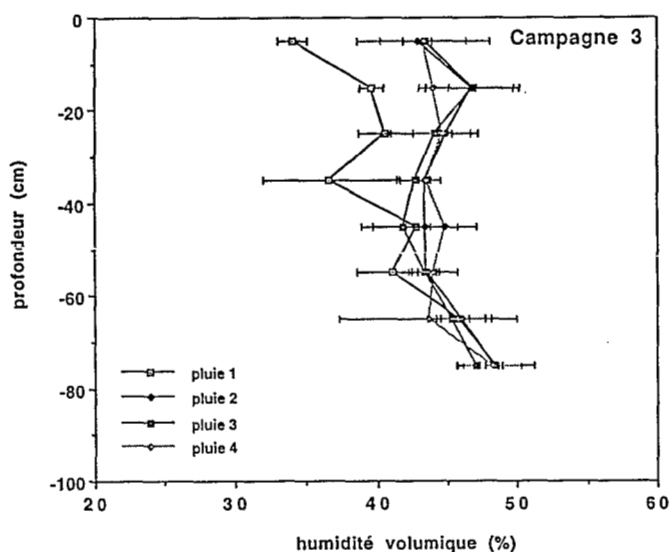
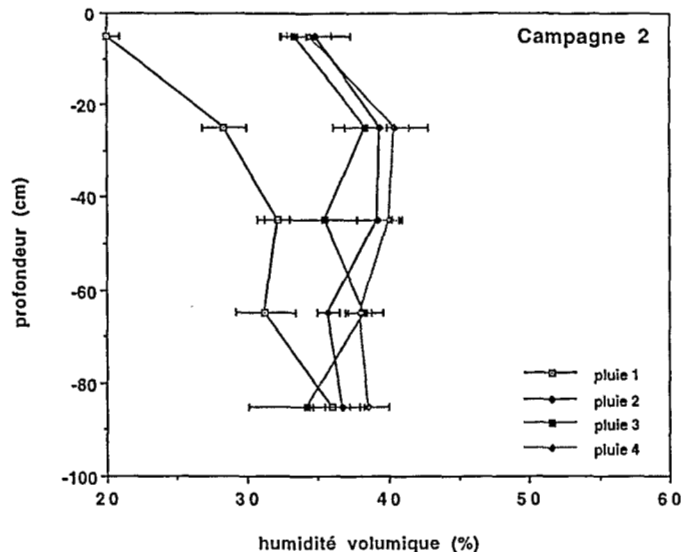
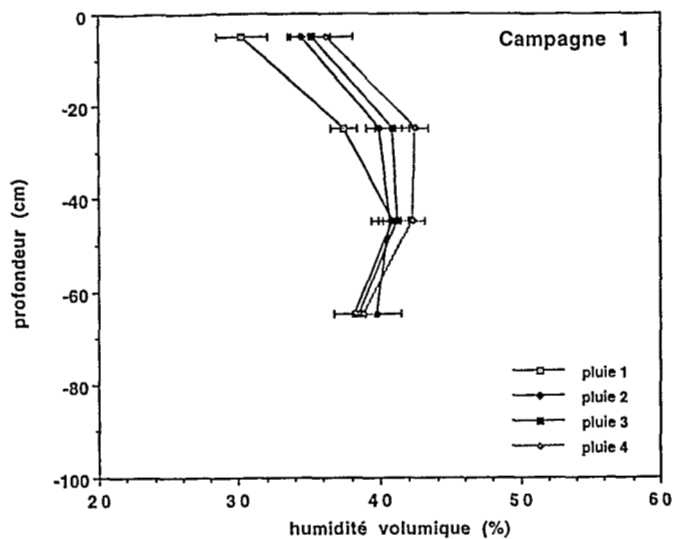


Figure 22. Profils de teneur en eau avant chaque pluie simulée pour les six campagnes.

3.1.3 Analyse de l'infiltrabilité

On a vu précédemment que la variabilité des pertes en sol peut être associée à la variabilité des taux de couverture végétale, ainsi qu'aux différences de type d'outil et de profondeur de préparation du sol. Ces paramètres jouent directement un rôle important dans la formation du ruissellement, qui contrôle en partie les pertes en sol. C'est pourquoi une analyse de l'infiltrabilité paraît fondamentale et nous avons cherché à l'aborder en utilisant les résultats des différentes simulations de pluie.

Plusieurs expressions mathématiques sont proposées par les physiciens du sol pour décrire l'infiltration. Elles peuvent être regroupées selon deux types :

- a) Les expressions empiriques qui cherchent à traduire algébriquement la forme de la courbe « lame infiltrée en fonction du temps » ou de sa dérivée « intensité d'infiltration en fonction du temps ». Les plus connues sont les équations de Horton (1940) (équation 2) et de Kostiakov (1932) (équation 3) qui les ont déterminées à partir d'expérimentations de lame d'eau dans un infiltromètre à double anneaux.

$$F(t) = F_c + (F_0 - F_c) e^{-kt} \quad (\text{équation 2})$$

- $F(t)$: intensité d'infiltration en fonction du temps
 F_0 : intensité maximale d'infiltration à l'instant $t = 0$
 F_c : intensité minimale d'infiltration à la fin de l'expérimentation
 k : constante caractérisant le sol.

$$L_i(t) = at^n \quad 0 < n < 1 \quad (\text{équation 3})$$

- $L_i(t)$: hauteur de la lame infiltrée en fonction du temps
 A et n : paramètres empiriques.

- b) Les expressions traduisant les connaissances de la mécanique des fluides en milieu poreux.

Plusieurs modèles sont proposés en utilisant les deux équations fondamentales :

- l'équation de continuité :

$$\delta(lw) / \delta t = - \text{div}(lq) \quad (\text{équation 4})$$

- l : masse volumique du fluide
 t : temps
 q : densité de flux volumique
 w : porosité

- l'équation dynamique, en faisant l'hypothèse d'un milieu homogène et isotrope, d'une phase air à la pression atmosphérique et d'une phase eau non soumise à des gradients chimiques ou thermiques :

$$q = - K(\theta) \text{ grad } H \quad (\text{équation 5})$$

- H : charge hydraulique
 $K(\theta)$: conductivité hydraulique correspondant à la teneur en eau θ

A partir des ces deux équations, l'équation de l'écoulement s'écrit :

$$w \delta l / \delta t = - \text{div}(l K(\theta) \text{ grad } H) \quad (\text{équation 6})$$

Un certain nombre de solutions pouvant caractériser les « entrées - sorties » du bilan hydrique ont été développées à partir des trois équations et en faisant des hypothèses simplificatrices d'un milieu supposé homogène, une humidité initiale du sol constante et un flux dans une seule direction. Un des modèles les plus utilisés est celui de Green et Ampt (1911). Dans ce modèle, l'infiltration est classiquement décrite par trois paramètres (Albergel, 1987) :

- l'intensité d'infiltration
- la capacité d'infiltration, qui tend vers la conductivité hydraulique à saturation
- la lame infiltrée.

Ce modèle est fondé sur les hypothèses suivantes :

1. le front d'humectation est bien net et le potentiel de succion matricielle reste constant dans le temps
2. derrière le front d'humectation, le sol est uniformément humide et de conductivité constante.

Le modèle est décrit par l'équation suivante :

$$F(t) = K_{GA} (h + Li(t)) / Li(t) \quad (\text{équation 7})$$

- F(t) : intensité d'infiltration (mm/h)
 K_{GA} : paramètre de conductivité hydraulique de Green et Ampt⁵ (mm/h)
 h : déficit de pression capillaire entre la surface et le front d'humectation (mm)
 Li (t) : lame infiltrée (mm).

Nous nous proposons ici d'appliquer le modèle de Green et Ampt (équation 7) aux données des simulations de pluie.

Application de l'équation de Green et Ampt (1911)

En fait, ce n'est pas l'intensité d'infiltration, mais les paramètres du sol K_{GA} et h qui sont recherchés. La lame infiltrée est calculée par la différence entre les précipitations et la lame ruisselée enregistrée par le limnigraphe au moment de la simulation de pluie. L'intensité d'infiltration est calculée en faisant la différence entre l'intensité de pluie et l'intensité de ruissellement. Cette dernière a été calculée comme le rapport entre la lame ruisselée entre l'instant t-Δt et t (pendant un intervalle de temps (Δt)). On introduit les valeurs F(t) et Li(t) du début jusqu'à la fin de la pluie (t=0 à t=75 minutes), avec un pas de temps variable qui dépend de l'entrée à la table à digitaliser des points de l'hydrogramme de ruissellement. La recherche des paramètres K_{GA} et h est faite directement à l'aide du logiciel statistique SYSTAT. L'algorithme utilisé est celui de Marquardt (1963) pour l'estimation des paramètres non linéaires.

$$Li_t = P_t - R_t \quad (\text{équation 8})$$

$$F_t = IP_t - IR_t \quad (\text{équation 9})$$

$$IR_t = (R_{cum_t} - R_{cum_{t-\Delta t}}) / \Delta t \quad (\text{équation 10})$$

- P_t : Précipitation cumulée au temps t (mm)
 R_t : Ruissellement cumulé au temps t (mm)
 IP_t : Intensité de pluie au temps t (mm/h)
 IR_t : Intensité de ruissellement au temps t (mm/h)
 R_{cum_t} : Ruissellement cumulé au temps t (mm)

Les campagnes de simulations de pluies 1, 2, 3 et 6 ont été considérées comme les plus appropriées pour appliquer ce modèle, car elles ont les mêmes conditions initiales d'humidité du sol. Les campagnes 4 et 5 présentent des conditions différentes d'état de surface et d'humidité du sol (cf tableau VII).

⁵Ce paramètre va être largement utilisé dans le texte et nous soulignons que c'est la conductivité hydraulique du sol *théoriquement* à la saturation. Comme c'est difficile de savoir si le sol a atteint la saturation ou non, nous préférons appeler ce paramètre K de Green et Ampt (K_{GA}).

Les simulations qui ont eu des ajustements avec trop de dispersion des valeurs observées ont été éliminées de cette classification, car elles ne permettent pas des ajustements acceptables de K_{GA} . C'est le cas de 2c3, 2c4, 3b2, 3b3, 3c4, 6a2, 6a3, 6a4, 6b4 ; au total c'est ainsi 35 pluies simulées qui ont été utilisées pour évaluer les paramètres K_{GA} et h de l'équation de Green et Ampt (tableau IX). La figure 23 présente la lame infiltrée cumulée calculée à partir de l'équation de Green et Ampt en utilisant ces paramètres estimés, pour quatre simulations faites à titre d'exemple. On peut observer que la forme des courbes mesurées varie beaucoup. Les courbes ne sont pas identiques à celles estimées à travers la loi d'infiltration théorique de Green et Ampt (1911). On sait que le modèle fait des hypothèses pour simplifier l'équation d'infiltration et que dans la nature ces simplifications ne sont pas toujours justifiées, notamment celle du flux continu dans un milieu homogène et isotrope, avec un K_{GA} constant. Néanmoins la lame infiltrée mesurée cumulée de la simulation 2b4 est presque identique à celle de la courbe estimée. Nous n'avons pas toujours trouvé, dans les exemples reportés ci-dessous, les raisons des différences dans la qualité de nos estimations. Nous voulions simplement souligner l'importance de la variabilité et de la complexité naturelle des processus hydrodynamiques.

Le paramètre K_{GA} , conductivité hydraulique de Green et Ampt, varie de 13 à 56 mm/h suivant la préparation du sol utilisé, le nombre de jours après le semis et l'ordre d'application des pluies.

Albergel (1987) a utilisé une adaptation de l'équation de Green et Ampt (1911), l'équation de Morel-Seytoux (1973), qui considère l'effet de l'air piégé dans le sol pour traiter les résultats de simulations de pluie sur des microparcelles de 1 m^2 sur différents types de sols non labourés au Burkina Faso. Les valeurs de K_{GA} obtenues varient entre 0,1 et 70 mm/h pour les pluies appliquées quand le sol était déjà bien humide. Les valeurs les plus fortes correspondent à des microparcelles à végétation naturelle et les plus faibles caractérisent les parcelles des glacis dénudés du SAHEL qui se comportent véritablement comme des surfaces imperméables. La gamme de variation est nettement supérieure à celle obtenue pour les cas que nous avons étudiés, où les sols sont bien plus homogènes malgré les différents types de préparation et capables globalement d'assurer un bon drainage.

Si l'on compare les résultats que nous avons obtenus avec la classification des conductivités hydrauliques à saturation fondée sur la texture proposée par Carsel et Parrish (1988) à partir de 5600 échantillons de sols, force est de constater que nos valeurs sont plus proches de celles des sols sableux (15 à 35 mm/h dans la plupart des cas, mais les valeurs s'échelonnent entre 9 à 100 mm/h) que de celles des sols argileux (2 mm/h en moyenne). Cela s'explique par la structure particulière des sols, où les particules élémentaires sont en fait des microagrégats très stables où les kaolinites sont dominantes.

Compte tenu du fait que les sols étudiés présentent une grande homogénéité, la variabilité des comportements hydrodynamiques est principalement due à l'influence du type de travail du sol et aux interactions entre opérations culturales et climat.

L'infiltrabilité du sol est susceptible d'être très variable au cours d'un cycle de culture. Juste après la préparation du sol, elle est importante et accrue dans le cas d'un travail en profondeur avec la charrue à soc. Après quelques mois, l'infiltrabilité du sol diminue mais elle reste encore un peu supérieure à celle d'un sol récemment travaillé en surface à l'aide d'une charrue à disques. Dans le cas du *semis direct*, les valeurs d'infiltrabilité sont faibles par comparaison à celles mesurées dans le cas d'un travail en profondeur à la charrue à soc. Ce type d'influence, et le caractère essentiellement dynamique de l'infiltrabilité des sols cultivés, ont déjà été mentionnés par d'autres auteurs.

Boiffin et Papy (1988) soulignent l'effet des systèmes de culture sur l'infiltrabilité des sols limoneux sensibles à la battance du nord du bassin parisien. Ils insistent sur le fait que les cycles culturaux induisent des cycles d'états de surface, avec d'une part des changements brutaux dans le cas du travail d'un sol dégradé qui peuvent faire instantanément passer l'infiltrabilité de valeurs très faibles, voisines de 1 mm/h à des valeurs de l'ordre de 50 mm/h du fait de l'augmentation de la macroporosité et de la rugosité et d'autre part des changements plus progressifs associés à la diminution de la rugosité et à la formation des croûtes de battance.

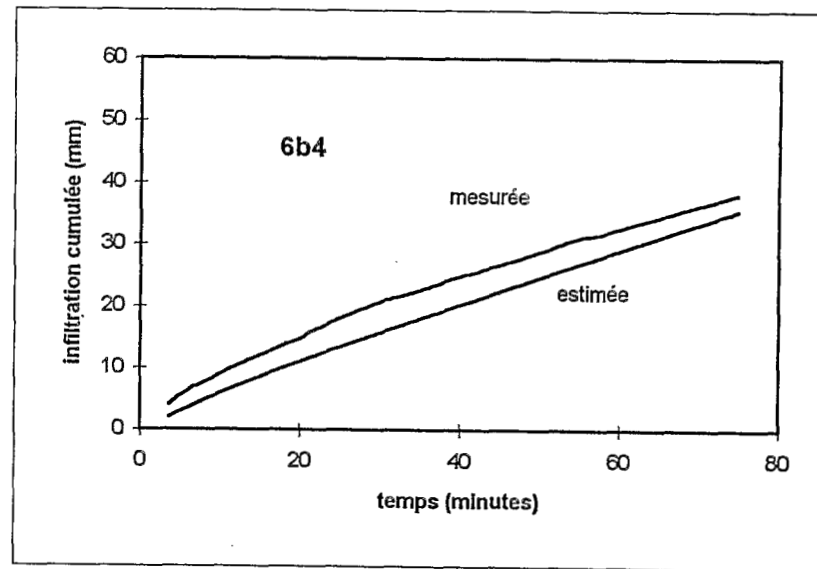
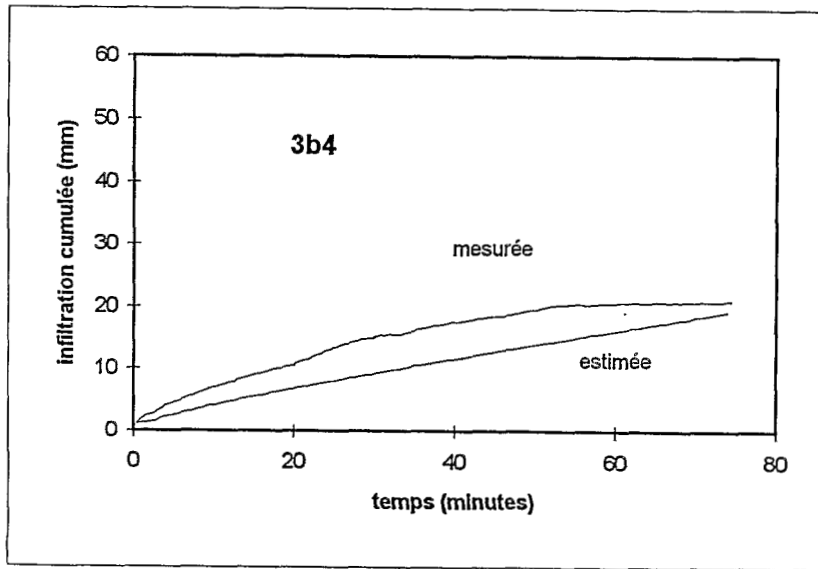
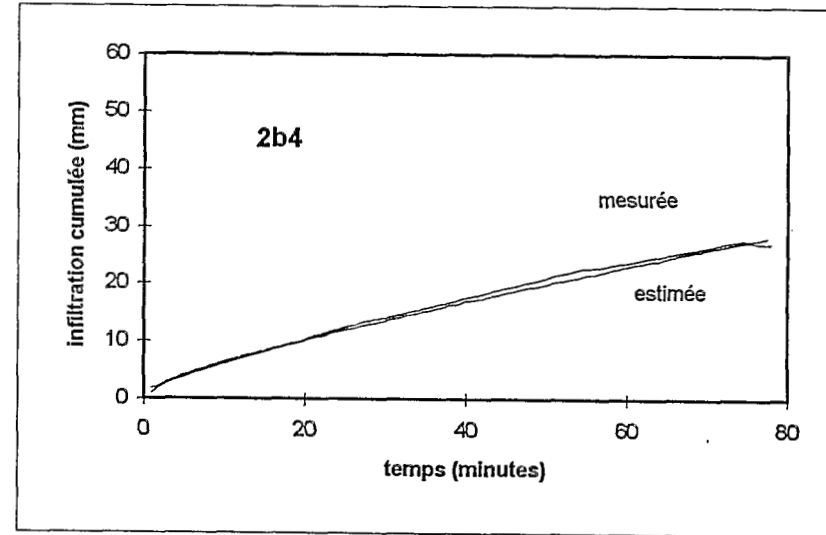
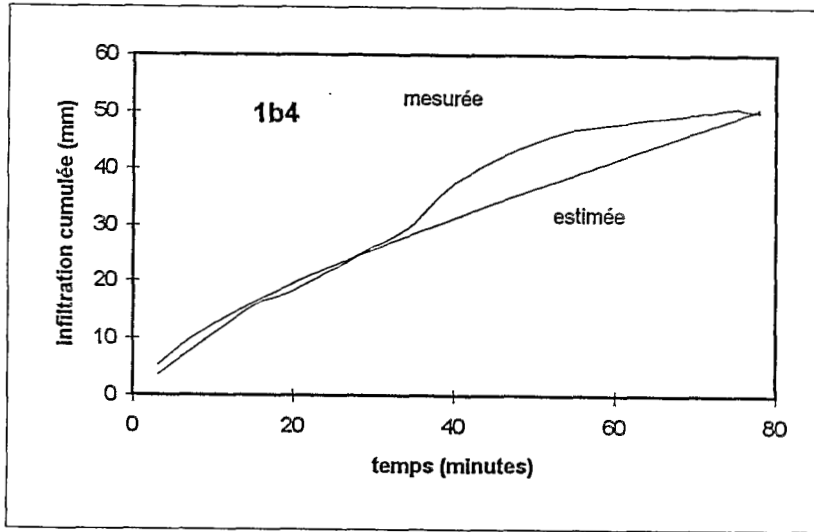


Figure 23. Ajustement des paramètres de Green et Ampt K_{GA} et h .

Le tableau IX présente les résultats moyens, des trois microparcelles, des paramètres calculés.

Tableau IX: Résultats des paramètres K_{GA} et h estimés par l'équation de Green et Ampt (1911).

Campagne	K_{GA} (mm/h)			h (mm)			C.I. (%)		
	moyen	σ	n	moyen	σ	n	moyen	σ	n
1 pluie 2	56,1	4,7	3	1,1	0,52	3	87,4	7,5	3
1 pluie 3	38,8	6,1	3	2,46	1,4	3	62,0	5,1	3
1 pluie 4	27,0	5,5	3	5,7	5,1	3	50,3	5,9	3
2 pluie 1	45,7	14,1	3	3,5	2,7	3	74,7	17,8	3
2 pluie 2	30,9	-	2	2,82	-	2	49,9	-	2
2 pluie 3	24,9	-	2	2,9	-	2	41,0	-	2
2 pluie 4	20,8	-	2	3,3	-	2	41,3	-	2
3 pluie 1	45,4	6	3	0,5	0,4	3	82,5	8,8	3
3 pluie 2	18,8	-	2	0,9	-	2	34,5	-	2
3 pluie 3	16,9	-	2	2,1	-	2	41,6	-	2
3 pluie 4	13,2	-	2	2,4	-	2	32,4	-	2
6 pluie 1	37,6	5,1	3	3,01	2,7	3	76,8	5,1	3
6 pluie 2	14,0	-	2	14,9	-	2	37,5	-	2
6 pluie 3	12,6	-	2	9,6	-	2	35,6	-	2
6 pluie 4	23,1	-	1	4,0	-	1	44,4	-	1

σ : écart type

n : nombre de répétitions faites

K_{GA} : conductivité hydraulique saturée (mm/h)

h : déficit de pression capillaire entre la surface et le front d'humectation

C.I. : coefficient d'infiltration en % (lame infiltrée cumulée/hauteur de pluie)

Vauclin et Chopart (1992), étudiant la conductivité hydraulique de sols cultivés de Côte d'Ivoire, ont déterminé la quantité de micros et macro-pores dans les préparations labour récent, labour ancien et *semis direct* pour un sol gravillonnaire et effectué des mesures à l'aide d'un infiltromètre permettant des mesures à différentes valeurs de succion. Ils ont proposé un schéma d'évolution du comportement hydrophysique des couches de surface en relation avec le travail de sol et son influence sur la porosité. « Le labour récent est caractérisé par une classe très uniforme de pores fonctionnels de plus petites dimensions (20-30 microns) que pour les autres traitements : 50 à 120 microns pour le *semis direct* et 20 à 120 microns pour le labour ancien. Un schéma qualitatif d'évolution du comportement hydrophysique des couches de surface en liaison avec le travail du sol pourrait être envisagé. (a) Le labour récent créerait une collection importante de pores de petite dimension, bien connectés. De ce fait, ils contribueraient à assurer une conductivité hydraulique plus élevée que celle du sol non labouré (*semis direct*) ou anciennement labouré. (b) Au cours du temps, il se développerait un réseau de macropores (comportement du labour ancien) tendant à rapprocher progressivement le fonctionnement hydrodynamique du sol labouré de celui d'un sol non travaillé (comportement de *semis direct*). »

Roth *et al.* (1987), se fondant sur 7 ans de mesures sur les *latosolos* (oxisols) du Paraná, concluent que le développement des macropores (supérieures à 50 microns) entre 0 à 20 cm est plus important dans le cas des préparations conventionnelles (labour à 20 cm à la charrue à disques + deux hersages) que dans celui du *semis direct*. Par contre, de 20 à 30 cm de profondeur, la macroporosité serait plus développée dans le cas du *semis direct*. Les différences à cette profondeur seraient dues aux effets du poids des machines lors des nombreux passages nécessaires dans le cas de la préparation conventionnelle. Dans le cas du travail limité à la charrue à soc à 20 cm (*minimum tillage*), la macroporosité serait plus élevée à toutes les profondeurs.

3.1.4 Principaux facteurs influençant le ruissellement et l'érosion

Les résultats dont nous disposons pour les microparcelles sont : la hauteur de la lame d'eau ruisselée (R_t , mm), le coefficient du ruissellement (Cr , %) et la concentration totale en sédiments (C_t , g/l). Différents facteurs peuvent être envisagés, on l'a vu, pour expliquer la variabilité de ces paramètres caractérisant le ruissellement et l'érosion à l'échelle des microparcelles soumises à des pluies simulées. Ce sont :

- les précipitations
- les paramètres K_{GA} et h de Green et Ampt, caractérisant l'infiltration et l'état de succion du sol
- le couvert végétal
- l'état du sol

L'ensemble des variables est listé dans le tableau X et leur distribution présentée au tableau XI. La matrice de corrélation entre les différentes variables est donnée en annexe 8.

Concernant les précipitations, le protocole adopté (hauteur totale et succession des intensités, cf. fig. 16) ne permet théoriquement pas d'en apprécier l'influence. Cependant, les hauteurs qui aurait dû être constantes ne l'ont pas été totalement, compte tenu des contraintes expérimentales, en particulier de l'effet du vent.

C'est pourquoi il a semblé utile de mettre en relation la hauteur de la lame d'eau ruisselée avec la hauteur de la lame d'eau précipitée (fig. 24). On constate que, pour les campagnes 4 et 5 où il y avait très peu de vent, la hauteur de la lame d'eau précipitée a très peu varié. Par contre, pour les autres où la hauteur d'eau précipitée a varié entre 50 et 100 mm, il y a évidemment un effet « pluie » qu'il serait incorrect de négliger.

Une autre influence particulièrement nette, qui ressort de simples comparaisons graphiques, est l'influence de l'infiltrabilité appréciée ici à travers le paramètre K_{GA} . La figure 25 en témoigne. On objectera que ces deux paramètres ne sont pas indépendants : cependant, le paramètre K_{GA} résulte des valeurs instantanées tandis que les hauteurs ruisselées sont des cumuls pour chaque pluie simulée. La relation n'est donc pas immédiate. Cette relation se différencie de celle établie par Chevallier (1990) en appliquant l'équation de Green et Ampt aux résultats de simulation de pluie sur microparcelles de $1m^2$ pour des sols ferrallitiques, ferrugineux, cuirassés et hydromorphes en Côte d'Ivoire (fig. 26) ; également établis à partir de l'équation de Green et Ampt. Dans notre cas, l'allure de la relation est linéaire et les points sont proches de la droite de régression : elle traduirait le caractère particulier des sols ferrallitiques (*latossolo roxo*).

Les observations de la rugosité du sol ne sont pas assez précises pour en tenir compte dans l'analyse. C'est pour cela qu'on utilise ici les variables « pluie d'imbibition » et « ruissellement retardé », qui sont directement corrélées avec la rugosité, pour estimer son effet. Une pluie d'imbibition importante signifie qu'une hauteur importante de lame d'eau est précipitée avant que le ruissellement ne débute, grâce à la rugosité du sol qui retient l'eau dans ces dépressions. Une fois ces dépressions remplies, le ruissellement peut commencer. Ainsi, une pluie d'imbibition importante traduirait une rugosité élevée.

Le ruissellement retardé (R_{ret} , mm) correspond à celui qui se produit après l'arrêt de la pluie simulée. Pour les microparcelles où le sol était rugueux celui-ci est nul, parce que la lame d'eau reste piégée dans les dépressions puis s'infiltré. Quand la rugosité est très faible, comme dans le cas d'une surface très-affinée, une partie importante de l'eau ruisselle et atteint le collecteur : R_{ret} peut atteindre près de 5 mm. On remarquera (figure 27) que la relation entre la hauteur de la lame d'eau ruisselée et le ruissellement retardé est non linéaire et fait apparaître un seuil. Jusqu'à une valeur du ruissellement retardé voisine de 2 mm, la relation est fortement croissante. Au delà, les valeurs de la lame d'eau ruisselée se stabilisent autour de 70 mm.

La figure 28 présente la relation entre la hauteur de la lame d'eau ruisselée et la pluie d'imbibition. Il semble que la pluie d'imbibition soit un facteur explicatif primordial pour le premier épisode de pluie simulée. Pour les autres épisodes, il n'y a aucune relation entre la pluie d'imbibition et la hauteur de la lame d'eau ruisselée. Cela peut être expliqué par le fait que la rugosité et la porosité du sol ne varient réellement qu'au cours de la première pluie. Pour les autres pluies, ces paramètres varient très peu et ne peuvent expliquer les différences de ruissellement.

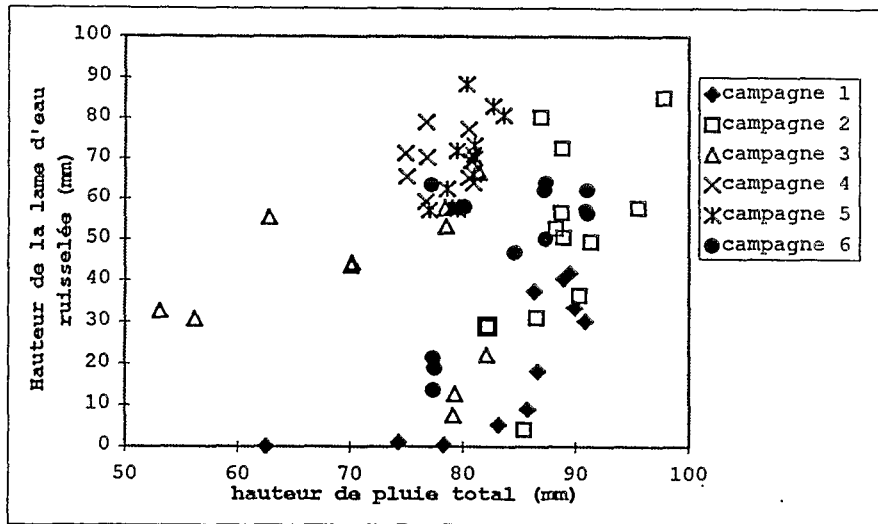


Figure 24. Relation entre lame d'eau ruisselée et hauteur totale de pluie (pluie simulée)

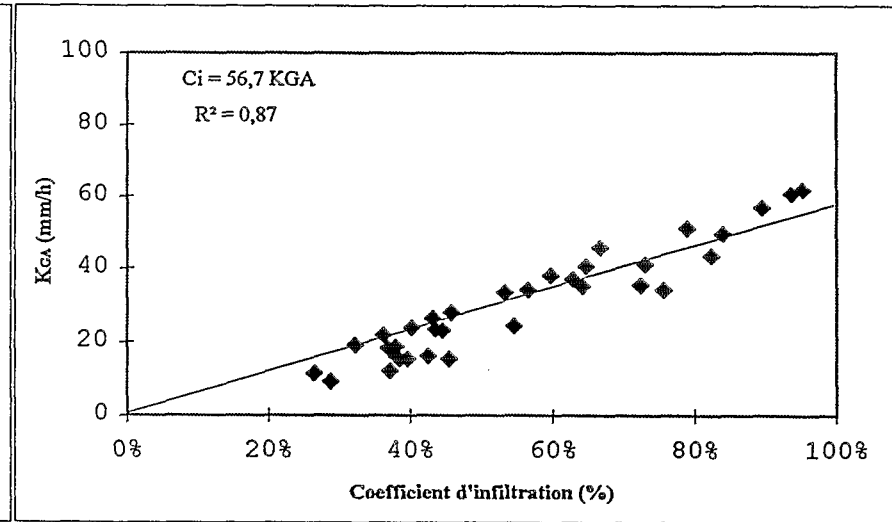


Figure 25. Relation entre K_{GA} et coefficient d'infiltration (pluie simulée)

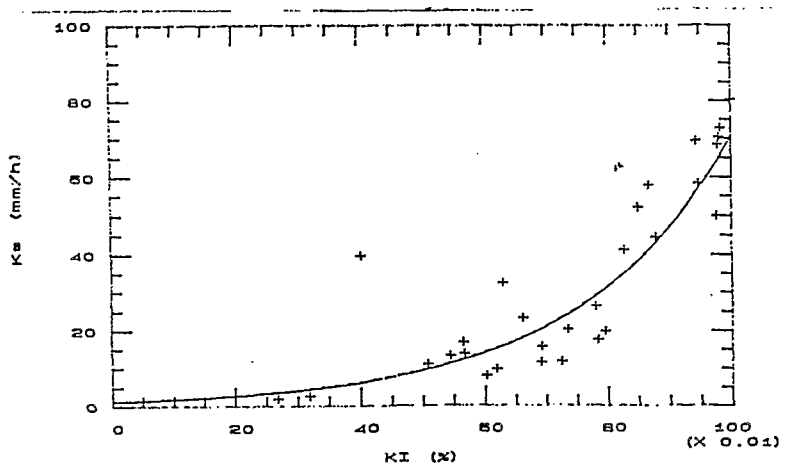


Figure 26. Relation entre K_{GA} et coefficient d'infiltration (Chevallier, 1990) (pluie simulée)

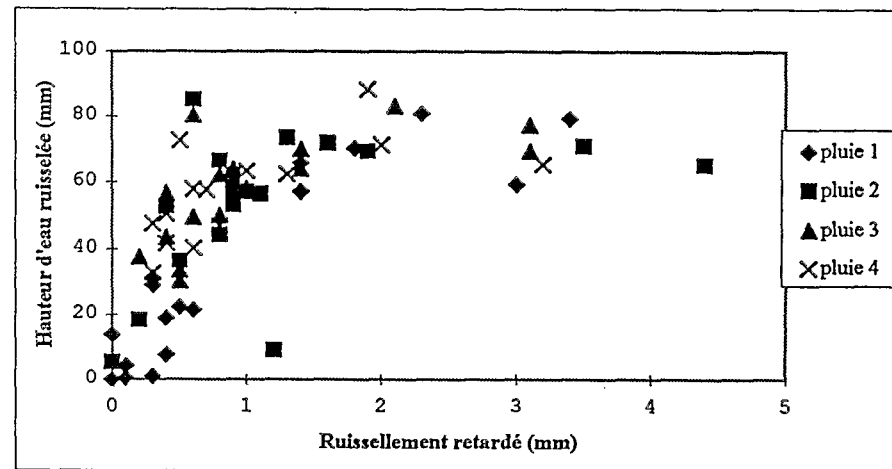


Figure 27. Relation entre hauteur de la lame d'eau ruisselée et ruissellement retardé

Tableau X. Caractéristiques des microparcelles utilisées.

Symbole	Variable	Unité	Estimé à travers:
P	Hauteur de pluie totale	mm	mesure de terrain
Cvt	recouvrement du couvert végétal (couvert vert + résidus) total sur la microparcelle	%	observation de terrain
Cvv	recouvrement du couvert végétal vert sur la microparcelle	%	estimé au terrain, seulement le couvert de la culture
Cvr	recouvrement des résidus sur la microparcelle	%	estimé au terrain, résidus de la culture antérieure
Pi	Pluie d'imbibition	mm	Hauteur de pluie cumulée qui s'infiltré avant le début du ruissellement.
R _{ret}	Détention superficielle	mm	Hauteur de pluie cumulée qui ruisselle après l'arrêt de la pluie. R _{ret} = Ruissellement total - Ruissellement à l'instant où la pluie s'arrête
H (0-20)	Humidité volumique du sol de 0 à 20 cm de profondeur	%	données de terrain
H (0-80)	Humidité volumique du sol de 0 à 80 cm de profondeur	%	données de terrain
IPA _n	Indice de précipitations antérieures au début de l'averse n	mm	$IPA = (IPA_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha t}$ P _n = hauteurs de pluie n (en mm) α = coefficient pris égal à 0,5 t = durée (en jours) séparant la fin de l'averse n-1 du début de l'averse n.
K _{GA}	conductivité hydraulique	mm/h	estimé par l'équation de Green et Ampt
h	facteur de succion du sol	mm	estimé par l'équation de Green et Ampt
Rt	Hauteur totale de la lame d'eau ruisselée	mm	mesures de terrain
Cr	Coefficient du ruissellement	%	Cr = (Rt/P)*100
Cts	Concentration totale en sédiment	g/l	Cts = Charge solide totale/Rt la charge solide totale est obtenue en intégrant la courbe de concentration instantanée en sédiments et en lui rajoutant le total des sédiments déposés dans la gouttière.

Tableau XI: Variabilité des paramètres utilisés dans le modèle statistique pour les .. microparcelles sous pluies simulées.

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	ecart-type	unité
P	71	53,1	97,8	81,5	7,9	mm
Cvt	72	10	90	58,9	35,7	%
Cvv	72	0	90	53,2	35,1	%
Cvr	72	10	50	17,8	11,9	%
Pi	71	0,5	62,5	9,3	9,8	mm
R _{ret}	71	0	4,4	1	0,9	mm
H (0-20)	71	21,8	50,4	40,7	6,5	%
H (0-80)	71	26,8	53,6	42,9	6,1	%
IPA	72	0	117,3	63,8	38,7	
K _{GA}	34	9,2	61,7	30,4	14,7	mm/h
h	34	0,2	19,5	3,8	4,1	mm
Rt	70	0	88,4	49,0	23,2	mm
Cr	70	0	100	60,1	28,3	%
Cts	23	0	4,3	1,4	1,3	g/l

Le logiciel statistique *SYSTAT* a été utilisé pour effectuer des régressions multiples pas à pas et rechercher les ajustements statistiques significatifs. Cette méthode statistique permet d'insérer plusieurs paramètres comme variables explicatives. Le choix des paramètres les plus explicatifs de la variable analysée est fait avec un intervalle de confiance de 95%.

Ruissellement total

L'ajustement retenu comprend un premier terme correspondant à la hauteur d'eau précipitée et deux termes correspondant aux paramètres K_{GA} et h de la loi d'infiltration de Green et Ampt (1911). L'équation prend la forme suivante :

$$R_t = 1,874 + 0,915 * P - 1,230 * K_{GA} - 0,905 * h \quad (r^2 = 0,967) \quad \text{(figure 29)} \quad \text{(équation 11)}$$

Le tableau XII présente l'analyse de la variance du modèle (test ANOVA).

Tableau XII Analyse de la variance de la régression globale du ruissellement total

	Somme des carrés	DL	F (SR/SCR)	P
Régression	9173,9	4	274	0
Résiduel	242,7	29		

La somme des carrés de la régression est supérieure à celle des résidus. Le test de Fisher (F) est significatif à un intervalle de confiance de 95%.

Concentration totale en sédiments.

La figure 30 présente la relation entre les concentrations totales en sédiments (Cts) et le coefficient du ruissellement (Cr) dans la microparcelle B pour chaque pluie simulée de chaque campagne. Quand le sol est nu (campagne 1 et 3), les concentrations en sédiments élevées se produisent quand le ruissellement est important. Pour les faibles ruissellements, les concentrations en sédiments sont faibles. Par contre, on peut avoir de faibles concentrations de sédiments quand le ruissellement est important, notamment pour les campagnes où le taux de couverture par la végétation était élevé (4 et 5). Les points se regroupent selon les différentes campagnes en raison des différents taux de couvert végétal et des états de surface du sol propres à chaque campagne. Cela souligne encore une fois l'importance des conditions de la surface du sol dans les processus de ruissellement et de l'érosion.

Les variables les plus explicatives de la concentration totale en sédiments sont : le coefficient du ruissellement, qui prend en compte les hauteurs des lames d'eau ruisselée et précipitée, et le taux de couvert végétal par les résidus et par la culture en cours. La fonction d'ajustement choisie est la suivante :

$$Cts = 1,736 + 2,707*Cr - 3,1*Cvr - 2,5*Cvv \quad (r^2 = 0,803) \quad \text{(figure 31)} \quad \text{(équation 12)}$$

Le tableau XIII présente l'analyse de la variance du modèle (test ANOVA).

Tableau XIII : Analyse de la variance de la régression globale de la concentration totale en sédiments.

	Somme des carrés	DL	F	P
Régression	29,038	3	25,894	0,000
Résiduel	7,102	19		

Les signes négatifs des coefficients des variables Cvr et Cvv signifient que plus ces variables seront importantes, plus faible sera la concentration en sédiments. La somme des carrés de la régression est supérieure à la somme des carrés des résidus. Le test F est acceptable à un intervalle de confiance de 95%.

Le poids du taux de couverture par les résidus traduirait le fait que ceux-ci protègent davantage le sol que la couverture végétale vivante, qui, nous l'avons souligné dans nos observations, est sensible à l'effet du vent. Celui-ci peut incliner la plante d'un côté et laisser l'autre côté du sol sans aucune protection, même si la couverture totale est importante. Par contre, quand il y a des résidus, ils sont toujours par terre et offrent continuellement une protection efficace au sol. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Roth *et al.* (1988) qui ont trouvé une relation décroissante entre les pertes en sol et le taux de couverture par les résidus dans leur étude sur le *semis direct*. Zhang *et al.* (1995) expriment le taux de couverture végétale effective en fonction des deux paramètres : le taux des résidus et la hauteur du couvert végétal vert. Selon les auteurs, cette couverture effective exprime bien mieux la protection offerte par le couvert végétal que le taux de couvert végétal total.

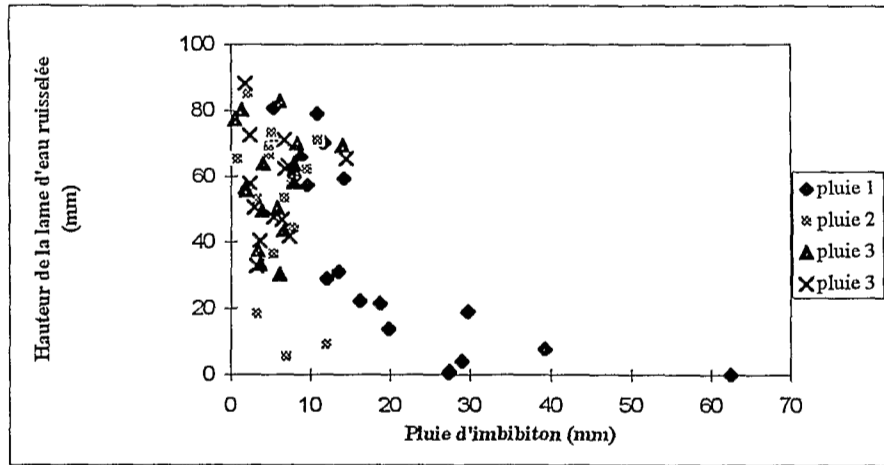


Figure 28. Relation entre hauteur de la lame d'eau ruisselée et pluie d'imbibition

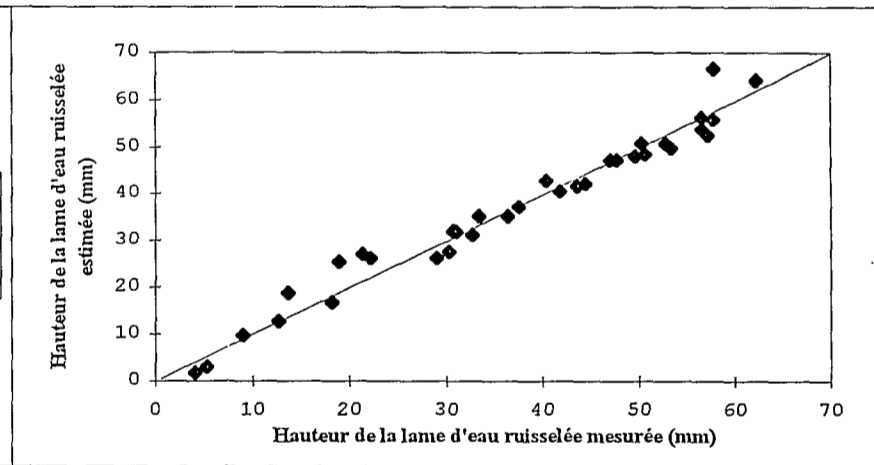


Figure 29. Relation entre hauteur de la lame d'eau ruisselée estimée et celle mesurée pour les pluies simulées

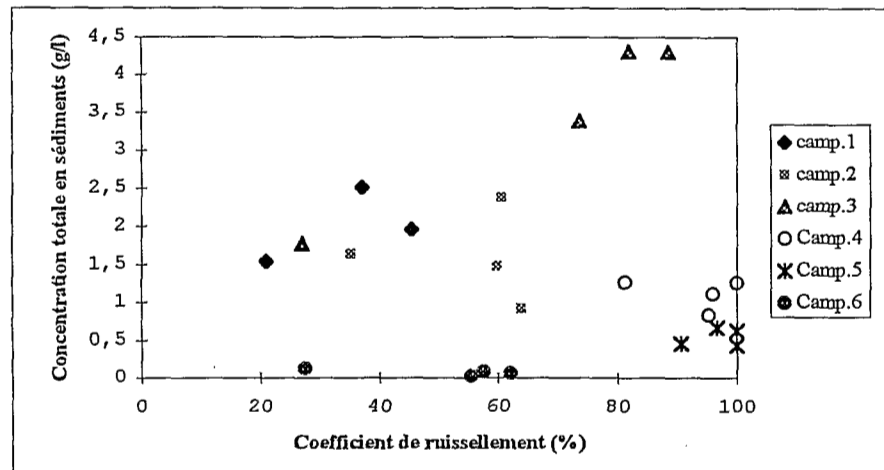


Figure 30. Relation entre concentration totale en sédiments et coefficient de ruissellement

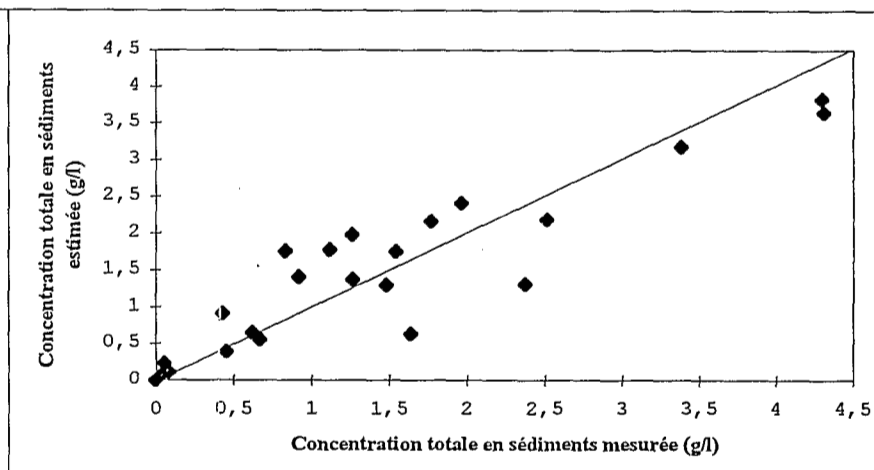


Figure 31. Relation entre concentration totale en sédiments estimée et celle mesurée pour les pluies simulées

3.1.5 Synthèse et discussion : proposition d'une approche typologique

Le traitement des résultats des simulations de pluie présentés a permis à l'échelle de microparcelles :

- d'obtenir des valeurs d'infiltrabilité pour des situations contrastées qui correspondent à des états-types combinant type de préparation du sol et stades de développement du couvert végétal ;
- d'identifier les principaux facteurs explicatifs du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de microparcelles. Ces facteurs sont les pluies, des paramètres d'infiltrabilité et de succion d'eau du sol pour le ruissellement, le ruissellement et le couvert végétal pour les pertes en sol.

Il semble dès lors intéressant de tenter une généralisation de ces résultats en adoptant une démarche typologique visant à permettre l'extrapolation. Les premières étapes d'une typologie vont être discutées ici. Elle est fondée sur l'application d'une loi d'infiltration (Green et Ampt) aux résultats de simulations de pluie et sur les observations faites de manière descriptive précédemment. Cette typologie est présentée sous la forme d'un tableau à plusieurs entrées qui sont détaillées ici (figure 32).

Etat hydrique initial du sol

Les résultats obtenus amènent à distinguer deux classes :

- *sol peu humide* : teneur en eau du sol voisine de 35 % (par exemple campagne 3, avant la première averse simulée) ;
- *sol humide* : teneur en eau du sol voisine de 45 % (par exemple campagne 3, la moyenne avant les trois autres averses simulées).

Comme on l'a vu à la section 3.1.2, ces valeurs de teneurs en eau qui dans d'autres conditions évoqueraient une forte humidité, correspondent bien ici à des succions déjà élevées et à une humidité égale ou inférieure à la capacité au champ.

Etat de surface du sol

OPS

- sol non dégradé : ouvert, poreux avec une macroporosité importante, n'ayant pas donné de flaque (c.f. photo 1) ;
- sol moyennement dégradé : OPS sur moins de la moitié de la microparcelle, quelques traces de flaque (photo 2) ;
- sol dégradé : OPS sur plus de la moitié de la microparcelle, traces de flaques sur plus de moitié de la microparcelle (photo 5).

Rugosité

- élevée : dénivelée supérieure à 3 cm entre les points hauts et les points bas de la surface du sol (photo 1)
- faible : dénivelée inférieure à 3 cm entre les points hauts et les points bas de la surface du sol (photo 5)

Là encore, les limites sont établies assez grossièrement et mériteraient d'être précisées par un relevé plus systématique, dont nous n'avons pas perçu l'importance lors du travail de terrain.

Les cases comportant une croix soulignent des situations qui n'existent pas ou ont très peu de chances d'être rencontrées dans le contexte où est menée l'étude. Il s'agit des cas suivants :

- sol non dégradé une centaine de jours après le semis pour les préparations charrue à soc et charrue à disque;

- sol à rugosité élevée après un travail à la charrue à disques ou un *semis direct* à n'importe quel stade du cycle cultural ;
- sol à faible rugosité travaillé à la charrue à soc, quelques jours après le semis quand le sol est non dégradé et moyennement dégradé ;
- sol dégradé à rugosité élevée quelle que soit le type de préparation ;
- sol dégradé sous *semis direct* à n'importe quel stade du cycle cultural.

Les simulations que nous avons menées sont insuffisantes et mériteraient d'être complétées. Certaines cases du tableau comportant un « ? » identifient les situations qu'il faudrait tester et qui sont les suivantes :

- sol moyennement dégradé, préparé à la charrue à disques quelques jours après le semis;
- sol moyennement dégradé et dégradé, préparé à la charrue à disques une centaine de jours après le semis,
- *semis direct*, quelques jours après le semis.

Des lacunes évidentes concernent les préparations à la charrue à soc à faible profondeur (20 cm) et le *semis direct* qui en était à ses débuts au moment où nous avons effectué le travail de terrain. Une autre lacune évidente de cette typologie est l'absence de situations intermédiaires. Les dates de simulations correspondent à quelques jours après le semis et peu de temps avant la récolte. Il serait intéressant de choisir des dates en particulier avant la chute des feuilles de soja.

Une autre question concerne celle des ordres de grandeur de l'infiltrabilité obtenue en appliquant l'équation de Green et Ampt (1911) aux résultats de simulations de pluie. Il serait intéressant de disposer de mesures tensiométriques permettant de s'affranchir des hypothèses simplificatrices de Green et Ampt. Les valeurs de conductivité hydraulique rapportées par Roloff (1983), qui a utilisé également la simulation de pluie (112 mm/h pendant une heure) pour six types de sols au Paraná, se situent entre 26 et 64 mm/h , soit une gamme de variation proche de celle établie dans ce travail.

Par contre, une discussion avec C. Roth qui a travaillé sur des situations très voisines au Paraná (type de sol voisin, mais à microstructure sans doute différente, même climat, culture et préparation du sol) comme cela a déjà été mentionné, conduit à penser que les valeurs de l'infiltrabilité que nous proposons sont très élevées. Les valeurs qu'il a obtenues en utilisant des mesures tensiométriques sous simulation de pluie (60 mm/h pendant 1 heure) pour les microparcelles avec une formation d'OPS, entre le semis et la récolte, se situent respectivement entre 3 et 6,5 mm/h respectivement (Roth, 1992).

Pluie	1	2	3	4
Campagne 1				
Campagne 2				
Campagne 3				
Campagne 6				

a. Résultats issus de simulations

Nombre de jours depuis le semis	une semaine (< 10% de couvert végétal)						une centaine de jours (> 70% de couvert végétal)					
	peu humide		humide				peu humide		humide			
Etat hydrique initial	non dégradé		moyennement dégradé		dégradé		non dégradé		moyennement dégradé		dégradé	
Rugosité	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible	élevée	faible
Semis direct		?		?								
charrue à disques à 20 cm				?						?		?
charrue à soc (sous-solage) à 50 cm												

K_{GA} de 10 à 20 mm/h

K_{GA} de 30 à 40 mm/h

absence de données

K_{GA} de 20 à 30 mm/h

K_{GA} de 40 à 60 mm/h

situations qui n'existent pas

b. Essai de typologie

Figure 32 : Typologie de l'infiltrabilité du sol

Ces valeurs indiquent que le couvert végétal du soja, le cycle sol humide/sol sec et l'activité biologique doivent rompre au moins partiellement cette OPS.

Une mesure plus directe des flux d'infiltration serait importante et permettrait d'améliorer la validité de la relation hauteur de la lame d'eau ruisselée et la conductivité hydraulique présentée à la figure 23, dont on a vu les limites.

On peut envisager de caractériser l'infiltrabilité par d'autres méthodes, ainsi celle utilisée par Vauclin et Chopart (1992), l'infiltrométrie sous succion (TRIMS). Mais cette méthode serait difficile à employer in situ sans perturber les états de surface. Elle pourrait néanmoins être utilisée à titre comparatif sur des surfaces planes, des préparations assez affinées et des sols nus.

Par contre, les essais effectués sur le terrain d'étude, à la méthode du double anneau, et les résultats correspondants, non présentés ici, amènent à rejeter cette méthode pour les raisons habituellement évoquées : charge hydraulique surestimant la conductivité hydraulique, non prise en compte des variations des états de surface du sol notamment l'OPS formée par l'impact des gouttes de pluie et perturbation de la surface du sol au moment de l'installation des doubles anneaux (Valentin, 1981 ; Sidiras et Roth, 1987 ; Casenave et Valentin, 1989).

Compte-tenu des réserves émises concernant les limites des valeurs proposées et des lacunes soulignées, une typologie de l'infiltrabilité complétée et améliorée pourrait déboucher également sur une typologie du ruissellement dont on a vu qu'il était le principal facteur explicatif de l'érosion à l'échelle des microparcelles. Pour ce qui concerne le couvert végétal, évidemment conditionnel lui aussi de l'érosion, il nous semble que l'appréhension spatiale ne pose aucun problème en raisonnant simplement à partir des dates précises de semis, qui permet d'apprécier le développement dans les conditions de pluviométrie et de températures propres à la région (distribution relativement homogène des pluies et des températures). Le cas échéant, cet aspect peut être apprécié grâce à la télédétection ou la simple observation suivant les surfaces à couvrir.

Evidemment, une des limites de cette approche en est l'échelle. Le raisonnement à l'échelle des microparcelles n'est pas extrapolable à des superficies plus grandes en raison des infiltrations et des dépôts reprises possibles. L'approche à l'échelle des microparcelles met l'accent sur la détachabilité des particules solides et la genèse du ruissellement de l'eau en surface avant sa circulation. Il nous semble que ces formes d'érosion et de ruissellement diffus concernent une part importante des surfaces des bassins versants. Les distances et les modalités de transfert qui les conditionnent, les dépôts-reprises mériteraient d'être précisés. Une approche plus complète devrait prendre en compte les autres formes, notamment le ruissellement concentré et les ravinements à l'échelle des bassins versants.

Il n'en reste pas moins que cette échelle de la parcelle, abordée ici via les microparcelles, permet de proposer une méthode qui tient compte des variations spatiales et temporelles. Cet aspect essentiel est trop souvent négligé dans les modèles de prévision de l'érosion et du ruissellement à l'échelle de bassins versants (De Roo, 1993; Ludwig et al, 1996 ; Auzet *et al.*, 1995).

3.2 LES MICROPARCELLES SOUS PLUIES NATURELLES

3.2.1 Evolution du ruissellement et de la concentration en sédiments durant l'année agricole 1992/1993

Les résultats peuvent être présentés d'abord de manière globale, à travers les indicateurs qui sont les coefficients de ruissellement et les pertes en sol moyennes annuelles.

Le tableau XIV présente le bilan annuel des coefficients de ruissellement et des pertes en sol établis pour les microparcelles de 1 m², en fonction du type de préparation du sol.

Tableau XIV. Bilan annuel des coefficients de ruissellement et pertes en sol pour les microparcelles sous pluies naturelles (22/08/1992 - 18/09/1993)

	<i>conventionnelle</i> (charrue à disques) (moyenne microparcelle 1 et 2)	<i>semis direct</i> (microparcelle 3)
coefficient de ruissellement (%)	16	6
pertes en sol (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	4	0,2

Ce bilan confirme les résultats des simulations de pluies pour les pertes en sol : le sol est davantage protégé dans le cas du *semis direct* que dans celui du labour à la charrue à disques.

Les microparcelles préparées *conventionnellement* ruissellent un peu plus (+10%) que préparées en *semis direct*, ce qui n'était pas le cas pour les microparcelles sous pluies simulées. La différence peut provenir du fait que les simulations ont été faites de façon très ponctuelle, une semaine et une centaine de jours après le semis. En revanche, les résultats obtenus sous pluies naturelles intègrent l'ensemble du cycle cultural.

Ces résultats peuvent être comparés à ceux publiés par le *Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul* (1986) obtenus sur des parcelles de 77 m² du type Wischmeier situées à 30 km du bassin du Donato, sur le même type de sol et préparées de manière conventionnelle (charrue à disques) ou en *semis direct* (tableau XV).

Tableau XV. Coefficients de ruissellement et pertes en sol sur des parcelles de 77 m², Ijuí (1978 - 1981)

Culture	Préparation du sol	coefficient de ruissellement (%)	Pertes en sol (t ha ⁻¹ an ⁻¹)
blé-soja	<i>Conventionnelle</i>	8,5	3,1
avoine-maïs		8,5	4,0
blé-soja	<i>semis direct</i>	0,5	0,4
avoine-maïs		0,8	0,8

Ces résultats à l'échelle de 77 m² vont dans le même sens que ceux obtenus sous pluies naturelles à l'échelle du m².

De manière plus détaillée, l'analyse s'appuie sur la figure 33 qui présente le ruissellement des microparcelles 1, 2 travaillées de manière *conventionnelle* et de la microparcelle 3 préparée en *semis direct* pour la période d'août 1992 à septembre 1993.

La microparcelle 3 préparée en *semis direct* est celle qui ruisselle le moins. Pour ce qui concerne la microparcelle 1, installée sur un site préparé avec le système *conventionnel*, en amont du bourrelet d'une banquette, presque tous les ruissellements importants sont provoqués par des pluies supérieures à 40 mm. Les ruissellements les plus importants ont lieu en hiver lorsque le taux de couvert végétal est faible (<15%). La microparcelle 2 installée en aval du même bourrelet de banquette ruisselle systématiquement moins que la précédente. Différentes hypothèses peuvent être évoquées pour expliquer cette différence :

1. la plupart du temps, la microparcelle 2 a un taux de couvert végétal de 10 à 20% supérieur à celui de la microparcelle 1 (fig. 32). On peut penser que la couverture végétale plus importante aurait en effet diminué le ruissellement et la concentration en sédiment, comme c'est le cas pour la microparcelle 3 ;
2. la position de chaque parcelle, la microparcelle 2 en amont et la microparcelle 1 en aval du bourrelet de la banquette, exercerait une influence. Cette différence pourrait provenir des sédiments accumulés sur la partie aval du bourrelet, ce qui a été observé au moment de l'installation de la microparcelle 1. La différence de structure du sol en surface expliquerait les différences, y compris le moindre développement du couvert végétal par rapport à l'amont du bourrelet ;
3. la microparcelle 1 serait plus compactée que la 2 ;
4. il y a simplement une hétérogénéité du sol et il aurait fallu disposer de davantage de microparcelles ou de parcelles de plus grande dimension.

Les hauteurs de pluies, le taux de couvert végétal, les ruissellements et les concentrations en sédiments de la période du 01/08/1992 au 30/09/1993 sont présentés en annexe 9.

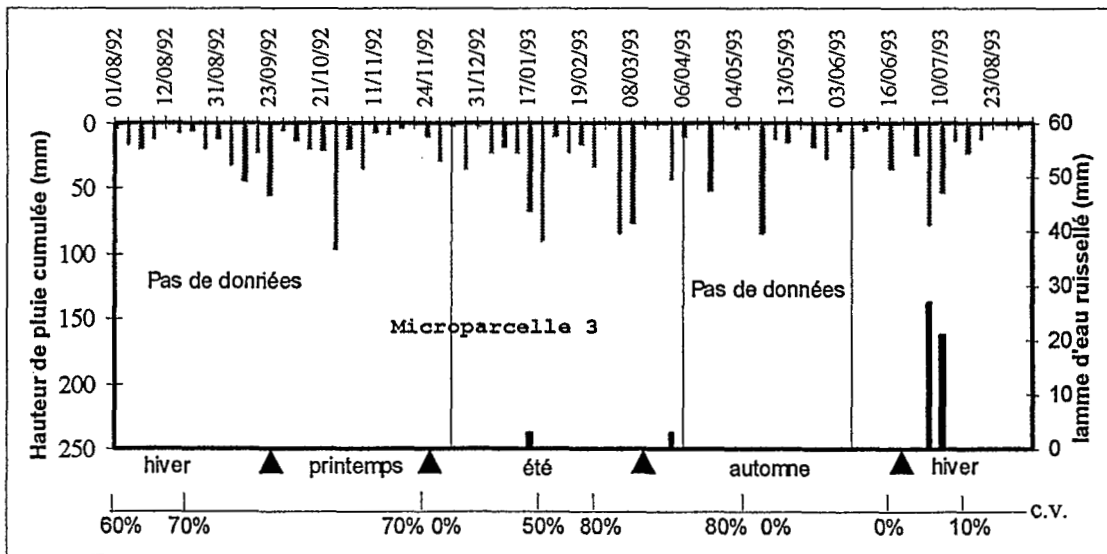
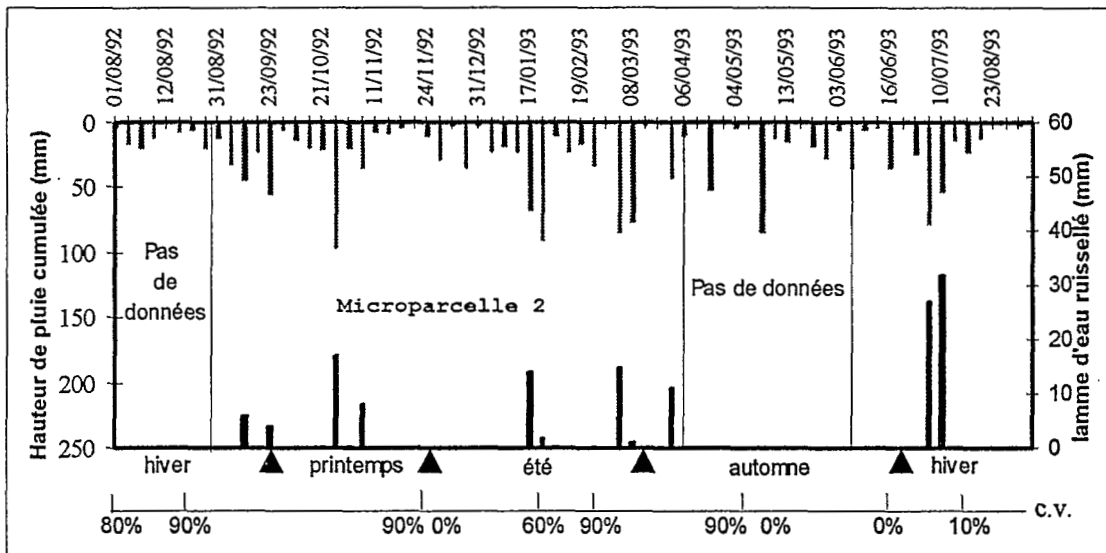
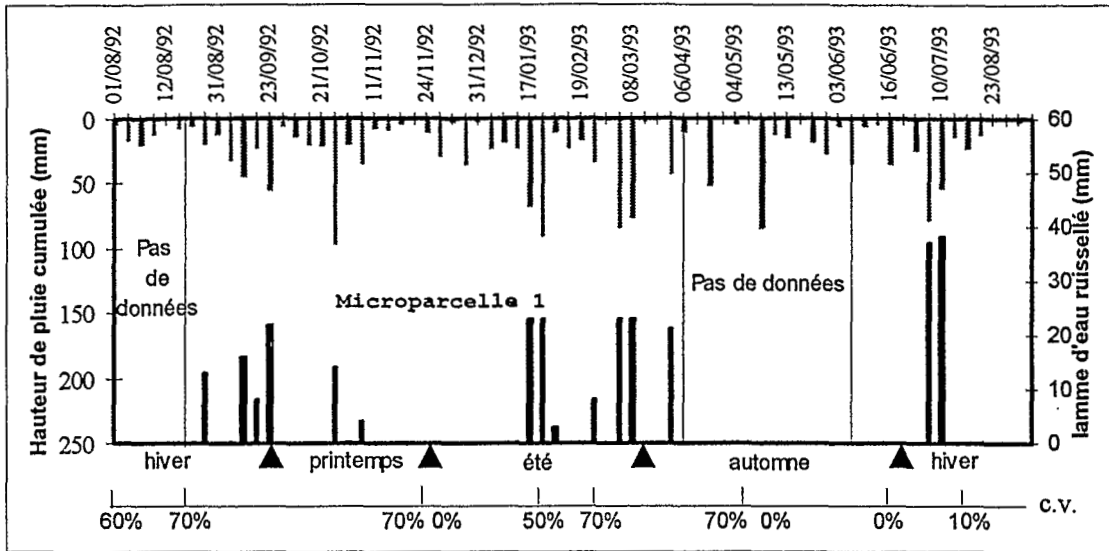


Figure 33. Distribution des hauteurs de la lame d'eau ruissellée et du taux de couvert végétal des microparcelles sous pluies naturelles (1992/1993)

3.2.2 Comparaison avec la pluie simulée

Si on essaie de mettre sur un même graphique les mesures de concentrations en sédiments et le coefficient de ruissellement correspondant pour les pluies simulées et naturelles, on peut constater (figure 34) qu'il y a une cohérence entre les résultats obtenus.

Dans le cas des pluies simulées, la relation entre ces deux variables est nette lorsque le sol est nu (campagnes 1 et 3). Cette relation n'apparaît pas pour les parcelles en *semis direct* : quel que soit le volume ruisselé, la concentration en sédiments est très faible. Pour les microparcelles préparées selon le système *conventionnel*, soumises aux pluies naturelles, on constate que lorsque le sol est faiblement (< 15%) ou moyennement (entre 45 et 55%) couvert, les points suivent la même tendance que lorsque le sol est nu pour les pluies simulées.

Si on compare les deux points des microparcelles 1 et 2, où le couvert végétal est du même ordre de grandeur (8% le 03/07/1993 et 13% le 10/07/1993), on constate que les différences de ruissellement sont faibles. Par contre, les différences de concentration en sédiments sont importantes. Pour le premier événement il a plu 4,8 mm avec une intensité supérieure à 40 mm/h, 2,2 mm avec une intensité supérieure à 70 mm/h et 1,2 mm avec une intensité supérieure à 100 mm/h. Pour le deuxième événement, l'intensité est moindre : 0,8 mm avec une intensité supérieure à 40 mm/h et rien a précipité avec des intensités supérieures à 70 mm/h. On peut penser que c'est l'énergie cinétique de la pluie plus grande du premier événement qui explique l'érosion plus forte. Par rapport aux pluies simulées, les précipitations d'intensité supérieure à 40 mm/h sont bien moins importantes et il est possible que les énergies cinétiques de pluies simulées soient inférieures à celles des pluies naturelles.

Pour les cas où le couvert végétal atteint 70% (figure 34 a), les concentrations en sédiments sont bien inférieures aux autres événements pour les trois microparcelles analysées sous pluies naturelles. On remarque que les concentrations en sédiments sont systématiquement plus faibles (< 0,5 g/l) pour la microparcelle 3 sous *semis direct*. Ceci témoignerait de la protection que le couvert végétal assure au sol. La surface couverte par la végétation protège le sol de l'impact des gouttes de pluies. Le détachement des sédiments en serait ralenti. La couverture végétale peut agir également de manière indirecte comme un frein au ruissellement, principalement à travers les résidus au sol qui entravent le transport des sédiments. Le ruissellement de la microparcelle 3 est très inférieur à ceux observés dans le système *conventionnel* (microparcelle 1 et 2). Pour toute la période analysée il n'y a eu que deux ruissellements importants (les 03 et 10/07/1993) pour cette parcelle, et ils ont été inférieurs aux ruissellements provoqués par les mêmes événements sur les microparcelles 1 et 2.

Ce seuil apparent de 60 à 70% de taux de couverture est très élevé et doit être relativisé par rapport aux données : les valeurs intermédiaires (40 - 50%) sont peu représentées dans nos relevés. Il n'y a pas de données de ruissellement pour la période de 24/03 à 07/06/1993 où le sol n'était pas couvert par la végétation. Pour le sol très faiblement couvert, on ne dispose que de deux enregistrements (les 03 et 10/07/1993). Ces résultats sont donc préliminaires : il faudrait plus de données pour confirmer les conclusions relatives aux taux de couvert végétal.

Un certain nombre de points correspondant à des concentrations élevées pour des ruissellements pratiquement nuls (figure 34 b) trouvent leur explication dans l'effet des événements antérieurs ou de la mise en place du cadre de la microparcelle : les sédiments déposés dans la gouttière à la base du cadre ne parviennent au réservoir de récupération que lors du ruissellement suivant qui peut être alors très faible (d'où des valeurs très élevées de concentration, correspondant en fait à de très faibles masses de sédiments). Ce fait méritait d'être mentionné : c'est l'une des limites techniques du dispositif expérimental dont nous n'avons pu nous affranchir dans le cas des pluies naturelles (dans le cas des pluies simulées, ces dépôts avaient été récupérés).

Ces restrictions faites, on constate que les résultats obtenus sous pluie naturelles confirment l'importance des coefficients de ruissellement et des taux de couvert végétal comme facteurs explicatifs des concentrations en sédiments à l'échelle de microparcelles déjà soulignée par les résultats des pluies simulées. Il est dès lors

intéressant de voir si les ajustements obtenus pour les données de simulation de pluie sont validés par celles des pluies naturelles.

Pour le test de la relation concernant le ruissellement total (Rt) une interpolation des paramètres K_{GA} et h est nécessaire. Cette interpolation a été faite en utilisant la typologie proposée précédemment (figure 32).

La connaissance des dates et du type de préparation du sol pour chaque parcelle pour la période d'août 1992 à septembre 1993 a conduit à subdiviser le bassin en 5 unités. A chaque date, une valeur de K_{GA} et de h a été générée pour chacune des unités.

Ne disposant pas de mesures des teneurs en eau du sol, l'indice IPA a été pris comme un indicateur de l'humidité du sol. Les limites ont été fixées pour un IPA inférieur à 5 et supérieur à 30.

La figure 35 présente la relation entre hauteur de la lame ruisselée estimée par l'ajustement et mesurée : la dispersion des points est forte. Une explication réside dans le caractère incomplet de la typologie : la figure 36 témoigne qu'il n'y a pas de relation entre les K_{GA} affectés à chaque parcelle et les coefficients de ruissellements mesurés.

La relation entre concentrations en sédiment estimées par l'équation d'ajustement et mesurées (figure 37) montre que l'estimation est systématiquement inférieure à la réalité. Ceci doit au moins en partie être attribué au fait que l'énergie cinétique des pluies simulées est probablement inférieure à celle de pluies naturelles et provoque de ce fait un détachement moins important.

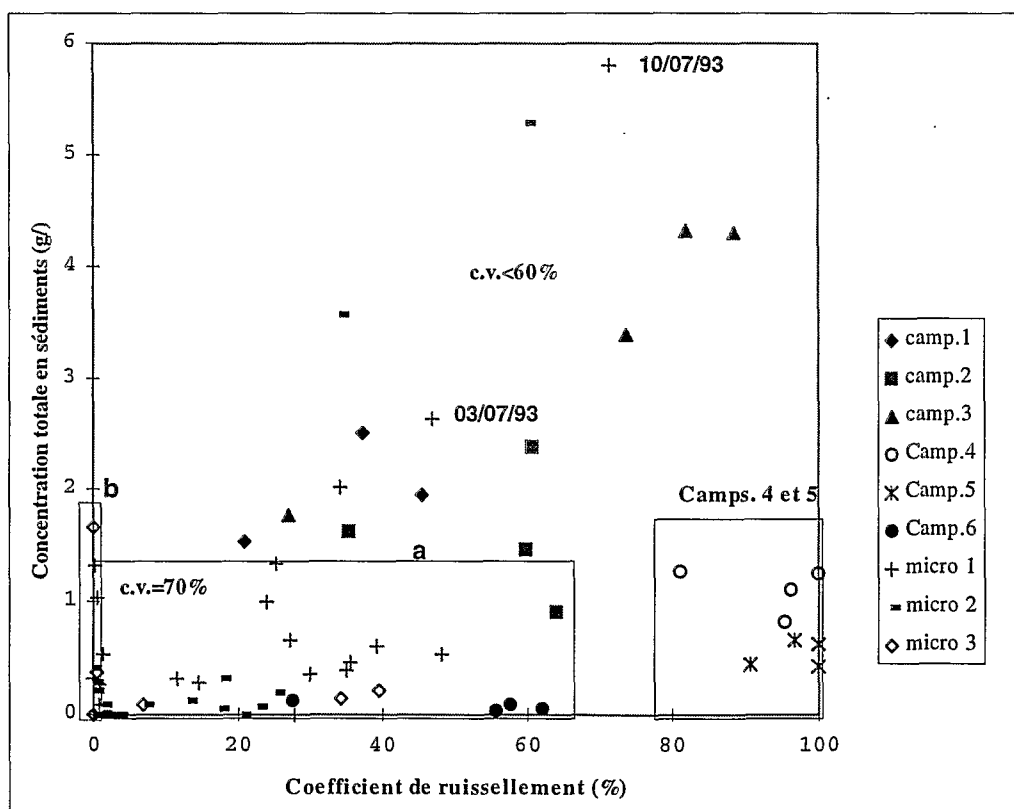


Figure 34. Relation entre concentration en sédiments et coefficients de ruissellement pour les pluies simulées et naturelles

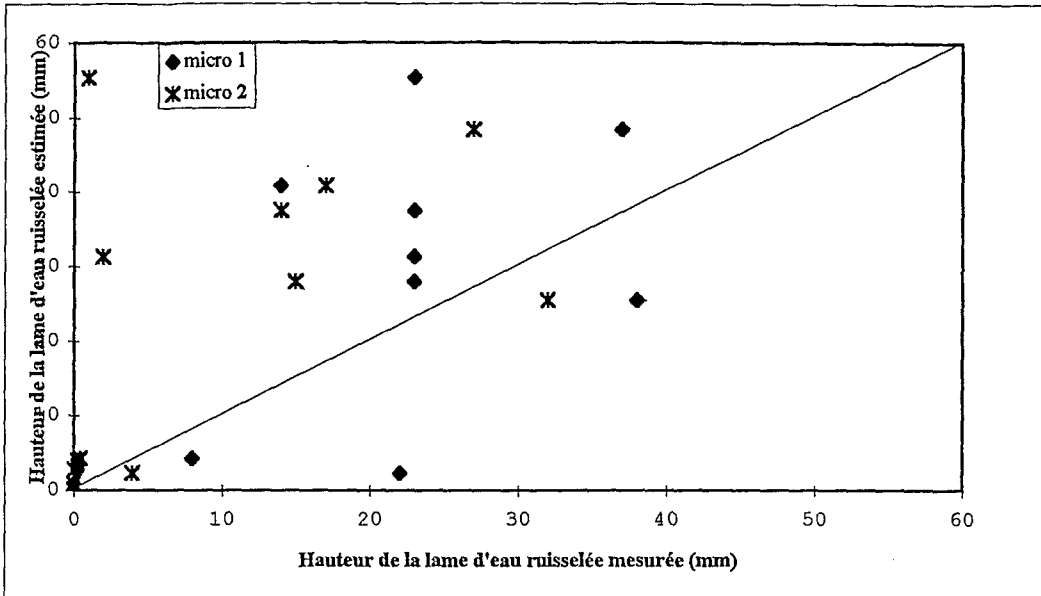


Figure 35. Relation entre hauteur de la lame d'eau estimée et mesurée pour les pluies naturelles

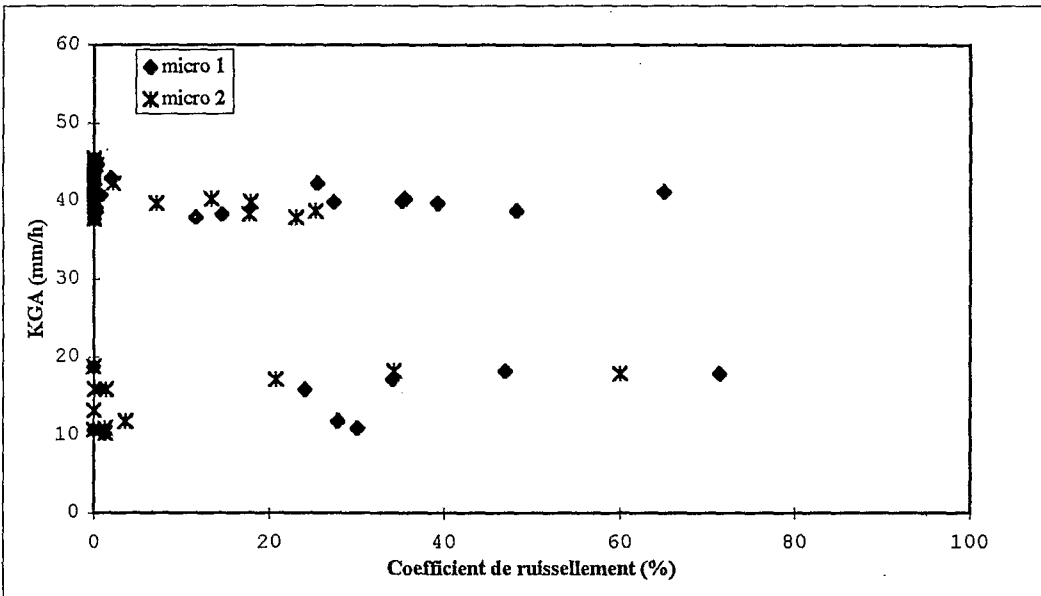


Figure 36. Relation entre K_{GA} et coefficient de ruissellement pour les pluies naturelles

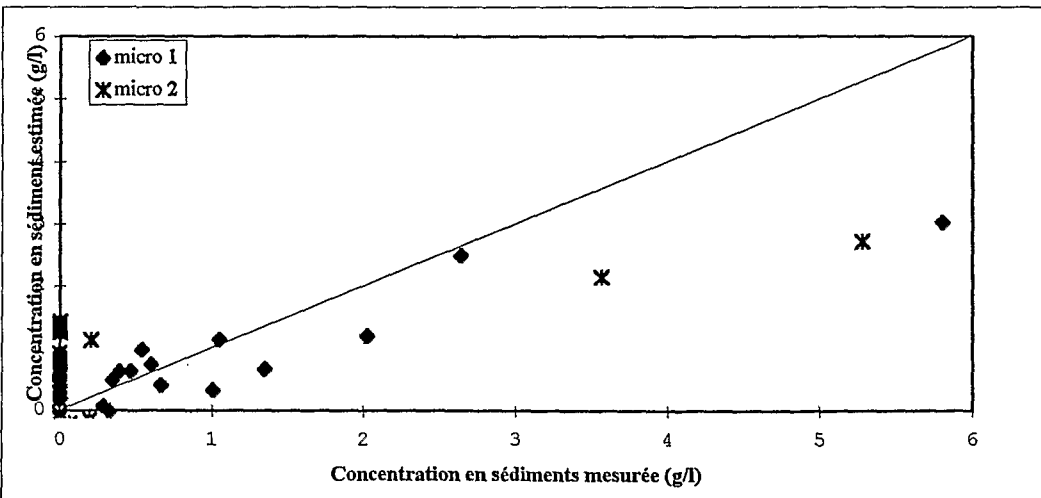


Figure 37. Relation entre concentrations en sédiments estimée et mesurée pour les pluies naturelles

3.2.3 Conclusion

Les résultats sous pluies naturelles confirment ceux obtenus pour les pluies simulées mais ne permettent pas de valider les relations obtenues. Plusieurs raisons doivent être principalement évoquées :

- la typologie permettant l'extrapolation des valeurs d'infiltrabilité est incomplète ;
- l'énergie cinétique des pluies naturelles est probablement supérieure à celle des pluies simulées.

Ces points mériteront d'être précisés.

L'effet du couvert végétal lui même mérite d'être davantage exploré. Si le seuil de 60 à 70 % de taux de couverture était confirmé, il y aurait à revoir la manière de considérer habituellement l'effet protecteur qui n'apparaîtrait que pour des taux de couverture très élevés et donc tardifs par rapport au cycle cultural. On objectera que nos résultats sont trop ponctuels et que certains taux sont peu ou pas représentés. Il est certain que le suivi tel que nous l'avons fait ne permet pas d'être plus affirmatif. Il aurait été nécessaire de suivre les parcelles durant l'ensemble du cycle cultural, ce qui était matériellement impossible dans nos conditions de travail.

En outre, au delà des taux de couverture, un travail sur l'efficacité des différents couverts mériterait d'être mené. Nos résultats, pour les pluies simulées et naturelles, suggèrent que les résidus de culture en surface protègent beaucoup plus le sol qu'un couvert végétal aérien et qu'ainsi le *semis direct* offre au sol la meilleure protection.

PARTIE 4

**ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION À L'ÉCHELLE DES
BASSINS VERSANTS EMBOÎTÉS : ANFITEATRO (14 HA) ET
DONATO (1,1 KM²)**

ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'EROSION A L'ECHELLE DES BASSINS VERSANTS EMBOITES : ANFITEATRO (14 HA) ET DONATO (1,1 KM²)

Ce chapitre est consacré à l'étude du ruissellement et de l'érosion à l'échelle des bassins d'Anfiteatro et du Donato.

Nous analyserons tout d'abord l'hydrologie des bassins et les bilans (pluie-écoulement) seront présentés de manière globale pour la période étudiée (11/1989 à 12/1994), période pour laquelle nous avons réalisé des bilans annuels, mensuels et journaliers.

L'érosion est ensuite abordée pour les crues, en nombre limité, durant lesquelles des mesures de la charge solide des cours d'eau ont pu être effectuées.

L'érosion concentrée du bassin est évaluée à partir de levés topométriques diachroniques de la partie la plus importante de la grande ravine, dont la section excède 70 m² et la longueur quelques dizaines de mètres. Cette démarche vise à estimer la contribution de la ravine à l'érosion total du bassin.

Enfin, malgré le caractère imparfait de notre jeu de données, nous avons testé deux modèles d'érosion applicables à des bassins versants : le modèle empirique MUSLE (Williams, 1975) qui est une adaptation de l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978) et le modèle ANSWERS (Beasley, 1977) de base physique et distribué dans le bassin, dont l'application est effectuée au moyen du système d'information géographique, le logiciel GRASS.

4.1 PLUVIOMETRIE

4.1.1 Analyse des pluies mensuelles et journalières entre novembre 1989 et décembre 1994

Les données pluviographiques et pluviométriques ont été traitées avec le logiciel *PLUVIOM* de l'ORSTOM.

Pour cette analyse, le choix s'est porté sur le pluviographe 11 situé au centre du bassin et dont on s'est assuré que le fonctionnement est dans son ensemble correct. La période du 01/12/1989 au 19/12/1994 compte 1844 jours dont 393 jours de lacunes (soit 21%) parmi lesquels 70 jours de pluie effective, soit 3,8% du total de la période. Les lacunes ont été complétées en utilisant une régression linéaire entre les données disponibles au poste 23 ou, à défaut, au poste 14 et les données du poste 11. La méthode du double cumul a été utilisée pour voir s'il y avait une importante dispersion entre les trois appareils. Une distribution satisfaisante a été observée pour toute la période, sauf pour l'année 1994 qui ne présente pas de période notable de lacune (8% de lacunes, et seulement 2,3 % de lacunes effectives correspondant aux jours de pluie). Il n'a donc pas été jugé nécessaire de reconstituer l'information pour cette dernière année. Les données de cette année sont moins fiables que précédemment. En effet, contrairement à la période 1989-1993 où nous assurions avec Pierre Chevallier une critique minutieuse, l'acquisition des données est depuis lors confiée aux techniciens de l'IPH de Porto Alegre qui n'ont pas été spécifiquement formés à cette tâche : elles nous ont été transmises sans que nous ayons les éléments pour juger de leur bonne qualité.

a) Analyse des pluies mensuelles

La figure 38 présente l'histogramme des hauteurs de pluie mensuelles (P, mm) établi sur la période 1945-1985 au poste de Cruz Alta (Chevallier, 1990). La distribution des hauteurs mensuelles est bien homogène, avec des valeurs se répartissant entre 110 et 160 mm. Le postes de Cruz Alta est le plus proche du bassin de Donato. La figure présente également l'évapotranspiration potentielle (ETP, mm) estimée à partir des valeurs décadaires calculées par Beltrame *et al.* (1994) en appliquant l'équation de Penman-Monteith (Smith, 1991) pour l'Etat du Rio Grande do Sul.

Au cours de la période étudiée (1990 à 1994), il y a une alternance assez régulière de mois secs et de mois humides par rapport à la moyenne (fig. 39). On remarquera en outre que certaines années sont globalement plus humides, comme 1990, et d'autres globalement plus sèches comme 1991.

La figure 40 présente le bilan (P - ETP) au pas mensuel pour la période de novembre 1989 à novembre 1994. Ce bilan représente théoriquement l'eau disponible dans le bassin pour l'infiltration profonde et pour l'écoulement. Il est excédentaire pendant la plus grande partie de l'année. Les périodes sèches sont rares dans cette région. Le déficit se place principalement à la fin du printemps (novembre) et pendant l'été (de décembre à mars). Mais, même pour ces mois, un excédent est possible. Les déficits sont par contre peu fréquents en hiver (de juillet à septembre).

Si les précipitations ne présentent pas de caractère saisonnier, en revanche l'évapotranspiration est plus importante au printemps et en été (septembre à février), liée surtout aux variations de la température (moyenne de 14°C en hiver et de 24°C en été selon IPAGRO, 1989), mais aussi à la vitesse du vent et à la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. Les mois absents correspondent à des valeurs non observées.

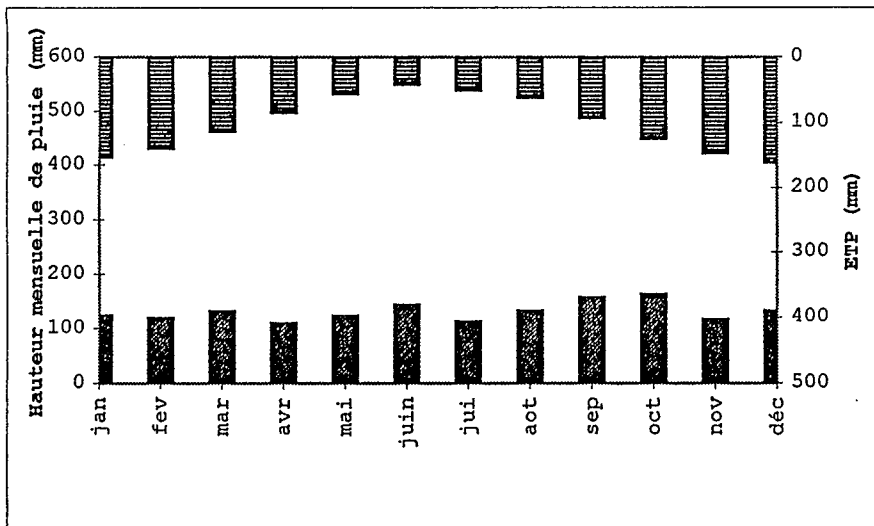


Figure 38. Distribution de la hauteur moyenne mensuelle de pluie et de l'ETP moyenne

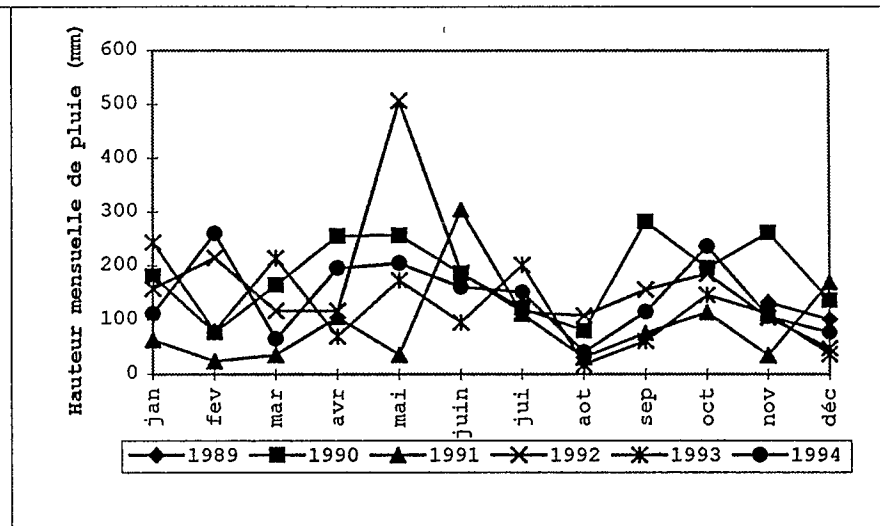


Figure 39. Distribution de la hauteur mensuelle de pluie (pluviographe 11) pour la période de 11/1989 à 12/1994

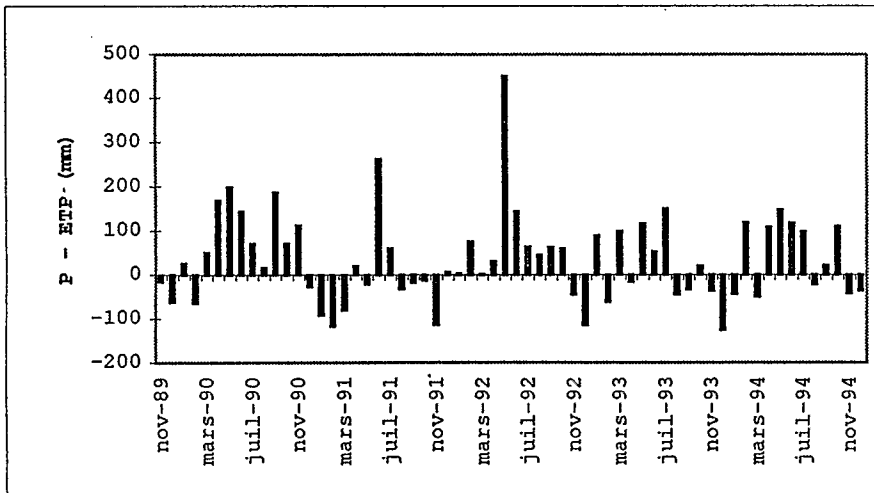


Figure 40 Distribution de (P - ETP) sur la période étudiée (11/1989 à 12/1994)

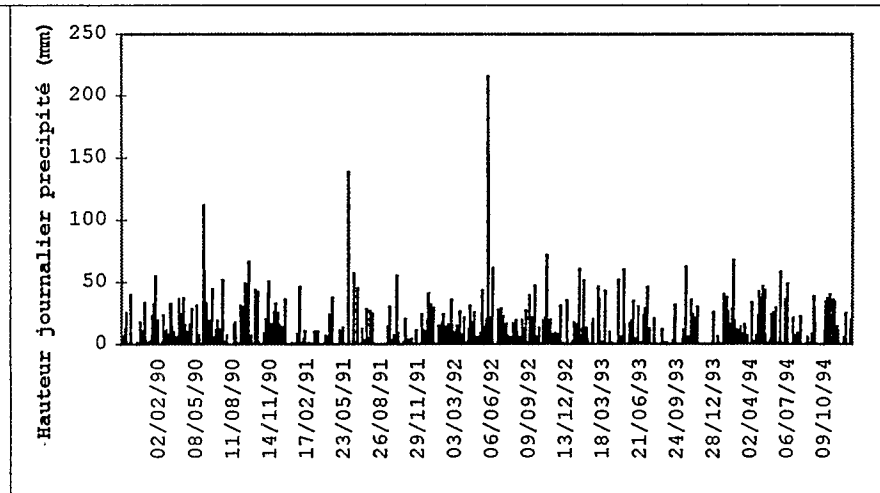


Figure 41. Distribution de la hauteur journalière de la pluie (pluviographe 11) pour la période étudiée (11/1989 à 12/1994)

b) Analyse des pluies journalières

La distribution des hauteurs de pluie journalière au cours de cette période est présentée sur la figure 41. On note que les hauteurs de pluies importantes ne présentent apparemment pas de distribution saisonnière.

Sur une période totale d'étude de 1 844 jours, il y a eu 833 jours de pluie et une hauteur cumulée de 8 773,5 mm, soit en moyenne 165 jours et 1 735 mm de pluie par an. Le tableau XVI présente la distribution des cumuls journaliers par classes.

Tableau XVI. Distribution des hauteurs de pluie journalières (01/12/1989 à 19/12/1994).

Classe	Nombre de jours de pluie par classe	Cumul du nombre de jours de pluies effectives
P = 0 mm	1009	
0 < P ≤ 1 mm	332	332
1 < P ≤ 10 mm	242	574
10 < P ≤ 20 mm	107	681
20 < P ≤ 40 mm	99	780
40 < P ≤ 60 mm	34	814
60 < P ≤ 80 mm	13	827
P > 80 mm	6	833

Cette distribution montre que, malgré leur nombre relativement limité, les 53 jours où les hauteurs de pluies ont été supérieures à 40 mm, représentent une part élevée des pluies : 3 452 mm soit 39% du total. A l'opposé, le nombre important de jours de pluie où les hauteurs ont été inférieures à 20 mm (681 jours, soit 82 % des jours de pluie) totalisent moins du tiers de la hauteur totale sur la période.

4.1.2 Analyse des intensités de pluie de décembre 1989 à décembre 1994

La figure 42 présente la distribution des hauteurs journalières par classe d'intensité pour l'ensemble de la période et l'ensemble des pluies (42a), les pluies tombées avec une intensité supérieure à 40 mm/h (42b) et pour chacune des saisons quelle que soit les intensités (42c à 42f). Ces valeurs ont été calculées en utilisant le logiciel ARES de l'ORSTOM, qui permet de calculer des intensités sur des pas de temps variables, choisis à partir de la pente du pluviogramme.

Le critère de séparation des averses a été choisi de la manière suivante : deux averses sont considérées comme distinctes lorsque l'intensité est inférieure à 1 mm/h pendant une heure. Toutes les averses de la période, dont le volume est supérieur à 1 mm sont prises en compte. Un tel critère permet d'avoir un maximum de précision en tenant compte des limites mécaniques des appareils utilisés.

Le pluviographe 11 a enregistré au cours de la période une hauteur d'eau précipitée totale de 6 094 mm. La différence avec la hauteur totale évaluée pour la période de décembre 89 à décembre 94 (8 773,5 mm) est liée aux lacunes d'enregistrement de cet appareil.

Les intensités élevées ne sont pas très importantes (figure 42a) : seuls 16 % du volume des pluies sur l'ensemble de la période est tombé avec des intensités supérieures à 20 mm/h, 13% avec une intensité comprise entre 10 et 20 mm/h, tandis que les intensités inférieures à 10 mm/h représente 72 % de la hauteur totale.

Si l'on considère uniquement la partie du volume des pluies correspondant aux cumuls journaliers relativement importants, supérieurs à 40 mm, on constate que la distribution par classe d'intensité ne se différencie pas de manière très importante (figure 42b). La différence au seuil de 10 mm/h est de l'ordre de 5 % seulement. On notera néanmoins que les intensités supérieures à 100 mm/h représentent pour ces journées 2 % du total, contre moins de 1 % si l'on considère l'ensemble.

On peut relever certaines variations saisonnières. Les intensités les plus importantes (supérieures à 10 mm/h) se produisent principalement en été, justement au moment du semis du soja et du maïs, lorsque le sol n'est pas ou très peu protégé des effets des gouttes de pluie. En revanche, le semis de l'avoine et du blé qui se produit à la fin d'avril où début mai, coïncide avec la période des faibles intensités. Les faibles intensités (inférieures à 10 mm/h) se produisent davantage en hiver et automne (78,6 et 71,6%) et moins en été et au printemps (66,4 et 70,2%). Chevallier (1991) avait observé la même tendance sur une série de 16 années au poste d'Augusto Pestana (30 km à l'ouest de Donato) géré par le CTC : des intensités plus fortes en été et au printemps, plus faibles en automne et en hiver (cf figure 41). Néanmoins, ces variations saisonnières restent limitées.

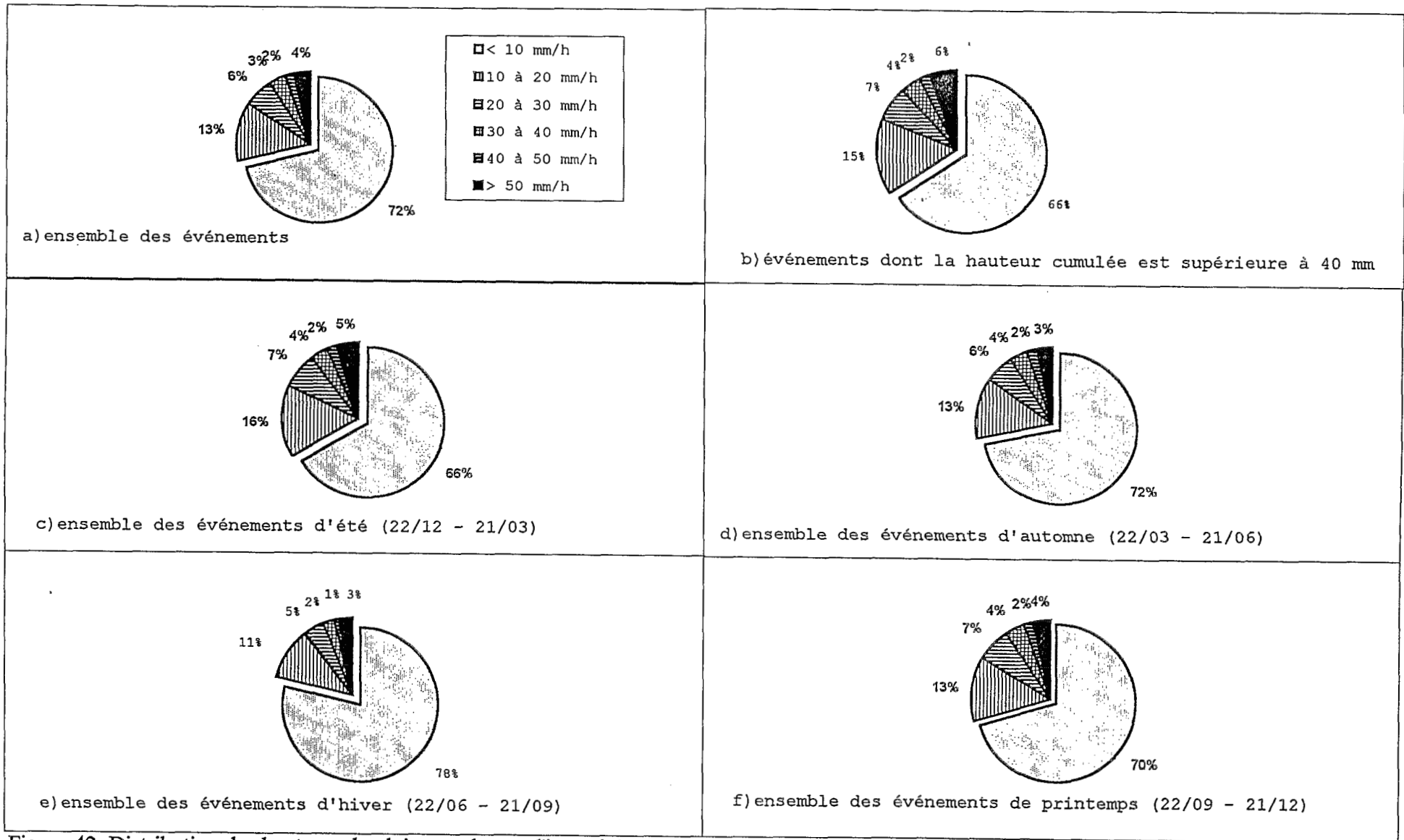


Figure 42. Distribution des hauteurs de pluie par classes d'intensités

4.2 ECOULEMENTS SUR LES BASSINS D'ANFITEATRO ET DE DONATO

4.2.1 Traitement des données hydrologiques

Cette analyse est faite à partir des limnigrammes du ruisseau de Donato et de l'exutoire d'Anfiteatro. Les courbes de tarage ont été établies en effectuant des jaugeages en étiage et en crue. Une information détaillée sur les procédures adoptées est donnée en annexe 3. Toutes les opérations de traitement et de gestion de l'information hydrométrique ont été réalisées avec le logiciel HYDROM de l'ORSTOM.

Une sélection des crues a été opérée sur les périodes de bon fonctionnement du limnigraphe. Pour avoir un échantillon le plus complet possible, toutes les crues, mêmes les moins importantes (lame ruisselée inférieure à 0,03 mm) ont été prises en considération dans l'analyse.

La séparation de l'écoulement rapide (ruissellement) et de l'écoulement de base pour chaque crue a été faite avec *HYDROM* (fig. 43) qui intègre les surfaces sur l'hydrogramme à partir de points sélectionnés manuellement. Les caractéristiques principales de chaque crue ont été calculées par *HYDROM* : le débit initial (Q_0 , l/s), le débit final (Q_f , l/s), le débit maximum (Q_{max} , l/s), le volume écoulé total (V_{et} , m³), le volume ruisselé (V_r , m³), la lame écoulée totale (L_{et} , mm) et la lame ruisselée (L_r , mm). Les analyses seront principalement fondées sur les lames écoulées et ruisselées : ces paramètres intègrent la surface du bassin et sont ainsi comparables avec les autres termes du bilan hydrologique.

La lame d'écoulement de base (L_{eb} , mm) est obtenue par la différence entre L_{et} et L_r . Le programme calcule également le temps de montée de la crue (T_m , secondes) et le temps de base de l'hydrogramme (T_b , secondes).

Après avoir évalué les caractéristiques principales de chaque crue, des cumuls journaliers, mensuels et annuels sont opérés pour permettre d'établir des bilans hydrologiques. En raison des lacunes des enregistrements des limnigraphes, ces bilans sont forcément partiels.

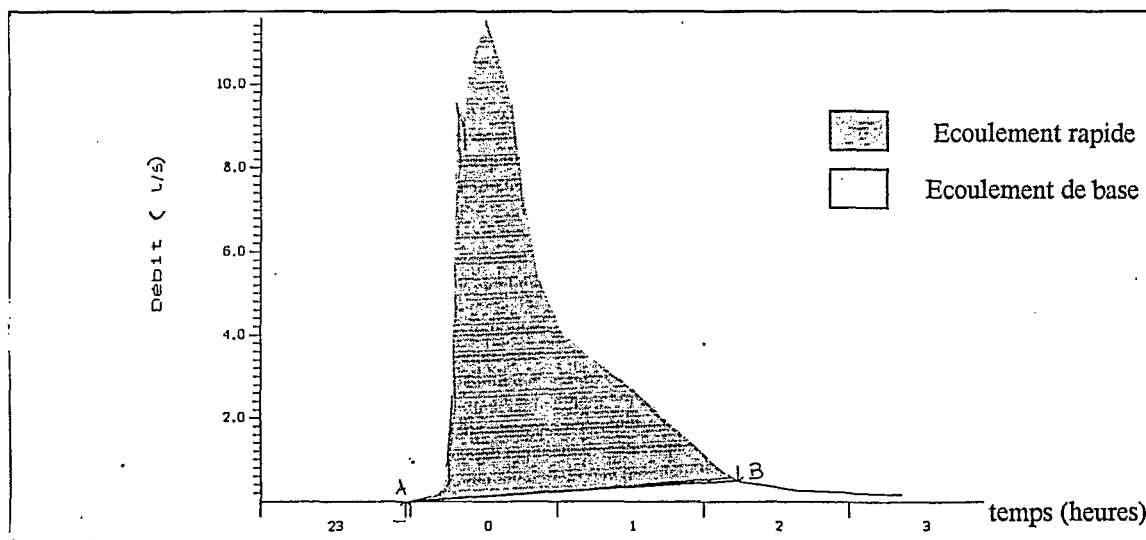


Figure 43 - Séparation des écoulements. Exemple de la crue du 25/04/1994 au bassin de Donato.

a) Bassin de Donato

La période retenue va du 12 novembre 1989 au 19 décembre 1994. Sur ces 1 875 jours, on dénombre 94 jours de crues (109 crues au total), 1 461 jours d'écoulement de base et 320 jours pour lesquels il y a des lacunes.

Ces 320 jours de lacunes représentent 17 % du temps total. Parmi ces jours, 197 correspondent à des jours sans précipitation, 82 jours à des jours avec une précipitation cumulée inférieure à 10 mm, 26 jours à des jours avec une précipitation cumulée comprise entre 10 et 30 mm, et, enfin, 15 jours à des jours avec une précipitation cumulée supérieure à 30 mm.

Sur la période étudiée, seules les pluies supérieures à 30 mm sont susceptibles de générer des ruissellements importants (lame ruisselée supérieure à 1 mm). Il n'y a qu'une exception, le 05/06/1992, où une pluie de 19,1 mm a provoqué une lame ruisselée de 1,2 mm. Cette crue s'est produite 9 jours après la pluie exceptionnelle du 26 et 27/05/1992 (379 mm) et 3 jours après une précipitation de 22,5 mm. Elle intervenait sur un sol très humide, ce qui explique probablement cette réponse du bassin à une averse pourtant modeste.

Compte tenu de ce constat, on peut admettre que, sur toute la période étudiée, seules 15 journées présentant des crues importantes ont été perdues du fait d'un fonctionnement défectueux du limnigraphe.

b) Bassin d'Anfiteatro

Pour le bassin versant d'Anfiteatro, la période étudiée est plus limitée : elle va du 1^{er} juillet 1992 au 18 décembre 1994. Sur ces 876 jours, on dénombre 54 jours où il y a eu écoulement, 710 jours sans écoulement et 112 jours de lacunes (13% du temps de fonctionnement du limnigraphe). Contrairement à ce qui se passe sur le bassin de Donato, ce petit bassin ne présente pas d'écoulement de base : les écoulements observés correspondent à des crues généralement de courte durée.

Seuls 12 événements ont généré une lame ruisselée supérieure à 1 mm : parmi ceux-ci, 10 correspondent à des pluies de plus de 30 mm, un événement correspond à une pluie de 25 mm (25/10/1992) survenant après une pluie de 72 mm la veille ; une autre crue, celle du 07/08/1992, correspond à une précipitation de 20 mm sans précipitation antérieure importante.

Des 112 jours de lacunes, 77 jours correspondent à des jours sans pluie, 25 jours où il a plu moins 10 mm, 6 jours où il a plu 10 à 30 mm et 4 jours où l'on a plus de 30 mm : on peut ainsi admettre que seuls 4 événements importants n'ont pas été enregistrés du fait des pannes du limnigraphe sur l'ensemble des 876 jours de la période étudiée.

4.2.2 Bilan hydrologique annuel partiel (1990 - 1994)

Le bilan hydrologique des bassins est fait de manière partielle parce que les lacunes des lames ruisselées ne sont pas reconstituées. En revanche, la bonne corrélation entre les pluviographes 11, 23 et 14 a permis de compléter les lacunes du pluviographe. Ainsi, les bilans présentés ci-dessous correspondent à des périodes où toutes les données sont disponibles : précipitations, écoulements et évapotranspiration. La somme annuelle des lames ruisselées et écoulées correspond à celles enregistrées par les limnigraphes et générées par les précipitations correspondantes et diffère légèrement de la somme des précipitations et des lames ruisselées et écoulées pour chaque année.

Le tableau XVII présente les résultats concernant les principaux termes du bilan hydrologique annuel (partiel) des bassins de Donato et d'Anfiteatro.

Tableau XVII. Bilans hydrologiques annuels (partiels) des bassins versant de Donato et d'Anfiteatro (mm)

années	Donato (1/01/90 - 19/12/94)					Anfiteatro (24/07/92- 19/12/94)	
	P (mm)	Lr (mm)	Let (mm)	Let - Lr (mm)	P-Let (mm)	P (mm)	Lr (mm)
1990	1539	28,12	609	581	930		
1991	712	16,71	251	234	461		
1992	1869	495,78	1250	754	619	625	16,68
1992*	1489	15,35					
1993	1502	25,86	263	237	1239	1277	11,72
1994	1634	25,26	416	391	1218	1462	12,13

P : hauteur des pluies Lr : lame ruisselée Let : lame écoulée totale

1992* : résultats obtenus en excluant la crue des 26 et 27 mai.

La hauteur totale de pluie de l'année de 1992 sur le bassin de Donato est exceptionnelle du fait de la pluie des 26 et 27 mai où il est tombé 379 mm en 25 heures. Pour cette raison, les données de cette année sont également présentées en excluant cet événement. Le limnigraphe d'Anfiteatro ne fonctionnait pas encore à ce moment là.

L'hétérogénéité interannuelle des variables relevées pour le Donato peut être attribuée au fait que l'année 1990 se caractérise comme une année humide avec 2 216 mm de pluie (lacunes reconstituées) et l'année 1991 comme une année sèche avec 1098 mm et en partie aux lacunes d'enregistrement des limnigraphes. Les lames ruisselées enregistrées par les limnigraphes accompagnent les pluies : la lame ruisselée la plus importante correspond à l'année 1990, les moins importantes correspondent aux années 1991 (année la plus sèche) et 1992 si on exclut la crue des 25 et 26/05. Les lames écoulées totale (Let) et de base (Leb=Let-Lr) sont également les plus importantes pour l'année 1990 et les plus faibles en 1991; elles suivent la distribution des précipitations. Les années 1993 et 1994 contribuent le plus à l'infiltration en profondeur (percolation).

Les données sont plus hétérogènes pour le bassin d'Anfiteatro. L'année 1992 présente une précipitation partielle (à partir du 24 juillet) faible et une lame ruisselée plus importante qu'en 1993 et 1994.

Le tableau XVIII présente la redistribution du bilan hydrologique annuel partiel pour chacune des années, en pourcentage des pluies cumulées, ainsi que les moyennes pour la période 1990-1994, crue exceptionnelle de mai 1992 exclue ou non. Le déficit d'écoulement, qui correspond au stockage profond sans restitution à l'exutoire du bassin ou à l'évapotranspiration, est calculé par différence entre la hauteur d'eau précipitée et l'écoulement total dans l'année (P-Let). L'écoulement de base (Let-Lr) et le ruissellement rapide (Lr) sont également présentés.

Le coefficient de ruissellement annuel au bassin de Donato varie entre 1,8 % et 2,3 %, sauf pour l'année 1992 où il atteint 26,5 %. L'écoulement de base varie entre 15,8 % et 37,8 %. Le déficit d'écoulement varie entre 60,4 % et 82,5 % de la hauteur pluviométrique totale. Ce bilan fait apparaître un faible taux de ruissellement (1,9 % en moyenne) et un écoulement de base relativement important (27,6 % en moyenne) pour la période considérée.

Tableau XVIII. Bilan hydrologique partiel sur le bassin versant de Donato et d'Anfiteatro en pourcentage de la hauteur de pluie tombée.

Années	Donato (1/01/90 - 19/12/94)			Anfiteatro (24/07/92 - 19/12/94)
	Écoulement rapide de crue Lr (%)	Écoulement de base Let - Lr (%)	Déficit d'écoulement P - Let (%)	Écoulement rapide de crue Lr (%)
1990	1,8	37,8	60,4	
1991	2,3	32,9	64,7	
1992	26,5	40,3	33,1	2,7
1993	1,7	15,8	82,5	0,9
1994	1,5	23,9	74,5	0,8
moyenne sans 1992	1,9	27,6	70,6	
moyenne avec 1992	6,8	30,1	63,1	

4.2.3 Bilan hydrologique mensuel partiel

a) Analyse de l'écoulement de base

L'analyse s'appuie sur les lames d'écoulements de base enregistrées par le limnigraphe du bassin de Donato pour les années 1990 à 1994. Pour chaque crue, les valeurs de lame ruisselée ont été déduites de l'écoulement total pour obtenir l'écoulement de base. (L'analyse est faite uniquement pour le bassin de Donato, le bassin d'Anfiteatro n'ayant pas d'écoulement de base).

La figure 44 présente la distribution des écoulements de base mensuels du bassin de Donato pour les années 1990 à 1994, ainsi que la distribution des valeurs mensuelles d'ETP.

Les écoulements mensuels ont une distribution hétérogène, variant entre 2 et 120 mm. C'est en automne et en hiver qu'ils sont les plus importants, coïncidant avec le minimum d'ETP. Cette coïncidence est logique, parce que si l'eau qui s'est infiltrée n'est pas reprise par évapotranspiration, ce qui se produit surtout en été, elle peut contribuer plus facilement à l'écoulement de base sous la forme de stockage et d'écoulements internes latéraux.

Sur le bassin d'Anfiteatro, Boulet *et al.* (1993) ont mis en évidence la présence d'un de matériau humide et plastique à respectivement 1,6 m et 1,8 m de profondeur en amont et en aval du bassin. Son épaisseur atteint en

aval 4,2 m (c.f. fig. 11). En amont, la base de cette couche n'a pas été repérée et se situe dans l'altération du basalte. Ces observations, la bonne connaissance du terrain et les observations d'écoulements du type *piping* (cf. travaux de Mendiondo, 1995) dans les berges de la grande ravine (*voçoroca grande*), conduisent à penser que l'infiltration se fait verticalement fonctionne jusqu'à cette couche de matériel humide située juste au dessus du niveau où le basalte altéré domine. Dans cette couche, pour des raisons de distribution de volume, l'eau s'accumule et circule latéralement vers l'aval du bassin, produisant l'écoulement de base du fait des sources et des résurgences connectées au réseau hydrographique ; celles-ci apparaissent plus en amont en hiver.

Ainsi que nous l'avons déjà plusieurs fois souligné, l'année 1992 est une année exceptionnelle marquée par la crue des 26 et 27 mai qui a été suivie d'écoulements de base très importants en mai et juin apparaissant très en amont du bassin (au niveau de la route qui limite le bassin d'Anfiteatro).

b) Analyse des lames ruisselées

L'analyse s'appuie sur la figure 45 qui présente les lames ruisselées des bassins de Donato et d'Anfiteatro en fonction de la hauteur de pluie, en excluant le mois de mai de 1992. On peut porter sur ce graphique une ligne-enveloppe supérieure. Cette enveloppe définit un seuil de lame ruisselée mensuelle associé à une précipitation mensuelle. Lorsque, dans un même mois, des précipitations importantes sont bien distribuées (par exemple : 10 jours de pluie de plus de 10 mm), elles donnent lieu à des lames ruisselées très *moyennes*, comme en avril 90, février 92, octobre 93 ou juillet 94 pour le bassin de Donato. Cela doit être attribué *au bon drainage* interne du sol déjà souligné lors des simulations de pluies. Entre les averses bien réparties, le sol a le temps de se ressuyer : 24 heures sont suffisantes.

Au contraire, en décembre 90, juin 91, mai 93, juillet 93 ou février 94, les précipitations sont tombées de manière très concentrée sur une seule journée. Dans ce cas, il y a toujours un ruissellement important. Par exemple, sur le bassin de Donato, le 23/12/1990 il est tombé une pluie de 62,3 mm qui a généré une lame ruisselée de 7,4 mm ; le 05/06/1991 il est tombé une pluie de 149 mm qui a généré une lame ruisselée de 10,0 mm ; le 11/05/1993, il est tombée une pluie de 60,6 mm qui a généré une lame ruisselée de 7,0 mm ; le 17/02/1994, il est tombé une pluie de 83 mm qui a généré une lame ruisselée de 10,8 mm . Le sol était très humide en surface et les pluies n'ont pas pu s'infiltrer.

Les ruissellements superficiels cumulés mensuels les plus importants (> 2 mm) ne sont associés qu'à des précipitations cumulées mensuelles supérieures à 145 mm.

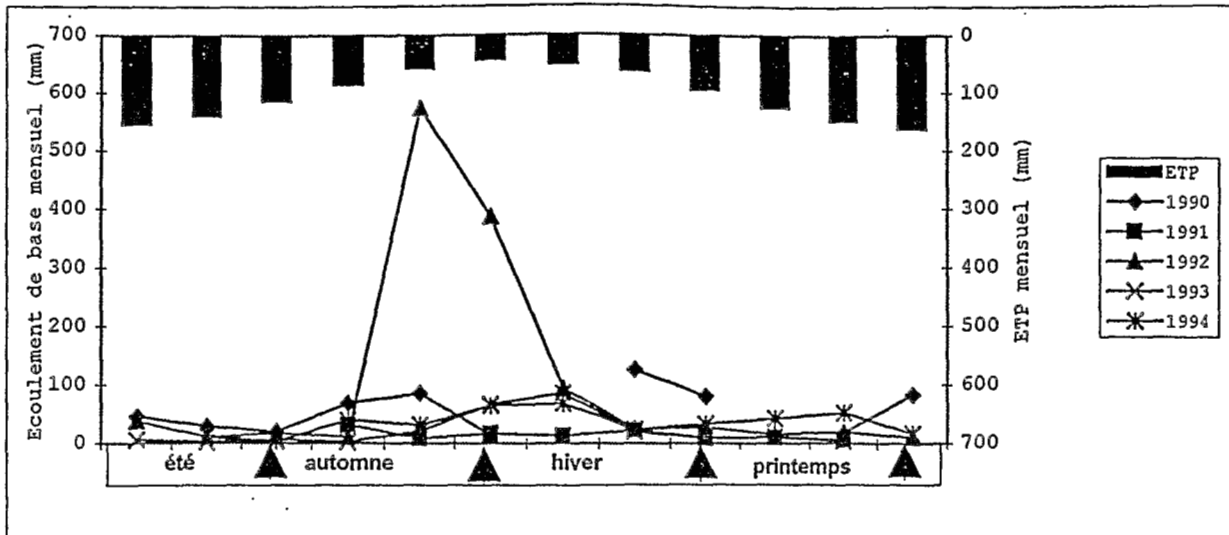


Figure 44 a. Distribution de l'écoulement de base mensuel et l'ETP au cours de la période étudiée (01/1990 à 12/1994) (inclus la crue de mai 1992)

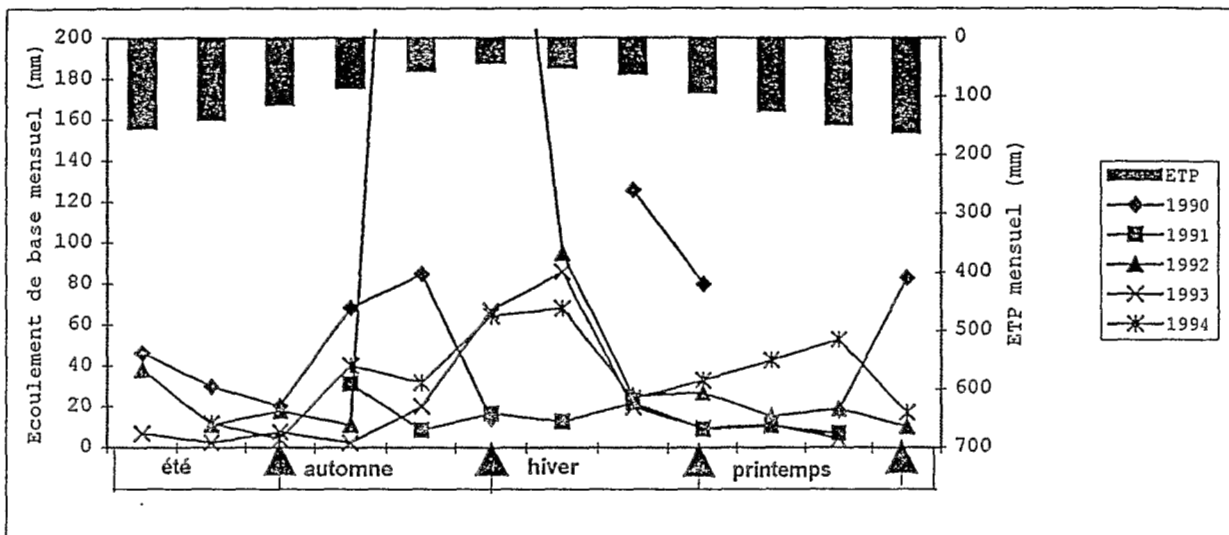


Figure 44 a. Distribution de l'écoulement de base mensuel et l'ETP au cours de la période étudiée (01/1990 à 12/1994) (zoom de la figure 44a)

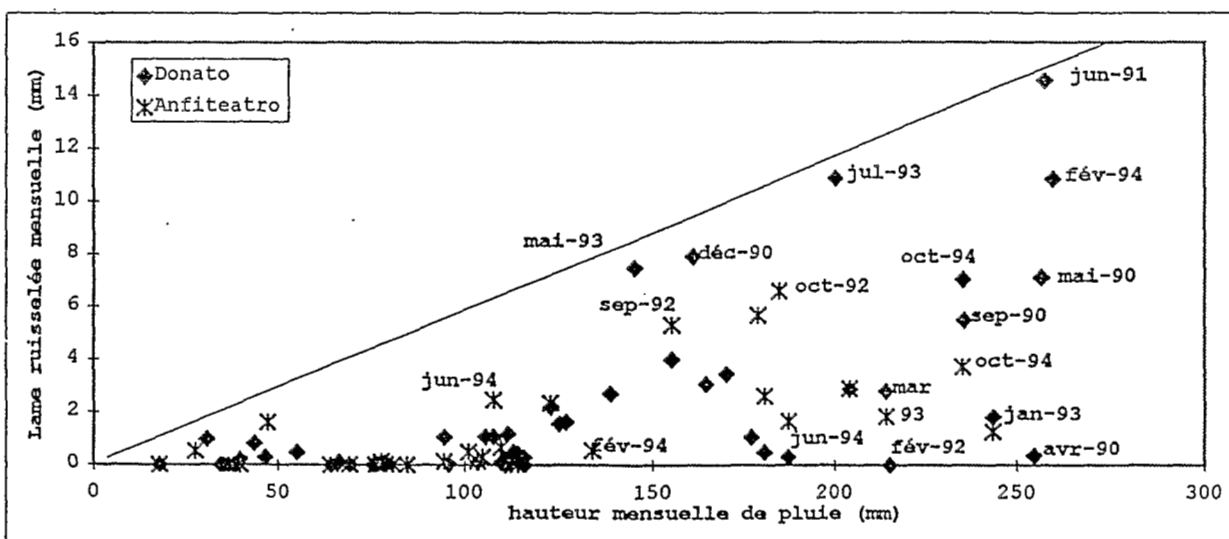


Figure 45. Relation entre lame d'eau mensuelle ruisselée et hauteur mensuelle de pluie

c) Analyse du débit instantané maximum.

Le débit maximum des 109 crues enregistrées par le limnigraphe (hors lacunes) pour le bassin de Donato varie entre 0,1 et 40,3 m³/s. Cette dernière valeur correspond au maximum de la crue du 27/05/1992. Si on exclut cette crue, le débit maximum est de 11,6 m³/s. Une classification est présentée aux tableaux XIX et XX.

Tableau XIX. Classification des débits maximums du bassin de Donato (hors lacunes).

Q max (l/s)	nb total de crues	nb crues / an
< 250	64	15,0
entre 250 et 500	16	3,8
entre 500 et 1000	15	3,5
>1000	14	3,3
total	109	4,26 années (1990- 1994)

Tableau XX. Classification des débits maximums du bassin d'Anfiteatro (hors lacunes)

Q max (l/s)	nb total de crues	nb crues / an
< 50	48	22,9
entre 50 et 250	10	4,8
entre 250 et 500	2	0,96
entre 500 et 1000	1	0,5
>1000	0	0
total	61	2,03 années (1992-1994)

La plupart des crues ont des débits maxima inférieurs à 250 l/s sur Donato et à 50 l/s sur Anfiteatro (tab.XVII et XVIII). Ces débits très faibles ne présentent aucun danger d'érosion si l'on considère les relations généralement évoquées entre débit maximum des crues et érosion (Carrol *et al.* 1995). Le modèle MUSLE (Williams et Berndt, 1972) utilise le débit maximum comme paramètre pour calculer les pertes en sol. Ce sujet sera discuté plus loin au paragraphe 4.5.

4.2.4 Bilan hydrologique journalier

La figure 46 présente la distribution des lames d'écoulement rapide de crues journalières du bassin d'Anfiteatro où un écoulement a été enregistré au cours de 54 jours.

La figure 47 présente la distribution des lames d'écoulement rapide de crues journalières du bassin de Donato pour la période étudiée. La plus grande partie (69%) des lames enregistrées sont inférieures à 1 mm.

Le bassin d'Anfiteatro ne présente pas, on l'a dit, d'écoulement de base. Les écoulements superficiels ne se produisent que lors de pluies importantes. La plupart de ces événements (86% du total) ont généré des lames inférieures à 1 mm. Rarés sont les lames ruisselées enregistrées supérieures à 2 mm (4%).

La figure 48 présente la distribution du ruissellement et des hauteurs de pluies sur les bassins de Donato et d'Anfiteatro au cours de la période analysée. Pour tous les points extrêmes, la date et le pourcentage de couvert végétal sont précisés.

On remarquera que les ruissellements les plus importants sont associés à des pluies journalières supérieures à 30 mm. On note également sur cette figure que les événements les plus importants se sont produits quand le sol était nu ou avec une faible couverture végétale. C'est le cas des événements du 29/05/1990 (sol nu), du 23/12/1990 (10% de couvert végétal), du 05/06/1991 (5% de couvert végétal), du 11/05/1993 (sol nu), du 04/07/1993 (8% de couvert végétal) et du 10/07/1993 (13% de couvert végétal). Seule la crue des 16 et 17 février, provoquée par une pluie de 83 mm, présente un fort ruissellement avec une couverture végétale estimée à 70%. Mais on sait que le sol à ce moment là, après les averses récentes des 13/02 (27,5 mm) et 14/02 (29,6 mm), était déjà bien humide et que sa surface était dégradé (faible rugosité et croûte).

On observe la même tendance sur les bassins d'Anfiteatro et de Donato.

Une comparaison entre le ruissellement observé sur la microparcelle 1 et celui observé sur les bassins d'Anfiteatro et de Donato est présentée (figure 49) pour la période d'août 1992 à septembre 1993.

On remarquera la même tendance entre les ruissellements à ces différentes échelles. D'une manière générale un ruissellement important de la microparcelle est toujours associé à un ruissellement important dans les bassins.

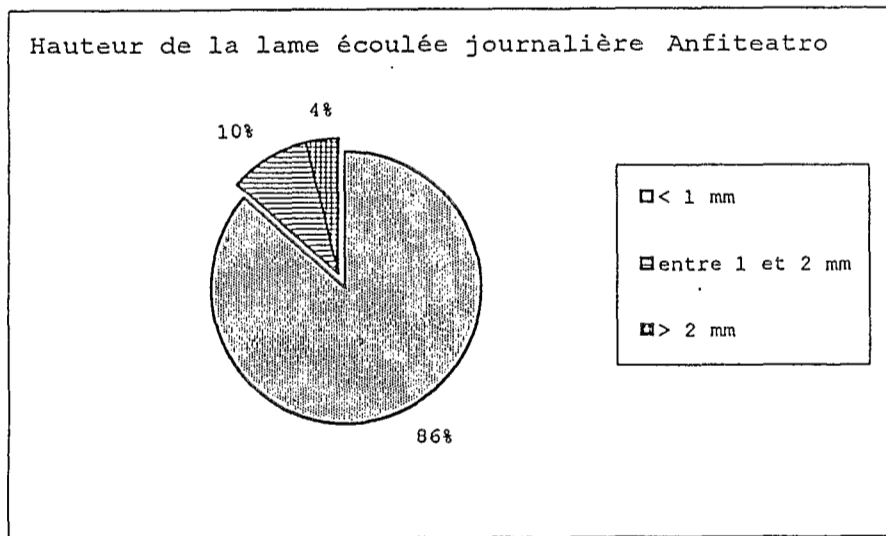


Figure 46. Distribution des hauteurs de la lame journalière écoulée dans le bassin d'Anfiteatro

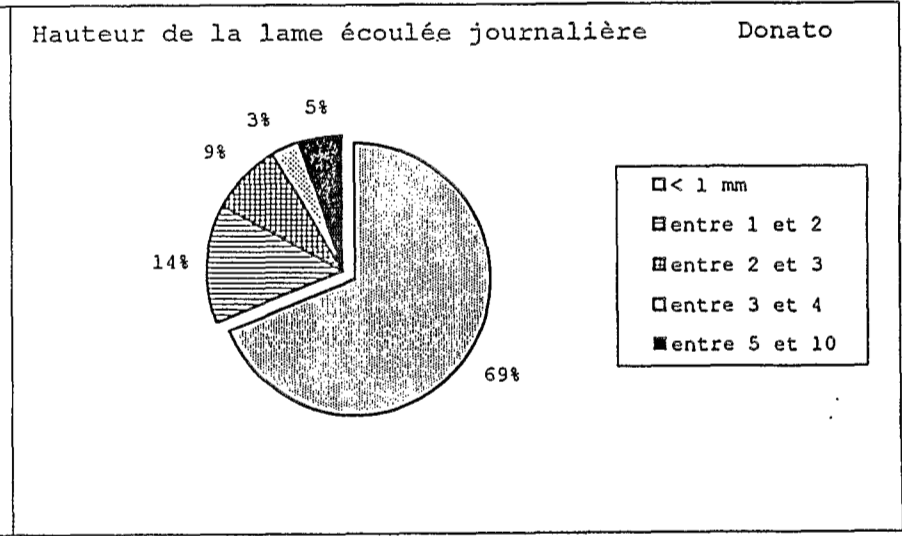


Figure 47. Distribution des hauteurs de la lame journalière écoulée dans le bassin du Donato

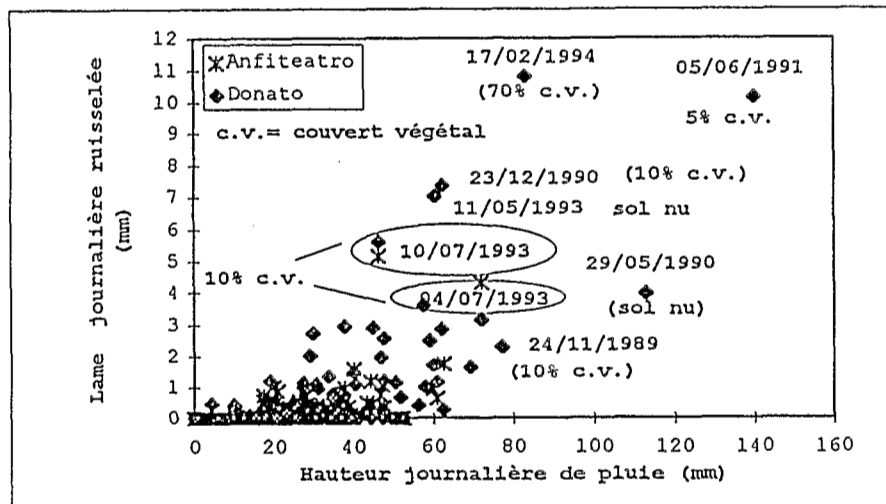


Figure 48. Relation entre hauteur de la lame d'eau journalière ruisselée et hauteur journalière de pluie

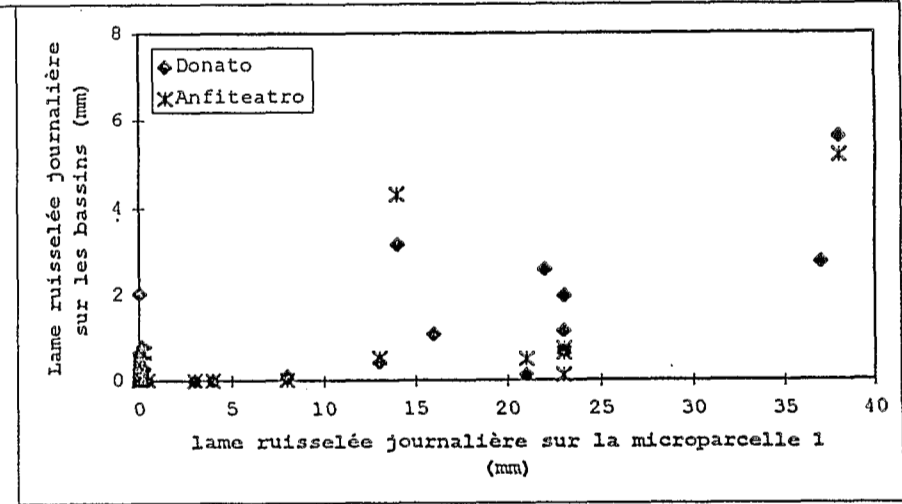


Figure 49. Relation entre lame ruisselée journalière sur sur les bassins et celle ruisselée sur la microparcelle

4.2.5 Discussion relative au fonctionnement hydrologique du bassin

Les résultats obtenus et les observations menées aux différentes échelles, des microparcelles aux bassins emboîtés, amènent plusieurs remarques et éléments de discussion.

Les expérimentation de simulation de pluies ont mis en évidence les points suivants :

1. L'humidité volumique le long du profil de sol ne varie de façon significative au cours d'une pluie que lorsque le sol est sec. Si le sol est déjà assez humide après une première averse, le profil hydrique varie peu, tout au moins dans les horizons de surface, sous l'effet de nouvelles averses intervenant dans un délai de 24 heures.
2. Les sols présentent une bonne capacité de drainage interne. L'infiltration est d'autant plus forte que le travail du sol est fait avec une charrue à soc en profondeur (sous solage).
3. La conductivité hydraulique du sol est liée au travail du sol, effectué durant les différentes préparations et aux états de surface et d'humidité initiale du sol
4. Le ruissellement, on l'a vu, peut être décrit en fonction d'une variable externe, la pluie, et de deux variables d'état, K_{GA} et h . Comme le travail du sol influence les paramètres K_{GA} et h , il a également un effet sur le ruissellement à l'échelle de la parcelle.
5. L'interception par la couverture végétale peut être importante sur les cultures de soja : à la période de maturité, lorsque le sol est recouvert par des feuilles tombées, il devient pratiquement imperméable.

L'analyse des microparcelles sous pluies naturelles montre que :

La microparcelle installée sur une parcelle préparée avec la méthode du *semis direct* ruisselle beaucoup moins que les deux autres microparcelles préparées avec la méthode *conventionnelle*. Cela doit être à notre sens en grande partie attribué au rôle du couvert végétal.

L'étude des bilans hydrologiques des bassins conduit aux remarques suivantes :

1. Les cumuls mensuels des pluies sont bien distribués et pratiquement constants pendant toute l'année. Les intensités de pluie sont plus importantes en été et au printemps, justement au moment du semis du soja et du maïs, et plus faibles en hiver et en automne. Mais les différences intersaisonniers sont faibles (entre 5 et 12%).
2. L'évapotranspiration potentielle est minimale en hiver et maximale en été. Pour les écoulements de base, c'est l'inverse.
3. Hormis l'année exceptionnelle 1992, le bilan annuel montre que le ruissellement de crue des bassins est très faible (2 % du total précipité). En revanche, l'écoulement de base est relativement important (28 %). Une partie de l'eau qui s'infiltré contribue à l'écoulement de base.
4. Les lames ruisselées les plus importantes se sont produites lors d'événements pluvieux dont le cumul sur une journée était important (précipitation supérieure à 30 ou 40 mm). Les bilans mensuels partiels montrent que les lames ruisselées peuvent être faibles même si le cumul mensuel des pluies est important à condition qu'elles soient bien distribuées au cours du mois. Au contraire, un ou deux événements pluvieux importants isolés peuvent conduire à de fortes lames ruisselées cumulées mensuelles. En outre, malgré le faible ruissellement global du bassin, des événements pluvieux supérieurs à 40 mm peuvent occasionner des ruissellements importants.
5. L'étude des bilans journaliers a montré que si les lames ruisselées les plus importantes sont associées à des événements pluvieux importants, le couvert végétal exerce néanmoins une forte influence sur l'importance du ruissellement. Quand le sol est bien couvert par la plante cultivé et par les résidus, la probabilité d'un

ruissellement important est plus faible. Le même constat a été fait pour les microparcelles sous pluies naturelles.

Si on replace les coefficients de ruissellement établis à l'échelle annuelle pour les différentes échelles (tableau XXI), on constate que le ruissellement est toujours inférieur dans le cas de préparation en *semis direct*. On peut également mentionner l'effet d'échelle. Les coefficients sont le plus élevés pour les microparcelles et les plus faibles dans le cas du bassin. Par contre, la différence est la plus marquée entre les microparcelles de 1 m² et les parcelles de 77 m². Ce qui témoigne à notre sens de la bonne infiltrabilité de ces sols : une longueur de 20 m suffit à fournir de multiples occasions d'infiltrations aux ruissellement.

Tableau XXI. Coefficient de ruissellement, bilan annuel pour les différentes échelles sous pluie naturelles.

	1 m ²	77 m ²	1,1 km ²
conventionnel	16 %	3,1 %	2,0 %
<i>semis direct</i>	6 %	0,4 %	?

En fait, ces résultats nous confirment ce qu'on déjà attendait. Quand on considère 1 mètre de largeur (microparcelle de 1 m²) l'eau ruisselée n'a pas le temps de s'infiltrer. En revanche, quand on considère 20 mètres de large (parcelle de 77 m²) l'eau qui a initialement ruisselée a plus d'occasion de s'infiltrer, d'où vient cette différence. Plus la largeur du cheminement est importante, plus il y a d'occasion d'infiltration.

Nos résultats amènent un certain nombre de remarques qui peuvent être ainsi résumées. Le travail du sol avec la charrue à soc en profondeur favoriserait une forte infiltration en ouvrant la porosité et amplifiant la rugosité du sol. Mais cet effet ne serait pas permanent : la dégradation des qualités hydrodynamiques fait qu'en deux ou trois mois, le sol est à nouveau compacté en surface et ruisselle comme s'il n'y avait pas eu de préparation particulière. C'est en fait le couvert végétal des résidus qui paraît le plus efficace pour limiter le ruissellement en assurant une protection contre l'impact des gouttes de pluie et en limitant la formation d'OPS.

Bien que de texture très argileuse, la capacité de drainage interne importante des sols est à imputer à une structure en agrégats argileux très stables (on parle de *pseudo-sables* ou de *pseudo particules*). En l'absence d'OPS, l'eau circule facilement dans les macro-pores et s'infiltrer verticalement. L'eau infiltrée est conduite jusqu'à l'exutoire des bassins du fait d'un horizon de blocage constitué de matériau humide et plastique trouvé dans la toposéquence d'Anfiteatro juste au dessus du basalte altéré, que l'on trouve à des profondeurs comprises entre une dizaine de centimètres et plus de 8 m. Ce front d'altération apparaît d'ailleurs comme le niveau de base des ravines et des cours d'eau. Ce niveau bloque l'infiltration verticale et favorise la circulation latérale de l'eau vers les résurgences, dans le réseau hydrographique et à l'exutoire du bassin.

A l'échelle du m², les états de surface, la végétation et la préparation du sol exercent une influence décisive sur le ruissellement. A cette échelle on évalue bien les paramètres qui conditionnent la genèse du ruissellement. La compréhension des processus permet l'analyse du fonctionnement hydrodynamique du versant d'Anfiteatro et met en évidence l'influence des aménagements, de la préparation du sol et des incisions linéaires sur le ruissellement.

Le bassin d'Anfiteatro a un comportement différent de celui du Donato. Il est dépourvu de réseau hydrographique naturel permanent et l'écoulement n'apparaît que pour des précipitations journalières cumulées supérieures à 30 mm. Le système en banquettes concentre l'eau dans les rigoles latérales ; celles-ci sont

rapidement saturées et dirigent l'écoulement vers les fossés de la piste, où il est canalisé vers l'exutoire du bassin (ceci sera décrit de façon plus détaillée plus loin). De plus, on observe quelques chemins « préférentiels » de l'eau, surtout en aval du bassin, qui, même après les travaux mécaniques de préparation du sol, apparaissent toujours aux mêmes endroits.

Le bassin de Donato est plus complexe, avec l'apparition et l'intégration successives des mécanismes observés à l'échelle de la microparcelle, du versant et dans un système hydrographique plus développé. Ce bassin a été également aménagé en banquettes (jusqu'en mai 1994) et sa réponse après des précipitations importantes (supérieures à 30 mm) est rapide. On peut l'assimiler à un ensemble formé par plusieurs versants ayant approximativement la taille et les propriétés d'Anfiteatro, par une ravine profonde au fonctionnement complexe qui concentre l'eau d'une surface d'environ 30 ha et par un système de cours d'eau permanents.

Cependant, malgré ces différences d'échelle, on peut noter qu'il y a une même tendance de la lame ruisselée à tous les niveaux d'approche : à un ruissellement important des microparcelles est le plus souvent associé un ruissellement des bassins d'Anfiteatro et de Donato, probablement en raison du transfert rapide permis par le système des rigoles et drains des banquettes débouchant dans des ravines.

4.3 EROSION

4.3.1 Description détaillée des formes d'érosion dans le bassin d'Anfiteatro et de Donato

Dans les parcelles cultivées sur les banquettes des versants les particules de sol sont initialement arrachées sous l'action de gouttes de pluie. Lors d'une pluie importante un ruissellement se forme. Initialement il s'écoule vers l'aval dans le sens de la pente, mais comme la préparation du sol et le semis sont faits perpendiculairement au sens de la pente, il est dévié par la microtopographie et suit un cheminement sinueux et plutôt diffus (figure 50a-A, photo 9).

L'érosion en rigoles et interrigoles peut être observée sur les versants en amont et en aval de débordements ou de ruptures de bourrelets (sections de moins de 20 cm de large et moins de 3 cm de profondeur -fig. 50a-A1). Elles sont en général rapidement effacées par les agriculteurs. En aval du versant (fig.50a-A2) se produit une érosion concentrée avec formation des rigole de sections plus importantes (10 à 40 cm de large et 3 à 10 cm de profondeur) de formes variées, pouvant être du type parabolique, trapézoïdal ou triangulaire pour la même rigole. Ce type d'érosion a lieu principalement lors de pluies importantes, avec des débordements ou ruptures de bourrelets. La concentration et la localisation sont déterminées par la topographie locale.

Un suivi des rigoles du bassin d'Anfiteatro a été fait en juillet 92, septembre 93, mai et décembre 94. Les mêmes rigoles (chemin préférentiel de l'eau ou « CPE » figure 50a) ont été observées tous les ans avec à peu près les mêmes profils. En régions tempérées, plusieurs auteurs ont souligné ce caractère répétitif des localisations, qu'ils attribuent à l'influence de la topographie sur la direction du ruissellement (Bryan, 1987 ; Auzet *et al.*, 1990 ; Ludwig *et al.*, 1995).

L'eau provenant du ruissellement diffus (fig. 50a-A) et du ruissellement concentré en rigoles s'accumule dans le cheñal en amont du bourrelet (fig. 50a-B, photo 9) qu'elle longe jusqu'au bord des chemins, pistes (photo 10) ou routes ou en limites de propriétés. Lorsque ces limites se trouvent en dévers, il se forme une chute souvent brutale qui est une source importante de creusement pouvant atteindre un volume de 0,7 m³ (fig. 50a-C1) quand il y a de la végétation, et jusqu'à 40 m³ (figure 50a-C2, photo 11) quand le sol est nu. Ces ravines, en général non traitées, sont chaque année plus importantes. On a noté le long de la route qui borde le bassin d'Anfiteatro (photo 11) un recul de plus d'un mètre par an en l'absence de végétation. Toute l'eau qui sort des parcelles au droit des chenaux amont des bourrelets se concentre, soit directement dans les ravines (photo 12), soit dans les fossés bordant les chemins, pistes et routes (fig. 50a-D) et rejoint les cours d'eau (fig. 50a-E).

Le bassin du Donato est affecté pour une ravine qui débute à l'exutoire d'Anfiteatro (fig 50b-G, photos 12, 13 et 14). Cette ravine est largement responsable de la charge solide qui arrive à la station hydrométrique de Donato et de l'acheminement des sédiments provenant des parcelles en amont.

Dans sa partie initiale la ravine collecte seulement le ruissellement en provenance du bassin d'Anfiteatro. Elle a une section trapézoïdale, parfois parabolique ou même triangulaire, avec une largeur comprise entre 0 et 1,7 m à la base, entre 1,7 et 4,2 m à la surface du sol et une profondeur entre 0,9 et 2,1 m. Ce type de section se maintient sur une longueur de 464 m (photo 12), soit un volume approximatif de 1 500 m³. Puis après une brusque chute pratiquement verticale de 6 m, la section s'élargit et passe à 14 m de largeur sur 30 m environ (photo 13 et 14). Après cette discontinuité (appelée *voçoroca grande*, terme portugais pour désigner une *très grande ravine*), la section redevient stable et relativement constante grâce à la végétation installée sur les deux berges, avec une taille comparable à la partie amont jusqu'à sa confluence avec le cours d'eau de Donato.

CPE chemin preferenciel de l'eau

l = largeur
p = profondeur

CPE1 l = 100 cm
p = 3 cm

CPE2 l = ?
p = ?

CPE3 l = 20 cm
p = 2 cm

CPE4 l = ?
p = 3 cm


CPE5 l = ?
p = 1 cm

CPE6 l = ?
p = 1 cm


CPE7 l = 30 cm
p = 1 cm

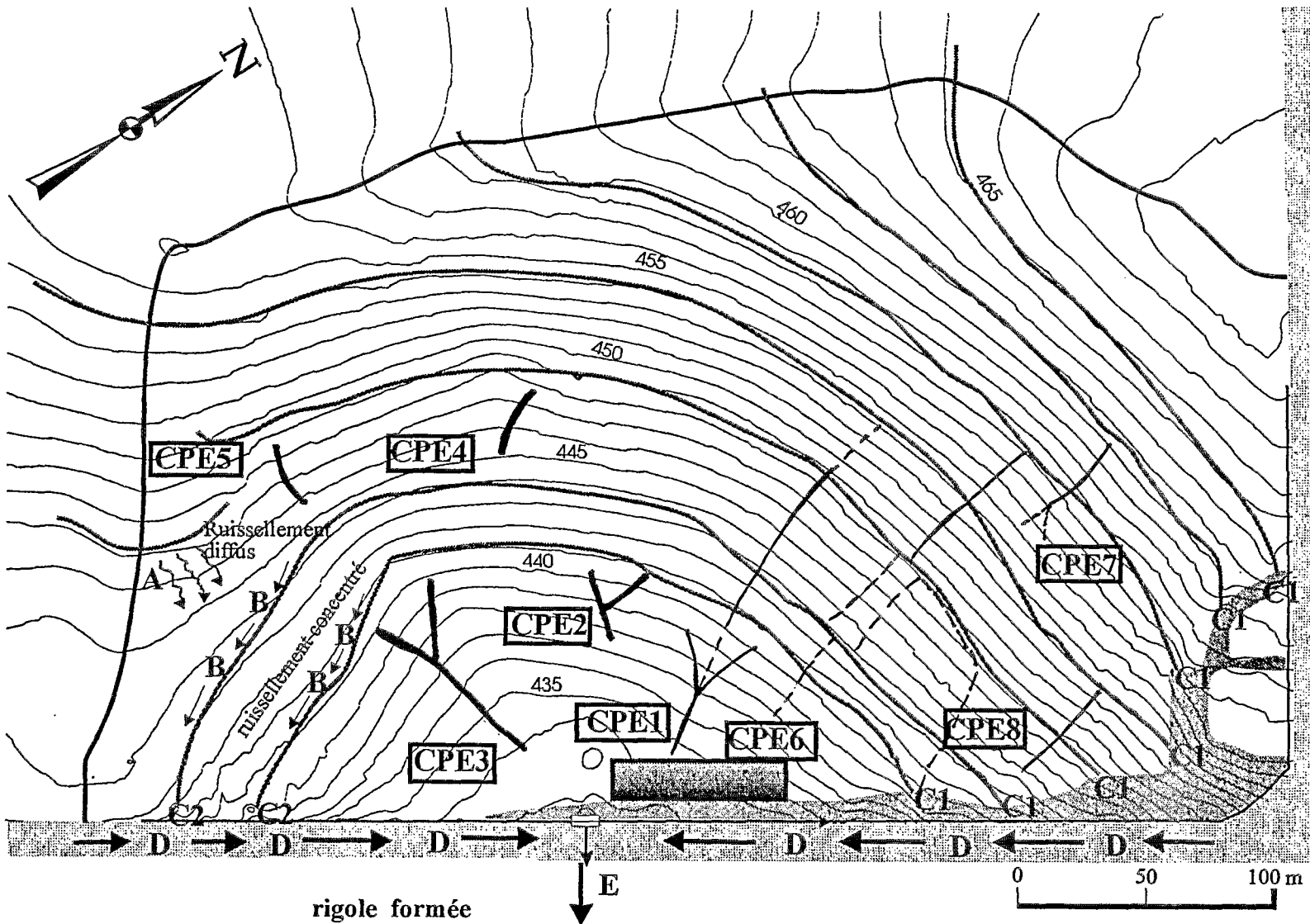
CPE8 l = ?
p = ?
CPE8 sans culture dans son lit

 routes

 végétation arbustive dense

 bourrelet des banquettes

 dépôts mesuré après la crue de 26/05/1992



0 50 100 m

équidistance des courbes de niveau: 1 m

Bassin d'Anfiteatro

Figure 50a. Cartographie du réseau des rigoles faites en : 1992 (Castro), 1993 (Castro, Gonsalves, Mendiondo, Genz), 1994 (Castro, Gonsalves, Mendiondo)

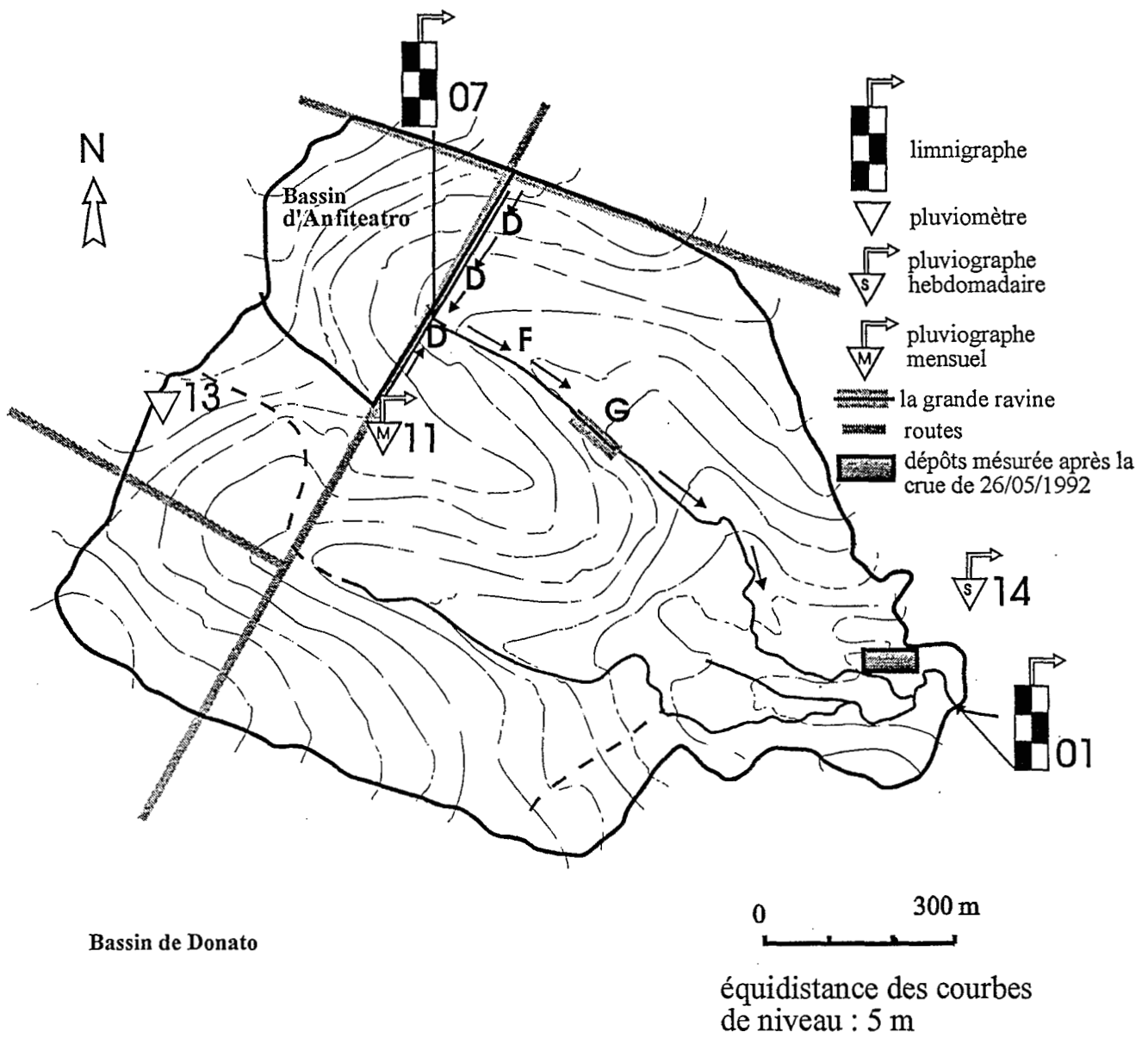


Figure 50b. Minutes de terrain du bassin de Donato



Photo 9. Dépôt de sédiments dans un drain en amont de bourrelet, traces de ruissellement diffus sur la parcelle



Photo 10. Ravinement en sortie des banquettes en bord de piste



Photo 11. Détail de la chute en sortie de banquette en bord de piste



Photo 12. Aval d'Anfiteatro, partie amont de la grande ravine



Photo 13. Section principale de la grande ravine



Photo 14. Grande ravine (17/12/1994)

On peut penser que le ruissellement concentré du bassin d'Anfiteatro contribue à la formation de cette ravine dans la section en amont de la grande discontinuité (464 m d'extension). En revanche, il semble que c'est le taux important d'infiltration de ce sol qui est à l'origine de la grande discontinuité de la ravine (chute de 6 m). L'infiltration initialement verticale est freinée au niveau de l'altération du basalte, où elle circule latéralement jusqu'à l'exutoire du bassin. La ravine se formerait au point de résurgence de l'eau (point de rencontre de l'altération du basalte avec la surface du sol) et s'agrandirait pour érosion régressive. Son agrandissement serait en partie dû à l'action du ruissellement concentré qui sape la base des berges ; les particules sont ainsi détachées et entraînées par les écoulements temporaires. L'humidité du sol contribuerait aussi à la déstabilisation des berges, fournissant des masses de sédiments importantes, disponibles pour être évacuées vers l'aval à l'occasion du prochain ruissellement, comme l'a décrit Govers (1987) dans un autre contexte.

4.3.2 Observation de la *voçoroca grande* entre 1991 et 1993

L'évolution de la partie la plus importante de cette « *voçoroca grande* », a été suivie par des levés topographiques précis entre 1991 et 1993 (17/07/1991, 13/07/1992 et 18/11/1993) pour évaluer les pertes en terre. Ils ont d'abord été dépouillés individuellement puis comparés entre eux.

Les mesures effectuées au théodolite se présentent sous forme d'un ensemble de cotes (z) à des points de mesure dispersés dans l'espace et rapportés à un système de repérage fixe (en coordonnées horizontales x et y), correspondant à une base de 20 m sur 12 m (2 400 m²). A partir de ces observations, une interpolation sur une grille régulière a été opérée en utilisant la méthode du krigeage proposée par le logiciel *SURFER* (figures 51, 52 et 53). Trois résolutions de maille ont été testées : 1 m, 0,5 m et 0,1 m pour des cotes qui varient entre 415 m et 421 m, rapportées au Nivellement Général de la région Sud du Brésil.

Le volume solide constitué par les terres situées dans le rectangle de base au dessus de la cote 415 m a été pris comme référence caractéristique de calcul. Il est calculé automatiquement par *SURFER*. L'analyse numérique et graphique des résultats montre que la résolution de 1 m manque visiblement de précision pour décrire correctement le relief de la ravine. Par contre, tout en offrant une assez bonne représentation morphologique, les résultats obtenus avec des mailles de 0,5 et de 0,1 m sont équivalents. Comme cette dernière résolution n'est pas vraiment raisonnable au regard du nombre limité de points sur lequel s'appuie l'interpolation, nous avons adopté pour la suite des calculs un pas de distance de 0,5 m.

A partir des valeurs des volumes de la ravine calculées pour les trois années (1991, 1992 et 1993), on peut calculer par différence les volumes de sol qui ont été érodés chaque année. Le tableau XXII présente les résultats :

Tableau XXII. Volumes de référence et pertes en terre de la *voçoroca grande*

	évolution de la ravine					
	1991	1992	1993	1991 à 1992	1992 à 1993	1991 à 1993
volume (m ³)	933	805	587	128	218	346
poids (t)	1400	1208	881	192	327	519

Les charges solides perdues par la ravine, exprimées en unités de masse, sont obtenues en multipliant le volume par une masse volumique apparente moyenne estimée à 1,5 t/m³.

Ravine de Donato - 1991

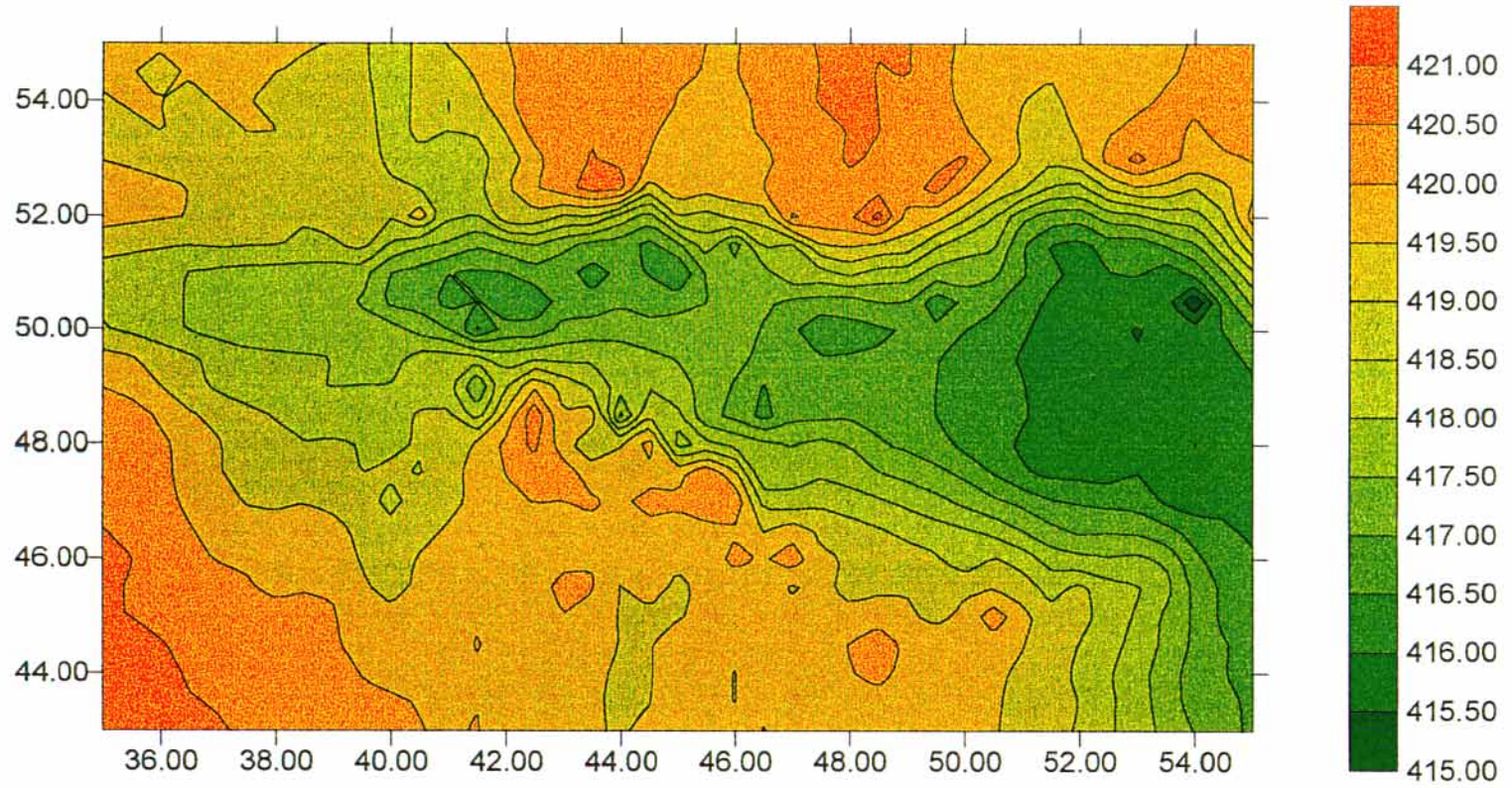


Figure 51 : Relief de la ravine le 17/07/1991 (courbe de niveau).

Ravine de Donato - 1992

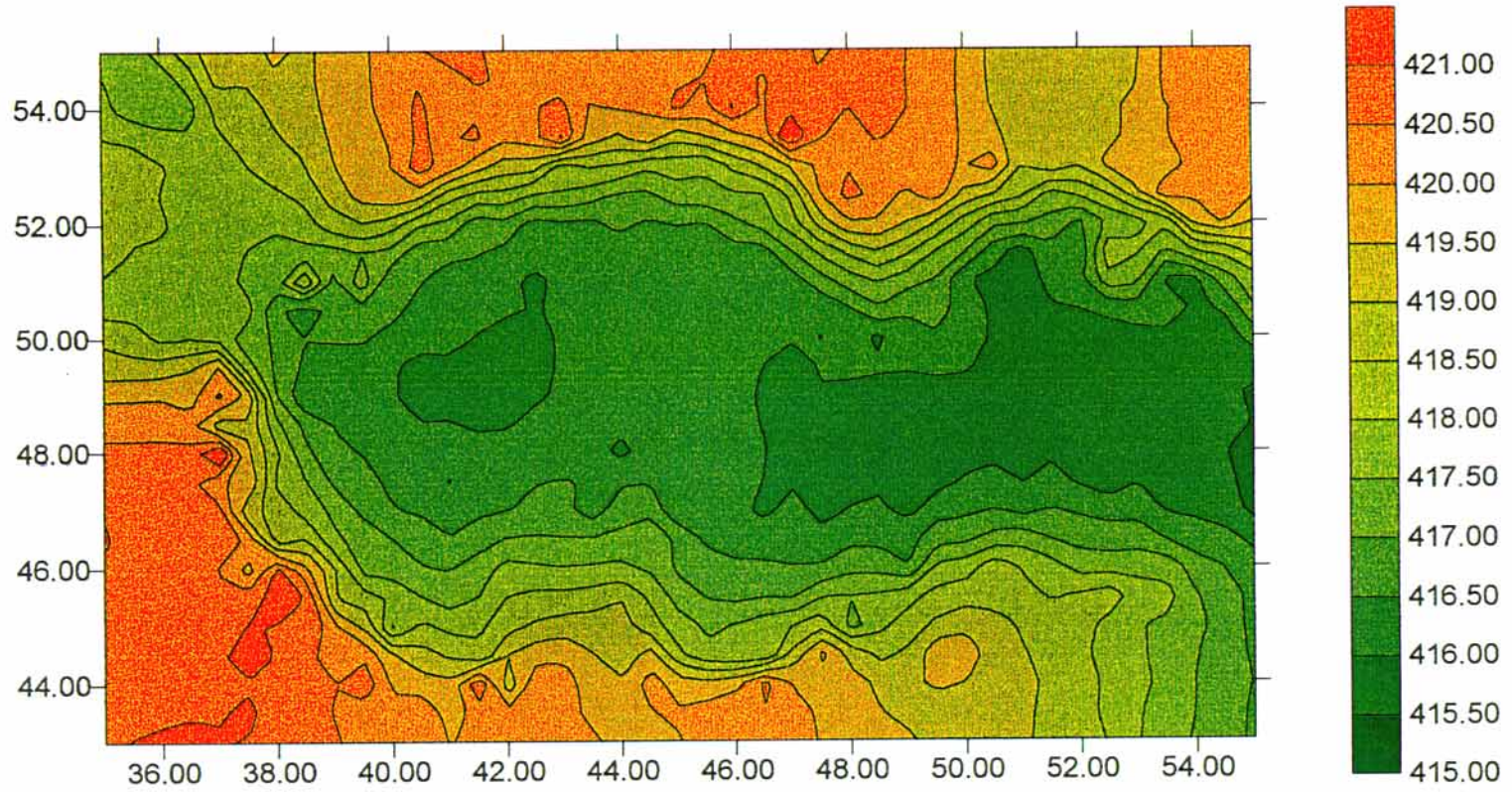


Figure 52 : Relief de la ravine le 13/07/1992.

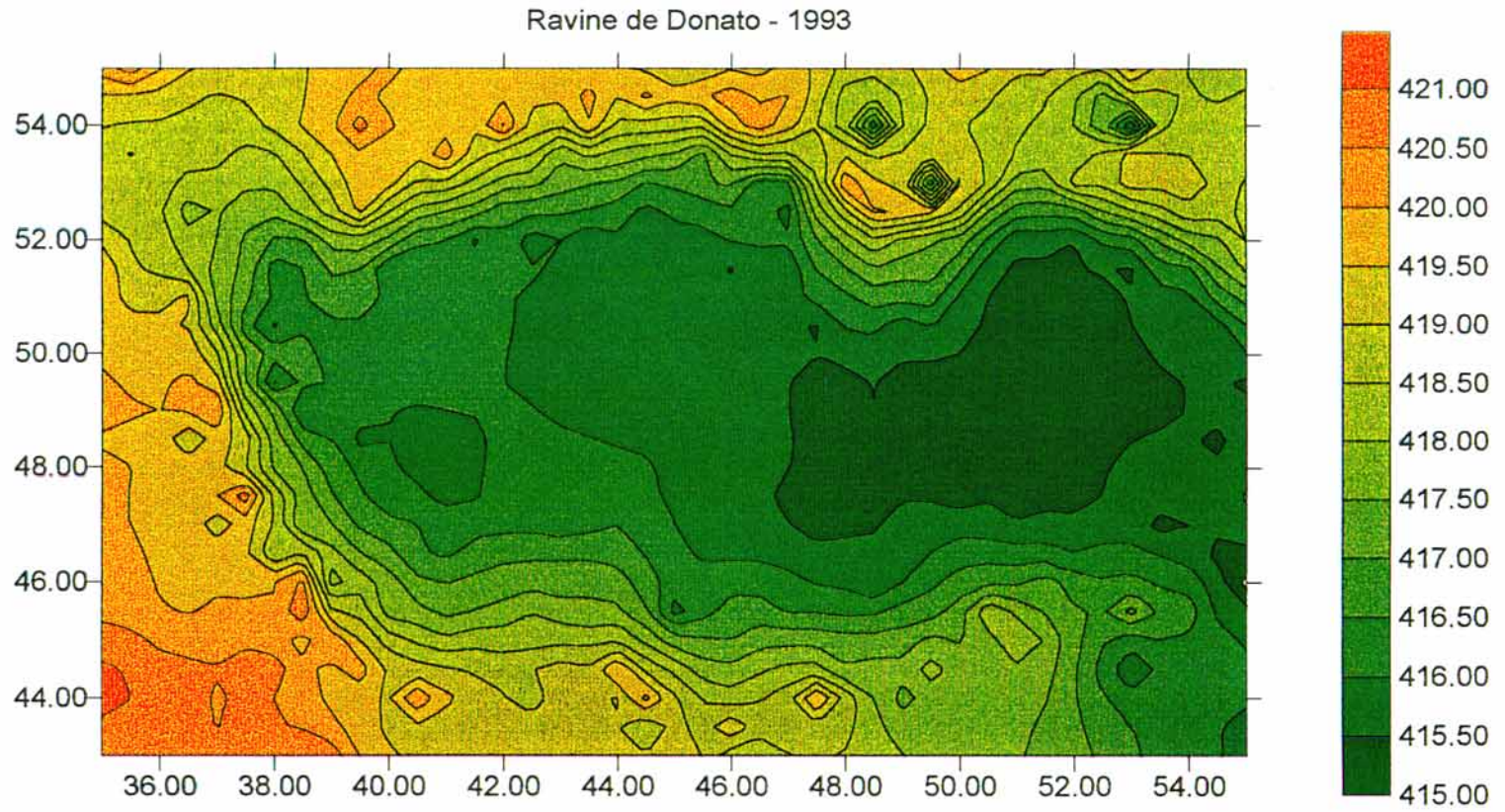


Figure 53 : Relief de la ravine le 18/11/1993.



On note que sur la période 92/93 (une année et quatre mois, de 13/07/1992 à 18/11/1993), la perte en terre est supérieure à celle de 91/92 (une année complète, de 17/07/1991 à 13/07/1992). Compte tenu des pas de temps différents, on peut considérer que l'ordre de grandeur est le même et se situe autour de 200 tonnes par an. Au total entre 1991 et 1993, 519 t de terre ont été érodées dans la ravine et transportées vers l'aval par le cours d'eau. Cela correspond à une moyenne annuelle de quelques 7 t/ha, la surface du bassin versant amont étant d'environ 30 ha et de 2 t/ha, si on rapporte cette masse à tout le bassin de Donato. Cette valeur, qui doit être considérée comme un ordre de grandeur, est sans doute un minimum pour l'évaluation de l'érosion en ravine, car elle est fondée uniquement sur la « grande ravine » : il faudrait y ajouter l'ensemble des ravines formées au débouché des drains de rebord de terrasses. Cette érosion concentrée est loin d'être négligeable pour l'apport de matières en suspension dans les cours d'eau et plus généralement dans les estimations des pertes en terres agricoles.

Les figures 51, 52 et 53 témoignent de l'extension de la ravine en surface (surtout notable en 91/92), et en profondeur (plutôt en 92/93). En 1993, il ne reste par rapport au volume de référence que très peu de cotes supérieures à 420 m d'altitude. Cette évolution est assez typique de ce que l'on peut observer dans de nombreux bassins ou les surfaces à contiguës aux ravines sont abandonnées, en général, au pâturage. Le piétinement du bétail n'arrange rien, comme l'ont montré dans un tout autre milieu Muxart *et al.* (1987) et Mietton (1988).

4.3.3 Mesures du débit solide de la rivière Donato pour deux crues

N'ayant pas les moyens d'équiper les stations hydrométriques avec des préleveurs automatiques pour échantillonner les débits solides lors des crues, il a fallu organiser des campagnes intensives et veiller de manière à intervenir rapidement pour faire des prélèvements manuels. Deux campagnes intensives ont été programmées en mai / juillet 1991 et en juillet / août 1992. Malheureusement, il n'y a eu que très peu de crues sur ces périodes. Nous n'avons finalement réussi à échantillonner que deux crues significatives le 18/06/1991 et le 06/03/1993. Cette dernière crue ne correspondait pas à une campagne intensive, mais à la présence fortuite d'une équipe sur le terrain à l'occasion d'une action de formation.

Les principales caractéristiques des pluies et crues sont données par les tableaux XXII à XXV qui concernent les crues de juin 1991 et mars 1993. Les hauteurs de pluie tombées avec une intensité supérieure à des seuils donnés ont été calculées en utilisant le logiciel *ARES* (POH 126) de l'ORSTOM. Le critère de séparation des averses est le même que celui qui a été décrit précédemment (§ 4.1.2). L'érosivité des pluies a été calculée à l'aide du logiciel *PCE* de l'IPH / UFRGS (Lautert, 1990) à partir d'un échantillon d'averses traitées par le logiciel *PLUGRAPH* de l'ORSTOM (Rossignol, 1990). Nous avons retenu les averses dont le volume total est supérieur à 1 mm. Le calcul de l'indice de précipitations antérieures, IPA, a été expliqué précédemment (§ 2.2.3). Le temps de montée correspond au temps compris entre le début de la crue et l'instant où le débit est maximum.

Les figures 54 et 55 présentent les intensités de pluie, les débits liquide et solide pour ces événements. Les données de précipitation et de débit liquide ont été interpolées et moyennées sur un pas de temps constant de 15 minutes.

Tableau XXIII. Caractéristiques des événements pluvieux de Donato et d'Anfiteatro

Pluie (mm)	Donato		Anfiteatro
	16 au 18/06/91	5 au 06/03/93	27/04/93
total	105,5	83,9	51,7
> 10 mm/h	20,8	38,8	32
> 20 mm/h	11,5	24,2	22,4
> 30 mm/h	7,4	14,7	15,7
> 40 mm/h	3,8	10,2	10,4
> 50 mm/h	1,4	7,8	5,5
> 60 mm/h	0,5	6,4	2,5
> 70 mm/h	0	5,6	1,2
> 80 mm/h	0	5,0	0,6
> 90 mm/h	0	4,5	0,4
> 100 mm/h	0	4,0	0,2
Erosivité (en unités métriques, calculée par la formule de Wischmeier)	21,13	41,7	28,3
IPA (en mm)	26,83	1,00	0,15

Tableau XXIV. Caractéristiques des écoulements de Donato et d'Anfiteatro

Caractéristiques	Donato		Anfiteatro
	16 à 18/06/1991	05 à 06/03/1993	27/04/1993
Temps de montée (minutes)	34	38	12
Débit initial (l/s)	8,66	8,66	0
Débit maximum (l/s)	1280	1176	102
Lame écoulée totale (mm)	2,96	2,39	1,38
Lame ruisselée (mm)	2,04	1,97	1,19

Tableau XXV. Caractéristiques des débits solides de Donato e d'Anfiteatro

Caractéristiques	Donato		Anfiteatro
	16 à 18/06/91	05 à 06/03/93	27/04/93
Nombre de prélèvements	5	5	10
Concentration moyenne des prélèvements (g/l)	5	2	5
Concentration maximale (g/l)	11	3	15
Concentration minimale (g/l)	2	1,5	2

Les intensités de pluie lors de la crue de juin 91 ont été inférieures à celles de mars 93, mais le ruissellement et l'érosion sont plus importants (figures 54 et 55). La hauteur de pluie était plus importante (105 mm en juin 31, contre 83,9 mm en mars 93) ; le sol est plus humide (IPA respectifs 27 et 1) en raison de précipitations de 150 mm les jours précédents.

La crue de juin 91 s'est produite 26 jours après le semis de l'avoine. Le couvert végétal n'était que de 5 à 10% alors que, lors de la crue de mars 93, il atteignait 80%.

Le coefficient de ruissellement de ces deux événements, qui est obtenu en divisant la lame ruisselée par la lame précipitée, est de même ordre de grandeur, respectivement 1,93% pour juin 91 et 2,34% pour mars 93.

Par contre, la différence entre les concentrations maximales en sédiments est très importante : 11 g/l pour la crue de juin 91 et 2,97 g/l pour celle de mars 93, soit un rapport de 1 à 4. La pluie, plus intense et plus érosive de mars 93, n'a pas entraîné d'érosion comparable à celle de juin 91.

Une première explication est que le sol en mars 93 était bien protégé avec 80% de couverture végétale. On remarquera que les rapports entre les concentrations mesurées pendant les campagnes de simulation de pluie effectuée en début et en fin de cycle cultural pour une même préparation étaient de l'ordre de 1 à 3. Mais une autre raison doit être évoquée. Il a été observé en juin 91 *in situ* un effondrement de la *voçoroca grande* après la crue précédant celle que nous étudions (précipitation de 150 mm le 5/6/91). Lors de la crue étudiée, les sols éboulés de la ravine ont pu être transportés facilement jusqu'à l'exutoire du cours d'eau, où les échantillons ont été prélevés. Cela signifie qu'une partie importante des pertes en sol mesurées n'est pas due directement à la pluie du 18/06/91, mais également à celle du 05/06/91 et qu'elle provient d'une érosion linéaire.

En évaluant la concentration moyenne en sédiment pour les deux crues et en la multipliant par le volume total ruisselé, on obtient une évaluation de la charge solide totale sortie du bassin que l'on peut rapporter à la superficie. Le résultat peut exprimer l'ordre de grandeur des pertes en t/ha : 0,10 t/ha pour la crue de juin 91 et 0,04 t/ha pour celle de mars 93. La différence entre les deux valeurs est due, d'une part, au couvert végétal (plus important en mars 93) et, d'autre part, à la contribution de la *voçoroca grande* (juin 91).

4.3.4 Mesures du débit solide de la rivière Anfiteatro pour une crue

Une seule crue a pu être mesurée sur ce bassin, celle du 27/04/1993. Les caractéristiques de l'événement pluvieux, des débits liquides et de la charge solide sont rassemblées dans les tableaux XXIII à XXV.

La figure 56 présente l'évolution des pluies, débits et concentrations en sédiments au cours de cette crue.

51,7 mm de pluie d'assez forte intensité sont à l'origine de la crue : 62% de cette hauteur de pluie est tombée avec une intensité supérieure à 10 mm/h. On a vu que pour l'ensemble des pluies analysées sur la période 1989-1994 seuls 29% de la hauteur totale avait eu une intensité supérieure à 10 mm/h. Corrélativement l'érosivité a été importante atteignant 28,3 t/ha.h. Cette averse érosive est intervenue sur un sol sec ($IPA=0,15$) dont la couverture est comprise entre 70% et 90% de la surface du bassin. La lame ruisselée de 1,19 mm, correspondant à un coefficient du ruissellement de 2,3%, est relativement importante. La concentration maximale en sédiment de 15,2 g/l a été relevée 4 minutes après la pointe de débit. Neuf minutes plus tard, la concentration en sédiment est retombée à 4,58 g/l ; elle diminue ensuite pour atteindre 1,18 g/l, 49 minutes après la pointe de débit.

4.3.5 Relation entre débit liquide et concentration en sédiment

On a observé, à l'occasion des trois crues sur Donato et Anfiteatro pour lesquelles des prélèvements ont été réalisés, que la concentration en sédiment atteint une valeur très élevée au moment du débit maximum avant de diminuer rapidement. En tenant compte de prélèvements isolés dans la rivière de Donato à l'occasion des visites régulières sur le terrain, on peut construire la figure 57 qui présente la relation entre le débit liquide et la concentration en sédiment pour le bassin de Donato à différentes dates en 1991 et en 1993.

La figure 57 montre qu'il y aurait une tendance linéaire dans la relation entre le débit liquide et la concentration des sédiments établie à partir de 12 prélèvements à 4 dates différentes, le 17/06/91, le 18/06/91, le 27/06/91 et le 06/03/93.

Cela va dans le même sens que ce que nous avons déjà noté à l'occasion de l'interprétation des résultats de la simulation de pluie et des microparcelles sous pluie naturelle : la concentration en sédiments est directement liée au volume ruisselé. Une forte concentration en sédiments est associée à un ruissellement suffisamment important pour transporter les agrégats. Dès que le ruissellement diminue, la concentration en sédiments diminue également.

Apparemment, cette relation entre débit de crue et concentration en sédiments est indépendante du couvert végétal. Mais on a trop peu de données pour en tirer une conclusion définitive. Lors de l'analyse des résultats de la simulation de pluie et des microparcelles sous pluies naturelles, on a noté que le couvert végétal a tendance à limiter l'érosion à l'échelle de microparcelles.

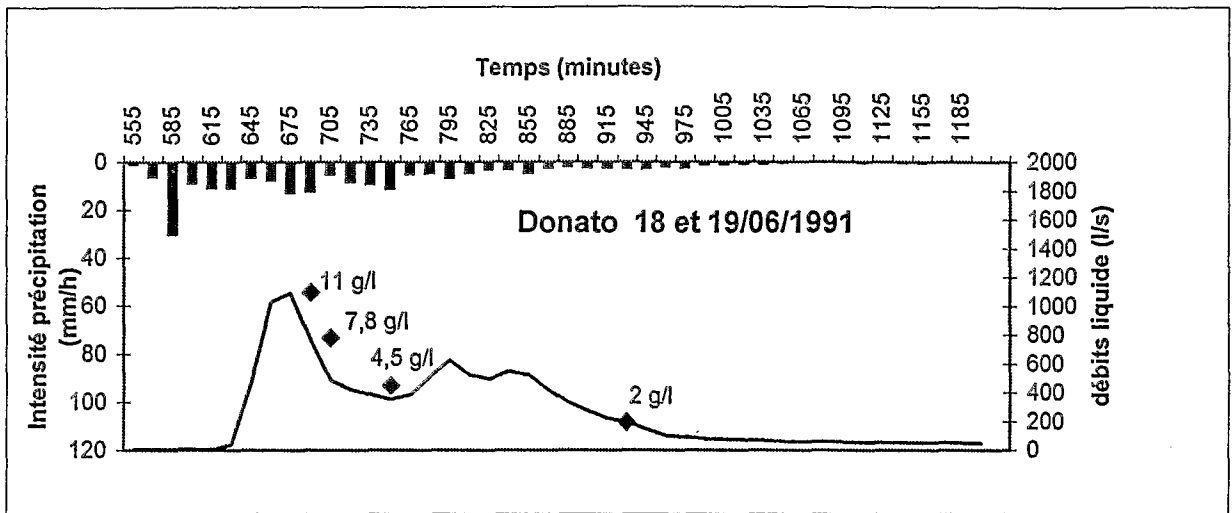


Figure 54. Hyétogramme, hydrogramme et concentration en sédiments lors de l'événement du 18 et 19/06/1991 au bassin du Donato

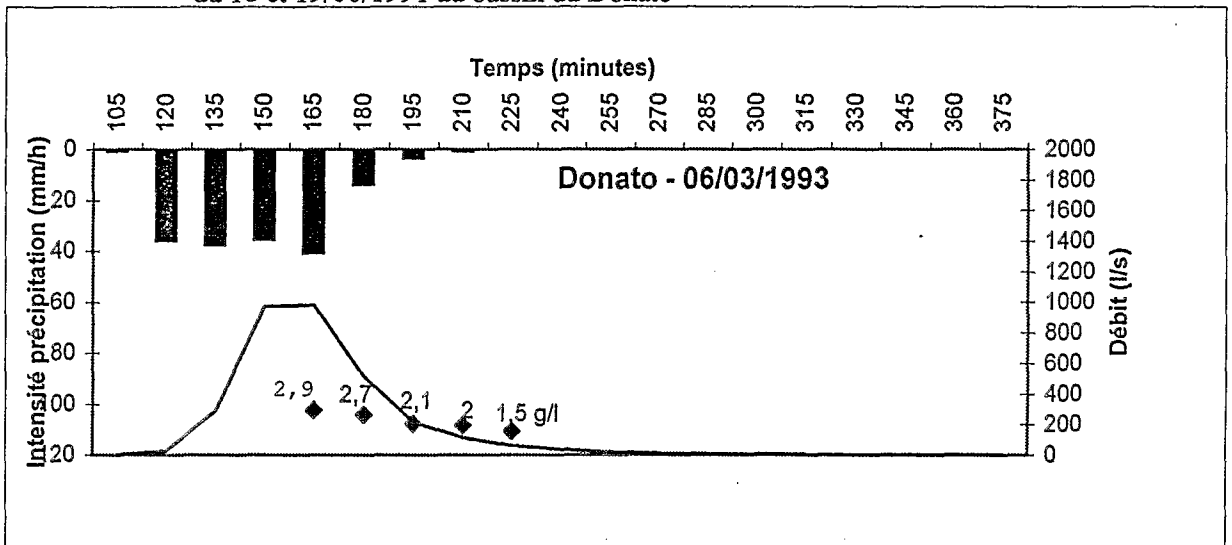


Figure 55. Hyétogramme, hydrogramme et concentration en sédiments lors de l'événement du 06/03/1991 au bassin du Donato

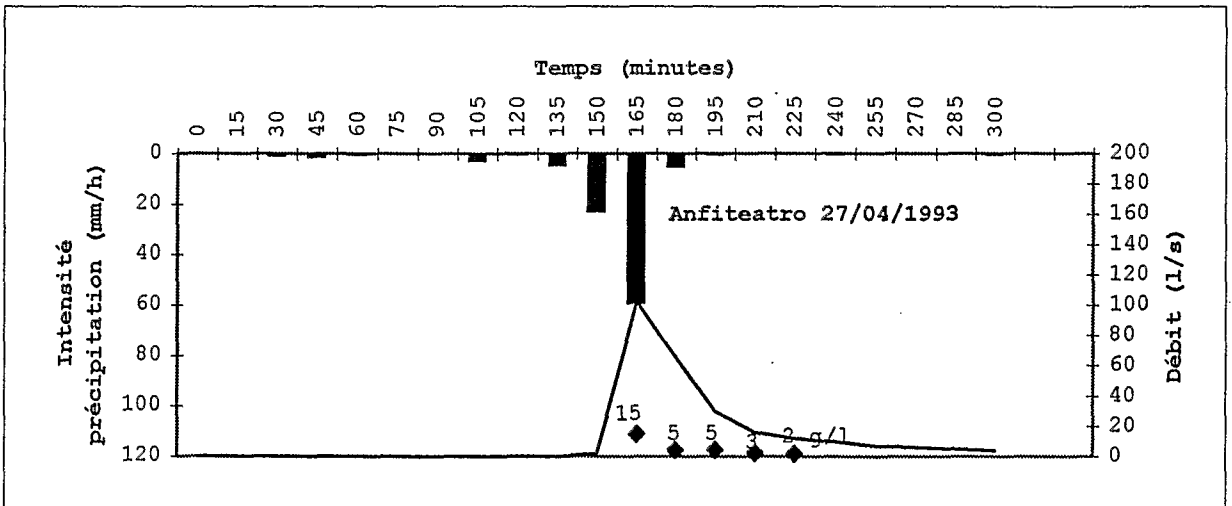


Figure 56. Hyétogramme, hydrogramme et concentration en sédiments lors de l'événement du 27/04/1993 au bassin d'Anfiteatro

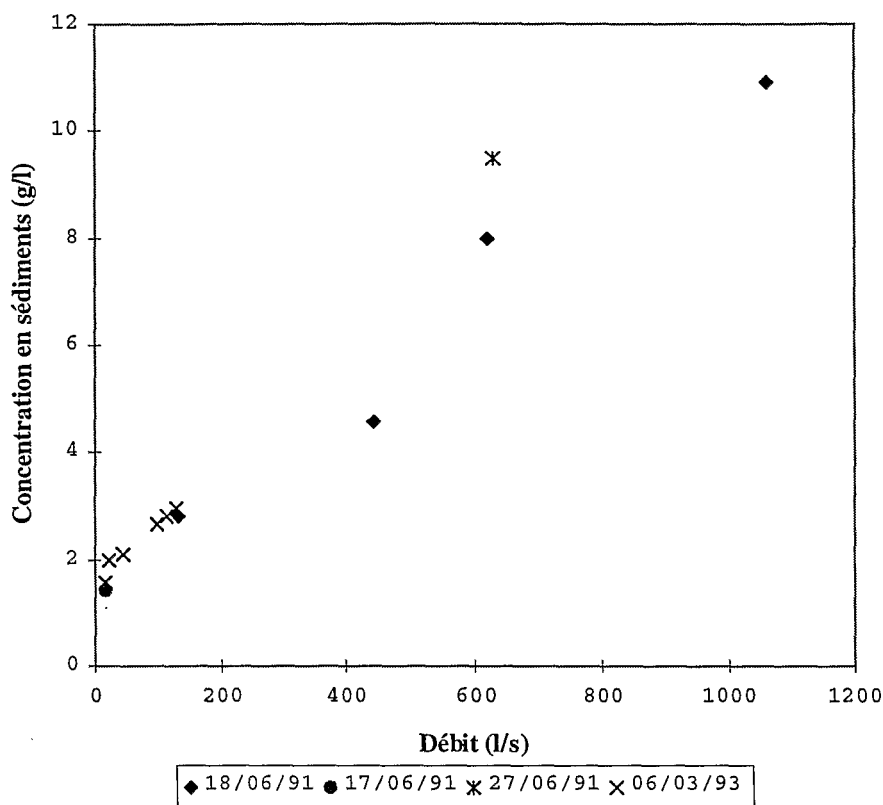


Figure 57. Relation débit liquide - concentration en sédiments pour le bassin de Donato

L'importance du couvert végétal comme facteur limitatif de l'érosion est largement mentionnée dans quasiment tous les travaux qui concernent la conservation du sol à l'échelle de parcelles. Pour donner quelques exemples, on peut citer les travaux de Roth au Paraná, largement cités dans notre mémoire (1985, 1986, 1988, 1991, 1992) et de Leprun *et al.* (1988) dans l'ensemble du Brésil, ou le travail de Snelder et Bryan (1995) qui ont mesuré des pertes en sol sous pluie simulée dans le bassin de Baringo au nord de la vallée du Rift Est-africain au Kenya, pour différentes densités de couvert végétal. Ces auteurs ont conclu que, pour 0 à 25% de couvert végétal, la perte en sol est importante ; entre 25 à 55% de couvert, elle est moyenne et pour plus de 55% de couvert, elle est faible.

Les résultats de Carrol *et al.* (1995) concordent avec nos observations en début de crue. Les auteurs ont trouvé sur deux parcelles (l'une de 241×482 m, l'autre de 151×298 m) d'un sol bien différent des latossolos puisqu'il s'agit d'un vertisol australien, 97% d'explication de la charge solide par les variables suivantes : débit maximum de crue, couvert végétal et longueur de la parcelle.

La MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), équation universelle de pertes en sol de Wischmeier modifiée par Williams et Berndt (1972) calcule la charge solide produite par événement pluvieux, en substituant à l'indice d'érosivité de pluie annuelle de Wischmeier le volume total écoulé dans le bassin et le débit maximum écoulé de la crue. Elle tient compte également du couvert végétal, des pratiques de conservation, de la topographie du terrain et de l'érodibilité du sol. Il semble intéressant de calculer les valeurs de la charge solide produite pour quelques crues à l'aide de cette équation et de les comparer, d'une part, avec la charge solide mesurée à la sortie du bassin de Donato et d'Anfiteatro et, d'autre part, avec la charge solide produite sur les microparcelles pour les mêmes événements. On conçoit le danger d'une extrapolation à partir d'observations sur une parcelle de 1 m² ; la confrontation nous paraît néanmoins intéressante.

4.4 APPLICATION DU MODELE MUSLE

Wischmeier et Smith (1960) ont développé une équation empirique estimant les pertes en sol annuelles à partir de nombreuses données. Leurs conclusions découlent de l'analyse statistique de plus de 10 000 données annuelles sur des parcelles d'environ 70 m². Elles conduisent à l'Equation Universelle de Pertes en Sol (USLE, *Universal Soil Loss Equation*) :

$$A = R K L S C P \quad (\text{équation 13})$$

- A : pertes en sol annuelles calculées par unité de surface
- R : érosivité des pluies annuelles
- K : érodibilité du sol
- L : longueur du versant
- S : pente moyenne du terrain
- C : indice d'utilisation du sol et de couverture végétale
- P : indice de pratique conservationniste

En 1972, Williams et Berndt ont adapté cette équation établie à l'échelle de parcelles standardisées pour estimer les pertes en sol dans les bassins hydrographiques, pour des événements averse-crue isolés. Pour cela, l'indice d'érosivité de pluie annuelle a été remplacé par un indice qui traduit la contribution solide du ruissellement concentré et qui est lié aux débits ruisselés des cours d'eau. Les autres facteurs sont conservés mais ils sont adaptés. Williams en 1975 et 1977 a étudié 18 bassins au Texas et au Nebraska et il a amélioré la précision de l'équation. Cette dernière version est appelée l'équation universelle de perte en terre modifiée (MUSLE), et elle s'exprime :

$$A = 11,8 (Q q_p)^{0,56} K L S P \quad (\text{équation 14})$$

- A : pertes en sol en t/ha
- Q : volume écoulé en m³
- q_p : débit de pointe en m³/s
- K : érodibilité du sol
- LS : indice topographique du terrain, fonction de la longueur de pente et de la pente
- P : indice d'utilisation du sol et de pratique conservationniste.

Selon l'*Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo* (1987) qui reprend les valeurs calculées par Bertoni et Lombardi Neto (1975 et 1985), le facteur K serait de 0,12 pour les *latossolo roxo* proches de notre. Le facteur LS a été calculé en 2,5 à partir d'un MNT pour le bassin du Donato (Risso, 1992) en utilisant un système d'informations géographiques (SIG) de l'INPE (Institut de Recherches Spatiales) au Brésil. P est pris égal à 0,5 comme le suggèrent Wischmeier et Smith (1978) pour les parcelles aménagées avec des banquettes. Les valeurs Q et q_p sont présentées au tableau XXVI et sont calculées à l'aide du logiciel *HYDROM* de l'ORSTOM.

Le tableau XXVI présente également les résultats de la charge solide totale de chaque événement estimée par la MUSLE. Les valeurs calculées (en t/ha) à partir des valeurs mesurées de concentration en sédiment (en g/l) sur la microparcelle 1 et sur le bassin de Donato correspondent aux valeurs moyennes de concentration en sédiment pour chaque événement multipliées par le volume total écoulé.

Tableau XXVI - Caractéristiques des événements mesurés *in situ* et estimés par la MUSLE.

Bassin - événement	Q (m ³)	q _p (m ³ /s)	CS estimé par la MUSLE (t/ha)	CS (g/l) moyen. mesuré sur la microparcelle 1	CS (t/ha) moyen mesuré sur la microparcelle 1	CS (t/ha) mesuré sur le bassin
Donato - juin 91	3261	1,28	0,63	5	1,37	0,15
Donato - mars 93	2638	1,18	0,36	2	0,15	0,05
Anfiteatro - avril 93	198	0,102	0,17	5	?	0,07

Si on extrapole la charge solide observée sur la microparcelle à l'ensemble du bassin, on obtient des valeurs beaucoup plus importantes que celles qui sont mesurées à l'exutoire du bassin pour le même événement. Les différences sont encore plus significatives lorsque le sol est nu, comme pour l'événement de juin 91 où la valeur extrapolée de la microparcelle est 9 fois plus importante que celle qui est mesurée à l'exutoire de Donato. Pour un sol couvert (mars 93), l'écart n'est que de 1 à 3.

Dans la réalité les combinaisons de processus en jeu à l'échelle de la parcelle ne représentent qu'une faible partie de celles à l'échelle du versant et *a fortiori* du bassin versant. Si l'on observe une forte perte en sol sur la microparcelle, une partie importante se redépose ensuite sur le versant, principalement dans les drains des terrasses. C'est précisément quand le sol est nu que ces drains sont encore profonds et plus efficace pour la rétention de l'eau et le dépôt des sédiments, à cause du travail du sol récent. Quand le sol est bien couvert, le sol n'a pas une rugosité importante et les drains des terrasses ne sont plus assez profonds pour retenir les sédiments.

A titre d'exemple, on a mesuré le volume du dépôt qui s'est accumulé dans les parties aval respectivement des bassins d'Anfiteatro et de Donato après la pluie exceptionnelle du 26/05/1992 (cf. fig. 50a et 50b). En multipliant ce volume par la densité apparente moyenne, également mesurée en divers points du dépôt à cette occasion, on obtient la charge déposée. Le dépôt du bassin d'Anfiteatro a été évalué à 144 tonnes et celui du bassin de Donato à 59 tonnes. A cette époque de l'année agricole, la couverture végétale était faible, entre 0 et 20%. Ces sédiments ont été déposés en aval des bassins, dans des zones à très faible pente. Ils proviennent de l'érosion diffuse du bassin, mais également de l'érosion concentrée, plusieurs rigoles s'étant formées au milieu des champs. Cette observation confirme que, avec un sol nu, malgré d'importants départs sur les versants exposés (correspondants aux sites des microparcelles), le dépôt dans les parties peu ou pas pentues avant l'exutoire peut être considérable.

Si on observe les résultats de la MUSLE on constate que ce modèle surestime la charge solide du bassin pour n'importe quelle couverture du sol, mais qu'elle la surestime d'avantage quand le sol est bien couvert. Elle ne prend pas en compte correctement l'effet du couvert végétal sur l'érosion. Elle ne prend pas davantage en compte le piégeage des sédiments par la microtopographie.

4.5 APPLICATION DU MODELE DISTRIBUE ANSWERS

Le modèle ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) a été développé par Beasley (1977) dans le but d'estimer l'effet des changements d'utilisation du sol sur les bilans hydro-sédimentologiques à l'échelle de bassins versants.

Contrairement à l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978), ANSWERS est un modèle conceptuel, c'est à dire qu'il tente de simuler les processus physiques (Hammond et McCullagh, 1980).

Les modèles conceptuels considèrent le bassin comme un seul ensemble (le modèle est *dit* global) ou comme un assemblage de plusieurs unités spatiales (on parle de *modèle distribué*). Les modèles globaux, comme CREAMS (Knisil, 1980), décrivent une réponse moyenne à l'échelle du bassin (Beasley, 1986). En raison de la variabilité spatiale des processus d'érosion dans le bassin, ce type de modèle n'est pas le mieux adapté pour décrire leur fonctionnement (De Roo *et al.* 1989).

Un modèle distribué doit prendre en compte la variabilité spatiale des paramètres qui jouent un rôle important dans les processus d'érosion. Les modèles distribués sont capables, pour établir ces estimations à l'échelle d'un bassin, d'intégrer des variables collectées à d'autres échelles (Beasley *et al.* 1980, Ritter 1992). Malgré les avantages des modèles distribués, ce sont les modèles ponctuels, comme l'USLE qui sont les plus utilisés en raison de leur grande facilité de mise en oeuvre et de paramétrisation. Les modèles distribués exigent en effet une bonne connaissance spatiale et temporelle du milieu étudié. Ils se sont développés davantage à partir de la fin des années 80 du fait du développement des systèmes d'information géographique (SIG) et des progrès de l'informatique (De Roo *et al.* 1989).

Une version récente d'ANSWERS (associée au SIG GRASS) utilise des informations géographiques (des cartes du modèle numérique du terrain, des cartes des sols, des cartes de la végétation) pour générer les variables d'entrée dans le format exigé par ANSWERS (De Roo *et al.* 1989). C'est cette version qui a été employée.

L'objectif de ce chapitre est d'estimer le ruissellement et l'érosion produits pour quelques événements importants au cours desquels on a suivi les états de surface du sol, puis de les comparer aux résultats mesurés pour le bassin du Donato.

4.5.1 Description du modèle ANSWERS

Il est composé d'un modèle hydrologique, d'un modèle sédimentologique et d'un modèle mathématique pour résoudre les équations des deux premiers modèles. Celles-ci sont résumées figure 58.

Un maillage du bassin doit être réalisé en divisant le bassin en cellules carrées régulières, considérées comme homogènes du point de vue du sol, du relief et des précipitations. ANSWERS calcule le ruissellement pour chaque cellule. A partir du modèle numérique du terrain (MNT), la carte des pentes du bassin, puis celle des directions du flux de surface considérant qu'il suit la plus forte pente sont établies. On simule alors un bilan en évaluant les **entrées** (pluie + ruissellement calculé des cellules dont l'eau est drainée vers la cellule considérée) et les **sorties** (ruissellement de la cellule considérée + ruissellement des cellules dont l'eau est drainée vers la cellule considérée). Le modèle effectue cette estimation pour chaque cellule à chaque instant sur la base d'un pas de temps prédéterminé. A la fin de la séquence qui correspond le plus souvent à un événement averse-crue, le modèle calcule le ruissellement total de chaque cellule et de l'ensemble du bassin.

Le modèle ANSWERS (Beasley *et al.* 1980) adopte un certain nombre d'hypothèses simplificatrices :

Simplifications pour le calcul de l'infiltration et du drainage sub-superficiel :

1. le drainage sub-superficiel commence quand l'humidité du sol est supérieure à la capacité au champ ;
2. le régime permanent est atteint (intensité d'infiltration égale à la conductivité hydraulique à saturation K_{sat}) quand le sol est saturé ;
3. le coefficient de drainage sub-superficiel est égal au coefficient d'infiltration permanent (K_{sat}) quand le sol est saturé.

Simplifications pour le calcul de l'érosion du bassin :

1. ANSWERS considère qu'au début de la pluie, les particules sont arrachées du sol uniquement par effet *splash* puisqu'il n'y a pas de ruissellement. Quand la pluie s'arrête ou quand le ruissellement devient important, le ruissellement est considéré comme facteur de détachement des particules ;
2. les sédiments associés au drainage subsuperficiel sont négligés (ils ne représenteraient que 1 à 2% de la charge solide totale pour le bassin Black Creek situé au Nord-Ouest de l'Indiana aux Etats Unis, selon Beasley *et al.* 1980) ;
3. la charge solide en provenance d'une cellule et déposée dans une autre est considérée comme appartenant à nouveau à la surface du sol ;
4. les reprises successives de sédiments redéposés nécessitent la même quantité d'énergie que l'arrachement initial ;

l'érosion dans le réseau hydrographique (rigoles, ravines, cours d'eau) est négligée.

1. Equation de continuité : $I - Q = \frac{dS}{dt}$

avec : I : flux entrant dans l'élément provenant des précipitations et des éléments adjacents,
 Q : flux sortant,
 S : volume d'eau stocké dans l'élément,
 t : temps.

2. Surface potentielle de Stockage (Huggins et Monke) : $DEP = HU * RC * \left[\frac{H}{HU} \right]^{1/RC}$

avec : DEP : volume d'eau stocké (mm),
 H : hauteur au dessus de l'élément (mm),
 HU : hauteur au dessus du microrelief maximum (mm),
 RC : un paramètre caractéristique de la surface.

3. Infiltration (Holtan, Overton) : $FMAX = FC + A * \left[\frac{PIV}{TP} \right]^P$

avec : $FMAX$: capacité d'infiltration surface inondée,
 FC : capacité finale d'infiltration,
 A : capacité maximale d'infiltration en excès de FC ,
 TP : volume total de porosité à l'intérieur de la profondeur de contrôle de l'infiltration,
 PIV : volume d'eau qui peut être stockée à l'intérieur du volume de contrôle préalablement à la saturation,
 P : coefficient sans dimension relatif à la décroissance du taux d'infiltration avec l'accroissement d'humidité du sol.

4. Drainage (lorsque l'humidité du sol excède la capacité au champ) : $DR = FC * \left[1 - \frac{PIV}{GWC} \right]^3$

avec : DR : taux de drainage de la zone de contrôle,
 GWC : contenu en eau gravitaire de la zone de contrôle (porosité totale - capacité au champ).

5. Détachement des particules du sol sous l'effet des impacts des gouttes de pluie (Meyer et Wischmeier):

$$DETR = 0,108 * C * K * A_i * R^2$$

avec : $DETR$: taux de détachement (Kg.mn⁻¹),
 C : coefficient cultural et d'occupation du sol, C*P de l'équation universelle de perte de sol (USLE),
 K : facteur d'érodibilité du sol, d'après l'USLE,
 A_i : accroissement de la surface (m²),
 R : intensité des pluies par intervalle de temps (mm / mn).

6. Détachement des particules de sol par ruissellement (Meyer et Wischmeier, Foster):

$$DETF = 0,90 * C * K * A_i * SL * Q$$

avec : $DETF$: taux de détachement par ruissellement (Kg. mn⁻¹),
 SL : pente (%),
 Q : flux par unité de section (m². mn⁻¹),
 C : coefficient cultural et d'occupation du sol, C*P de l'équation universelle de perte de sol (USLE),
 K : facteur d'érodibilité du sol, d'après l'USLE,
 A_i : accroissement de la surface (m²).

7. Capacité de transport (Yalin, Meyer et Wischmeier, Foster et Meyer, Curtis):

$$TF = 161 * SL * Q^{0.5} \quad si \quad Q \leq 0,046 m^2 mn^{-1}$$

$$TF = 16320 * SL * Q^2 \quad si \quad Q > 0,046 m^2 mn^{-1}$$

avec : TF : taux potentiel de transport de sédiments (Kg.mn⁻¹ m⁻¹),
 Q : flux par unité de section (m². mn⁻¹),
 SL : pente (%).

Figure 58 : Liste des principales relations utilisées par le modèle « ANSWERS »

(d'après Beasley et Huggins, 1982)



4.5.2 Variables d'entrées

L'intégration du modèle ANSWERS dans le SIG GRASS permet l'utilisation des cartes d'altitude (MNT), de pentes et de directions des écoulements. Ces variables, ainsi que les variables physiques d'état (végétation, état de surface) et hydrologiques de forçage (précipitations, l'évapotranspiration étant négligée à l'échelle de l'événement) (figure 59) au moment de chaque événement simulé sont les seules indispensables à ANSWERS pour estimer le ruissellement et l'érosion dans chaque cellule et sur l'ensemble du bassin.

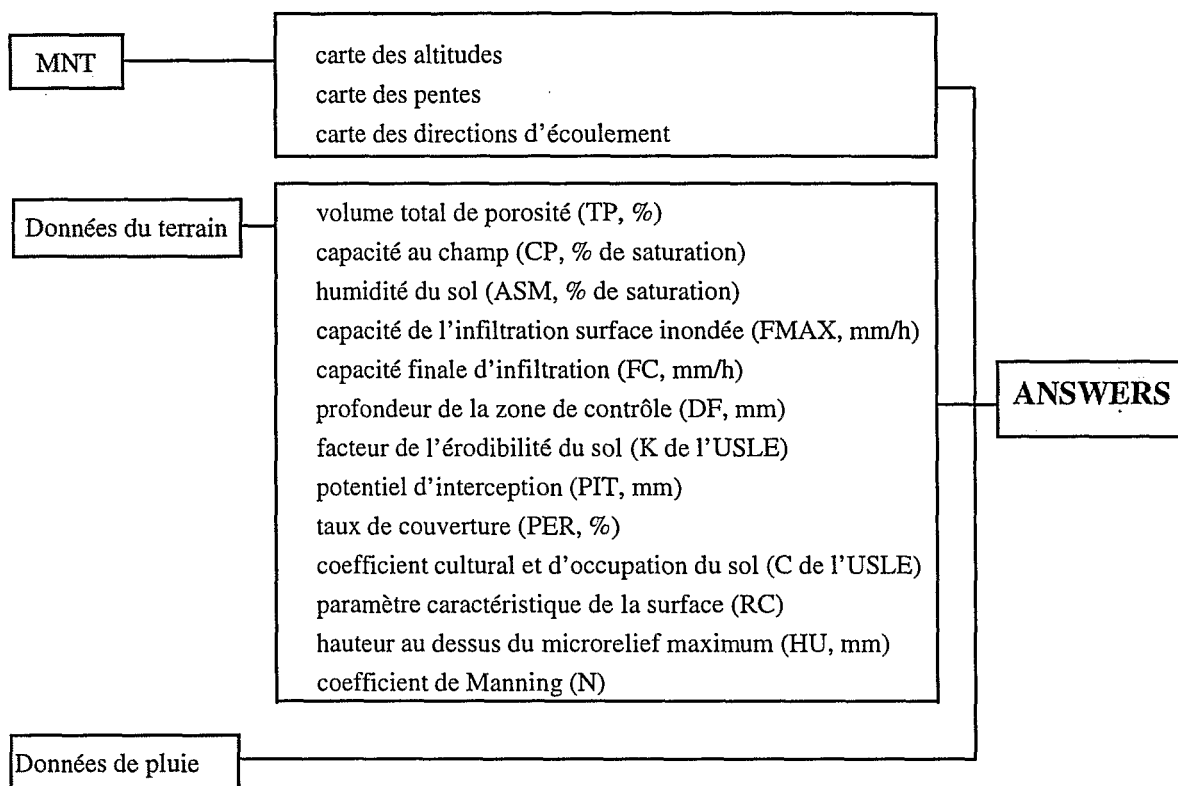


Figure 59. Variables d'entrées du modèle ANSWERS (source, De Roo *et al.*, 1989)

4.5.3 Variables du SIG

Les traitements de l'information spatialisée ont été faits avec le logiciel GRASS à l'ORSTOM-Montpellier. La première carte à fournir dans le modèle est celle du MNT avec des coordonnées géographiques globales (système UTM). A partir de cette carte, GRASS construit automatiquement une carte des pentes, une carte des directions des écoulements et le réseau de drainage du bassin. A chaque cellule une pente moyenne est attribuée ainsi qu'une direction d'écoulement.

Des utilitaires spéciaux permettent, dans GRASS, de corriger les éventuelles dépressions parasites du MNT.

GRASS permet aussi d'acquérir dans un format compatible avec ANSWERS les cartes de sol et d'usage du sol. Toutes ces cartes utilisent le même système de coordonnées géographiques, ce qui permet une *superposition* des cellules ; à chaque cellule sont associées des variables contenues dans le SIG : sol, hydrologie et états de surfaces. L'intensité de pluie intervient alors comme paramètre de forçage stimulant le ruissellement et l'érosion dans le bassin.

a) Sols et caractéristiques hydrodynamiques

Les variables sont distribuées dans le bassin à partir de la carte des sols. A chaque type de sol sont affectées des caractéristiques propres. Les variables caractéristiques utilisées dans ANSWERS sont :

FC et A (mm/h): pour ce calcul, FC est assimilée à la conductivité hydraulique à saturation. Sur le bassin du Donato, les sols présentent un drainage très homogène ; la même gamme de variation de la conductivité hydraulique a été affectée à l'ensemble du bassin. Elle a été estimée en fonction de l'analyse de la simulation de pluie (c.f. fig. 32). Des valeurs minimales de 15 mm/h et maximale de 60 mm/h ont été admises pour ce calcul.

TP(%), FP (% de saturation), P (coefficient sans dimension) : ces paramètres ont été adaptés au type de sol (argileux) et déduits de la texture selon le mode d'estimation proposé par le *mode d'emploi* d'ANSWERS (fourni avec GRASS). On a retenu les valeurs suivantes TP=53%, FC=83 %, P=0,8.

DF (mm) : la valeur retenue est 100 mm, et correspond en gros à la moitié de la profondeur de l'horizon supérieur du sol (au dessus de la semelle de labour).

ASM (%) : cette variable a été estimée à partir de l'indice de précipitations antérieures (IPA) (Chevallier, 1990) par la procédure suivante:

1. La relation IPA vs Humidité du sol mesurée avant chaque simulation de pluie a été représentée graphiquement.
2. Ce graphique a été divisé en deux parties: une pour les deux premières simulations où le sol était très poreux (en raison de la préparation du sol à charrue à soc en profondeur - 50cm) et l'autre pour les autres préparations.
3. Deux régressions linéaires simples entre IPA et l'humidité du sol ont été établies pour chacun des deux groupes en utilisant le logiciel de statistique SYSTAT.
4. L'indice IPA a été établi pour les années 1992 et 1993.
5. L'humidité des sols pour ces années a été évaluée en utilisant l'une ou l'autre équation de régression suivant le type de préparation du sol.
6. $ASM = (\text{humidité du sol} / TP) * 100$

L'érodibilité du sol K, paramètre sans dimension, a été établi en fonction du type de sol. Les valeurs retenues sont celles proposées par l'*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo* (1987), qui sont fondées sur les valeurs trouvées par Bertoni et Lombardi Neto (1975 et 1985) pour les sols du Brésil. Les valeurs de K pour ces sols sont respectivement : *latossolo roxo* : 0,12; *latossolo vermelho escuro* : 0,16; *aluvial* : 0,05; *terra roxa estruturada* : 0,18.

b) Etats de surface du sol

La distribution des variables a été faite en utilisant la carte d'occupation du sol du bassin.

PIT (mm) a été choisi entre 0 pour les sols nus et 1,3 mm pour les sols totalement couverts et ayant des résidus en surface (selon manuel d'ANSWERS ; Beasley et Huggins, 1982).

PER (%) - couverture végétale : observée in situ, interpolée pour la période d'une année en 1992/1993 et pondérée pour le bassin.

RC - paramètre caractéristique de la surface du sol, prend en compte la forme de la rugosité et décrit sa fréquence et son importance. Il a été estimé entre 0,4 pour des sols nus et récemment préparés et 0,1 pour des sols avec une couverture supérieure à 60% (3 ou 4 mois après la préparation du sol).

HU (mm) - hauteur au dessous du microrelief maximum : estimée entre 100 mm pour le sol bien couvert et anciennement préparé, et 170 mm pour le sol récemment préparé.

N - coefficient de Manning, tient compte de la surface du sol et de la végétation. Il a été estimé entre 0,1 pour un sol nu et 0,17 pour un sol bien couvert, avec des résidus en surface;

C - coefficient cultural et d'occupation du sol, est une combinaison directe des facteurs C (couvert végétal) et P (méthode conservacioniste) de l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978). Il a été estimé à 0,1 pour la culture et à 0,5 pour le sol nu.

c) Précipitations

Sont considérées l'intensité de la pluie (mm/h) et le temps (minutes). Le pas de temps peut être variable. Un pas de temps constant de 15 minutes a été retenu.

Le modèle offre la possibilité d'entrer les précipitations enregistrées par plusieurs pluviographes. Ceux-ci sont localisés par leurs coordonnées en x y. Nous avons utilisé un seul pluviographe, considérant qu'à l'échelle d'un km² la précipitation est homogène.

4.5.4 Premiers résultats

Dans le bassin du Donato, le sol est considéré homogène. Cependant, la carte des sols établie par l'EMBRAPA indique 5 types de sol sur l'ensemble du bassin : *latossolo roxo*, *latossolo vermelho escuro*, *latossolo amarelo*, *terra roxa estruturada* et *glei húmico*. Les principaux sont néanmoins le *latossolo roxo* et la *terra roxa estruturada*. Ces types de sols ont approximativement les mêmes caractéristiques de texture et de porosité de surface et de drainage interne. Un premier essai a été fait en considérant des unités différentes pour les 5 types de sols comme le suggère le mode d'emploi d'ANSWERS.

La totalité du bassin du Donato est cultivée avec des céréales pendant toute l'année, sauf dans la forêt galerie (quelques mètres de largeur sur les berges des cours d'eau) et le site où est située la maison d'un des exploitants (environ 1000 m²). Par simplification, une seule unité d'utilisation du sol a été prise en compte.

a) Lames ruisselées

Le modèle calcule la lame ruisselée de chaque événement simulé.

Choix des événements pour la modélisation :

On a sélectionné, d'une part, les événements qui ont provoqué les plus fortes crues à la station de Donato pendant la période où l'on disposait d'observations des états de surface du sol (d'août 1992 à septembre 1993) et, d'autre part, l'événement du 18/06/91 où la charge solide de la rivière Donato a été mesurée.

Les résultats obtenus figurent dans le tableau XXVII.

Tableau XXVII Lames ruisselées calculées par ANSWERS en tenant compte des différents types de sols et mesurées (Bassin du Donato).

Evénement	Date	L.r. calculé (mm)	L.r. mesurée (mm)	P (mm)
A	18/06/1991	0,778	7,69	48
B	24/09/1992	0,193	3,46	45
C	24/10/1992	11,8	3,24	62,5
D	17/01/1993	12,43	1,18	58,5
E	28/01/1993	2,02	0,95	30,3
F	06/03/1993	13,24	1,97	42,8
G	11/05/1993	14,49	6,91	44,8
H	04/06/1993	4,32	0,81	42,8
I	10/07/1993	7,49	5,12	60,3

Ces résultats ne sont pas satisfaisants. Une analyse de sensibilité du modèle (De Roo *et al.* 1989) indique que les paramètres les plus sensibles sont les variables d'infiltration (FC, A et DF) et l'humidité initiale du sol (ASM). Ritter (1992) rapporte que la variable la plus sensible à l'échelle de la microparcelle, FC, correspond à la variable la plus sensible également à l'échelle du bassin.

Malheureusement, on ne dispose pas directement de valeurs mesurées pour la variable ASM. L'estimation faite à partir de l'indice IPA est discutable, mais on n'a pas de moyen de corriger ce paramètre.

DF est un autre paramètre qu'on ne peut pas modifier. Beasley et Huggins (1982) préconisent d'utiliser DF comme la moitié de la profondeur du premier horizon. Considérant le premier horizon avec une profondeur de 20 cm, le DF utilisé est de 10 cm.

En revanche, les paramètres FC et A, calculés à partir de la conductivité hydraulique obtenus à l'aide des données de la simulation de pluie, peuvent varier beaucoup en fonction de la préparation du sol et des états de surface (cf. fig. 32).

ANSWERS utilise la carte d'occupation du sol comme une variable d'entrée. Pour le bassin du Donato, tout l'espace est utilisé pour l'agriculture céréalière, d'où l'adoption d'une unité de sol unique avec une valeur constante de FC et A, ce qui peut être amélioré en utilisant les résultats de la simulation de pluie.

Effet de la préparation du sol dans chaque parcelle

Pour montrer l'effet de la préparation du sol sur l'infiltration il faudrait travailler avec des valeurs calculées de la conductivité hydraulique en fonction de la préparation du sol pour chaque parcelle différente et plus seulement avec une valeur moyenne pour l'ensemble du bassin. Comme on possède les dates de toutes les opérations agricoles pendant cette période pour chacune des parcelles, la conductivité hydraulique a été estimée pour chaque date en fonction des valeurs obtenues grâce à la simulation de pluie (c.f. fig. 32).

Effet de la structure du sol en microagrégats (sol argileux qui se comporte comme des sables pour le drainage).

Les paramètres TP, FP et P adoptés pour les premiers calculs correspondent à des sols argileux. Sur le bassin de Donato le sol est argileux mais avec caractéristiques de densité ($1,6 \text{ g/cm}^3$) et de drainage voisines de celles de sols sableux. Par conséquent, en calculant TP avec les valeurs de densités données par les analyses de sol, on obtient des résultats qui correspondent à des sols sableux et non plus argileux.

On constate dans nos premiers calculs que le modèle surestime la plus grande partie des lames ruisselées. C'est logique parce qu'un sol argileux va ruisseler plus qu'un sol sableux : les micropores du premier vont

freiner davantage l'infiltration que les macropores du second qui le favorisent en réalité. On peut donc tenter une nouvelle modélisation en adoptant des paramètres correspondant à une texture sableuse.

Modifications proposées.

Le modèle ANSWERS propose de classer les différents paramètres en fonction du type de sol à partir de la carte des sols. Les sols du bassin du Donato étant assez homogènes (Boulet *et al.* 1993), c'est davantage la préparation du sol et le calendrier agricole qui expliquent la variabilité de l'infiltration et du ruissellement. C'est pour cette raison que l'on va substituer la carte du *parcellaire* à celle des *sols*. Le bassin est divisé en 5 parcelles agricoles qui ont approximativement les mêmes périodes et types de préparation du sol (figure 60) Les paramètres FC et A sont calculés directement en fonction du calendrier agricole de **chaque parcelle** pour les années 1992 et 1993. De plus, les paramètres d'infiltration correspondant à un sol sableux sont substitués aux précédents (TP=38%, FP=39% de saturation, P=8).

Avec les modifications proposées, les nouveaux résultats des simulations sont présentés au tableau XXVIII.

Tableau XXVIII. Lames ruisselées calculées par ANSWERS en tenant compte des types et dates de préparations du sol et en adaptant les paramètres d'infiltration à la structure particulière des sols et lames ruisselées observées (Bassin de Donato).

Événement	Date	Lr. calculée (mm)	Lr. mesurée (mm)	Pluie (mm)
B	24/09/1992	0	3,46	45
C	24/10/1992	6,9	3,24	62,5
D	17/01/1993	1,11	1,18	58,5
E	28/01/1993	0,13	0,95	30,3
F	06/03/1993	1,90	1,97	42,8
G	11/05/1993	6,07	6,91	44,8
H	04/06/1993	0,29	0,81	42,8
I	10/07/1993	0,0	5,12	60,3
J	11/09/1992	1,65	3,24	39,8

L'événement A n'a pas été repris parce qu'on ne disposait pas d'observations de l'état de surface du sol pour toutes les parcelles.

Les simulations sont nettement améliorées avec ces nouvelles hypothèses.

Le modèle sous estime la lame ruisselée pour 4 événements : B, E, H et I ; et l'événement C est sur-estimé. L'événement J est sous-estimé, mais l'allure de l'hydrogramme est conforme (c.f. fig. 68).

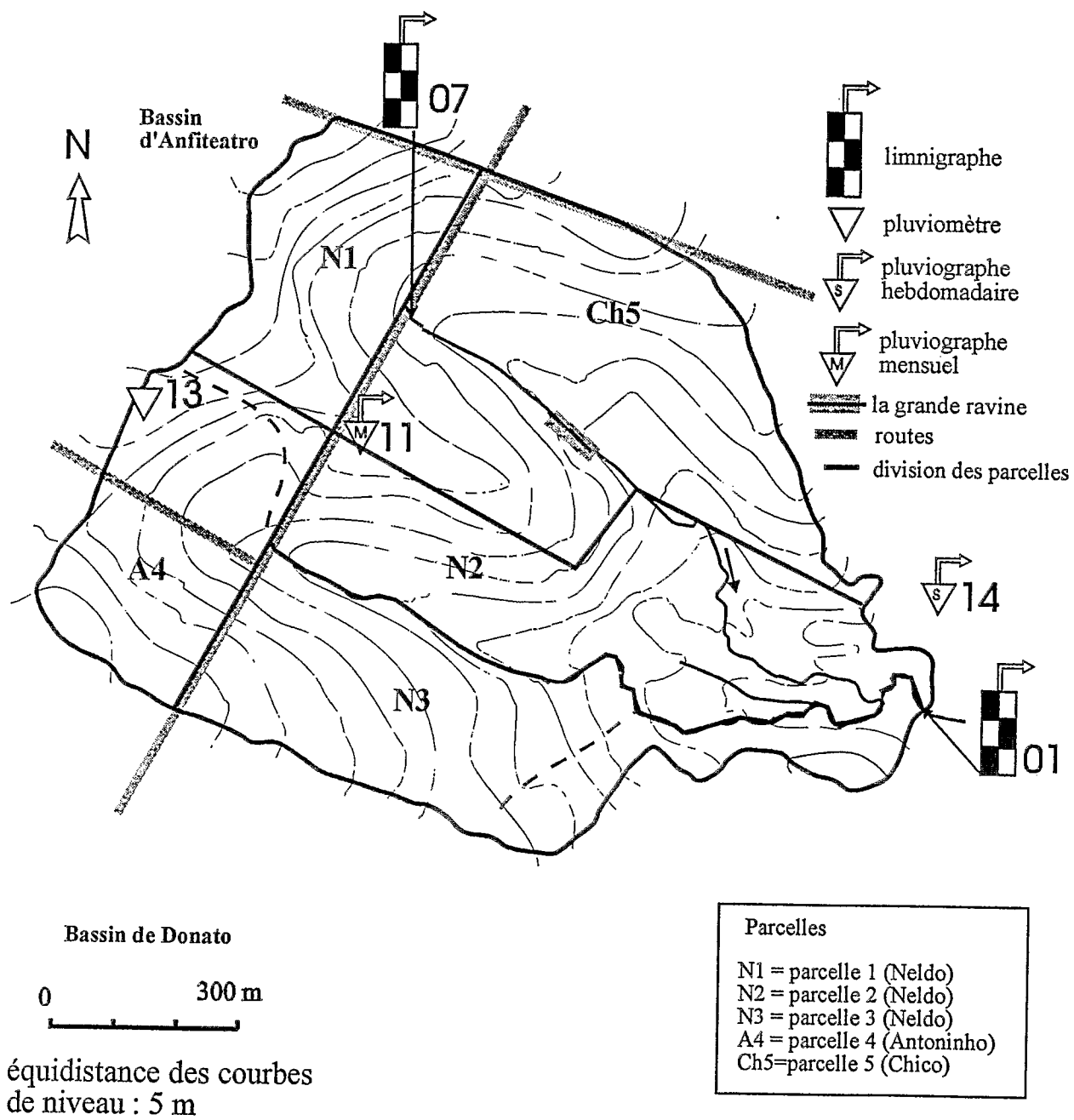


Figure 60. Localisation des parcelles (Bassin de Donato)

Effets des organisations pelliculaires superficielles (OPS)

Si on analyse en détail les événements sous-estimés par ANSWERS, on observe que trois sur quatre de ces événements (E, H, I) ont lieu quand le sol présente une forte organisation pelliculaire superficielle (OPS) (tableau XXIX).

Tableau XXIX. Observations concernant l'OPS sur le bassin du Donato à l'occasion des événements simulés par ANSWERS.

Dates	% du sol avec OPS	Observations
17/01/1993	60	Le 28/01/1993 (événement E) l'OPS recouvrait au minimum 60% de la surface du sol et probablement 100% à la fin de la pluie.
03/02/1993	100	
07/06/1993	80	Le 04/06/1993 (événement H) l'OPS recouvrait au minimum 80% de la surface du sol
07/07/1993	60	Le 10/07/1993 (événement I) l'OPS recouvrait au minimum 60% de la surface du sol et probablement 100% à la fin de la pluie car il n'a pas plu entre le 10/07 et le 27/07.
27/07/1993	100	

Malheureusement, nous n'avons pas les observations de l'état de surface pour l'événement B, mais on peut supposer qu'à cette occasion le sol avait une OPS. Ce serait la cause de la sous-estimation de la lame ruisselée. L'OPS diminue la conductivité hydraulique à saturation, par conséquent l'infiltration du sol diminuerait. Il faut rappeler que l'on a calculé la valeur de la paramètre FC à partir d'une gamme des valeurs de Ksat obtenus par la simulation de pluie. On sait bien qu'il y a une grande variation entre Ksat à la première pluie (Ksat1) et Ksat à la quatrième pluie (Ksat4) pour une même préparation du sol du fait des modifications des états de surface.

Nouvelles modifications pour tenir compte de la dégradation des états de surface (effets des OPS)

On va suivant les cas affecter les valeurs extrêmes Ksat1 ou Ksat4 pour le paramètre FC. Ksat1 sera utilisé pour calculer FC pour l'événement C, où le sol ne présentait pas d'OPS. Ksat4 sera utilisé pour calculer FC pour les événements B, E, H et I, où le sol présentait une OPS sur plus de la moitié de la surface.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XXX.

Tableau XXX: Lames ruisselées calculées par ANSWERS en tenant compte des types de préparations et des OPS et lame ruisselée mesurée (Bassin du Donato).

Événement	Date	L.r. calculé (mm)	L.r. mesurée (mm)	Pluie (mm)
B	24/09/1992	2,84	3,46	45
C	24/10/1992	2,98	3,24	62,5
E	28/01/1993	0,68	0,95	30,3
H	04/06/1993	0,77	0,81	42,8
I	10/07/1993	1,87	5,12	60,3

On voit que pour l'événement C, la lame ruisselée calculée par le modèle est proche de la lame ruisselée mesurée, mais la forme de l'hydrogramme qui présente deux pics (fig.62) est assez différente de celui mesuré. Les événements E et H ont des bons ajustements et des hydrogrammes acceptables (figure 66). Les événements B et I continuent à être sous-estimée par le modèle.

Discussion

Les figures 69 à 76 présentent les hydrogrammes calculés par le modèle et mesurés pour chaque événement. On voit que les hydrogrammes sont en général bien calculés, mais on observe une difficulté du modèle à simuler des événements qui ont provoqué plus d'un pic de crue (événements C, D et I). On voit également que pour quelques événements (événements B, D, J) les hydrogrammes corrects en amplitude sont décalés d'une demi-heure approximativement. Deux causes peuvent être envisagées : soit les données sont bonnes et le modèle est responsable du décalage, soit les données présentent des erreurs. cette seconde hypothèse qu'il faut retenir. Pour des raisons techniques, les données de pluie et de débit de 1993 n'ont pas été critiquées de façon aussi rigoureuse que les années antérieures ; des décalages peuvent être liés soit à des problèmes d'horloge ou de pose du papier sur le limnigraphe, soit enfin à des dérives de temps non corrigées lors du dépouillement.

On peut donc admettre qu'après les corrections proposées et appliquées (substitution de la carte des sols par la carte du parcellaire, modification des paramètres d'infiltration et prise en compte de la formation d'OPS), le modèle calcule de façon relativement satisfaisante les lames ruisselées du bassin.

Le principal problème pour l'application d'ANSWERS est que les nombreuses données nécessaires ne sont pas toujours disponibles. On a constaté à travers l'analyse de simulation de pluie que quand il y a une formation d'OPS il y a une diminution de l'infiltration. La plus grande difficulté est de déterminer la présence éventuelle d'une OPS au moment de l'événement que l'on veut simuler. Le modèle ANSWERS ne prend pas en compte ce problème comme Beasley *et al.* (1980) le soulignaient déjà.

De Roo et Riezebos (1992) ont tenté de résoudre ce problème en intégrant dans le modèle ANSWERS une équation pour déterminer la profondeur de la zone de contrôle du sol (DF) en fonction de l'énergie cinétique de l'événement pluvieux simulé. Les auteurs sont partis du principe que la diminution de l'infiltration pendant l'événement pluvieux est directement proportionnelle à l'énergie cinétique des gouttes de pluies, qui est la principale responsable de la formation de l'OPS. L'équation s'écrit :

$$DF_t = DF_{\min} + (DF_0 - DF_{\min})e^{(-a.CKE_t)} \quad (\text{équation 15})$$

avec

DF_t : DF au moment t

Df_{min} : DF au moment t=0

DF₀ : DF au moment de la moindre infiltration du sol

CKEt : énergie cinétique cumulée au moment t (j/m²)
t : temps
a : coefficient

Cette méthode admet qu'une augmentation de la surface d'OPS est due à une forte énergie cinétique des gouttes de pluies de l'événement simulé, ce qui correspond à une averse intense. Les auteurs prennent l'OPS en considération en liant DF à l'énergie cinétique cumulée de la pluie : une averse à forte énergie cinétique provoque une diminution de DF et par suite la saturation de l'horizon superficiel et la diminution rapide de l'infiltration.

Cette méthode permet de mieux prendre en compte la formation et l'effet de l'OPS sur l'infiltration dans la simulation du modèle ANSWERS, mais l'équation est empirique et n'est pas applicable sans discernement (De Roo et Riezebos, 1992). De plus, elle ne considère que l'OPS produite par l'averse modélisée, sans tenir compte de celle qui, résultant de pluies antérieures, préexiste éventuellement.

Dans notre analyse nous avons vu que l'état de surface du sol au début de l'événement pluvieux modélisé est le facteur qui joue le rôle principal dans le processus d'infiltration. Si le sol a une surface avec une OPS le couvrant à 80% ou davantage, une pluie importante en volume, mais de faible énergie cinétique, produira un ruissellement important.

La logique voudrait que l'on considère non seulement l'énergie cinétique de l'averse modélisée, mais également celle des événements pluvieux antérieurs. Une équation prenant tout ces termes pourrait mieux représenter l'influence de l'OPS formée avant et pendant l'événement pluvieux modélisé.

Roth *et al.* (1986) ont estimé l'infiltration du sol testé au Paraná (région sud du Brésil, environ 400 km au nord de notre zone, sur des sols comparables) à travers des régressions en utilisant comme facteur explicatif la somme de l'érosivité de pluies (facteur EI30 de Wischmeier) des 30 jours précédents l'événement simulé. Cette démarche permet de considérer la dégradation du sol et la formation de l'OPS au début de l'événement analysé. Les auteurs ont amélioré leurs résultats en ajoutant deux paramètres supplémentaires, le couvert végétal et l'humidité initiale du sol. On pourrait peut-être améliorer le modèle ANSWERS en formalisant cette analyse et en l'introduisant dans le calcul.

b) Pertes en sol

En plus de l'écoulement superficiel, le modèle ANSWERS calcule la perte en sol pour chaque événement. Neuf événements ont été choisis pour la modélisation, mais la charge solide pendant la pluie n'a été observée que pour un seul de ces événements. De ce fait il est difficile de calibrer les paramètres du modèle et de les confronter à l'observation. Dans la suite, on se contentera donc de commenter les résultats et on utilisera la prévision du modèle comme une estimation de l'ordre de grandeur de l'érosion.

Les résultats et les figures (69 à 76) présentés correspondent à ceux du dernier essai prenant en compte les modifications proposées pour le calcul du ruissellement. Les résultats de la perte en sol calculée par le modèle ANSWERS sont donnés au tableau XXXI. Ils sont comparés aux résultats obtenus avec l'Equation Universelle Modifiée de Perte en Sol (MUSLE, voir partie 4).

Tableau XXXI: Perte en sol calculée par ANSWERS pour le Bassin du Donato.

Événement	Date	Perte en sol calculée ANSWERS (t/ha)	Microp. 1m ² (t/ha)	MICRO/ ANSWERS	Concentrations max. ANSWERS (g/l)
B	24/09/1992	0,33	0,13	0,4	18
C	24/10/1992	0,71	0,04	0,06	34
D	17/01/1993	0,08	0,47	5,66	13,8
E	28/01/1993	0,04	0,31	8,61	8,7
F	06/03/1993	0,10	0,15	1,55	5,8
G	11/05/1993	0,37	-	-	16,7
H	04/06/1993	0,07	-	-	40
I	10/07/1993	0,37	2,21	5,91	-
J	11/09/1992	0,22	0,08	0,33	22,5

Discussion:

Il est difficile de valider les résultats estimés par ANSWERS parce qu'on n'a de mesures de pertes en sol à l'échelle du bassin que pour un seul événement (06/03/1993). Pour l'autre événement qui a été suivi (18/06/1991), le modèle ANSWERS n'a pas pu être appliqué parce qu'on ne disposait pas des données d'occupation du sol pour chaque parcelle comme l'exige le modèle.

Sur les figures 69 à 76, on note les concentrations en sédiment au cours des crues. On constate que ces valeurs sont probablement trop élevées par rapport à la réalité. On a mesuré une concentration maximale de 2,97 g/l le 06/03/1993, alors qu'ANSWERS estime pour cet événement une valeur double de 5,8 g/l. La concentration maximale absolue mesurée a été de 11 g/l pour l'événement du 16 au 18/06/1991. Ces résultats ont déjà été discutés dans la partie 4.3, mais il faut rappeler que cette concentration observée inclut la charge solide produite par le réseau hydrographique et en particulier par la *voçoroca grande*, alors qu'ANSWERS ne donne que la charge solide produite par l'érosion laminaire sur le bassin. Il apparaît que, même avec la contribution du réseau hydrographique, la concentration maximale en sédiment mesurée est inférieure à celle estimée par ANSWERS. Il semble donc qu'ANSWERS surestime largement l'érosion dans le bassin.

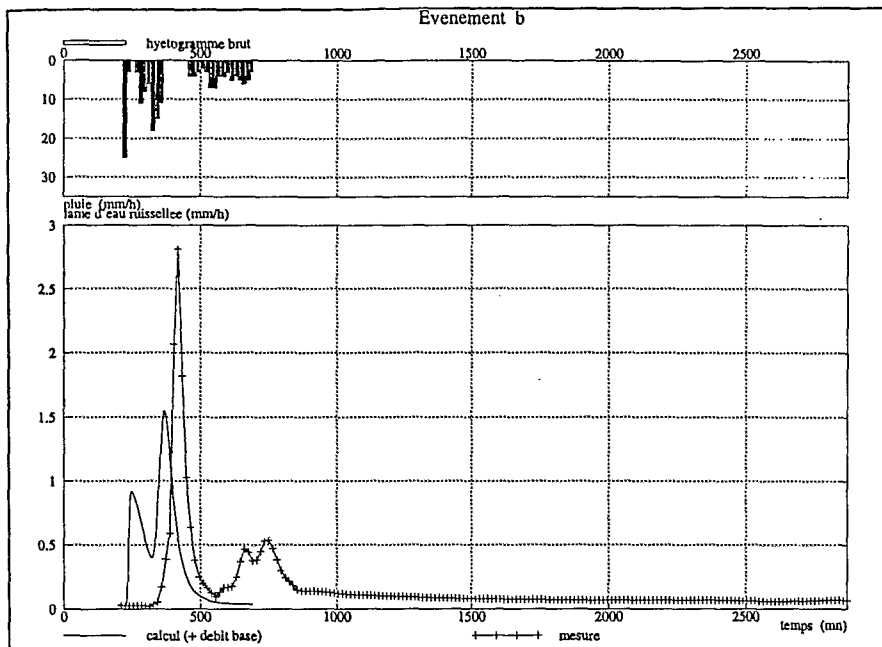


Figure 61. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement b

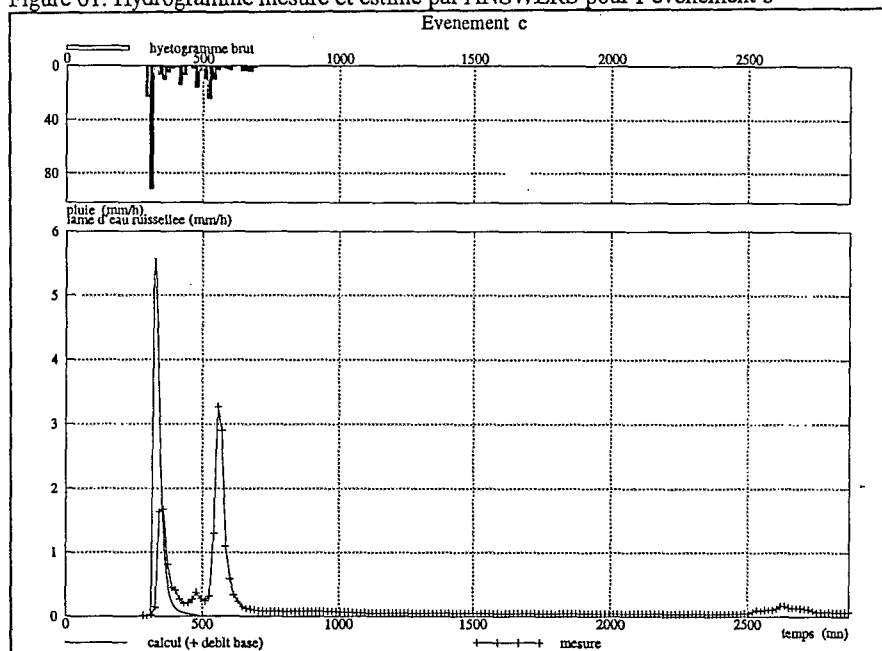


Figure 62. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement c

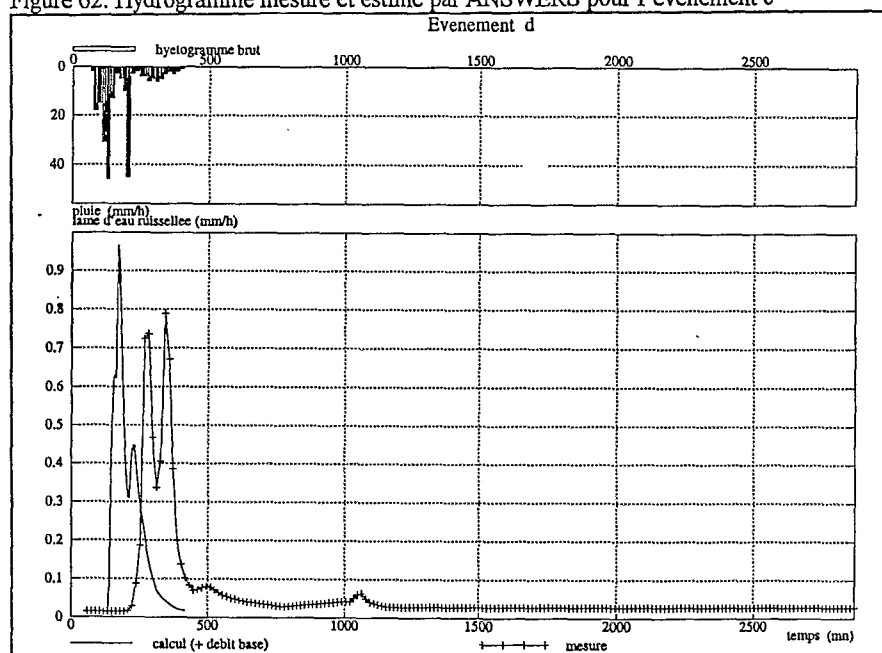


Figure 63. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement d

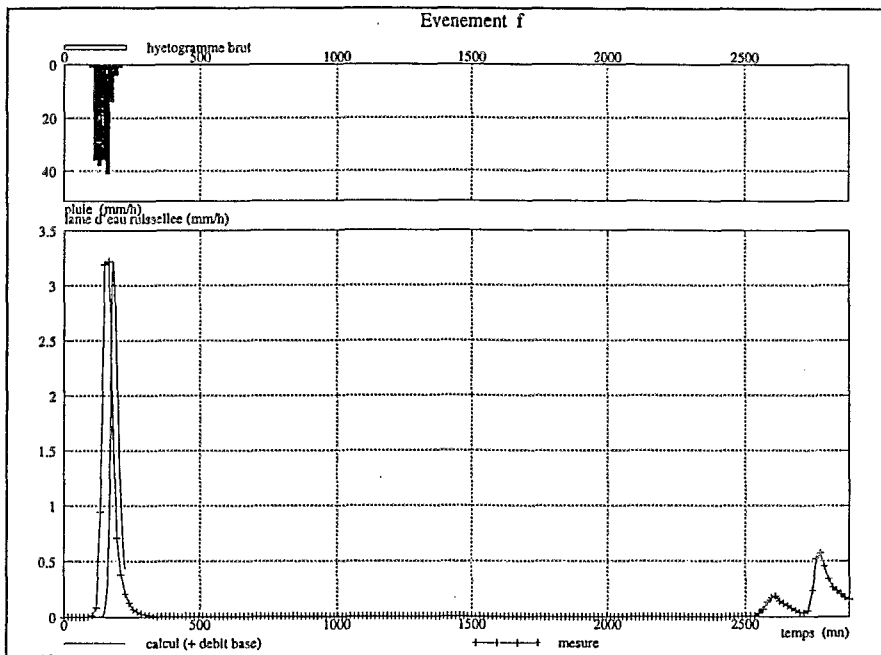


Figure 64. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement f

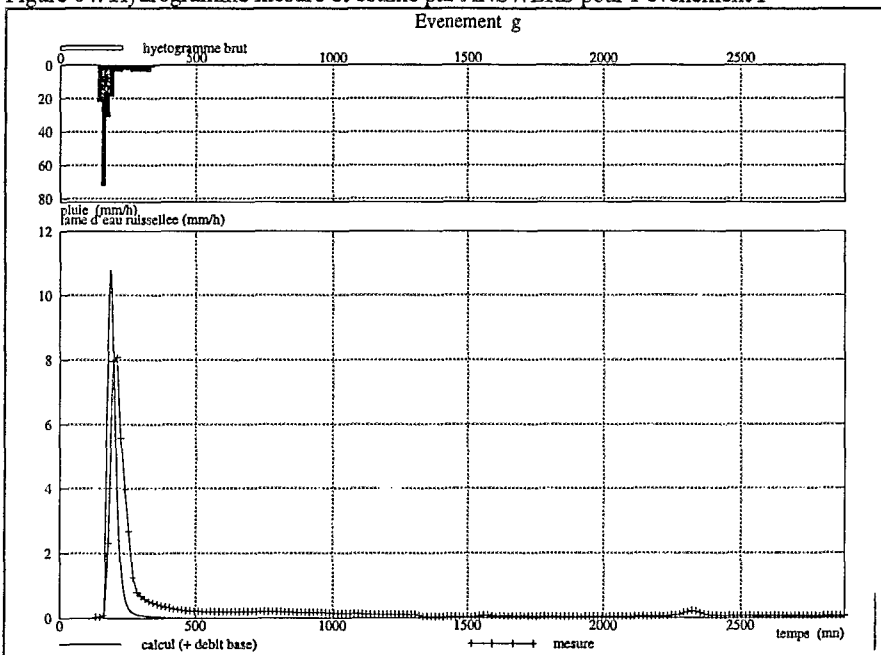


Figure 65. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement g

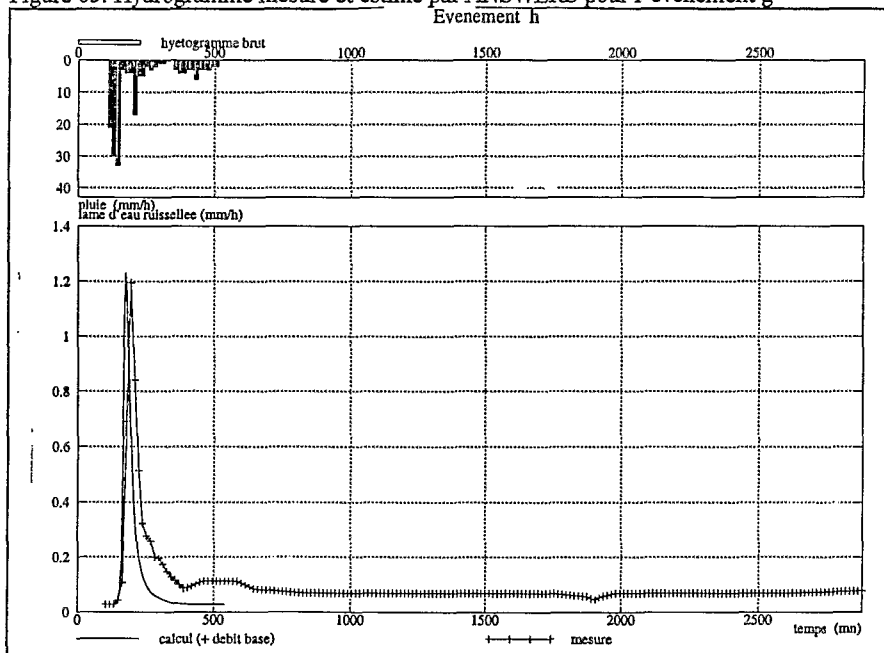


Figure 66. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement h

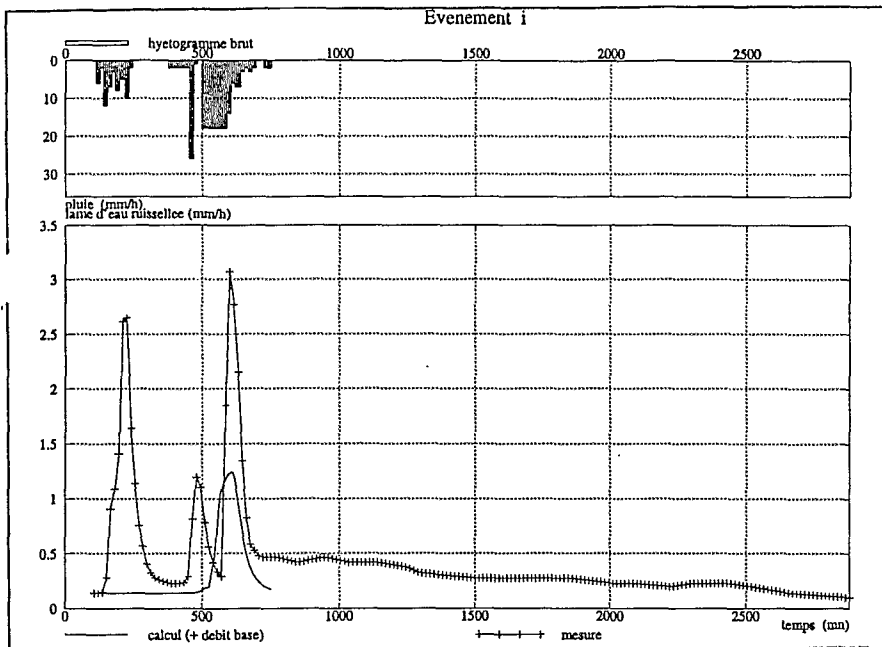


Figure 67. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement i

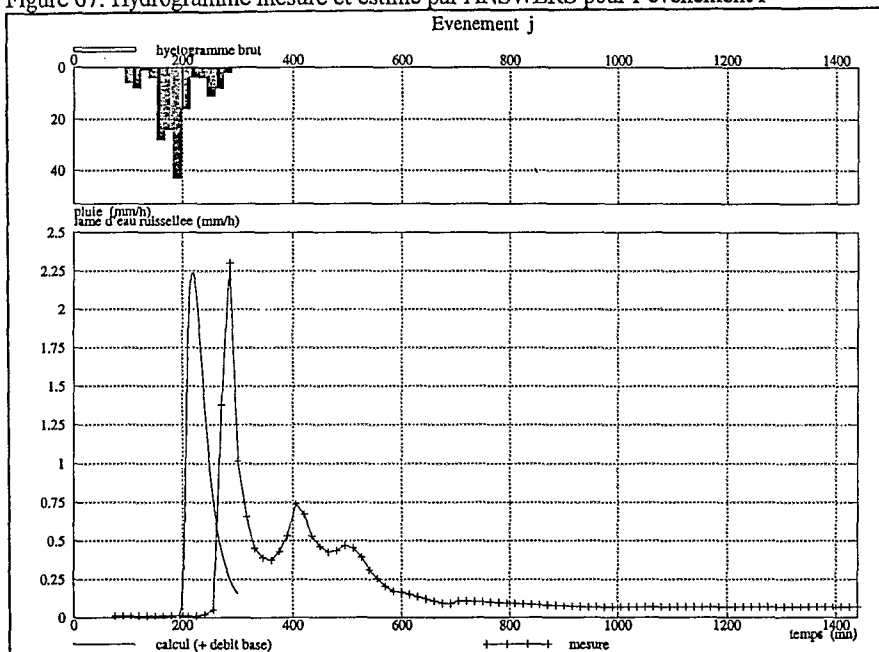


Figure 68. Hydrogramme mesuré et estimé par ANSWERS pour l'événement j

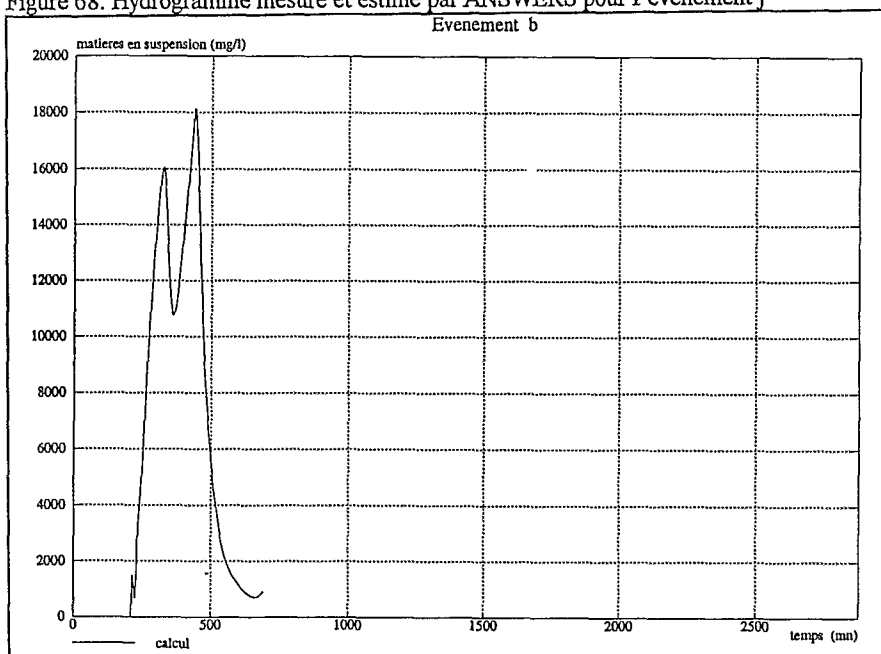


Figure 69. Concentration en sédiments estimée ar ANSWERS pour l'événement b

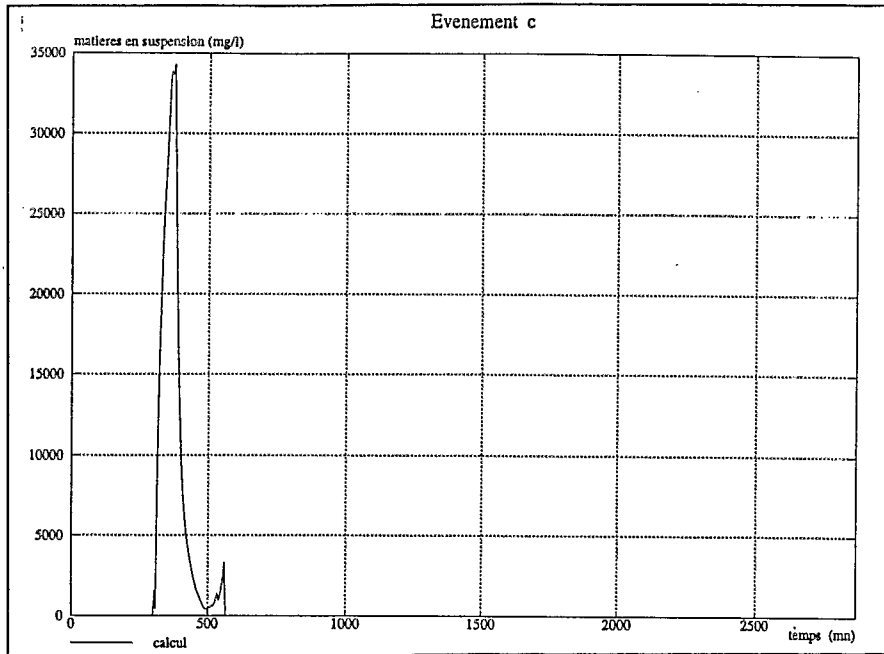


Figure 70. Concentration en sédiments estimée ar ANSWERS pour l'événement c

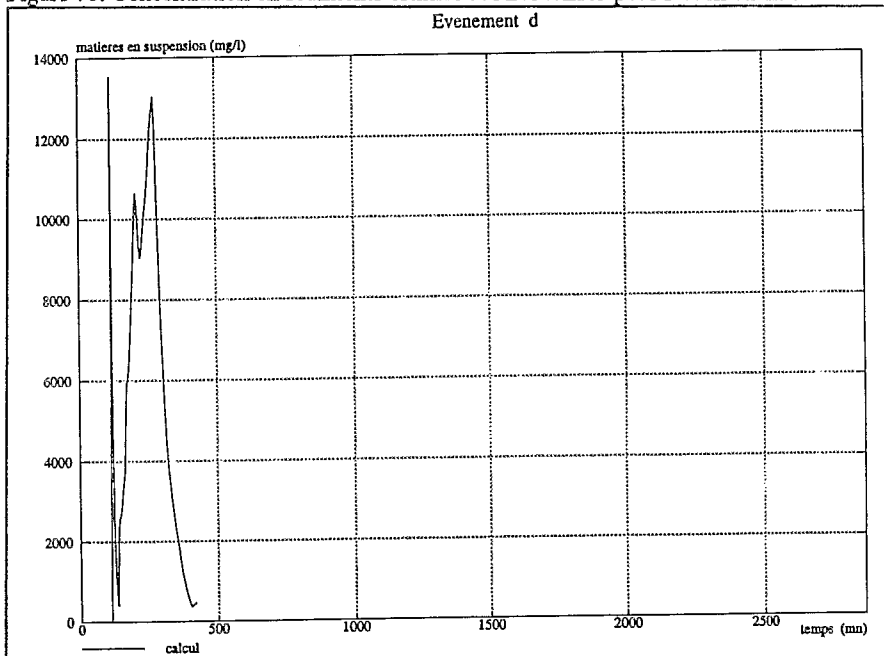


Figure 71. Concentration en sédiments estimée par ANSWERS pour l'événement d

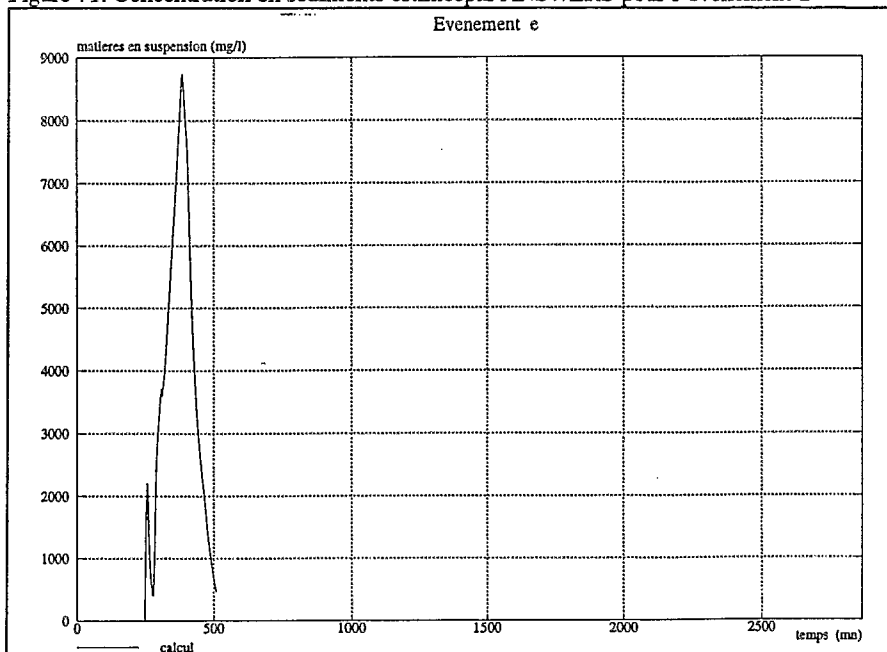


Figure 72. Concentration en sédiments estimée par ANSWERS pour l'événement e

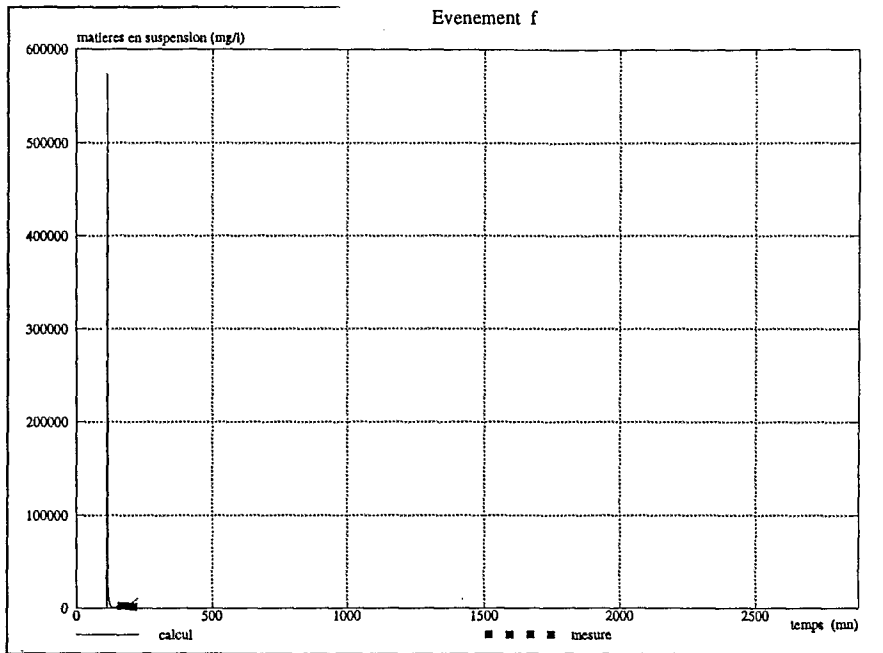


Figure 73. Concentration en sédiments estimée par ANSWERS pour l'événement f

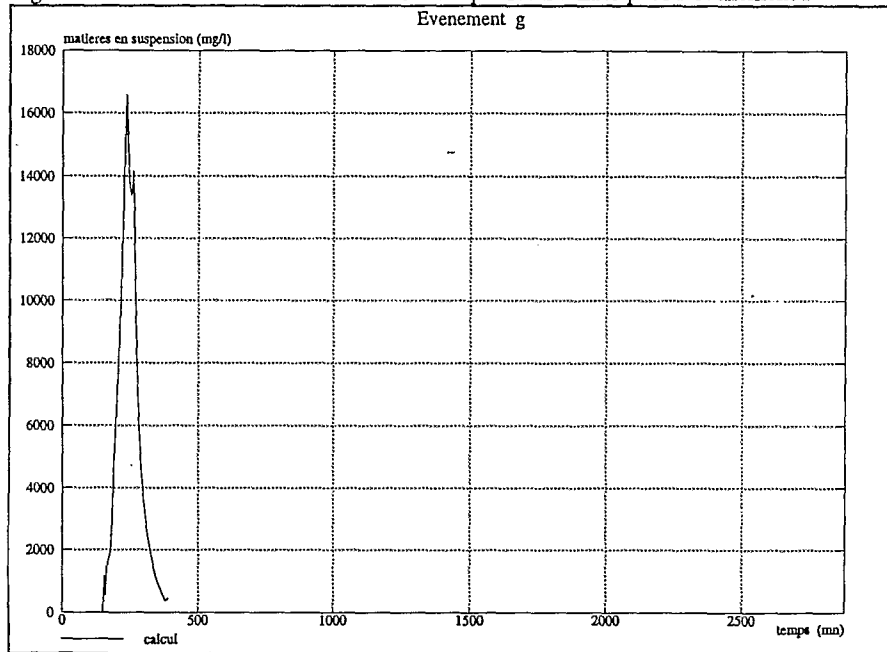


Figure 74. Concentration en sédiments estimée par ANSWERS pour l'événement g

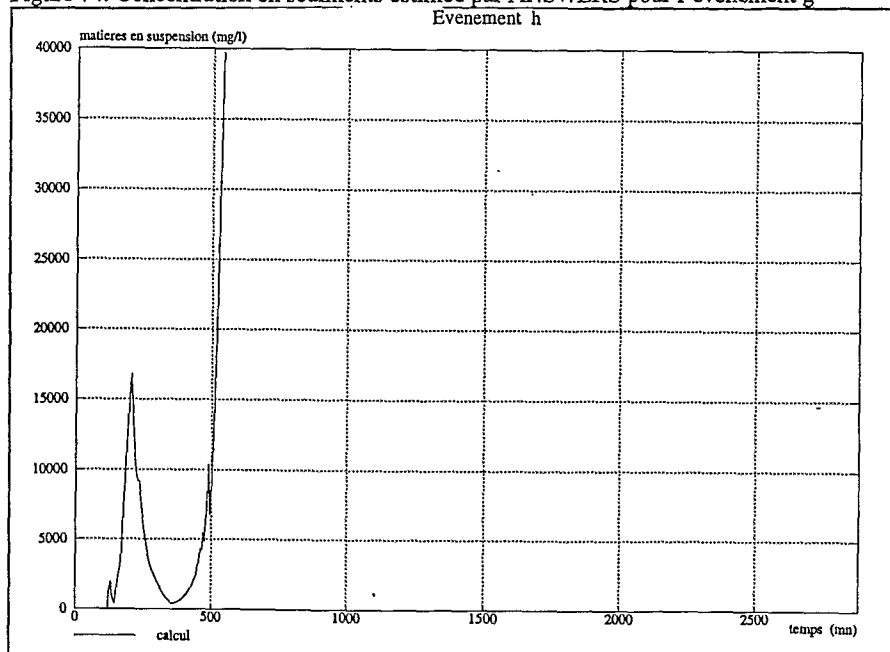


Figure 75. Concentration en sédiments estimée par ANSWERS pour l'événement h

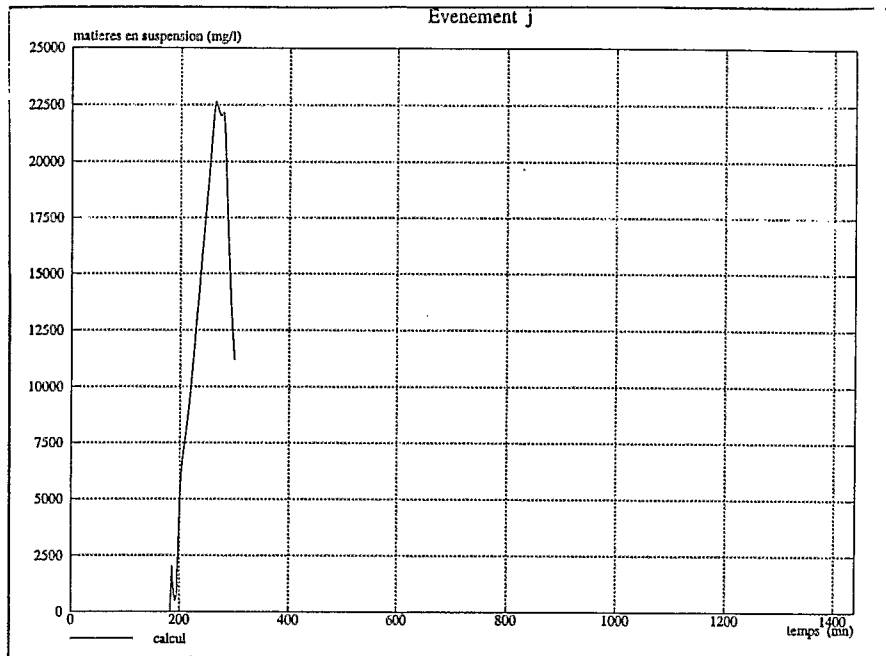


Figure 76 Concentration en sédiments estimée par ANSWERS pour l'événement j

CONCLUSION

CONCLUSION

La démarche adoptée conduit à un certain nombre de résultats, de réflexions et de perspectives.

Les microparcelles sous pluies simulées et naturelles, ont permis de :

- mettre en évidence les principaux facteurs explicatifs du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de la parcelle. Pour le ruissellement ce sont les paramètres d'infiltration K_{GA} , h et la hauteur de la lame d'eau précipitée; pour l'érosion, le coefficient de ruissellement et les taux des différents types de couvert végétal (culture en cours, résidus).

- comparer vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion 3 types de préparations du : labour à la charrue à soc à 50 cm de profondeur, labour à la charrue à disques à 20 cm et *semis direct*.

1. *l'infiltrabilité des eaux de pluie sur un sol nu préparé à la charrue à soc s'en trouve augmentée par rapport à la préparation à la charrue à disques (coefficient de ruissellement 25% pour la préparation à la charrue à soc et de 57% à la charrue à disques) et les pertes en sol diminuées (64 g/m² pour la préparation à la charrue à soc et de 190 g/m² à la charrue à disques). Le labour à la charrue à soc à 50 cm améliore la porosité et la rugosité de la surface du sol et ralentit sa dégradation ;*
2. *lorsque le sol est nu préparé avec la charrue à disques on constate que la perte en sol est forte (190 g/m²). Ce type de travail du sol accroît l'affinement du sol en surface ;*
3. *le ruissellement d'un sol préparée avec le semis direct au moment du semis est plus élevé que dans le cas d'une préparation à la charrue à soc, par contre trois mois après ils sont du même ordre de grandeur (coefficient de ruissellement 56%). Dans le cas d'une préparation à la charrue à disques le ruissellement de ces deux préparations est du même ordre de grandeur depuis le moment du semis (56%). Le sol préparé avec le semis direct ne connaît pas de dégradation de sa surface, comme on peut l'observer avec les deux autres préparations. Le semis direct offre la meilleure protection du sol vis-à-vis des gouttes de pluies grâce aux résidus de la culture antérieure, laissés à la surface. C'est avec ce système que l'érosion est sans doute la plus faible.*

Ces résultats permettent de conclure que le *semis direct* est sans aucun doute la préparation du sol qui réduit le plus l'érosion et probablement le ruissellement à l'échelle de microparcelles et des parcelles de 77 m². Les données dont nous disposons pour le moment sont cependant non suffisantes pour établir une comparaison à l'échelle du bassin. A cette échelle, nous disposons uniquement du point de vue des agriculteurs. Faut-il y croire ou s'agit-il d'un engouement pour le *semis direct* ? Incontestablement, il s'agit d'une dynamique récente et forte. Dans cette région la surface cultivée en *semis direct* a augmenté de 40 à 90% entre 1990 (début du Projet Potiribu) et 1994. C'est un record, sans doute, et les coopératives agricoles locales sont largement responsables de cet enthousiasme. La question de l'effet de mode dans un groupe social prompt aux adaptations et aux changements ne peut être éludée.

Les résultats obtenus confortent ceux de Roth au Paraná. La protection de la surface du sol par les résidus de la culture antérieure, très élevée dans le contexte de l'étude et dont la couverture peut atteindre un taux de 100%, est le principal facteur à évoquer pour expliquer la très faible érosion dans les parcelles travaillées ainsi.

Ils justifieraient un suivi plus exhaustif du taux de résidus nécessaire pour garantir à la surface du sol une protection efficace. Les effets des résidus sur le comportement hydrodynamique de ces sols très particuliers mériteraient d'être analysés pour des parcelles où le *semis direct* serait déjà implanté depuis plus de trois ans. Nous pourrions dès lors mieux évaluer l'influence de la macroporosité due à la faune du sol et au développement en profondeur des racines du fait de l'absence de labour du sol et de la diminution du passage des machines.

L'effet du *semis direct* sur les ravinements, qui paraissent nettement diminués d'après les enquêtes et les observations rapides que nous avons pu faire en décembre 1994, mériterait également d'être suivi. Celui-ci est-il diminué globalement en volume, ou les saignées sont-elles localisées différenciellement ? Si l'infiltration est favorisée, on va l'eau qui s'infiltré ?

Enfin, les effets du *semis direct* sur l'érosion et le ruissellement pourrait être suivi à l'échelle du bassin en profitant du fait qu'aujourd'hui l'ensemble du bassin de Donato est cultivé de cette façon, on aurait ainsi des éléments pour comparer l'érosion et le ruissellement avant et après son adoption.

L'importance de l'évolution de la structure des sols cultivés et des effets sur le comportement hydrodynamique du sol, à travers l'estimation de la **conductivité hydraulique à saturation (K_{GA})** a conduit à ébaucher une typologie de l'infiltrabilité du sol tenant compte du type de préparation du sol et de la durée écoulée depuis cette date, des états de surface et de l'état hydrique initial. Elle reste à compléter et les valeurs elles-mêmes appréciées à partir de l'équation de Green et Ampt (1911) mériteraient d'être évaluées plus directement à partir de mesures in situ.

D'une manière générale, la conductivité hydraulique des sols est largement utilisée dans les modèles qui estiment le ruissellement et l'érosion à l'échelle de bassins versants, et « un paramètre au quelle les modèles sont sensibles ». La démarche suivie nous a permis d'établir un lien entre les microparcelles de 1 m² et le bassin versant, en utilisant la typologie établie à partir des simulations de pluies.

Les données acquises ont été utilisées pour tester deux **modèles** d'érosion conçus à l'échelle du bassin : l'un empirique, dérivé de l'USLE, la MUSLE et l'autre à base physique ANSWERS. Les résultats ont montré que les simulations par le modèle MUSLE surestiment les charges solides mesurées. Ceci s'explique en partie par le fait que ce modèle est ponctuel et qu'il ne prend pas en compte la distribution des différents états de surface du sol sur le bassin.

Par contre, les tests du modèle ANSWERS indiquent qu'une approche typologique de la distribution de l'infiltrabilité permet de simuler relativement bien le ruissellement du bassin. Pour l'érosion, le très petit nombre de données de charge solide de la rivière ne permet pas de conclusions sur l'efficacité du modèle.

En complétant et améliorant la typologie proposée, il serait possible de spatialiser l'infiltrabilité du sol, démarche sans doute indispensable à l'amélioration des modèles distribués à l'échelle du bassin versant.

Enfin, il nous faut revenir sur le fonctionnement érosif de ce type de bassin versant du plateau basaltique occupé par des grandes cultures et sur les objectifs mêmes du projet POTIRIBU qui concernaient surtout les études de dimensionnement de petits barrages destinés à la production hydroélectrique, principale source d'énergie du Brésil.

Ce **type de sol, les *latossolos roxos*, sont très particuliers**, très profonds, très argileux, mais avec un important drainage interne grâce à une structure en micro agrégats très stable (pseudo sables). En l'absence d'OPS, l'eau circule facilement dans les macropores et s'infiltré verticalement. L'eau infiltrée est conduite jusqu'au réseau hydrographique du fait d'un horizon de blocage constitué de matériau humide et plastique présent dans la toposéquence d'Anfiteatro juste au dessus du basalte altéré, que l'on trouve à des profondeurs comprises entre une dizaine de centimètres et plus de 8 m. Ce front d'altération apparaît d'ailleurs comme le niveau de base des ravines et des cours d'eau. Ce niveau bloque l'infiltration verticale et favorise la circulation latérale de l'eau vers les résurgences, dans le réseau hydrographique et à l'exutoire du bassin.

Le bilan annuel montre que globalement ce type de sol a un **ruissellement** très faible (2%). Normalement seules les précipitations supérieures à 30 ou 40 mm sont capables de générer un ruissellement. Mais, quand ces précipitations tombent sur un sol déjà humide, dégradé en surface et faiblement couvert par la végétation, les dégâts peuvent être importants, particulièrement quand les précipitations journalières dépassent les 80 mm, qui dans cette région, n'est pas si rare. Ce type de sol est un peu dublivalent, d'un coté le ruissellement global est faible, les coefficients étant de l'ordre de 2%, de l'autre les marques d'érosion pour les événements les plus importants sont importantes (dépôts, ravinements, charge solide des cours d'eau).

Et le **système de banquettes**? Il nous paraît que ce système permet de diminuer l'érosion au sein des parcelles agricoles, mais reporte le problème sur les bords de pistes et aux limites des propriétés. L'eau qui devrait s'infiltrer, au contraire est conduite en partie, hors des parcelles à travers les drains des banquettes. A notre sens ce système ne paraît pas particulièrement efficace pour réduire l'érosion. Actuellement, il ne reste plus de banquettes dans ce bassin, les agriculteurs pratiquent le *semis direct* sans les banquettes.

Il est nécessaire de s'interroger sur **l'origine des charges solides des cours d'eau**. L'érosion à l'échelle des parcelles est forte et ne peut pas être négligée (moyenne de $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les microparcelles travaillées de manière conventionnelle). Sa prise en compte est largement relayée par les différents acteurs : professionnels de l'agriculture, collectivités, organismes de recherches. A l'échelle du bassin l'érosion est d'autant plus conséquente que la collecte du ruissellement est assurée par un réseau très efficace qui comprend les drains de rebord des banquettes, les ravines en limite de propriétés et en bord de routes, le tout débouchant dans le réseau hydrologique permanent.

Cependant, l'érosion linéaire en ravine n'a fait l'objet jusqu'à présent que de peu d'attention. L'évaluation faite sur la principale ravine (section $> 70 \text{ m}^2$ et extension de plusieurs dizaines de mètres) démontre son importance (7 t/ha et par an si on rapporte les volumes érodés à la surface en amont). Ces ravinements sont fréquents dans la région et généralement les agriculteurs délaissent ces terres au profit du pâturage, ce qui accélère encore l'érosion au contact du réseau hydrographique. Si on compare les chiffres, l'érosion en ravine est plus importante. On a mesuré seulement la partie la plus active de la ravine du Donato, il reste encore la partie amont de la ravine et tout le réseau des incisions qui n'ont pas été mesurées. On sait bien qu'on ne peut pas extrapoler les mesures faites à l'échelle de la microparcelle pour le bassin, parce qu'il est clair qu'une partie de cette érosion se déposera sur le bassin avant d'arriver à l'exutoire du bassin. Le chiffre à considérer à l'échelle du bassin pour l'érosion laminaire est sans doute inférieure aux $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Cette discussion conduit à démontrer la nécessité de mener davantage de recherches à l'avenir sur le ravinement et les différents types de ravines. Celles qui ont été recensées n'ont pas nécessairement la même origine et leur dynamique n'est pas vraisemblablement pas gouvernée par les mêmes combinaisons de processus.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 Université Paris 6, 336 p.
- Asseline J., Valentin, C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltrômetro à aspersion. *Cah. ORSTOM, série Hydrol.*, **15**, no.4, pp. 321-350.
- Auzet A. V., Boiffin J., Papy F., Maucorps J. et Ouvry J. F. (1990) , An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris basin, France. In, J. Boardman, I D L Foster et J. A. Dearing (eds), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Willey & Sons Ltda, pp 383-400.
- Auzet A.V., Boiffin J., Ludwig B. (1995). Concentrated flow erosion in cultivated catchments : influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms*, **20**, pp. 759-767.
- Bartz H. (1994). Depoimento de agricultor. In, IV Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha, Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha et Clube Amigos da Terra de Cruz Alta (coord), Cruz Alta, 308 p., pp. 65-81.
- Beasley D.B. (1977). ANSWERS - A mathematical model for simulation the effects of land use and management on water quality. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, 266 p.
- Beasley D.B. (1986). Distributed parameter hydrologic and water quality modelling, in Giorgini. In, A. et Zigales, F. (eds), *Agricultural Nonpoint Source Pollution : Model selection and application. Developments in Environmental Modelling*, **10**, Elsevier Science Publishing Company Inc., Amsterdam/New York.
- Beasley D.B., Huggins L.F., Monke E.J. (1980). ANSWERS : A model for Watershed Planning. *Transactions of the ASAE*, **23**, no.4, pp 938-944.
- Beasley D.B., Huggins L.F. (1982). ANSWERS - Users manual. Purdue University, West Lafayette, IN, 54 p.
- Bellinazzi Junior R., Bertonili D., Lombardi Neto F. (1981). Ocorrência da erosão rural no Estado de São Paulo. In, Simpósio de Controle de Erosão, 2°. São Paulo, nov. 1981. Anais. São Paulo, ABGE, pp.117-137.
- Beltrame L.F.S., Louzada J.A.S, Lanna A.E.L., Cauduro F.A., Da Rosa S.M., de Miranda T.L.G. (1994). Evapotranspiração no Rio Grande do Sul. *Recursos Hídricos*, Publicação **31**, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 49 p.
- Bertoni J., Lombardi Neto F., (1975) , Conservação do solo. Piracaba, Livro ceres., 392 p.
- Bertoni J., Lombardi Neto F. (1985). Erodibilidade dos solos paulistas. *Boletim técnico IAC* **27**, Campinas.
- Bertoni, J. (1959). O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. *Bragantia*, Campinas, **18** (1): pp 113-140.
- Bertrand A.R. et Parr, J.F. (1961). Design and operation of the purdue sprinkling infiltrometer. *Purdue Univ. Res. Bul.* **723**.
- Boiffin J., Papy F. (1988). Prevision et maîtrise de l'érosion : Influence des systèmes de culture. *Perspectives Agricoles*, **122**, pp. 93-98.
- Bonetti L.P. (1991). FUNDACEP 1971-1991, *Vinte anos gerando tecnologia para o produtor cooperativo*, FUNDACEP (ed), Cruz Alta, 33 p.
- Bordas, M.P., Borges, A.L. (1990). Escolha de bacias representativas e experimentais para estudo da erosão no planalto basáltico sulamericano. Porto Alegre: IPH/UFRGS/7f. Trabalho apresentado no 8. Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do solo, 1990 , Londrina.
- Bordas, M.P., Lanna, A.E., Semmelman, F.R. (1988). Evaluation des riches d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques élememntaires. Sediments budgets. In, Proceedings of the Porto Alegre Symposim, decembre 1988, *IAHS Publ.* no.174.
- Borges G. O. (1993). Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In, EMBRAPA, FECOTRIGO, ABC (coords), *Plantio Direto no Brasil*, Aldeia Norte (ed), Passo Fundo, pp 13-17.

- Boulet R., Leprun J. C., Chevallier P., Sanchez y Vacas A. M. (1993). Reconnaissance pedologique sur les bassins du Projet Potiribu, Rapport provisoire, N. P.
- Brasil. (1973). Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisas Pedológicas. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul, Recife, Boletim técnico no 30, 431 p.
- Bryan R. B. (1987). Processes and significance of rill development. In, Bryan (ed), Rill erosion : processes and significance, *Catena supplement* 8, Braunschweig-Germany, Leuven, 160 p., pp 1-15.
- Callai J. (1987). *A agricultura na Historia de Ijuí*. UNIJUI (ed), Ijuí, 28 p.
- Carrol, C., Halpin, M., Bell, K., Mollison, J. (1995). The effect of furrow length on rain and irrigation-induced erosion on a vertisol in Australie. *Austr. J. Soil. Res.*, Australie, 1995, 33, pp.833-850.
- Carsel D.K., Parrish R.S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24, pp. 755-769.
- Casenave A. et Valentin C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. ORSTOM, CEE, 202 p. + ann. + photos.
- Casenave A., (1982) , Le mini-simulateur de pluies . Condition d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 19, no 4, pp. 229-252.
- Castro N. M. R., Chevallier, P., Sanches y Vacas, A. (1990). Um método manual simples para coletar e tratar amostras de sedimentos em suspensão em pequenos rios. In, Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 1, 1991 , Ouro Preto, Anais, pp. 70-72.
- Chevallier P. (1983). L'indice des précipitations antérieurs. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 20 no 3-4, pp. 179-190.
- Chevallier P. (1990). Complexité hydrologique du petit bassin versant : exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, ORSTOM, *Collection études et thèses*, Paris, 331 p.
- Chevallier P. (1991). As precipitações na regio de Cruz Alta e Ijuí - RS - Brasil. *Recursos Hídricos*, Publicação 24, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 25 p.
- Chevallier P., Castro N. M. R. (1991). As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil). In , Simpósio Brasileiro de Recursos Hidricos, 10., 1991 , Rio de Janeiro, Anais 3, pp. 183-192, Rio de Janeiro : ABRH/APRH.
- Chevallier P. et Dhein R. A. (1993). Les précipitations exceptionnelles des 26 et 27 mai 1992 dans la région d'Ijuí (Rio Grande do Sul, Brésil). *Sécheresse* 4, pp. 159-164.
- Dedecek R.A., Resck D.V.S., Freitas de E. (1986). Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em latossolo vermelho-escuro dos Cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 10, Campinas pp. 265-272.
- De Roo A.P.J., Hazelhoff L., Burrough P.A. (1989). Soil Erosion Modelling Using ANSWERS and Geographical Information System. *Earth Surf. Process. Landforms*, 14, pp 517-532.
- De Roo A.P.J., Riezebos H.Th. (1992). Infiltration experiments on loess soils and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. Cremlingen-Germany, *Catena*, 19, pp. 221-239.
- De Roo A.P.J. (1993). *Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using geographical information systems : Validity and applicability of the ANSWERS model in two catchments in the loess area of South Limburg (The Netherlands) and one in Devon (UK)*. Nederlandse Geographische Studies, 295 p.
- Derpsch R., Roth C. H., Sidiras N., Köpke U. (1991). *Controle da erosão no Paraná, Brasil : Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, 272 p.

- Eltz F. L. F., Cassol E. A., Scopel I., Guerra M. (1981). Perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais em solo Laterítico Bruno Avermelhado Distrófico (São Jerônimo), sob chuva natural. Resultados dos primeiros cinco anos, *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, **8**, pp 117-125.
- Eltz F. L. F., Cassol E. A., Abrao P. U. R., Guerra M. (1984). Uso e manejo do solo e as perdas por erosão no solo Podzólico Vermelho Amarelo (São Pedro) sob chuva natural. Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do solo, IV, Campinas, 24 à 29 de julho de 1982, Resumos : SBCS, CATI, IAC, *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, **8**, pp 245-249.
- Geologia do Brasil. (1984). Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1: 2 500 000. Coord. Carlos Schobbenhaus, Diógenes de Almeida Campos, Gilberto Ruy Derze, Haroldo Erwin Asmus, Brasília, Departamento Nacional da produção mineral, 500 p.
- Govers, G. (1987). Spatial and Temporal Variability. In, Rorke B. Bryan (ed), Rill Development Processes at the Huldernberg experimental Site, Rill Erosion-processus and significance, *Catena* supplement **8**, Braunschweig-Germany, Leuven, 160 p., pp.17-34.
- Green W.H. et Ampt C.A. (1911). Studies on soil physics. Flow of air and water through soils, *J. Agr. Sci.*, **4**, pp.1-24.
- Hammond R., McCullagh P.S. (1980). Quantitative techniques in geography. An introduction. Second Edition, Clarendon Press, Oxford.
- Horton R.E. (1940). Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Ssci. Soc. Amer. Proc.*, **5**, pp. 339-417.
- IBGE (1986). Levantamento de recursos naturais, **33**, Feuilles SH 22, Porto Alegre et part des feuilles SH 21 Urugaiana et SI 22 Lagoa Mirim. Projeto Radam Brasil, 792 p.
- Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo (1987). Orientação para o combate a erosão no Estado de São Paulo. **3**. Bacia do Peixe-Parapanema.
- IPAGRO (1989). Atlas agroclimático. Rede meteorológica. Estado do Rio Grande do Sul, **3**, mapa no 232.
- Knisel, W.G. (ed.) (1980). CREAMS : A field scale model for chemicals runoff and erosion from agricultural management systems. U.S. Dept. Agric. Conservation Research Report no. 26.
- 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. Intern. Soil Sc. Soc. Moscow*, **67**, Part. A pp. 17-21.
- Lacouture J. (1992). Jésuites, T. 1. Les conquérants. ch. XIII. Une théocratie chez les Guaranis. Le seuil, Paris.
- Lautert J.A. (1990). PCE, Programa para cálculo de erosividade. IPH-UFRGS.
- Leinz V. (1949). Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. Fac. Fil. Ciências e Letras da USP, Bol. CIII, Geologia **5**, pp 1-61.
- Leprun J.-C. (1981). A conservação, a erosão e o manejo de solo no Nordeste Brasileiro. In , *Recursos de Solos*, **15**, Sudene, Recife.
- Leprun J.-C., Silveira C.O.da, Sobral Filho R.M. (1986). Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **22**, n°2, pp. 223-233.
- Leprun J.-C (coord.) (1994). ORSTOM - Dimensionnement et gestion de petits ouvrages hydrauliques au sud du Brésil, projet Potiribu. In, *Brésil, trente ans de coopération scientifique*, ORSTOM, Ed. du cinquantenaire, Paris, pp. 391-398.
- Ludwig B., Boiffin J., Chadoeuf J. et Auzet A.V. (1995). Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments, *Catena*, **25**, pp. 227-252.

- Ludwig B., Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., King D., Chadoeuf J. (1996). Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etudes et Gestion des Sols*, 3, 1, pp. 53-70.
- Lugon C. (1968). A República comunista cristã dos guaranis - 1610/1768. *Série Ecumenismo e Humanismo*, 12, Civilização Brasileira (ed), Rio de Janeiro, 347 p. Traduit par Alvaro Cabral (titre original : La republique communiste chrétienne des guaranis - 1610/1768).
- Maak R. (1952). Die Enturcklung des Gondwana-Schichten Suedbrasilien und ihre Beziehungen zur Karri-Formation Suedafrikas. *Int. Geol. Cong.* 19, Alger, symp sur les séries de Gondwana, pp. 339-372.
- Maak R. (1968). *Geografia física do Estado do Paraná*. Banco Des. Paraná, UFPR e IBTP, Curitiba. 350 p.
- Marquard D.W. (1963). An algorithm for least square estimation of non linear parameters. *J. of the stat. compt. sectio*, pp. 57-65.
- Masson J.M. (1971). L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthode expérimentale pour l'étude des quantités de terre érodée à l'échelle du champ. Thèse Doct. Int. Univ. Sciences et techniques du Languedoc, CNRS, n° AO 5445, 213 p.
- Melatti J. C. (1938). *Índios do Brasil*. São Paulo, Hucitec, 3ème édition 1980, 232 p.
- Mendiondo, M. E. (1995). Integração das escalas hidrológicas nas sub-bacias embutidas do Rio Potiribu, RS. Porto Alegre : UFRGS - Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Diss. Ms. Sci. Engenharia Civil, 248 p.
- Mietton, M. (1988). Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de Savane. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 511 p. + 266 p. anexes.
- Morel-Seytoux H.J (1973). Pour une théorie modifiée de l'infiltration, 2ème partie : Comment? *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, 10, n°2, pp. 185-194.
- Muxart T, Cosandey C., Billard A., Valadas B. (1987). Dynamique des versants et occupation humaine dans les cévennes (Montagne du Lingas). *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, Paris, pp. 1-40.
- Nimmer E. (1979). Climatologia da Região Sul. In, IBGE (ed), *Climatologia do Brasil*, 2 ed., Rio de Janeiro, pp 195-264.
- Oliveira J. B., Jacomine P.K.T., Camargo M.N. (1992). *Classes Gerais de solos do Brasil : guia auxiliar para seu reconhecimento*, Jaboticabal, FUNEP, 201 p.
- Péguy, C. P. (1970). *Précis de climatologie*. Paris, Masson et cia (eds), 468 p.
- Pébayle R. (1977). Les gauchos du Brésil : Eleveurs et agriculteurs du Rio Grande do Sul. *Travaux et documents de géographie tropicale*, 31, CEGET, CNRS.
- Puhl J. I. (1990). Cultura Indígena e a Evangelização. *Cadernos Culturas oprimidas e Evangelização no RS*, VI Encontro Intereclesial de CEBs/RS, Rio Pardo. 15 p.
- Reichardt Filho L., Dhein R. A. (1990). *Um Histórico da Agropecuária Conservacionista do Solo em Ijuí*. Ijuí, 74 p.
- Risso A. (1992). Obtenção de parâmetros da função de sedimentos utilizando sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas. Porto Alegre : UFRGS-Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Diss. Mestr. Engenharia Civil.
- Ritter J.B. (1992). Application of field infiltration data to hydrologic model parameterization : an example from drainage bassins disturbed by surface mining, *Journal of Hydrology*, 134, pp. 173-202.
- Roloff G. (1983). Quantificação da infiltração em seis solos do Paraná através de simulação de chuva. XIX Congr. Brasileiro de Ciência do Solo, Curitiba, Brasil.
- Roose E.J. (1973). Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical, ORSTOM, Abidjan, Thèse Doct. Ing., Fac. Sc. Abidjan, 1973, n°20, 125 p.

- Roose E.J. (1977). Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et documentations de l'ORSTOM*, Paris, 108 p.
- Roose E.J., Arrivets J. et Poulain J.F. (1974). Etude du ruissellement, du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta. Bilan de trois années d'observatin à la station de Saria. Rapport ORSTOM-Abidjan - IRAT-Haute-Volta, 83 p.
- Rossignol D. (1990). Plugraph, logiciel de traitement de données pluviographiques. ORSTOM, Pointe-à-Pitre (Guadeloupe).
- Roth C. H. (1992). Soil sealing and crusting in tropical south america. In, Sumner M.E., Stewart, B.A (eds), *Soil Crusting - chemical and physical processes*, Lewis publishers, pp. 267-297.
- Roth C. H., Henklain J. C. et Farias G. S. (1985). Avaliação do tamanho de gotas de chuva natural e simulada para o norte do Paraná, *Rev. Bras. Ci. Solo*, **9**, pp 171-174.
- Roth C. H., Meyer B., Frede H. G. et Derpsch R. (1986). The effect of different soybean tillage systems on infiltrability and erosion susceptibility of an oxisol in Paraná, Brazil. *J. Agronomy & Crop Science*, Paul Parey Scientific Publishers, Berlin and Hamburg, **157**, pp 217-226
- Roth C. H., Vieira M. J., Derpsch R., Meyer B. et Frede H. G. (1987). Infiltrability of an oxisol in Paraná, Brazil as influenced by different crop rotations, *J. Agronomy & Crop Science*, Paul Parey Scientific Publishers, Berlin and Hamburg, **159**, pp 186-191.
- Roth C. H., Meyer B., Frede H. G. et Derpsch R. (1988). Effect of mulch rates and tillages systems on infiltrability and other soil physical properties of an oxisol in Paraná, Brazil. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, *Soil & Tillage Research*, **11**, pp 81-91.
- Sartori L. P., Maciel Filho C, Menegoto E. (1975). Contribuição ao estudo das rochas vulcânicas da bacia do Paraná na região de Santa Maria, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, **5**, no 3, pp. 141-159.
- Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul (1986). *Erosão do solo - Influência do uso agrícola, do manejo e preparo do solo*. E. A. Cassol (ed), Publicação IPRNR N°15, Porto Alegre, 40 p.
- Secretaria General de la Organizacion de los Estados Americanos (1969). Cuenca del rio de la Plata. Estudio para su planificacion y desarrollo. Inventario de Datos Hidrológicos y Climatológicos. Washington, D.C.
- Sidiras N, Roth C.H. (1987). Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an oxisol. *Soil tillage Res.*, **9**, pp 161-168.
- Silveira G.L. (1982). Erosão do solo na encosta do planalto basáltico no Rio Grande do Sul. Representatividade dos parâmetros envolvidos na produção de sedimentos, Porto Alegre : UFRGS-Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Diss. Mestr, Engenharia Civil.
- Smith M. (1991). Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO quidelines for prediction of crop water requirements, *FAO*, Rome., 45 p.
- Snelder, D.J., Bryan, R.B. (1995). The use of rainfall simulation tests to asses the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District , Kenya. *Catena* **25** , 1995 , pp 105-116.
- Strahler A.N. (1984). *Geographie física*, Omega S.A. (ed), Barcelona, 767 p.
- Swanson N.P. (1965). Rotating-boom rainfall simulator. *Trans. ASAE*, **8** (1) , pp. 71-72.
- Théry H. (1989). *Le Brésil*, Masson (ed.), Paris. 244 p.
- Valentin C. (1981). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agdez-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3è cycle, Univ. Paris VII, *Colection études et thèses*, ORSTOM, 1985 , 259 p.
- Vauclin M., Chopart J.-L. (1992). L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *L'agronomie Tropicale*, **46** (4), pp. 259-270.

- Viani J.P. (1986). Contribution à l'étude expérimentale de l'érosion hydrique. Thèse de doctorat no. 641, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 240 p.
- Williams J.R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association, 10, 1975, 2, no.5, pp. 965-974.
- Williams J.R. (1977). Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. In , Paris Symposium, 1977, Erosion and solid matter transport in inland waters, Wallingford : *IAHS*. 352 p., pp. 168-179.
- Williams J.R. et Berndt, H.D. (1972). Sediment yield computed with universal equation. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, New York, 98, no.12, pp. 2087-2099.
- Wischmeier W.H (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation, *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 23, pp. 246-249.
- Wischmeier W.H (1962). Rainfall erosion potential, Geographic and location differences of distribution.. *Agr. Eng.*, 43, pp. 212-215.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1960). A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. In , International Congress soil Science, 7, Madison, 1, pp. 418-425.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning., *Agricultural Handbook 537*, Science and Education Administration, USDA, Washington D.C.
- Zamberlam J., Zamberlam R. O. (1991). *Pejuçara - suas origens na Colonia Visconde de Rio Branco - 1899 a 1930*, Pejuçara, 123 p.
- Zhang X.C., Nearing M.A., Risse L.M. (1995). Estimation of Green-Ampt conductivity parameters : Part I. Row Crops, *Transactions of the ASAE*, 38 , no 4 , pp. 1069-1077.

ANNEXES



Annexe 1 : Analyses chimiques et granulométriques de trois sites au bassin du Donato.

		Granulométrie					Chimie												
		Sable grossier en % (2 à 0,2 mm)	Sable fin en % (0,2 à 0,05 mm)	Limon en % (0,05 à 0,002 mm)	Argile en % (< 0,002 mm)	Total	pH	P (ppm)	K (ppm)	Matière Org. (%)	Al (me/dl)	Ca (me/dl)	Mg (me/dl)	S (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)	Mn (ppm)	Fe (%)
	0-10	14	11	21	54	100	6.7	14	262	3.0	0.0	7.8	3.1	10.1	2.6	4.2	0.8	3	0.11
	10-20	12	10	18	60	100	5.8	12	48	2.0	0.0	5.6	1.8	14.8	2.7	10.7	0.4	30	0.12
	20-30	10	9	18	63	100	5.6	3	28	1.6	0.2	4.5	1.6	13.3	2.2	11.6	0.4	45	0.11
Antoninho	30-40	8	7	14	71	100	5.5	1	20	0.7	0.1	3.5	1.1	25.0	0.5	8.2	0.4	30	0.09
	50-60	7	6	9	78	100	5.1	1	12	0.6	0.7	3.0	0.8	45.3	0.5	7.6	0.5	23	0.26
	70-80	6	4	10	80	100	5.1	1	16	0.6	1.2	1.9	0.6	42.2	0.3	6.8	0.3	18	0.24
	90-100	5	4	10	81	100	5.2	2	12	0.4	1.2	1.6	0.6	40.6	0.4	6.2	0.5	23	0.13
	0-5	24	15	5	56	100	5.4	5	71	2.4	0.0	3.1	1.4	6.2	0.7	8.0	0.2	15	0.16
	10-18	19	13	8	60	100	5.5	4	68	2.4	0.0	2.8	1.4	6.0	0.3	6.3	0.1	15	0.18
Anfiteatro	18-25	15	11	6	68	100	4.8	1	21	1.8	0.7	0.8	0.5	24.3	0.1	5.2	0.1	34	0.18
	30-35	14	9	7	70	100	4.7	1	12	1.5	0.8	0.3	0.3	9.0	0.1	5.0	0.1	47	0.19
	50-55	15	9	6	70	100	4.8	1	15	1.3	0.7	0.4	0.2	8.6	0.1	4.6	0.1	47	0.18
	80-90	11	9	6	74	100	5.0	1	11	0.9	0.7	0.1	0.1	10.4	0.1	4.6	0.1	46	0.24
	0-20	10	10	10	70	100	4.5	4	49	2.8	4.0	0.5	0.3	13.9	0.8	6.1	0.2	33	0.20
	20-40	10	10	3	77	100	4.6	2	38	2.5	3.3	0.6	0.3	16.0	0.1	5.1	0.1	4	0.16
	40-60	8	9	3	80	100	4.6	1	24	2.0	3.2	0.5	0.3	23.6	0.1	5.1	0.3	2	0.16
	60-80	6	7	3	84	100	4.6	2	16	1.4	3.0	0.4	0.2	3.5	0.1	4.3	0.3	2	0.17
Pejuçara	80-100	6	7	1	86	100	4.6	1	16	1.0	2.5	0.4	0.2	2.1	0.1	3.8	0.2	4	0.15
	100-120	7	7	1	85	100	4.8	2	16	0.8	2.4	0.4	0.3	2.1	0.1	3.2	0.1	1	0.20
	120-140	6	8	4	82	100	4.8	2	16	0.7	2.0	0.1	0.1	2.1	0.1	2.8	0.2	1	0.20
	140-160	7	8	5	80	100	4.7	2	18	0.6	2.0	0.3	0.2	4.2	0.2	2.8	0.2	4	0.17
	160-180	6	8	6	80	100	4.9	2	15	0.5	1.7	0.1	0.1	1.4	0.1	2.6	0.2	2	0.18
	180-200	7	7	7	79	100	4.8	2	15	0.4	1.5	0.1	0.1	4.2	0.1	2.5	0.1	1	0.20

Annexe 2 : Fiche standardisée de L'observation des états du surface du sol.

date	
heure	
référence	
1) couver végétal	
culture	
hauteur moyenne (cm)	
taux du couvert végétal total (classes)	
taux du couvert végétal de la culture aérienne (classes)	
taux du couvert végétal des résidus (classes)	
2) rugosité	
degré d'obstruction provoqué par les mottes (classes)	
degré d'obstruction provoqué par les ondulations du terrain naturelles ou induites par les machines	
taille des mottes minimum (cm)	
taille des mottes moyenne (cm)	
taille des mottes maxima (cm)	
3) OPS	
présence ()	
absence ()	
surface (classes)	
4) microfaune	
fourmis () fourmilière ()	
larves ()	
autres	

Classes de rugosité :

classe 0 - nulle -les obstacles occupent de 0 à 5% de la surface

classe 1 - faible - les obstacles occupent de 5 à 30% de la surface

classe 2 - moyenne - les obstacles occupent de 30 à 60% de la surface

classe 3 - forte - les obstacles occupent plus de 60% de la surface

Classes de végétation et d'OPS

classe 0 - aucune OPS

classe 1 - de 5 à 20 % de la surface

classe 2 - de 20 à 40% de la surface

classe 3 - de 40 à 60% de la surface

classe 4 - de 60 à 80% de la surface

classe 5 - de 80 à 100% de la surface

Annexe 3 : Liste des jaugeages et des méthodes utilisés pour l'établissement de la courbe de tarage des bassins d'Anfiteatro et de Donato (extrait de Chevallier, 1993)

Anfiteatro

Vingt-quatre mesures de débit ont été réalisées à la station de mesure d'Anfiteatro (fig 1 et tableau I) avec des niveaux d'eau compris entre 3 et 7 cm. Ces mesures sont limitées en raison de la faible épaisseur de la lame d'eau ruisselée. Dans ces conditions, il n'est pas facile d'utiliser le micro moulinet et on a pu réaliser qu'une à trois mesures de vitesse dans la station. La hauteur maximale enregistrée est de 28 cm le 24 octobre 1992 à 13h33.

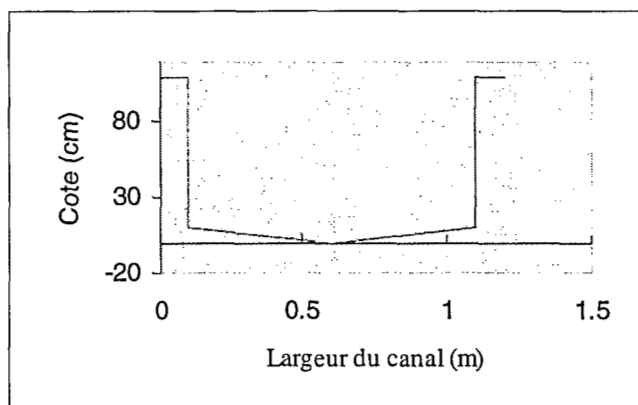


Figure 1: Section de mesure à l'exutoire d'Anfiteatro.

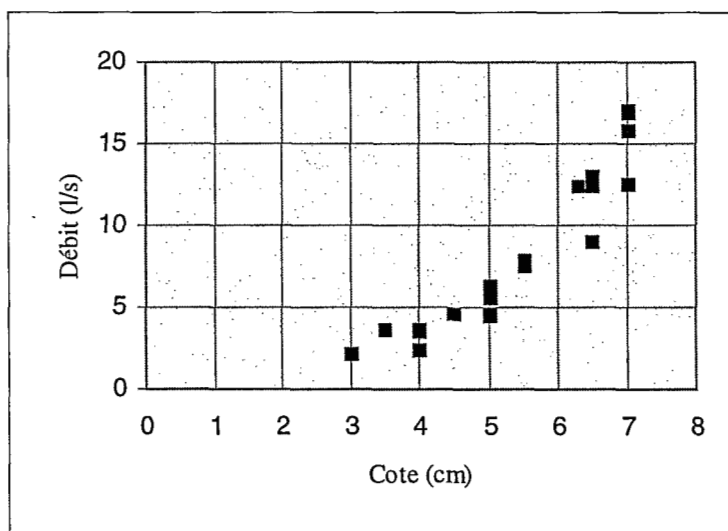


Figure 2 : Courbe de tarage hauteur-débit du bassin d'Anfiteatro (partie mesurée)

Tableau I : Jaugeages à l'exutoire du bassin d'Anfiteatro.

	date	début	fin	côte initiale (cm)	côte finale (cm)	débit (l/s)
2	08/08/92	05:34	05:40	5,0	5,0	4,54
3	08/08/92	05:43	05:47	5,0	5,0	4,46
4	08/08/92	05:50	05:53	5,0	5,0	4,61
5	10/08/92	08:40	08:46	3,5	3,5	3,60
6	10/08/92	08:45	08:46	3,0	3,0	2,19
7	10/08/92	09:05	09:10	4,0	4,0	3,55
8	10/08/92	09:10	09:15	4,0	4,0	3,65
9	10/08/92	09:15	09:20	5,0	5,0	6,21
10	10/08/92	09:55	09:58	5,5	5,5	7,62
11	10/08/92	09:58	10:00	5,5	5,5	7,70
12	10/08/92	10:01	10:03	5,0	5,0	6,38
13	10/08/92	10:50	10:53	5,0	5,0	5,64
14	01/09/92	09:07	09:12	4,5	4,5	4,64
15	01/09/92	09:12	09:14	5,5	5,5	7,98
16	01/09/92	09:14	09:21	6,5	6,5	9,04
17	01/09/92	09:22	09:24	6,5	6,5	12,6
18	01/09/92	09:24	09:27	6,5	6,5	12,5
19	01/09/92	09:27	09:29	6,3	6,3	12,5
20	01/09/92	10:10	10:14	6,5	6,5	12,6
21	01/09/92	10:14	10:25	6,5	6,5	13,0
22	01/09/92	10:25	10:26	7,0	7,0	15,9
23	01/09/92	10:28	10:32	7,0	7,0	17,1
24	01/09/92	10:32	10:36	7,0	7,0	16,9
25	01/09/92	11:01	11:11	7,0	7,0	12,6

Comme le ruissellement se fait dans un canal de section rectangulaire et de déclivité constante ($i = 0,01$) la formule classique de Manning a été appliquée.

$$Q = K_s \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

où

K_s : coefficient de Manning qui dépend de la rugosité du canal,

S : section immergée du canal,

R : rayon hydraulique,

i : déclivité du canal.

Le K_s a été estimé à 65. Cette valeur correspond à des murs réguliers en béton (Lancastre, 1972⁶), ce qui correspond à notre dispositif. La figure 2 présente la relation hauteur-débit. Les valeurs obtenues par la formule

⁶Lancastre A., (1972) , Manual de hidráulica geral. Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 412 p.

de Manning s'ajustent bien à nos mesures. La figure 3 présente la courbe de tarage (hauteur-débit) calculée de la même manière jusqu'à la cote de 30 cm. L'étalonnage (en cm) est représenté dans le tableau II.

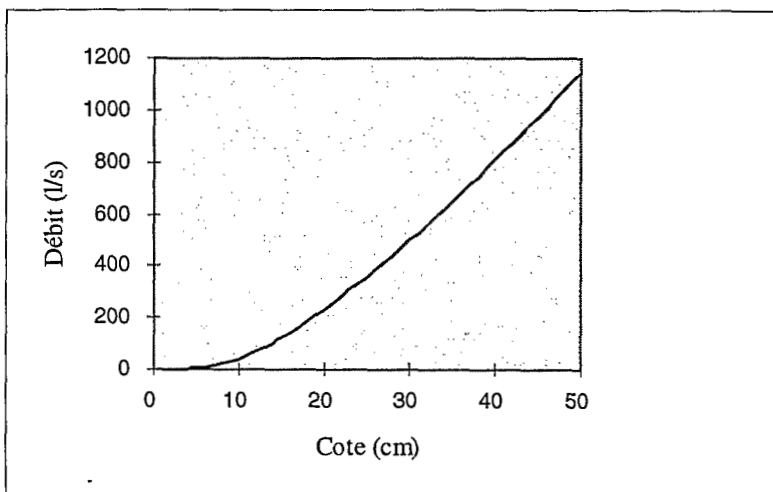


Figure 3 : Courbe de tarage niveau-débit du bassin d'Anfiteatro (partie extrapolée)

Tableau II : Etalonnage d'Anfiteatro niveau (cm)-débit (l/s).

cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	cm
0	0	0,1	0,5	1,6	3,5	6,3	10,2	15,4	21,9	30,0	0
10	39,7	51,2	66,8	83,8	102	121	141	163	185	208	20
20	231	256	281	307	333	360	387	415	443	472	20
30	501	530	560	590	621	652	683	714	746	778	30

Donato

Étalonnage

En raison de l'altération importante de la section de mesure, on va considérer deux périodes : une avant et l'autre après la construction de la section de mesure en béton.

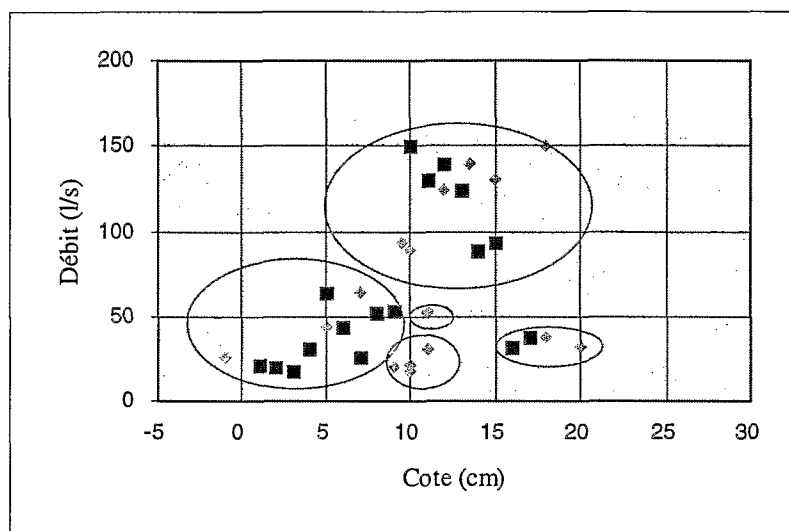


Figure 4: Groupes de mesures de débits de la première période.

Dix-sept mesures de débit ont été réalisées pendant cette période. La figure 4 donne la représentation graphique des points. On peut voir cinq groupes de mesures, chacun est probablement lié à un état différent de la section de mesure, autrement dit à un niveau différent du fond du lit. Le profil transversal supérieur n'est pas altéré (figure5). Malheureusement, entre novembre 1989 et octobre 1990 il y a eu plusieurs altérations de la station de mesure. Cette période coïncide avec une période d'étiage où les mesures de débits sont peu nombreuses. De ce fait, les données de cette période ont été écartées de la calibration.

Du début jusqu'au 09-03-1991

Tableau III: Mesures de débit réalisées à la station de jaugeage de Donato.

	date	début	fin	cote initiale (cm)	cote finale (cm)	débit (l/s)
1	13/12/89	10:50	11:20	10,0	10,0	20,8
2	20/02/90	16:07		9,0	9,0	20,6
3	22/02/90	10:08		10,0	10,0	18,3
4	23/05/90	15:00	15:25	11,0	11,0	30,5
5	26/06/90	13:30	13:57	7,0	7,0	63,5
6	31/07/90	15:40	15:56	5,0	5,0	43,5
7	03/09/90	12:28	12:42	-1,0	-1,0	25,6
8	21/11/90	15:30	16:00	11,0	11,0	51,5
9	22/11/90	10:42	11:05	11,0	11,0	52,9
10	05/12/90	16:32	16:40	24,0	18,0	150
11	05/12/90	16:40	16:45	18,0	15,0	130
12	05/12/90	16:45	16:51	150,0	135,0	140
13	05/12/90	16:51	16:55	135,0	120,0	124
14	05/12/90	16:55	17:00	12,0	10,0	88,5
15	05/12/90	17:00	17:05	100,0	95,0	93,1
16	09/01/91	08:15	08:30	20,0	20,0	32,5
17	06/02/91	10:50	11:08	18,0	18,0	38

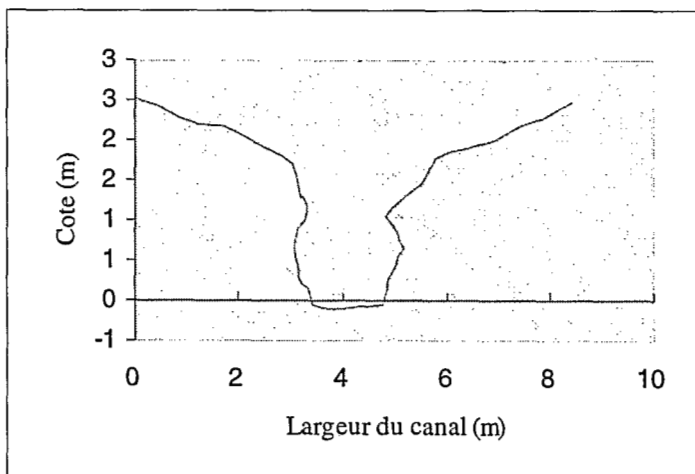


Figure 5 : Section transversale de la station de mesures du Donato avant la construction du canal en béton.

A partir de 10-03-1991

Vingt-six mesures de débit ont été réalisées à la station de jaugeage du Donato depuis la construction de la section en béton (seuil jaugeur) pour des hauteurs comprises entre 28 et 120 cm. Ces mesures présentent une grande dispersion du fait des problèmes techniques rencontrés :

- La variation rapide du niveau d'eau pendant les crues complique la mesure et en diminue la précision.
- Le micro-moulinet utilisé pour les basses eaux a eu des problèmes. Son étalonnage n'est probablement pas juste, plus particulièrement pour les gammes de vitesse de rotation importantes; comme c'est le cas pour les mesures au dessus de la base triangulaire du seuil jaugeur. En plus, le nombre de points de mesures est réduit en raison de la faible épaisseur de la lame d'eau ruisselée.
- Le volume en sédiments accumulés en amont de la section de mesure est variable, entraînant ainsi des probables changements dans le fonctionnement hydraulique de cette section.

En raison de toutes ces difficultés on a établi la courbe de tarage à partir d'une formule en utilisant les mesures réalisées. Le débit se calcule de la façon suivante (Henderson, 1966⁷ ; French, 1985⁸) :

Dans le profil triangulaire :
$$Q = \alpha \cdot h_1^{2,5}$$

Dans le profil rectangulaire :
$$Q = \alpha \cdot (h_1^{2,5} - (h_1 - H_b)^{2,5})$$

où α : paramètre hydraulique, qui dépend des caractéristiques géométriques de la base triangulaire.

h_1 : hauteur d'eau dans le seuil jaugeur ; dans notre cas, si h est la hauteur de la règle, $h_1 = h - 0,25$ (en m).

H_b : hauteur maxima du V du profil triangulaire ; $H_b = 0,30$ m.

Le coefficient α a été estimé à 8 (figure 6). Le tableau V présente la calibration (hauteur-débit) par centimètre pour l'amplitude totale du seuil jaugeur (de 25 à 270 cm de la règle).

A l'exception de la période du 26 mai au 10 juillet 1992, le ruissellement n'a jamais débordé le seuil jaugeur. Le niveau maximum atteint a été de 113 cm le 05/06/1991 à 6h04.

Au moment de la crue des 26 et 27 mai 1992, on a observé que :

- Le niveau d'eau a débordé le seuil jaugeur et a atteint la côte 321 cm le 27 mai à 12h06 ; heureusement le limnigraphe a fonctionné normalement et a enregistré toute la crue ;
- Une partie de la berge droite de la station s'est effondrée et l'eau s'est écoulé à travers le côté extérieur de la paroi droite du seuil jaugeur (figure7).

⁷Henderson F. M., (1966) , Open channel flow. Mac Millan Company, New York, 522 p.

⁸French R. H., (1985) , Open-channel Hydraulics. Mac Graw Hill Book-Co, Singapore, 706 p.

Tableau IV : Mesures de débit réalisées à la station de jaugeages de Donato

	date	début	fin	cote initiale (cm)	cote finale (cm)	débit (l/s)
19	17/04/91	17:10	17:30	31,0	31,0	4,93
21	17/06/91	13:58	14:08	35,0	32,0	17,3
22	18/06/91	23:07	23:13	70,0	65,0	1060
23	18/06/91	23:13	23:19	65,0	60,0	806
24	18/06/91	23:20	23:26	59,0	56,0	691
25	18/06/91	23:35	23:41	56,0	55,0	678
26	18/06/91	23:50	23:58	54,0	53,0	541
27	19/06/91	00:20	00:28	50,0	50,0	445
28	19/06/91	01:08	01:18	58,0	56,0	664
29	19/06/91	03:08	03:16	46,0	44,0	132
30	19/06/91	03:42	03:50	41,0	40,0	93,5
31	27/06/91	15:59	16:36	120,0	71,0	2510
32	27/06/91	16:37	16:45	70,0	58,0	630
33	27/06/91	16:54	17:08	48,0	46,0	116
35	11/03/92	07:44	07:50	29,0	29,0	16,9
36	11/03/92	07:55	08:00	29,0	29,0	17
37	01/04/92	16:10	16:20	28,5	28,0	13,3
38	01/04/92	16:20	16:25	28,0	28,0	12,1
39	03/06/92	10:40	10:50	45,0	45,0	131
40	03/06/92	10:50	11:00	45,0	45,0	124
41	18/07/92	09:30	09:31	33,0	33,0	25,8
42	24/07/92	16:20	16:36	32,0	32,0	32,4
43	15/08/92	08:18	08:35	31,0	31,0	32,5
44	20/08/92	14:46	15:08	30,0	30,0	31,7
45	01/09/92	13:18	13:25	32,0	32,0	33,9
46	01/09/92	13:32	13:43	31,5	31,5	37,3

Tableau V: Calibration de la base triangulaire de la station de mesure de Donato (l/s)

cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	cm
20						0	0,9	1,8	2,7	3,6	20
30	4,5	8,66	12,8	17	21,1	25,3	34,2	43,1	51,9	60,8	30
40	69,7	84,4	99	114	128	143	164	186	207	229	40
50	250	279	308	336	365	394	430	466	503	539	50
60	575	620	664	709	753	798	842	887	931	976	60
70	1020	1070	1120	1180	1230	1280	1330	1380	1440	1490	70
80	1540	1600	1660	1720	1780	1850	1910	1970	2030	2090	80
90	2150	2220	2280	2350	2410	2480	2550	2610	2680	2740	90
100	2810	2890	2960	3040	3110	3190	3260	3340	3410	3490	100
110	3560	3640	3710	3790	3860	3940	4010	4090	4160	4240	110
120	4310	4400	4480	4570	4650	4740	4820	4910	4990	5080	120
130	5170	5250	5340	5420	5510	5590	5680	5760	5850	5940	130
140	6020	6110	6210	6300	6400	6490	6580	6680	6770	6870	140
150	6960	7050	7150	7240	7340	7430	7520	7620	7710	7810	150
160	7900	8000	8110	8210	8310	8410	8520	8620	8720	8820	160
170	8930	9030	9130	9230	9340	9440	9540	9640	9750	9850	170
180	9950	10100	10200	10300	10400	10500	10600	10700	10900	11000	180
190	11100	11200	11300	11400	11500	11600	11800	11900	12000	12100	190
200	12200	12300	12400	12600	12700	12800	12900	13000	13100	13200	200
210	13400	13500	13600	13700	13800	13900	14000	14200	14300	14400	210
220	14500	14600	14800	14900	15000	15100	15300	15400	15500	15600	220
230	15800	15900	16000	16100	16300	16400	16500	16600	16800	16900	230
240	17000	17100	17300	17400	17500	17700	17800	17900	18000	18200	240
250	18300	18400	18600	18700	18800	19000	19100	19200	19300	19500	250
260	19600	19700	19900	20000	20100	20300	20400	20600	20700	20800	260
270	21000	21100	21200	21400	21500	21600	21800	21900	22000	22200	270

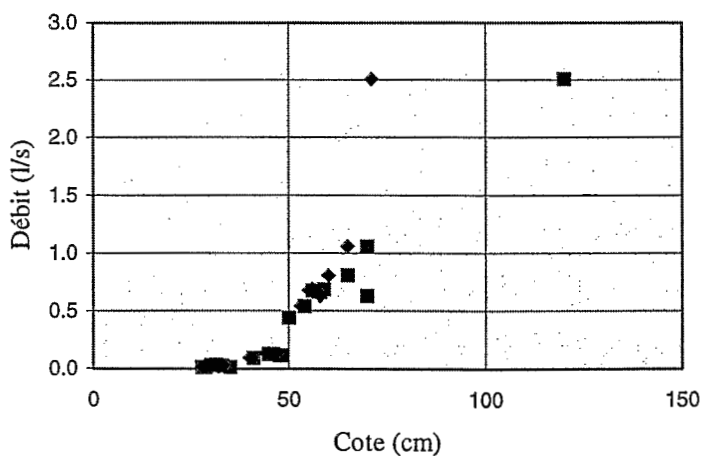


Figure 6 : Calibration du seuil jaugeur de la station du Donato

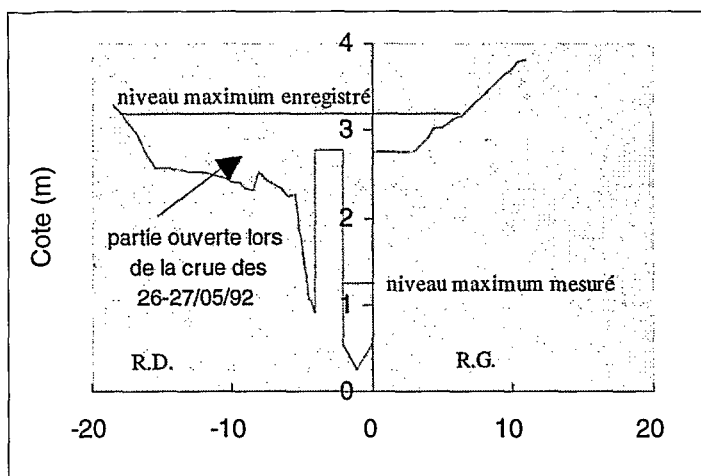


Figure 7 : Profil transversal de la station du Donato après la crue du 27 - 05- 1992

Pour évaluer les débits de cet événement et de la période suivante, il a été nécessaire de compléter le volume d'eau écoulé entre les murs du seuil jaugeur (canal principal), avec le volume d'eau écoulé sur le côté droit (canal droit) et sur le côté gauche (canal gauche). Les hypothèses suivantes ont été faites :

- La berge s'est effondrée au moment de la montée du troisième pic de crue le 27 mai après 11h15.
- Le débit d'écoulement dans les deux canaux latéraux (de gauche et de droite) est indépendant du débit du canal principal. Ce dernier continue à suivre la relation établie pour le seuil jaugeur. Par contre, les débits des canaux latéraux suivent la formule de Manning avec une valeur de 20 pour le coefficient de Manning et de 0,0045 pour la pente.

En conséquence, une nouvelle courbe de tarage a été établie pour la période du 27 mai 1992 à 11h20 jusqu'au 9 de juillet 1992 à 23h59. Le tableau VI présente la calibration par cm pour les côtes supérieures à 100 cm. En dessous de cette cote, les débits sont identiques à ceux du tableau V. Après le 9 juillet la première courbe de tarage reste valide. Les deux courbes sont présentées à la figure 8.

Tableau VI: Calibration de la station de Donato entre le 27 mai et le 9 juillet 1992.

cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	cm
100	2810	2890	2960	3040	3110	3190	3270	3340	3420	3490	100
110	3570	3650	3720	3800	3870	3950	4030	4100	4180	4250	110
120	4330	4420	4510	4590	4680	4770	4860	4940	5030	5120	120
130	5210	5290	5380	5470	5560	5640	5730	5820	5910	5990	130
140	6080	6180	6280	6380	6470	6570	6670	6770	6870	6970	140
150	7070	7160	7260	7360	7460	7560	7660	7760	7850	7950	150
160	8050	8160	8270	8370	8480	8590	8700	8800	8910	9020	160
170	9130	9230	9340	9450	9560	9660	9770	9880	9990	10100	170
180	10200	10300	10400	10500	10600	10700	10800	10900	11000	11200	180
190	11300	11400	11500	11600	11700	11800	11900	12000	12100	12200	190
200	12300	12400	12600	12700	12900	13000	13100	13300	13400	13600	200
210	13700	13800	14000	14100	14300	14400	14500	14700	14800	15000	210
220	15100	15200	15400	15500	15600	15800	15900	16100	16200	16300	220
230	16500	16600	16700	16900	17000	17100	17300	17400	17500	17700	230
240	17800	18000	18100	18300	18500	18600	18800	19000	19100	19300	240
250	19500	19600	19800	20000	20100	20300	20400	20600	20800	20900	250
260	21100	21400	21600	21900	22100	22400	22600	22900	23100	23400	260
270	23600	23900	24100	24400	24600	24900	25100	25400	25600	25900	270
280	26100	26400	26700	27100	27400	27700	28000	28300	28600	28900	280
290	29300	29600	29900	30200	30500	30800	31100	31500	31800	32100	290
300	32400	32800	33200	33500	33900	34300	34700	35000	35400	35800	300
310	36200	36500	36900	37300	37700	38000	38400	38800	39200	39600	310
320	39900	40300									

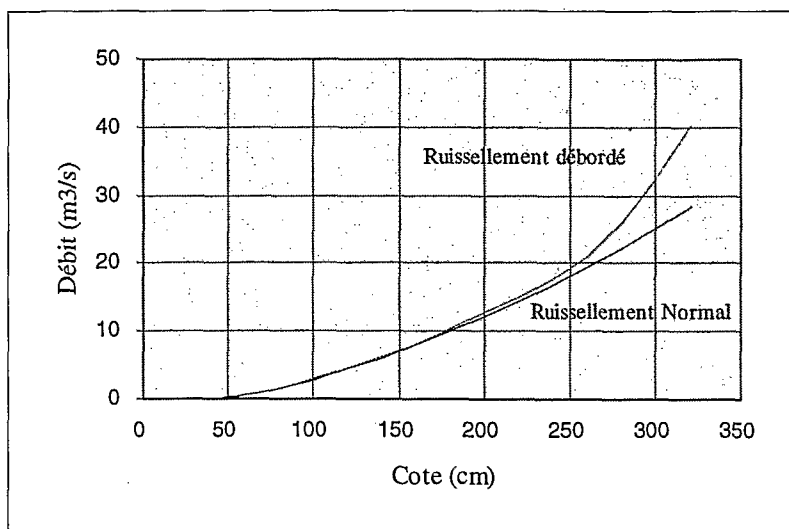


Figure 8 : Courbes de tarage de la station du Donato après la construction du seuil jaugeur.

Annexe 4: Méthode manuelle simple pour collecter et analyser les échantillons en suspension dans des petites rivières (extrait de Castro *et al.* 1990).

Echantillonneur

Cet appareil a été inspiré d'un modèle russe (Colombani, 1987⁹). Sur un axe vertical, on fixe perpendiculairement un nombre variable de bouteilles de 0,5 litres. Ces bouteilles comportent des bouchons avec deux buses en cuivre (diamètre 5 mm), une pour l'entrée d'eau et l'autre pour la sortie d'air.

Dans ces buses de cuivre sont insérés des tubes en pvc flexible dont l'extrémité est située au dessus du niveau de la rivière. Le rôle de ces tubes est d'éviter l'entrée d'eau avant que l'appareil soit positionné à l'endroit désiré.

L'opérateur doit boucher l'extrémité des tubes lorsque l'appareil est mis dans la rivière et doit la libérer lorsqu'il est bien positionné. En répétant les mesures et les échantillonnages on obtiendra rapidement une bonne représentativité des mesures.

L'analyse des échantillons donne la concentration en sédiments en chaque point de prélèvements. Pour le calcul de la charge solide dans la rivière, il est nécessaire de connaître simultanément le débit aux mêmes points de collecte.

Méthode d'analyse

Méthode de filtration rapide.

Une filtration rapide est réalisée avec une pompe à dépression. Ce dispositif de filtrage est de marque *Sartorius*. Les filtres utilisés sont commercialisés par *Milipore*. Ils ont un diamètre de 37 mm pour des micropores de 45 microns.

La méthode consiste à prendre le poids total du filtre et du porte-filtre et de les placer ensuite à l'étuve pendant 2 heures à 100 °C puis au dessiccateur 2 heures de plus. On fait la filtration et seulement après on mesure le volume d'eau extrait de l'échantillon au moment de cette filtration. Ce qui évite les transvasements d'échantillons et les pertes en précision. Après la filtration, l'ensemble filtre et porte-filtre est mis à l'étuve à 100°C pendant 24 heures.

La concentration en sédiment (mg/l) est obtenue par différence entre les deux pesées rapportée au volume d'eau de l'échantillon.

Avant les analyses définitives, un test de l'efficacité de la méthode de filtration vis-à-vis de la méthode traditionnelle par évaporation a été réalisée. Pour ce test, des échantillons d'eau et d'argile ont été préparés au laboratoire avec des concentrations connues. On a observé que pour les deux méthodes la précision augmente avec la concentration en sédiment.

Si on laisse les filtres seulement deux heures à l'étuve avant la pesée, l'erreur commise par la méthode par évaporation est de 79,8% pour une concentration de 21,3 mg/l et de 0,2% pour une concentration de 2429 mg/l. Le même ordre de grandeur a été obtenu par filtration rapide : une erreur de 78,5% et 0,01% pour une concentration de 13,5 mg/l et e 4818,6 mg/l respectivement.

Dans le deuxième test on a laissé les filtres (après la filtration) pendant 24 heures à l'étuve. Dans ce cas, les erreurs ont beaucoup diminué. Une erreur de 12,5% pour une concentration en sédiments de 4 mg/l et une erreur de 1% pour une concentration de 4787,3 mg/l.

⁹Colombani J., (1987), Transfers de matières solides dans le cycle de l'eau. Cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse).

Après ces tests, on a décidé d'utiliser la méthode de filtration en laissant les filtres après la filtration pendant 24 heures à l'étuve à 100°C.

Cette méthode présente un gain de temps incontestable sur la méthode traditionnelle de l'évaporation. Dans la pratique on a constaté que pour des charges solides importantes (plus de 3 g/l) les filtrations sont très lentes. Dans ces cas particuliers on a repris la méthode traditionnelle.

Annexe 5 : Exemple de calcul des pertes en sol en suspension instantanées et totales.

A	B	C	D	E	F	g	H	I
Temps	Ruis cumulé	Cor. ruis.	Ruis. cumulé corrigé	Int. ruis.	Conc. en séd.	Conc. en séd. interp.	Pertes en sol en suspension instantanée	Pertes en sol en suspension cumulée
hh :mm :ss	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g/l)	(g/l)	(g)	(g)
00:00:00	0		0	0		0,6486	0	0
00:21:40	0,2		0,2	49		0,6486	0,0494	0,137136
00:22:58	0,3	0,2	0,5	12,9	0,6486	0,6486	0,1540	0,291113
00:23:12	0,3		0,5	10,2		0,6486	0,0219	0,313055
00:23:35	0,4		0,7	20,6		0,6486	0,0713	0,384366
00:24:15	0,7		1,0	25,4		0,2904	0,1536	0,537959
00:24:31	0,8		1,0	17,9		0,2904	0,0232	0,561195
00:24:50	0,9		1,1	16,3		0,2904	0,0261	0,587335
00:25:32	0,9	0,2	1,4	20,8	0,2904	0,2904	0,0697	0,657071
00:25:56	1,0		1,5	15,2		0,2904	0,0290	0,686115
01:20:00	16,9		21,4	2,4		0,0050	0,0008	2,275920

Colonne A - Temps (hh:mm:ss)

Colonne B - Ruissellement cumulé (mm): enregistré par le limnigraphe.

Colonne C - Correction du ruissellement (mm) : correction du volume de chaque échantillon prise pour l'analyse des concentrations en sédiments qui n'est pas enregistré par le limnigraphe.

Colonne D - Ruissellement cumulé corrigé (mm):
$$D_t = B_t + \sum_t^0 C$$

Colonne E - Intensité de ruissellement (mm/h)
$$E = (D_t - D_{t-1}) / (A_t - A_{t-1})$$

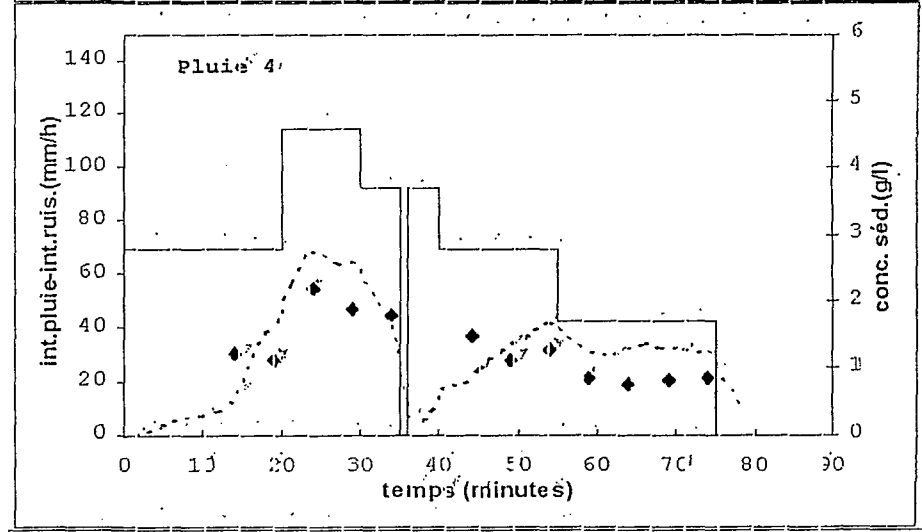
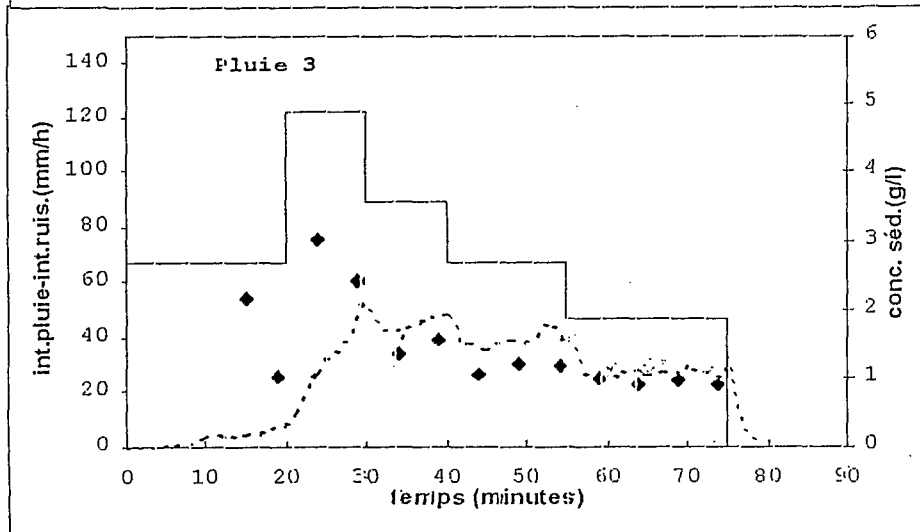
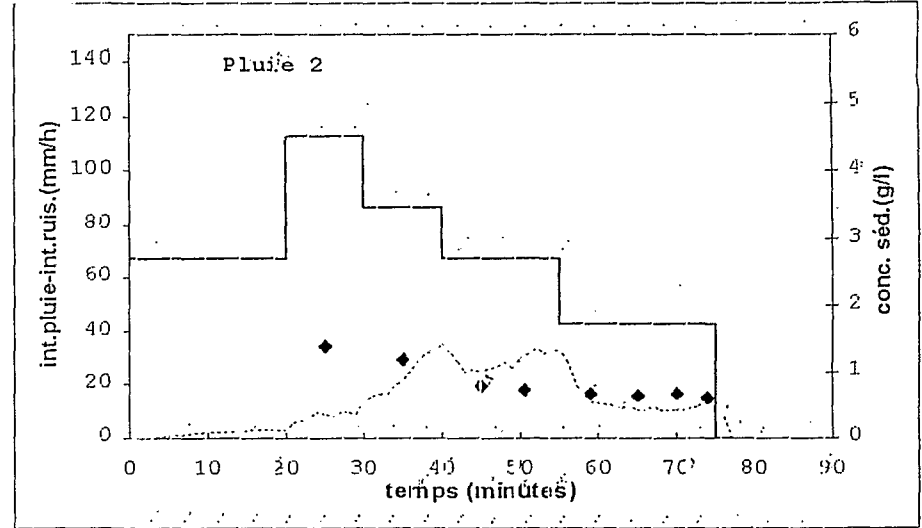
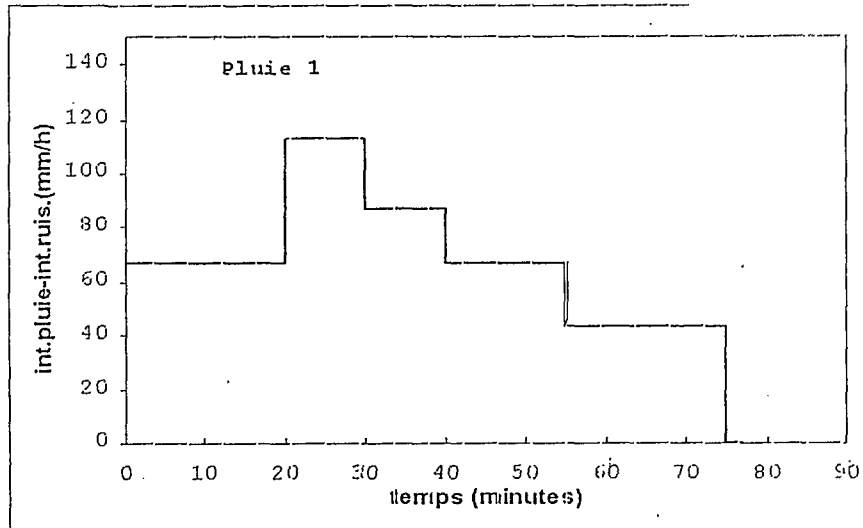
Colonne F - Concentration en sédiment instantanée mesurée (g/l)

Colonne G - Concentration en sédiment instantanée interpolée (g/l)

Colonne H - Pertes en sol en suspension instantanée (g)
$$H_t = G_t * (D_t - D_{t-1})$$

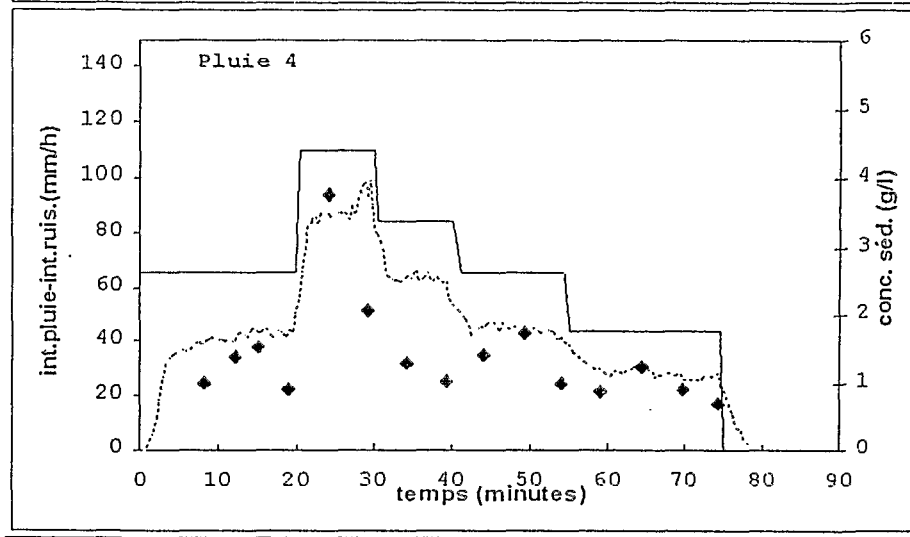
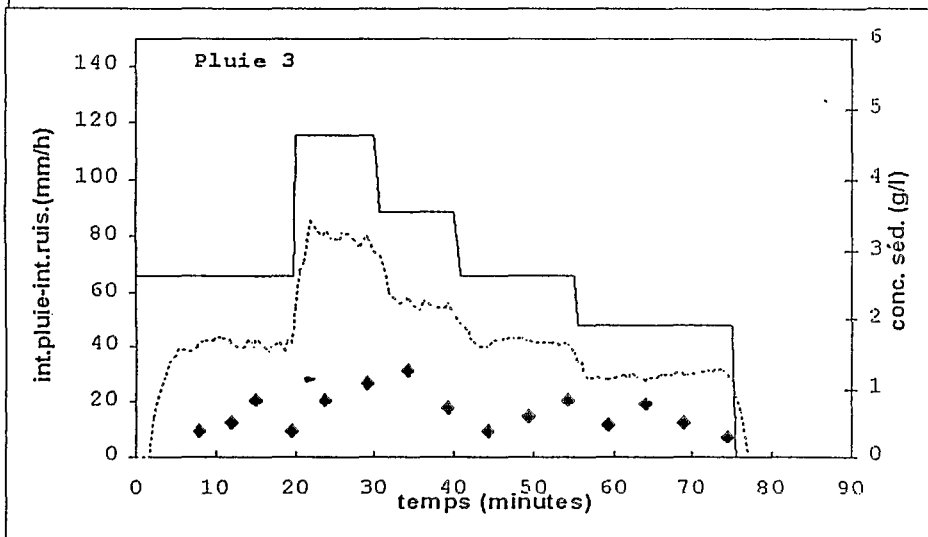
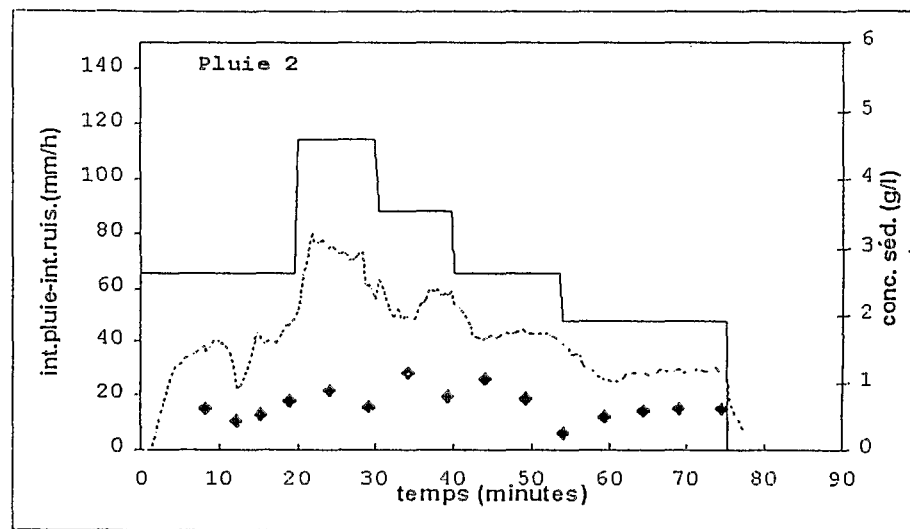
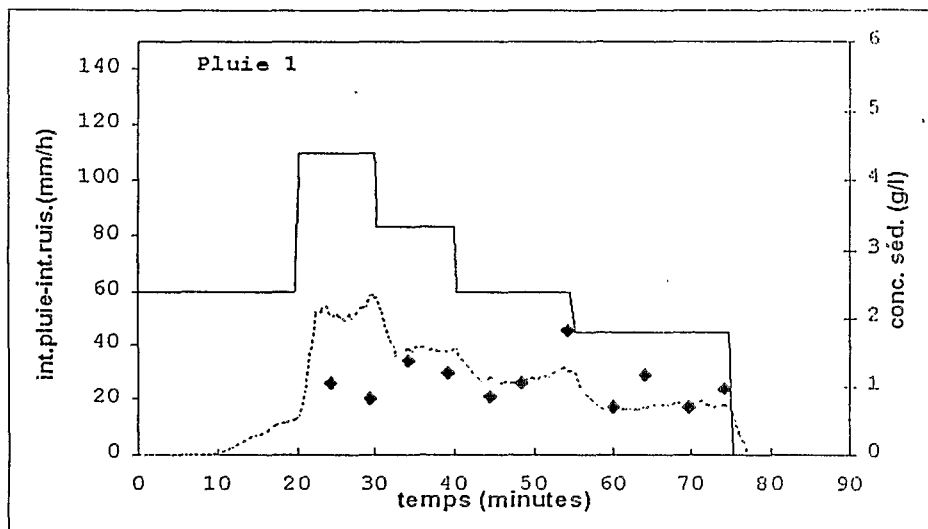
Colonne I - Pertes en sol en suspension cumulée (g)
$$I_t = \sum_t^0 H$$

**Annexe 6 : Evolution de l'intensité du ruissellement et de la concentration en sédiments
des campagnes de simulations de pluie 1, 2, 4, 5 et 6.**

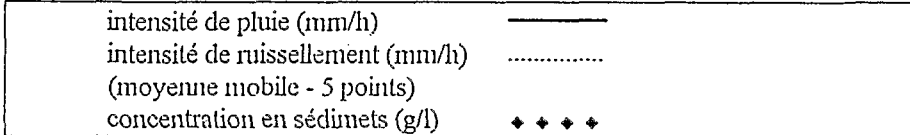


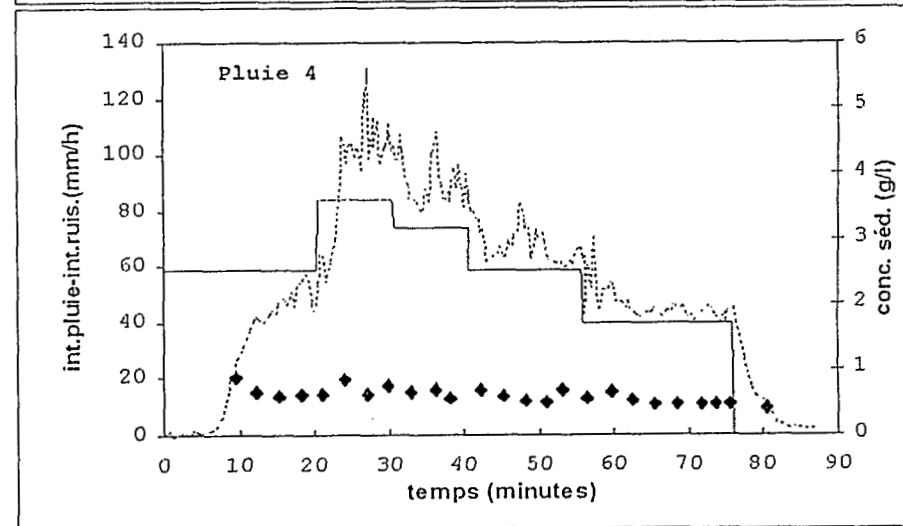
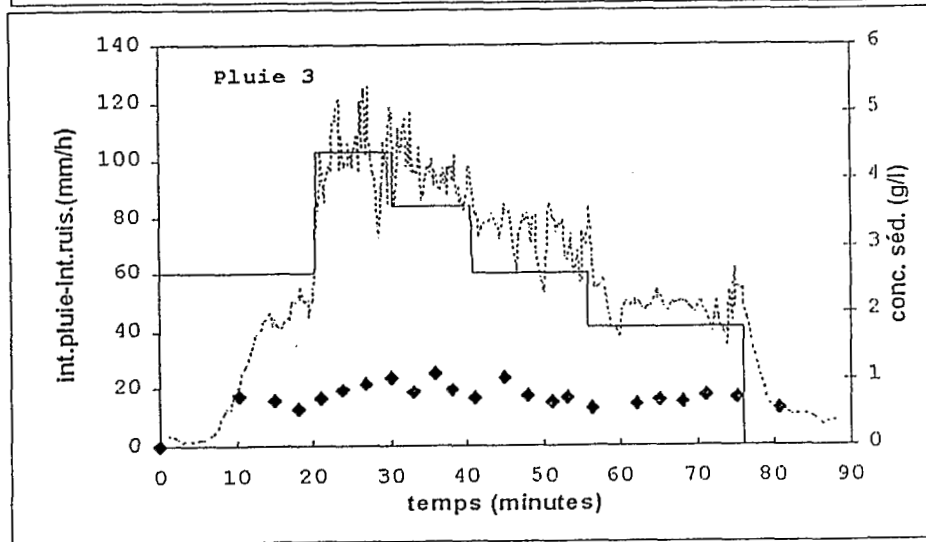
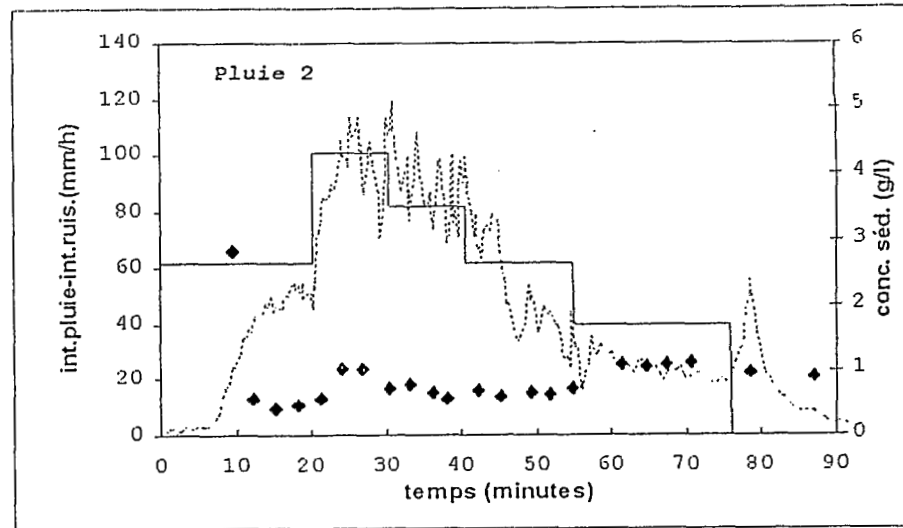
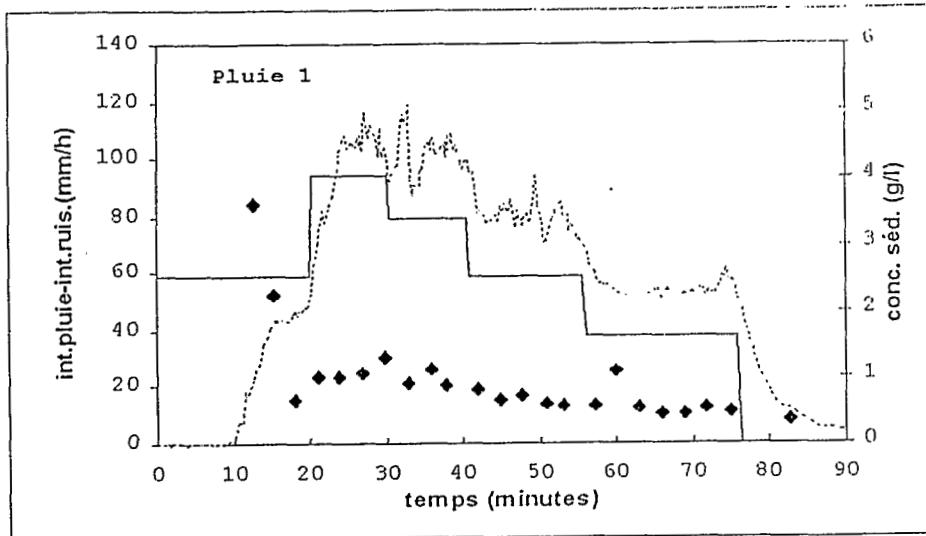
Première campagne de simulation de pluie, campagne B:

intensité de pluie (mm/h) ———
 intensité de ruissellement (mm/h)
 (moyenne mobile - 5 points)
 concentration en sédiments (g/l) ◆◆◆◆



Deuxième campagne de simulation de pluie, parcelle B.



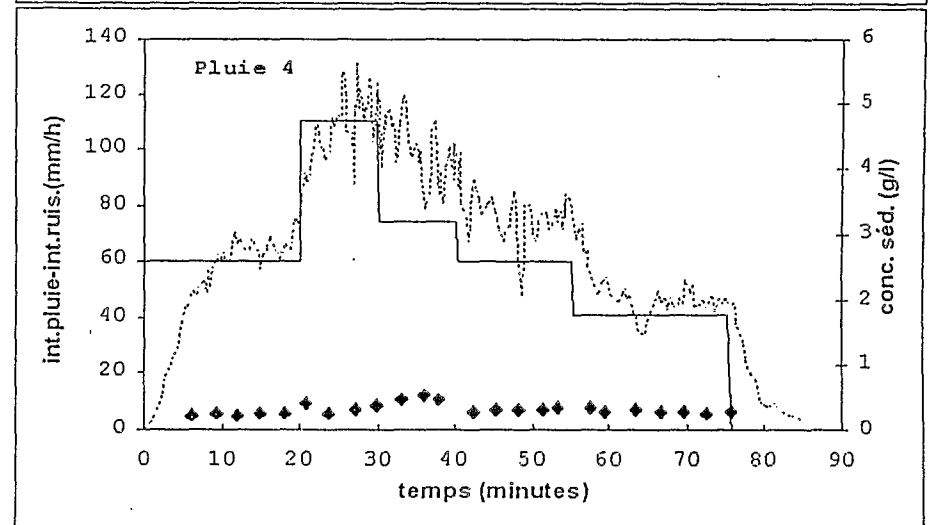
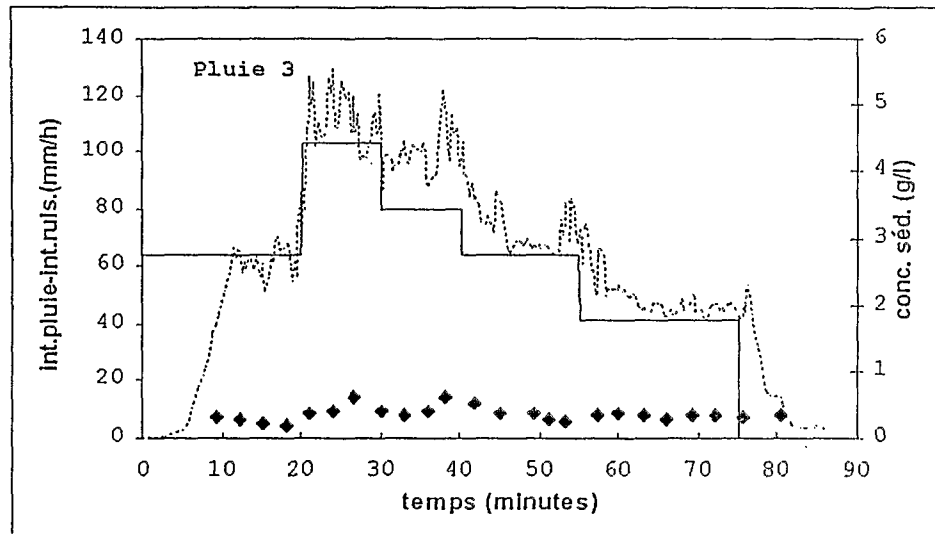
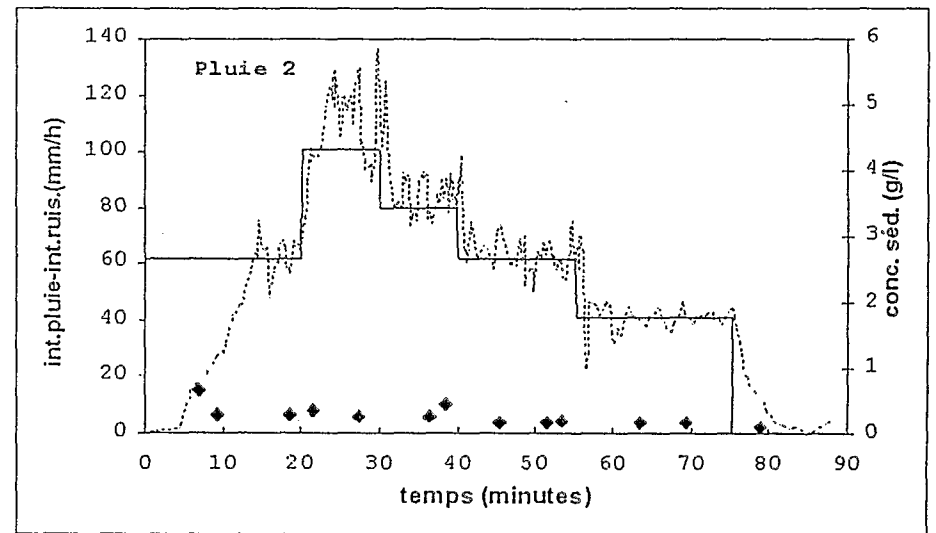
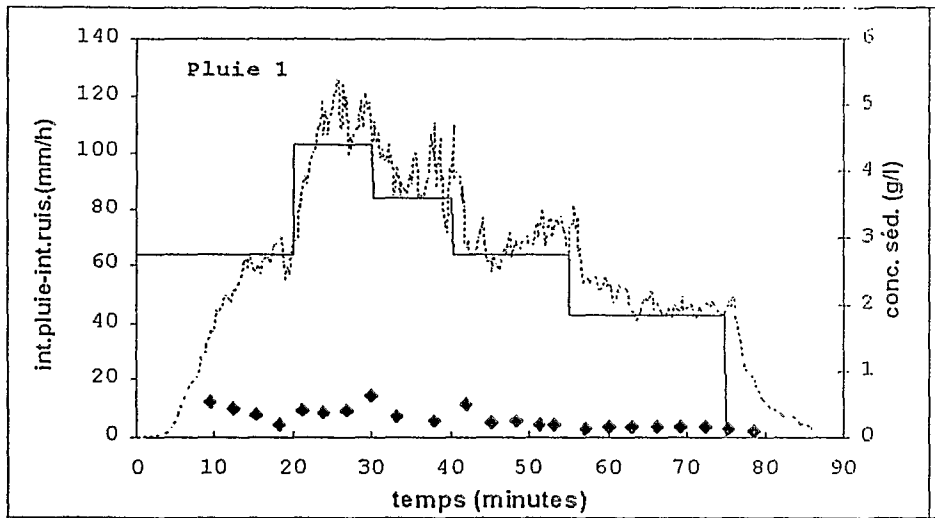


Quatrième campagne de simulation de pluie, parcelle B.

intensité de pluie (mm/h) —————

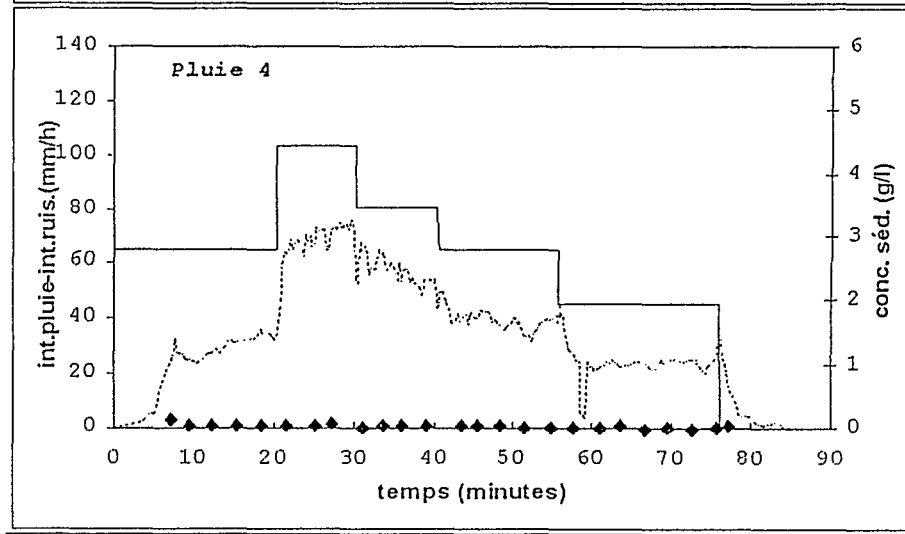
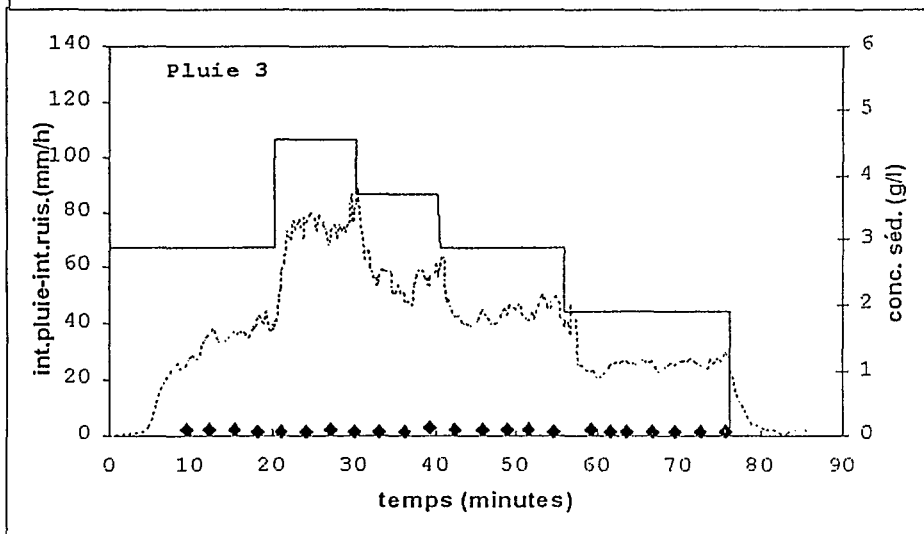
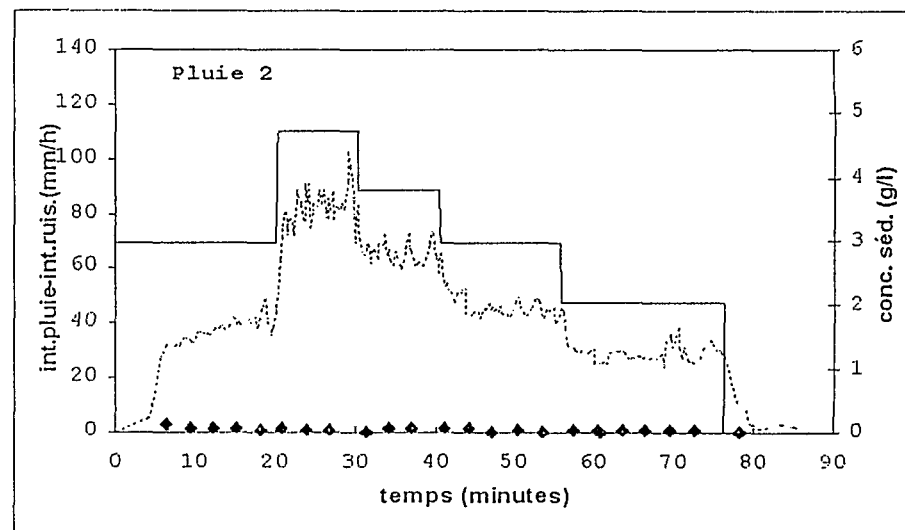
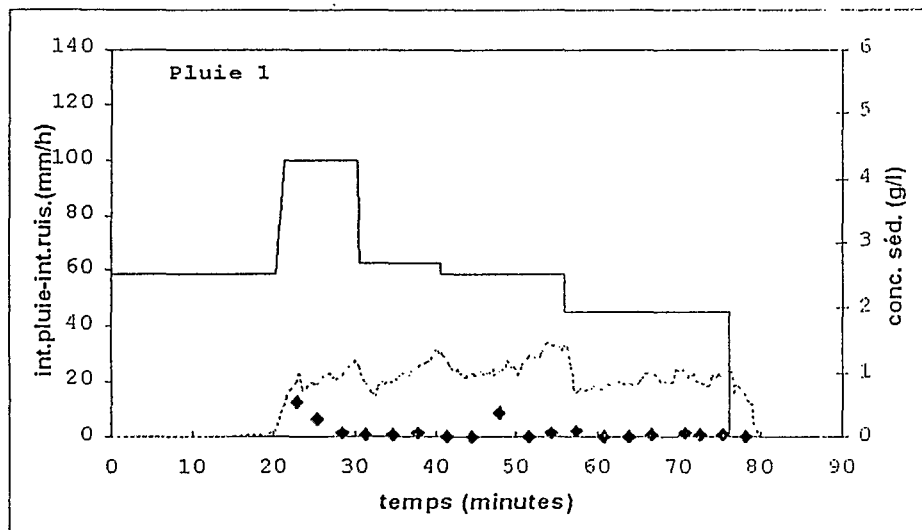
intensité de ruissellement (mm/h) (moyenne mobile - 5 points)

concentration en sédiments (g/l) ♦ ♦ ♦ ♦



Cinquième campagne de simulation de pluie, parcelle B.

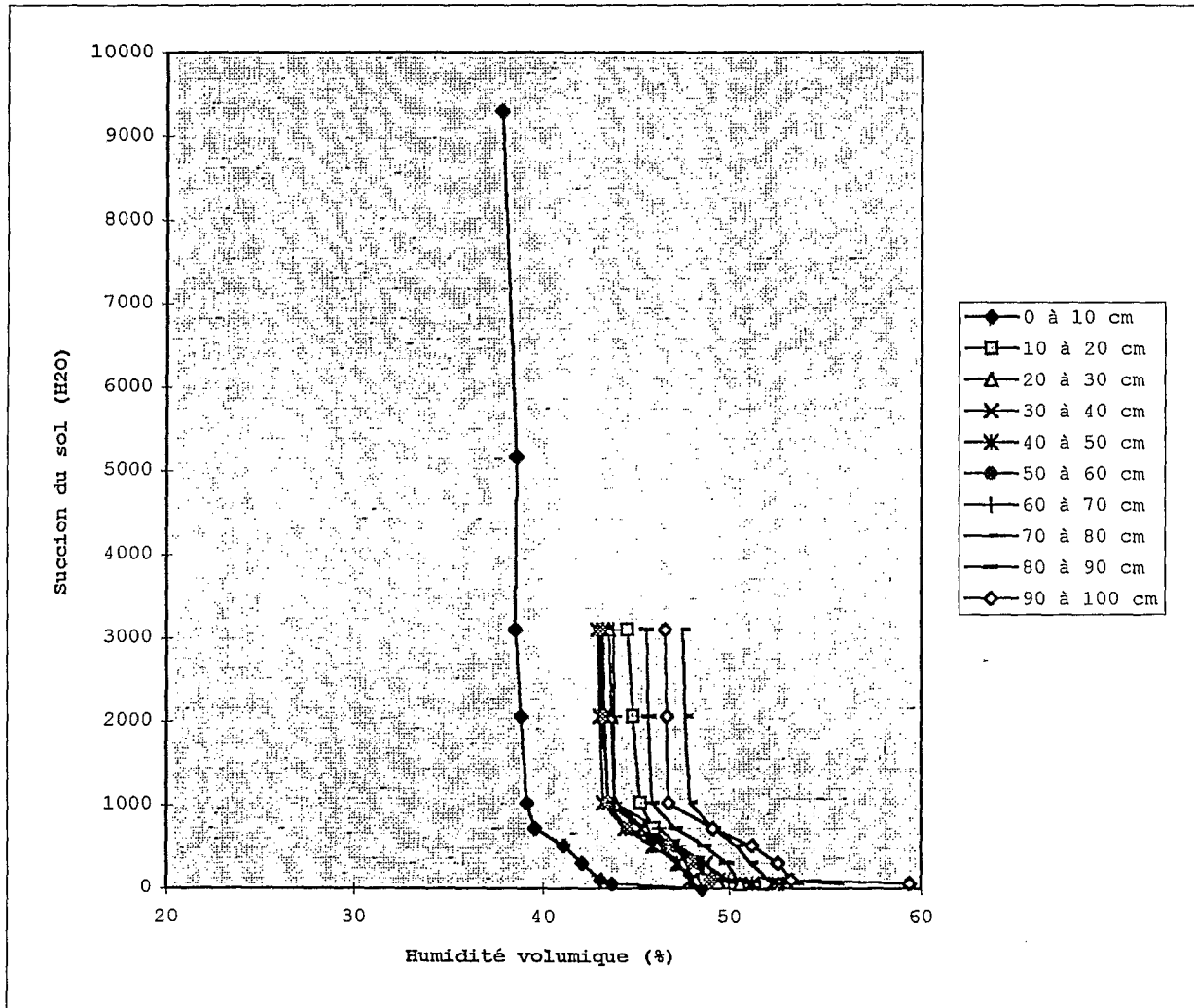
intensité de pluie (mm/h) ————
 intensité de ruissellement (mm/h)
 (moyenne mobile - 5 points)
 concentration en sédiments (g/l) ◆◆◆◆



Sixième campagne de simulation de pluie, parcelle B.

intensité de pluie (mm/h) ————
 intensité de ruissellement (mm/h)
 (moyenne mobile - 5 points)
 concentration en sédiments (g/l) ◆◆◆◆

Annexe 7 : Courbes θ (ψ) pour des profondeurs variées du profil d'Anfiteatro



Annexe 8 : Matrice de corrélation des paramètres explicatifs du ruissellement et de l'érosion

	P	Cvt	Cvv	Cvr	Pi	R _{ret}	H (0-20)	H (0-80)	IPA	KGA	h	Rt	Cr	Cst
P	1,000													
Cvt	0,098	1,000												
Cvv	0,113	0,998	1,000											
Cvr	-0,154	0,704	0,698	1,000										
Pi	-0,678	0,119	0,077	0,243	1,000									
R _{ret}	0,285	0,509	0,501	0,741	-0,117	1,000								
H (0-20)	0,027	0,162	0,165	0,621	-0,296	0,674	1,000							
H (0-80)	-0,009	0,277	0,269	0,760	-0,107	0,738	0,963	1,000						
IPA	0,515	-0,111	-0,074	-0,067	-0,769	0,278	0,454	0,303	1,000					
KGA	-0,278	-0,381	-0,395	-0,273	0,500	-0,634	-0,539	-0,422	-0,622	1,000				
h	0,376	0,184	0,204	0,440	-0,388	0,674	0,528	0,516	0,511	-0,570	1,000			
Rt	0,452	0,360	0,379	0,092	-0,690	0,483	0,418	0,275	0,647	-0,935	0,433	1,000		
Cr	0,293	0,327	0,345	0,104	-0,638	0,444	0,451	0,296	0,619	-0,943	0,396	0,984	1,000	
Cst	0,019	-0,770	-0,756	-0,838	-0,261	-0,490	-0,345	-0,530	0,226	0,034	-0,273	0,025	0,055	1,000

**Annexe 9 : Données de précipitation de l'année culturale 1992/1993, lame d'eau
ruisselée et concentration en sédiment des microparcelles sur pluie naturelle.**

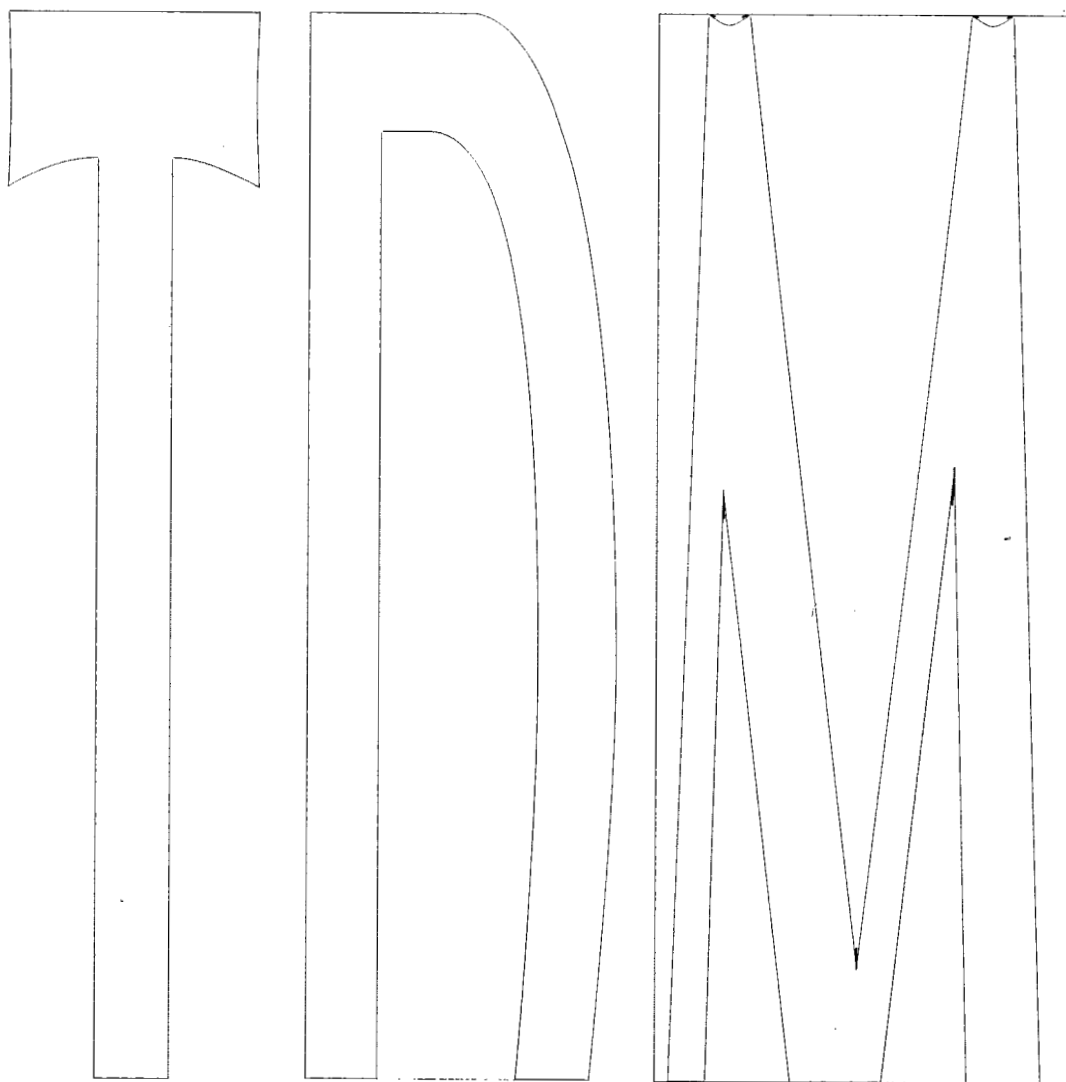
événement	P (mm)	Lame d'eau ruisselée (mm)			Concentration en sédiment (mg/l)		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
01/08/1992	5,1	-	-	-	-	-	-
04/08/1992	17,4	-	-	-	-	-	-
09/08/1992	20,1	-	-	-	-	-	-
11/08/1992	11,9	-	-	-	-	-	-
12/08/1992	2,2	-	-	-	-	-	-
18/08/1992	8,3	-	-	-	-	-	-
19/08/1992	5,5	-	-	-	-	-	-
23/08/1992	20,0	1	-	-	648	-	-
31/08/1992	13,0	0,1	0	-	275	0	-
02/09/1992	31,7	0,2	0,03	-	97	406	-
12/09/1992	45,1	1	6	-	466	118	-
19/09/1992	22,8	8	0	-	397	280	-
23/09/1992	56,2	2	4	-	601	89	-
02/10/1992	6,5	0	0	-	0	0	-
06/10/1992	14,0	0	0	-	0	0	-
17/10/1992	20,0	0,06	0	-	1332	0	-
21/10/1992	22,0	0,03	0	-	321	0	-
25/10/1992	96,7	1	1	-	288	46	-
29/10/1992	20,0	0,3	0	-	531	85	-
03/11/1992	34,8	8	4	-	331	66	-
11/11/1992	8,3	0	0	-	0	0	-
16/11/1992	9,5	0	0	-	0	0	-
21/11/1992	4,8	0	0	-	0	0	-
22/11/1992	2,3	0	0	-	0	0	-
24/11/1992	11,4	0	0	-	0	0	-
29/11/1992	29,1	0	0	-	0	0	-
05/12/1992	2,5	0	0	-	0	0	-
17/12/1992	36,2	0,2	0,1	0,04	1046	207	167
31/12/1992	2,9	0	0	0	0	0	0
02/01/1993	23,3	0	0	0	0	0	0
07/01/1993	19,1	0	0	0	0	0	0
14/01/1993	23,8	0,5	0,03	0	-	-	0
17/01/1993	67,6	2	1	3	2024	-	-
25/01/1993	90,4	2	2	0	1348	-	-
31/01/1993	10,8	3	0	0	-	-	-
05/02/1993	23,1	0	0	0	0	0	0
19/02/1993	17,4	0	0	0	0	0	0
21/02/1993	33,4	8	0,5	0	1004	-	0
03/03/1993	1,1	0	0	0	0	0	0
05/05/1993	84,3	2	1	0	668	319	385

08/03/1993	76,6	2	1	0	350	25	0
13/03/1993	2,4	0	0	0	0	0	0
16/03/1993	1,9	0	0	0	0	0	0
24/03/1993	43,6	2	1	3	544	201	92
06/04/1993	10,4	-	-	-	-	-	-
11/04/1993	1,8	-	-	-	-	-	-
27/04/1993	52,5	-	-	-	-	-	-
02/05/1993	1,8	-	-	-	-	-	-
04/05/1993	5,4	-	-	-	-	-	-
05/05/1993	1,2	-	-	-	-	-	-
11/05/1993	85,5	-	-	-	-	-	-
12/05/1993	12,6	-	-	-	-	-	-
13/05/1993	14,7	-	-	-	-	-	-
14/05/1993	1,1	-	-	-	-	-	-
26/05/1993	17,9	-	-	-	-	-	-
30/05/1993	27,1	-	-	-	-	-	-
03/06/1993	6,3	-	-	-	-	-	-
04/06/1993	35,6	-	-	-	-	-	-
08/06/1993	6,1	0	0	0	0	0	0
12/06/1993	4,5	0	0	0	0	0	0
12/06/1993	36,1	0	0	0	0	0	0
24/06/1993	1,45	0	0	0	0	0	0
01/07/1993	24,7	0	0	0	0	0	0
03/07/1993	78,9	3	2	2	2639	356	139
10/07/1993	53,3	3	3	2	5805	527	210
17/07/1993	14,2	0	0	0	0	0	0
28/07/1993	23,5	0	0	0	0	0	0
17/08/1993	12,5	0	0	0	0	0	0
23/08/1993	1,6	0	0	0	0	0	0
31/08/1993	1	0	0	0	0	0	0
14/09/1993	3,4	0	0	0	0	0	0
18/09/1993	55,2	0	0	0	0	0	0

où: M1 = microparcelle 1, M2 = microparcelle 2 et M3 = microparcelle 3

le signe - correspond à absence de données.

La précipitation est cumulée en fonction de la collecte des échantillons pour l'analyse de la concentration en sédiments et de la mesure du ruissellement, que quelquefois est cumulée pendant quelques jours quand il y a plus d'un jour consécutif de pluie.



Thèses et documents microfichés

Mots-clés

Bassin versant de recherche, Grandes cultures, Érosion, Basalte, Rio Grande do Sul, Brésil



209-213, rue La Fayette
75480 Paris cedex 10

ISSN : 0767-922X
ISBN : 2-7099-1341-0

Diffusion :
32, avenue Henri Varagnat
93143 Bondy cedex