

8

L'aménagement des conditions du ruissellement sur les pentes cultivées soudano-sahéliennes. Résultats d'une approche triple : enquêtes, expérimentation, modélisation

F. GUILLET⁽¹⁾, J.-M. LAMACHÈRE⁽²⁾, J.-L. SABATIER⁽¹⁾,
G. SERPANTIE⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (IRAT),
avenue du Val de Montferrand, BP5035, 34032 Montpellier, France

⁽²⁾ Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM),
01 BP 182, Ouagadougou, Burkina Faso

Dans la région soudano-sahélienne du Burkina Faso, les systèmes de culture paysans dépendent de nouvelles conditions : réduction de la pluviométrie et dégradation de certaines facettes des paysages agraires. Les hauts de pente des terroirs agricoles en particulier ont subi une imperméabilisation après disparition de la végétation. Les sols cultivés souvent liés aux bas de pente, peuvent ainsi recevoir des quantités massives d'eaux de ruissellement, sous forme plus ou moins concentrée. Mis à profit pour compléter le déficit des bilans hydriques des cultures, ces ruissellements participent aussi à l'érosion hydrique, en assurant principalement le transport des particules détachées par les pluies elles-mêmes [15].

Ces constatations sont certainement à l'origine du renouvellement progressif des techniques préconisées par les intervenants en matière d'aménagement des eaux de ruissellement. Dans le Yatenga, les années 1980 voient peu à peu l'abandon des dispositifs dits de diversion ou imperméables (diguettes en terre damée) alors que se généralise la pratique des réseaux d'obstacles perméables (cordons pierreux, fascines, haies vives). Il est à regretter que peu d'études rigoureuses aient

accompagné ce changement technique au demeurant logique et généralement soutenu par les techniciens de terrain et les organisations paysannes. Or la connaissance de l'impact d'un aménagement des eaux relève pour l'hydraulicien de la déontologie professionnelle vis-à-vis des utilisateurs ou de ceux qui l'ont promu. Pour l'agronome, il importe de confronter les nouvelles propriétés d'un milieu modifié à un système de culture. A de nouvelles répartitions spatiales ou successions temporelles des états du sol, doivent répondre de nouvelles logiques d'itinéraire technique voire une remise en cause du système de culture. Mais bien souvent les changements ne sont pas ceux qui sont attendus et les pratiques d'aménagement, qui s'accompagnent de coûts d'installation et d'entretien parfois prohibitifs, devraient être, pour le moins, modulées suivant les conditions et les objectifs des agriculteurs, à défaut d'être optimisables.

Si les dernières années ont vu se réaliser de larges progrès en matière de connaissance de l'organisation structurale de la couverture pédologique, de la physique des sols, du rôle des états de surface, l'impact réel de modifications appliquées à des espaces hétérogènes reste difficile à appréhender. En particulier l'intégration dans l'espace de phénomènes localisés et les changements d'échelles. Les approches systémiques qui en restent « aux schémas de fonctionnement » décrivent bien mais ne suffisent pas à tester des décisions ou de nouveaux paramètres. Il existe néanmoins d'autres outils qui aideront le chercheur à rivaliser avec la connaissance commune issue de l'expérience accumulée par les paysans et leurs conseillers. Ces outils de diagnostic, d'investigation ou de représentation des connaissances doivent permettre le test d'hypothèses, et donc fournir des éléments de prévision dans le cadre d'une assistance à la décision, celle-ci concernant aussi bien l'agriculteur sur son exploitation que celui qui devra négocier une politique d'aménagement. Ces outils relèvent sans doute tous de la recherche opérationnelle, mais il doit être rappelé ici qu'ils n'en doivent pas moins rester transparents et accessibles à la discussion, si l'on veut qu'ils conservent une rigueur suffisante. Enquêtes, expérimentation, modélisation sont toutes trois initiées par un modèle formel, représentation d'un corps d'hypothèses qui sera testé puis utilisé en simulation pour la décision. Nous voudrions montrer à propos des questions hydrauliques de l'aménagement des eaux de surface à quelle fin peut mener la mise en œuvre de ces trois outils élémentaires associés.

Enquêtes agronomiques et hydrauliques

Dans un site reconnu représentatif des conditions relevant des systèmes de culture « des champs de brousse »⁽¹⁾, une aire d'une dizaine d'hectares a été cartographiée en 1984 sur le thème des états de surface et des traces de ruissellement concentré (figure 1). Un réseau de cordons pierreux a été installé en avril 1985, sur le modèle

(1) Large cuvette sableuse, pentes de 2 %, culture de mil sur un modèle extensif de gestion de la fertilité, cinq années de cultures suivies de cinq années de repos de la terre, présence d'un impluvium.

Aménagement des conditions de ruissellement



Figure 1. Carte des états de surface. Site de Samniweogo, décembre 1984.

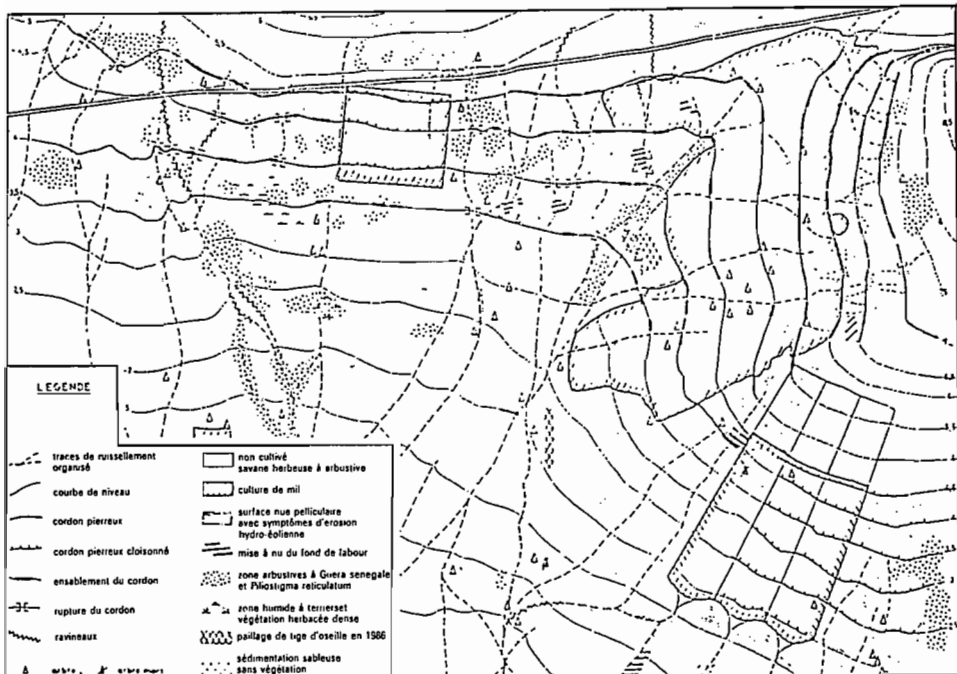


Figure 2. Carte des états de surface. Site de Samniweogo, décembre 1987.

recommandé par le projet agroforestier Oxfam DPET⁽²⁾. L'impact de l'aménagement fut évalué à partir d'une nouvelle cartographie fin 1987 à la fin de trois hivernages (figure 2) et d'observations ponctuelles pendant la saison des pluies 1987.

L'aménagement a modifié considérablement les états de surface et perturbé le régime du ruissellement et la répartition de l'humidité dans l'espace. Il entraîne la juxtaposition des meilleures conditions d'humidité et de meilleurs caractères physiques et chimiques du sol. Les agriculteurs ont été séduits par cette évolution, puisqu'ils ont reproduit ce type d'aménagement dès 1986 dans d'autres situations sans aucune assistance. Mais ils l'ont réalisé sur des terrains peu épais, surmontés d'immenses impluviums. Ils comptent apparemment surtout sur l'effet de terrassement, d'humectation et de ralentissement des vitesses de ruissellement en amont des diguettes, ce qui leur permet de valoriser au mieux des fumures en réduisant les risques par une sorte de contraction de l'espace cultivé sur des zones rendues plus favorables. Pour accélérer le processus, ils colmatent eux-mêmes le cordon pierreux, ce qui entraîne un assèchement total de l'aval du cordon, transformant ainsi le champ en une succession de bandes alternées, zones nues précédant des peuplements médiocres de mil puis de belles récoltes; redécouvrant ainsi une vieille pratique de *dry-farming*. Mais après quelques années, il apparaît que les cordons sont complètement enfouis, que le nouveau profil de pente ne suffit pas à améliorer même localement l'humidité, que des entailles se développent là où les diguettes ont rassemblé les eaux et ont rompu.

Le diagnostic auquel ces enquêtes conduisent est donc clair. Un tel aménagement provoque avant tout une contraction des terrains favorables à la réussite de la culture, et mène à des conséquences secondaires assez inquiétantes en favorisant la canalisation des eaux.

Pourtant, il est facile d'imaginer des alternatives techniques appropriables qui limiteraient les effets secondaires. La concentration des filets d'eau pourrait être limitée si on entravait la circulation latérale par un cloisonnement de l'aire d'inondation en amont des cordons [19]. Les débordements mieux régulés favoriseraient ainsi un nettoyage du cordon au fur et à mesure de son colmatage. Wright [20] donne la solution de l'enfouissement progressif du cordon dans la terrasse : pratiquer des murets sur les cordons proches de l'impluvium et relayer les cordons pierreux par des bandes doubles de graminées pérennes. Celles-ci piègent les résidus ligneux qui se substituent peu à peu au cordon lui-même dans son rôle de rétention temporaire et laminage de la crue. Dans de telles conditions, on pourrait aménager durablement le système de culture tel qu'il existe, sans contraction de terrain cultivé, ni accroissement exagéré de l'hétérogénéité, ni obstruction au drainage externe. Celui-ci est indispensable en certaines périodes trop pluvieuses. Dans une telle perspective qui n'est pas irréaliste, on peut légitimement poser le problème de la gestion de l'eau à la parcelle et des conséquences globales sur la fertilité. Cette question fait appel à d'autres outils : expérimentation et modélisation.

(2) Courbes de niveau définies par un niveau à eau tous les 8 m, assemblage de blocs de cuirasse de 25 cm de haut, représentant 40 kg/m. Les cordons sont installés tous les 20 m soit 0,50 m de dénivelé entre deux cordons successifs.

Expérimentation et modélisation

Aborder objectivement l'impact de tels aménagements de surface nécessite des modèles réduits, réels ou virtuels, suffisamment simples ou idéalisés et conçus pour en extraire une information significative. Ils doivent aussi reprendre de la manière la plus réaliste possible les conditions réelles qui prévalent dans nos systèmes de culture, à savoir :

- un terrain représentatif, y compris dans sa micro-hétérogénéité;
- l'existence de ruissellements entrants;
- une longueur de pente suffisante (la centaine de mètres);
- un système de culture proche de ceux pratiqués par les paysans.

L'expérimentation de Bidi Samniweogo

En organisant un tel dispositif en situation réelle l'agronome ne fait rien d'autre que tester les hypothèses issues de l'enquête, ordonnant à l'avance les données qu'il compte obtenir pour en extraire de l'information fiable.

Ce dispositif expérimental a été mis en place en 1985 et 1986 dans la parcelle d'un agriculteur du village de Bidi. Il s'agit d'un ensemble de trois parcelles contiguës de même géométrie et de même terrain, installées à mi-pente sur un terrain sableux profond. Elles sont hydrologiquement isolées par des tôles fichées en terre sur tout leur pourtour. Chaque parcelle mesure environ 150 m de long et 25 m de large, sur une pente de 2 à 3 % (figure 3). Le tiers supérieur n'est pas cultivé. Son état de surface lissé et encroûté lui confère un rôle d'impluvium pour la partie cultivée qui mesure 100 m.

Les systèmes de culture ne diffèrent d'une parcelle à l'autre que sur une seule modalité :

- parcelle témoin cultivée sur le modèle des champs paysans contigus à l'essai;
- parcelle équipée d'un réseau d'obstacle isohypses, filtrants;
- parcelle équipée du même aménagement mais bénéficiant en outre d'un travail du sol avant semis.

Le suivi de l'essai a été assuré sans interruption de 1985 à 1989. Les résultats ont fait l'objet de plusieurs communications [14, 17, 18]. Sur le plan hydraulique, un aménagement en cordons pierreux à l'occasion de fortes pluies, modifie les paramètres d'une crue par écrêtage et déphasage, lesquels ont une incidence nette sur le ruissellement et les transports solides. Toutefois, le dispositif ne paraît guère apte à piéger autre chose que des sédiments grossiers en raison principalement de sa rusticité, ce qui fait douter de son impact en matière d'économie de matières fines.

L'analyse des ruissellements sur trois années de mesures (150 événements mesurés dont 45 ayant donné lieu à un ruissellement de plus de 1 mm) montre que l'efficacité du réseau d'obstacles à accroître l'infiltration dépend significativement de l'état du sol lors de l'averse et du régime de celle-ci. Un sol lisse et humide entraîne un effet nul voire négatif si la pluie est « violente ». Un sol rugueux et sec, sous une pluie importante mais « douce », optimise au contraire l'aptitude de l'aménagement à infiltrer un surplus d'eau (figures 4 et 5). Les averses sont ici

Modèle de bilan hydrique :

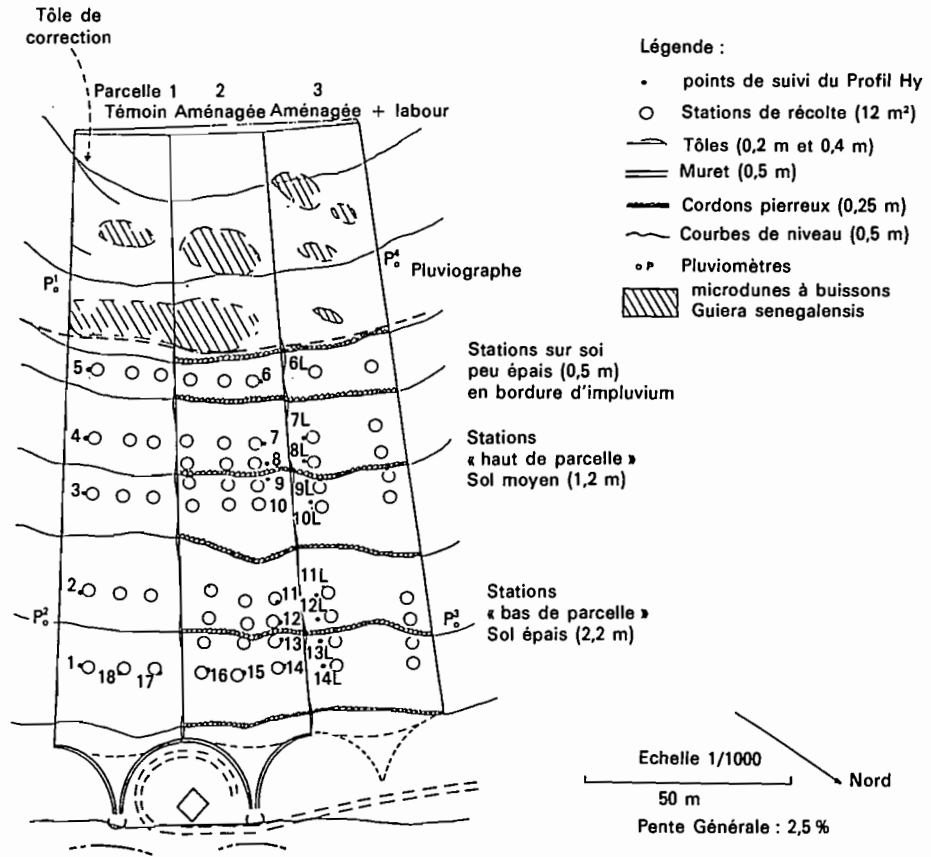
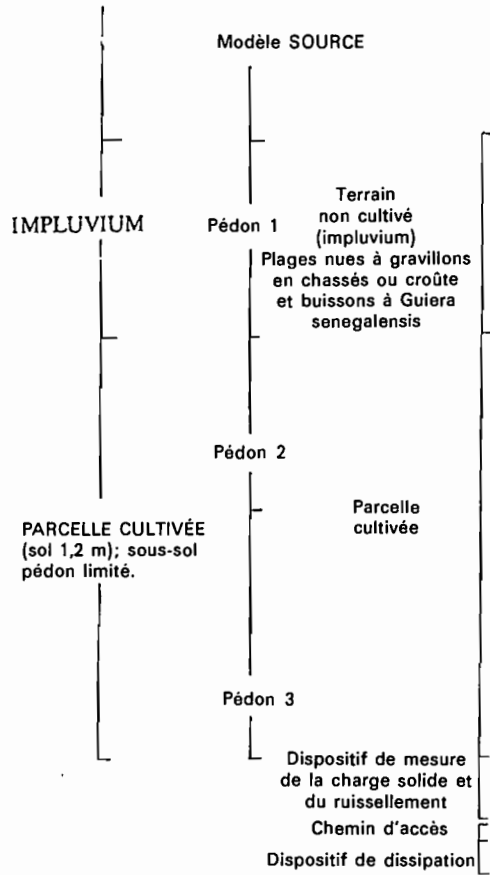


Figure 3. Plan d'ensemble de l'essai de Samniweogo (1986).

Aménagement des conditions de ruissellement

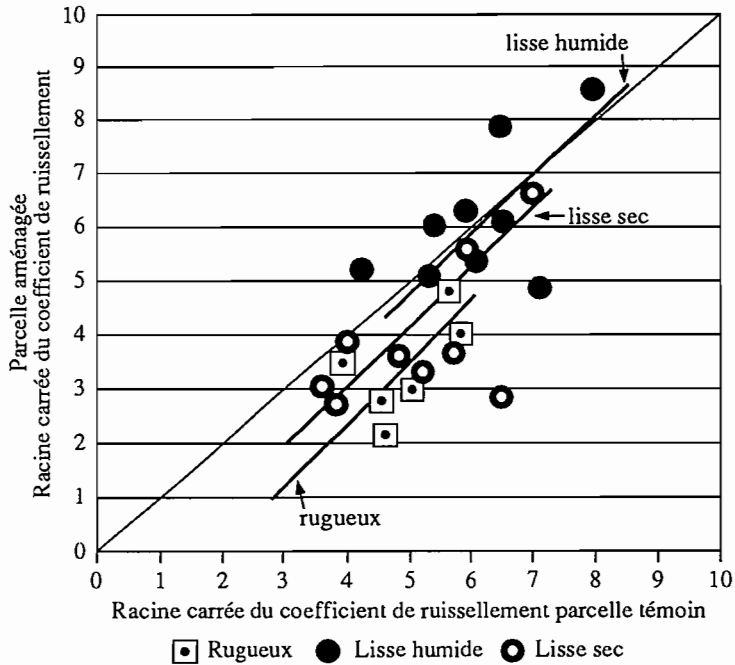


Figure 4. Comparaison des ruissellements parcelles témoin / parcelles aménagées. Pluies standard.

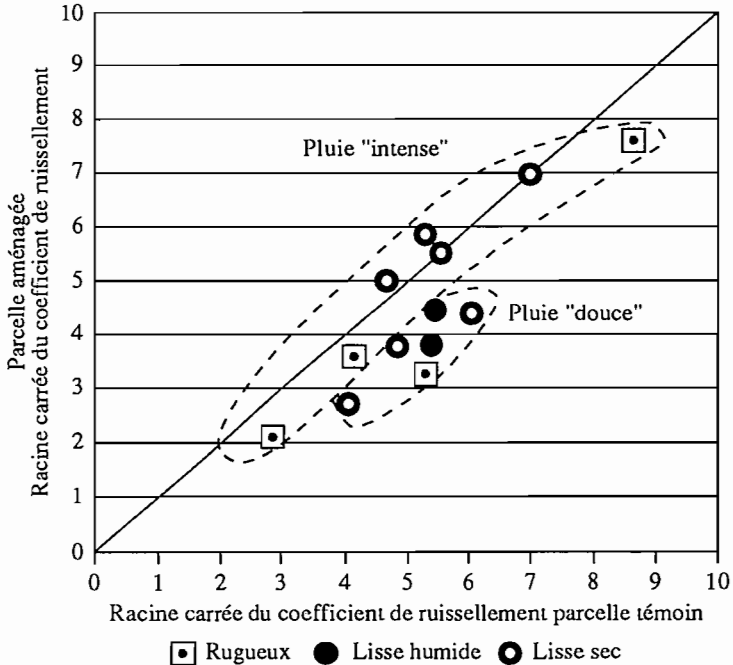


Figure 5. Comparaison des ruissellements parcelles témoin / parcelles aménagées. Autres pluies.

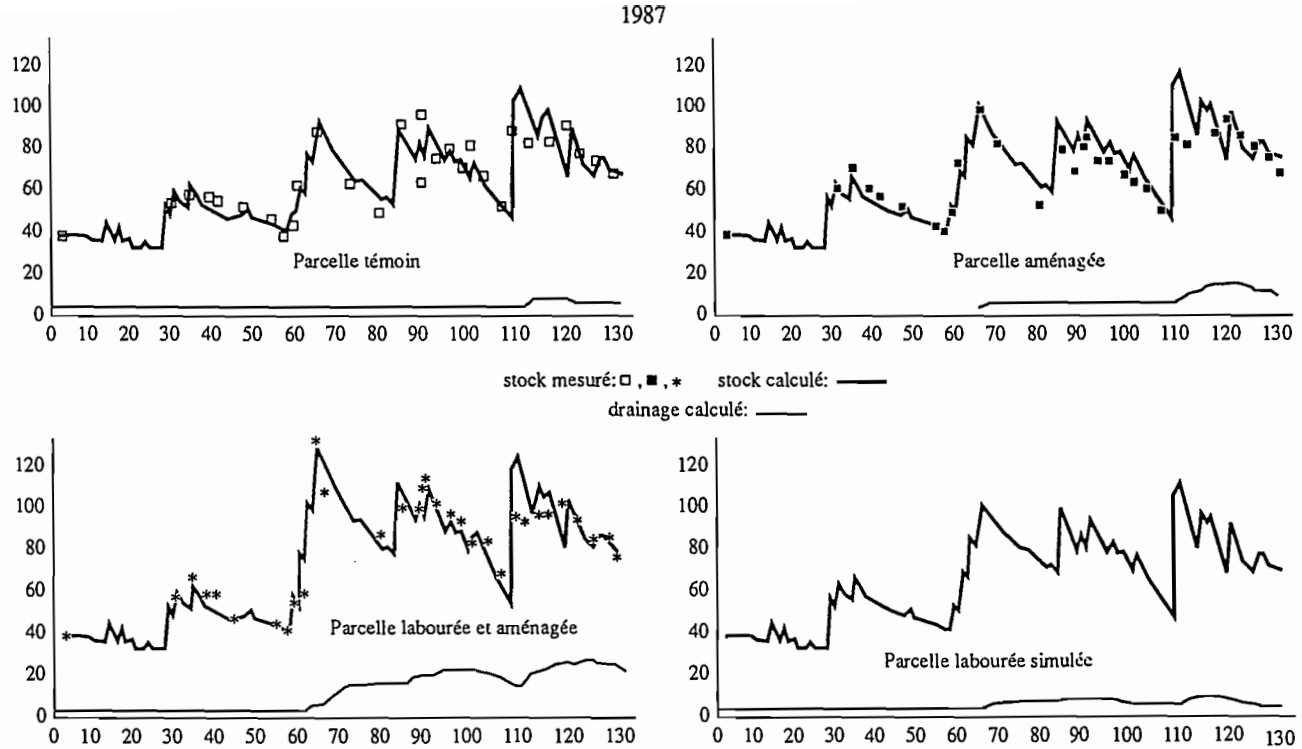


Figure 6. Stocks calculés par le modèle de bilan hydrique comparés aux mesures (moyenne de huit profils hydriques par parcelle).

classées en pluies « standard » si elles suivent à 20 % près la tendance de la relation entre intensité et hauteur, au-dessus elles sont considérées comme « violentes », au-dessous comme « douces ».

L'analyse des composantes du rendement sur quatre ans met en évidence l'impact très variable du réseau d'obstacles isohypses filtrants sur la croissance du mil. Le suivi de l'humidité du sol et la réalisation d'un premier bilan hydrique permettent de comprendre les résultats obtenus. Lorsqu'un effet significatif apparaît sur la croissance du mil ou le rendement en grains (1985 : + 10 %, 1986 : + 80 %, 1987 : + 30 %), on le relie grossièrement à la mise en réserve profonde d'un surplus d'eau qui pourra être repris en fin de cycle, parfois il faut prendre en compte une meilleure humectation du profil qui avantage l'enracinement et la nutrition minérale au tallage, si des pluies convenables sont tombées sur un terrain récemment sarclé. En 1988, la réduction significative du rendement dans la parcelle aménagée (- 20 %) fut au contraire liée à une durée accrue des conditions d'engorgement du sol lors de la période tallage/montaison. Il y a donc concordance entre résultats hydrauliques et agronomiques.

Il est difficile de prétendre que la modification de la charge hydraulique faible en ruissellement de nappe crée une infiltration supplémentaire, par contre on peut admettre que le temps et la surface d'application de l'eau en raison de la désorganisation du ruissellement liée au cordon ont augmenté. Tout se passe comme si une nouvelle rugosité était créée par le doublet sol-diguette.

A ce stade de la démarche, nous constituons deux types d'informations ou d'hypothèses :

- une information sur des mécanismes (interaction état du sol/aménagement) qui alimentera une théorie agronomique des systèmes de culture;
- une information empirique qui servira de base de règles à des modèles virtuels :
 - coefficients culturaux ETM/ETP;
 - lois de production du ruissellement en fonction de la pluie et de l'état du milieu [19];
 - lois d'évolution des états de surface après travail du sol (Lamachère, à paraître);
 - lois d'apparition du drainage.

On dispose par ailleurs d'une base de faits issus de la caractérisation du milieu et du suivi (mesures de stocks d'eau, mesures de ruissellements, essais annexes).

Les relations d'Albergel [1] et Casenave et Valentin [8] permettent de faire des hypothèses sur les ruissellements entrants.

Afin d'organiser et de tester nos hypothèses, nous avons bâti un premier modèle, dont les fonctions ont été en grande partie déterminées à partir des relations existant entre les données expérimentales et les variables mesurées. Comme ceux de Cornet [10] ou Franquin et Forest [11], il est basé sur une relation de récurrence traduisant la conservation de l'eau dans une couche de sol de 120 cm. Cette couche correspond à l'essentiel de l'enracinement du mil mais aussi à notre profondeur de mesure des stocks hydriques.

Sur une période $j = 1$ jour

$$S_j = (S_{j-1} + P_j + RE_j + RD_j) - (RS_j + DR_j + ETR_j)$$

S_j, S_{j-1} : stocks d'eau en fin de période j et $j - 1$

- P_j : pluie au sol pendant la période j
- RE_j : ruissellement entrant pendant la période j
- RD_j : reprise de drainage par les racines pendant la période j
- RS_j : ruissellement sortant pendant la période j
- DR_j : variation du stock sous-jacent ou drainage (vertical et latéral)
- ETR_j : évapotranspiration réelle et évaporation du sol pendant la période j

Pour une même année, on peut donc simuler le bilan hydrique d'une parcelle hypothétique, simplement labourée et non aménagée en considérant le labour comme un premier sarclage. Le modèle fournit en outre des estimations non mesurables, telles que le drainage, ou ETR tous les cinq jours. La figure 7 montre qu'une parcelle simplement labourée, aurait eu sans doute le même gain d'alimentation hydrique que la parcelle simplement aménagée. Le labour joint à l'aménagement (parcelle 3) n'a subi quant à lui aucun déficit hydrique, mais présente un drainage non négligeable, en particulier aux phases de réhumectation

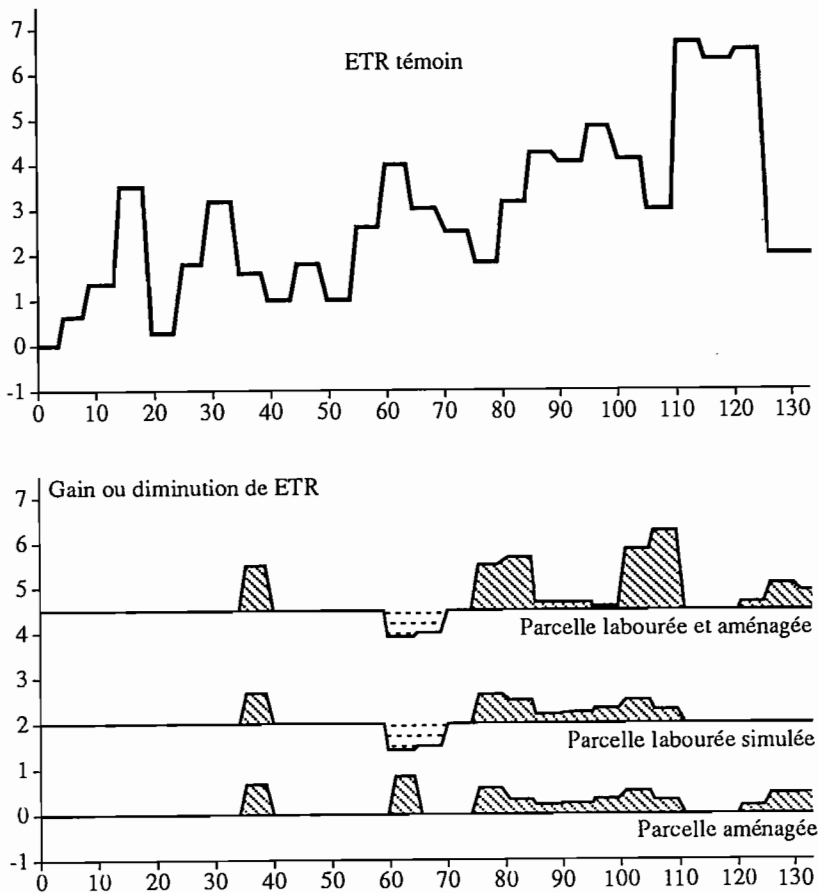


Figure 7. Comparaison des ETR des 3 parcelles réelles et d'une parcelle simulée sur modèle de bilan hydrique.

qui sont les phases principales de nitrification — d'où une lixivation probable d'azote. Le modèle a permis de mettre en évidence la nécessité de prendre en compte l'état du peuplement dans le calcul de ETR. Entre 1985 et 1986, années sans drainage, ni ETP mesuré (semblables en 1985 et 1986), ni le ruissellement calculé (compatible avec celui mesuré), n'expliquent la différence de vitesse de la diminution des stocks d'eau. Par contre, il faut prendre en compte l'état du peuplement de mil, très mauvais en août 1985.

Un tel modèle permet de simuler des événements différents de ceux observés à condition toutefois qu'on reste dans une gamme d'événements proches des conditions qui présidaient à la période de mesures. Cependant, le modèle ne peut simuler de conditions de sol différentes, voire mêmes certaines modifications : changement de taille de l'impluvium, changement dans les caractéristiques de l'aménagement; on ne peut non plus explorer l'hétérogénéité des parcelles pour lesquelles on dispose pourtant de données hydriques et agronomiques. Ces fonctions sont réalisables par des modèles simulant les transferts hydriques dans la couverture pédologique.

Modélisation des transferts hydriques

Au travers des expérimentations, nous connaissons la difficulté d'étude d'un mécanisme hydraulique en milieu réel.

En effet, généralement la caractérisation du comportement hydrique d'un sol nécessite que l'on ne dépasse pas le stade de l'analyse stationnelle : les variations des propriétés hydrodynamiques d'un sol étant rapides quand on les aborde dans l'espace; la topographie oriente le sens des écoulements latéraux, l'aval collecte les eaux amont; la profondeur du substratum variable et les caractéristiques des horizons pédologiques déterminent l'importance des écoulements verticaux, etc. [7]; la relation état de surface-ruissellement est également non triviale à l'échelle étudiée : on ne dispose en général que de données issues de simulation de pluies réalisées sur micro-parcelles [8, 9].

Par ailleurs, les objectifs affichés de l'agronome s'attachant à caractériser l'influence d'un tel dispositif sur le système de culture nous firent opter pour un objet d'étude différent. Nous nous sommes contraints à donner de la réalité une représentation simplifiée, mais globale, en vue de la simulation formelle de l'impact de l'aménagement proposé, et partant, à traiter le problème comme étant un domaine de la recherche opérationnelle et non comme un processus physique localement résolvable.

Se situer dans le champ de la recherche opérationnelle n'est pas absurde dès lors qu'on veut produire rapidement des décisions ou des nouvelles hypothèses de travail et que l'on a établi un paradigme de représentation, simulable : objet homothétique de la réalité dont il est toujours de bon ton de discuter la représentativité.

La représentation formelle de l'objet d'étude

Notre démarche initiale a été de nous demander quelle représentation pertinente pouvait s'adapter à la situation étudiée, négligeant dans un premier temps le problème hydrodynamique; soit à définir une représentation heuristique du

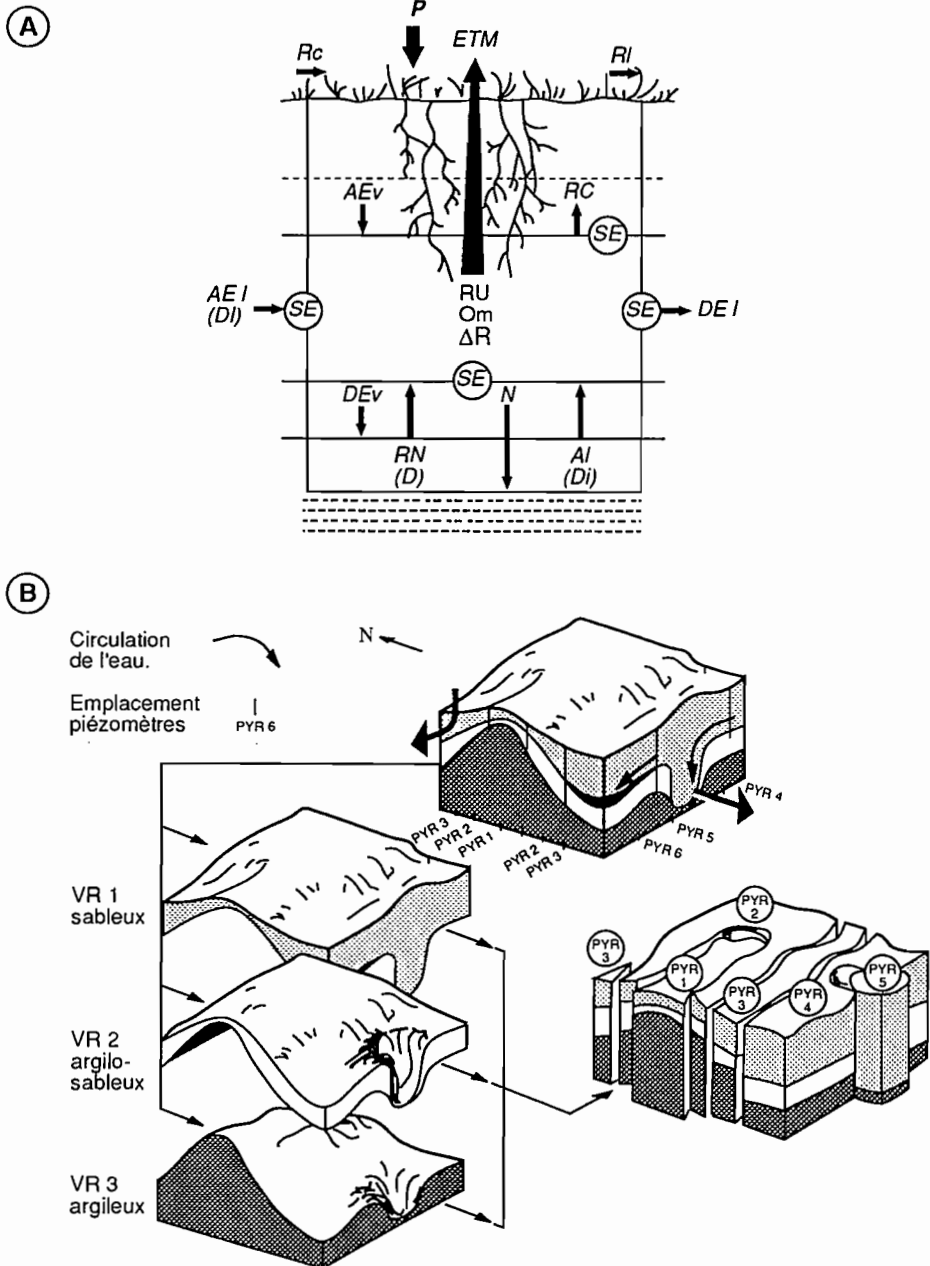


Figure 8. Représentation schématique des fonctions du modèle Source.

8a : Eléments pris en compte dans le bilan « entrée-sortie » du modèle Source.

8b : Analyse de la couverture pédologique (d'après M.C. Girard et L. Dufaure). A gauche, comme un ensemble de Volumes de Référence (VR). A droite, comme un ensemble de « Profils de Volumes de Référence » (PVR). Les flèches indiquent les sens des écoulements.

paysage. Par notre formation, et sans autre justification arbitraire, il nous est apparu naturel de se rattacher à la notion d'organisation pédologique (différents auteurs) dont découlent des représentations thématiques claires de la couverture pédologique. En effet, conceptuellement la couverture pédologique est assimilable à un ensemble hiérarchisé de volumes de référence. Ces volumes sont analogues à la notion empirique d'horizons dont les propriétés seraient uniformément continues sur des limites identifiables. En particulier, il est possible d'exhiber les variables pédologiques (propriétés) qui déterminent des volumes réagissant de la même manière à la circulation de l'eau ([12] et Boulet, Humbel, Lucas, en 1982). Comme il est indiqué sur la figure 8, la couverture pédologique du paysage « hydrique » est alors décrite par un ensemble de profils de volumes de référence.

Cette représentation est cohérente à la réalité pédologique. Elle est opérationnelle; en particulier, elle nous permet de décider des types de flux qui vont affecter les différents volumes : drainage lent ou rapide, écoulement latéral, remontée de nappes, échanges avec le système racinaire.

La surface de contact avec l'atmosphère peut être également représentée par un volume de profondeur nulle. Elle détermine les phénomènes de ruissellement. Le problème délicat est de cerner correctement les relations entre volumes de référence et de décider des écrans à la circulation de l'eau verticalement et latéralement [13]. Ces auteurs développent la notion de seuil de passage dynamique. Au sein d'un volume, l'homogénéité prédéfinie confère un seuil maximal aux différentes tranches du volume en conditions hydriques non limitantes. Au voisinage des limites d'un volume, les seuils dépendent des perméabilités respectives des volumes.

A l'intérieur d'un volume, sur le plan hydrologique, on est ramené à un problème plus simple de bilan hydrique classique.

A l'échelle du paysage, on peut montrer qu'on est ramené à un problème de flot maximum dans un graphe (algorithme de Ford-Fulkerson) : les sommets du graphe sont les volumes par profil de référence, les arêtes les liens verticaux et horizontaux entre volumes. Les arêtes sont orientées et définissent des fonctions de transfert hydrologiques. En limitant la capacité de transport d'arêtes, on peut simuler des vitesses de transport à un pas de temps choisi.

La diguette est un élément présent ou absent du volume de surface; elle induit une rugosité spécifique dudit volume.

L'ensemble de ces représentations constitue aujourd'hui le corps du modèle Source dont nous ne détaillerons pas ici la mécanique (Sabatier, Guillet, à paraître, 1990) et qui a une fonction opérationnelle plus large que l'application Bidi.

Il est clair que le modèle se différencie des modèles classiques de bilan :

- parce qu'il ne travaille pas dans une section de sol mais sur des volumes de référence;
- parce qu'il étudie les problèmes de formation de nappe et de remontée capillaire;
- parce qu'il prend en compte la dimension spatiale des écoulements latéraux et des ruissellements ainsi que la position relative des différents volumes.

L'objet d'étude ainsi représenté constitue un modèle de simulation visant à tester les hypothèses fortes : « la modification de la rugosité du paysage par la mise en place de cordons pierreux a une influence sur les paramètres de l'infiltration. Elle augmente les chances de réussite de la culture par une meilleure satisfaction des termes du bilan hydrique. »

La validation des hypothèses se fait sur la comparaison des stocks simulés et observés in situ, et l'évolution des consommations d'eau par le peuplement végétal, l'importance du ruissellement, etc.

Le modèle peut également apporter des informations sur l'influence des façons culturales au cours du cycle, celles-ci étant interprétées par le modèle comme des changements a priori de la rugosité.

Application aux parcelles d'essai « Ruissellement »

Description

Les parcelles expérimentales de Bidi ont été aménagées en 1985 dans le cadre du programme ORSTOM d'étude de la dynamique des systèmes agro-pastoraux au Yatenga [17]. En 1985, deux parcelles sont mises en culture : l'une est cultivée sans aménagement avec un système de culture traditionnel, l'autre est cultivée sous des cordons pierreux selon le même système. En 1986, une troisième parcelle est adjointe à celles-ci, elle est aménagée de cordon pierreux et labourée. Les parcelles sont jointives, isolées entre elles par un cloisonnement de tôles (figure 3).

Les parcelles sont implantées sur un versant sableux sur cuirasse peu profonde (< 2 m) [5].

En amont, elles présentent une aire dénudée à surface battue (« Zipele ») et à sol meuble très peu épais sur cuirasse peu altérée. En raison de l'absence de végétation et de sa très faible rugosité, cette surface tient lieu d'impluvium. Chaque parcelle comporte un impluvium indépendant (25 × 50 m).

Modélisation des parcelles

Les parcelles ont été modélisées chacune en quatre pédons. Le premier pédon correspond à l'impluvium amont, le second à la portion à pente relative plus importante et faible épaisseur, le troisième à la partie aval du champ en pente douce avec 2 m d'épaisseur de sable. L'exutoire constitue le 4^e pédon.

Les caractéristiques initiales

Les caractéristiques de remplissage et de perméabilité de chaque horizon sont données sur le Tableau I.

Les fonctions hydrauliques précisant la localisation des différents types de cinétiques de l'eau dans les pédons, ainsi que l'enracinement et la superficie sont donnés dans le Tableau I.

La simulation

L'exemple portera sur les trois parcelles (système cultural traditionnel — avec et sans aménagement, système labouré avec aménagement); nous y adjoindrons une modélisation sur une parcelle virtuelle labourée sans aménagement (Tableau I).

Nous utiliserons les années hydrologiques 86 et 87, soit une année assez pluvieuse et une année assez sèche.

La modélisation est segmentée en sous-périodes déterminées en fonction du calendrier cultural et de tout autre modification des états de surface (rugosité, végétation).

Pour une même année seule changera entre parcelle aménagée et non aménagée l'existence de cet aménagement;

Aménagement des conditions de ruissellement

Tableau I. Simulation et modifications apportées.

Année 1985 parcelle témoin à culture traditionnelle									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-41	déb. hivern.	10	Fbl.	Lis	10	45	0.18	070	
41-46	1 ^{er} sarcl.	30	Fbl	Dur	30	50	0.15	070	
46-50	1 sarcl. + 100	100	Moy	Lis	15	45	0.18	070	
50-59	2 ^e sarcl.	200	Dens	Dur	30	50	0.15	070	
Année 1985 parcelle 2 aménagé à culture traditionnelle									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-41	déb. hivern.	10	Fbl.	Lis	10	45	0.18	070	
41-46	1 ^{er} sarcl.	30	Fbl	Dur	3	50	0.15	070	
46-50	1 sarcl. + 100	100	Moy	Lis	20	45	0.18	070	
50-59	2 ^e sarcl.	150	Dens	Dur	30	50	0.15	070	
Année 1985 parcelle 3 aménagée et labourée									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-37	déb. hivern.	00	null	Lis	10	45	0.18	070	
37-41	semis lab.	10	Fbl	Dur	30	50	0.10	100	
41-46	1 ^{er} sarcl.	40	Moy	Dur	30	50	0.15	100	
46-50	1 sarcl. + 100	150	Dens	Lis	10	40	0.18	100	
50-59	2 ^e sarcl.	200	Dens	Dur	30	50	0.15	100	
Année 1986 parcelle témoin à culture traditionnelle									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-37	déb. hivern.	10	Fbl	Lis	10	45	0.18	070	
37-43	semis lab.	10	Fbl	Lis	5	45	0.18	070	
43-47	1 ^{er} sarcl.	30	Fbl	Dur	25	50	0.15	070	
46-50	1 sarcl. + 100	100	Moy	Lis	15	45	0.18	070	
50-59	2 ^e sarcl.	150	Dens	Dur	25	50	0.15	070	
Année 1986 parcelle 2 aménagé à culture traditionnelle									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-37	déb. hivern.	10	Fbl	Lis	10	5	0.18	070	
37-43	semis lab.	10	Fbl	Lis	5	5	0.18	070	
43-47	1 ^{er} sarcl.	30	Fbl	Dur	25	0	0.15	070	
47-50	1 sarcl. + 100	100	Moy	Lis	10	5	0.18	070	
50-59	2 ^e sarcl.	150	Dens	Dur	25	0	0.15	070	
Année 1986 parcelle 3 aménagée labourée									
période	cult.	DA surf	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	FH	
31-37	déb. hivern.	1.55	10	Fbl	Lis	10	45	0.18	070
37-43	semis lab.	1.35	10	Fbl	Lis	5	45	0.18	100
43-47	sarcl. 1	1.40	50	Fbl	Dur	25	50	0.15	100
47-50	sarcl. 1 + 100 mm	1.45	100	May	Lis	10	45	0.18	100
50-59	sarcl. 2	1.40	200	Dens	Dur	25	50	0.15	100

Tableau I. (Suite).

Année 1987 parcelle témoin à culture traditionnelle									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-43	déb. hivern.	10	Fbl	Lis	5	45	0.18	070	
43-50	sarcl. 1	30	Fbl	Dur	30	45	0.18	070	
50-54	sarcl. 2	100	Dens	Dur	30	50	0.15	070	
54-59	sarcl. 2 + 100	150	Dens	Lis	10	45	0.18	070	
Année 1987 parcelle aménagée à façon culturale traditionnelle									
période	phase cult.	Rac cm	CV.	ES	PI mm	PKR mm	KR	FH	
31-43	déb. hivern.	10	Fbl	Lis	5	45	0.18	070	
43-50	sarcl. 1	30	Fbl	Dur	30	45	0.18	070	
50-54	sarcl. 2	100	Dens	Dur	30	50	0.15	070	
54-59	sarcl. 2 + 100	150	Dens	Lis	10	45	0.18	070	
Année 1987 parcelle 3 aménagée labourée									
période	cult.	DA cm	Rac	CV.	ES mm	PI mm	PKR	KR	FH
31-37	déb. hivern.	1.55	10	Fbl	Lis	10	45	0.18	070
37-43	semis lab.	1.35	10	Fbl	Lis	35	50	0.15	100
43-50	sarcl. 1	1.40	50	Moy	Dur	35	50	0.15	100
50-54	sarcl. 2	1.40	100	Dens	Lis	35	50	0.15	100
54-59	sarcl. 2 + 100 mm	1.50	200	Dens	Dur	20	40	0.20	100

Période simulation : pentade 31 (début juin) à la pentade 59 (fin septembre).

Nota. L'appellation d'état de surface « dur » signifie très rugueux.

tampon de 20 cm

vitesse de drainage 40

translat 2

Rac : racine

CV : couverture végétale

ES : état de surface

PI : pluie d'imbibition

PKR : paramètre de pluie limite

KR : Kr max coefficient de ruissellement

FH : front d'humectation

Sarcl. : sarclage

Fbl : faible densité du couvert végétal

Moy : densité moyenne

Dens : couvert dense

Les états de surface (rugosité et végétation) de l'impluvium et de l'exutoire restent constants (battant et couverture végétale nulle).

Interprétation et critique des simulations

Interprétation

On dispose pour l'interprétation des simulations de parcelles du ruissellement

Aménagement des conditions de ruissellement

observé à l'exutoire de chacune d'elle, des évapotranspirations et drainages estimés à partir des stocks hydriques sur les tubes de chaque demi-parcelle.

On extrait des simulations cinq résultats :

- les ruissellements pour chaque unité modélisée;
- l'évapotranspiration;
- les stocks pour chaque volume de sol modélisés.

On ajoute de façon accessoire actuellement une partition des eaux drainées verticalement ou latéralement.

Résultats (figures 9 et 10)

Les lames ruissellées simulées sont conformes du point de vue événementiel aux lames observées à l'exutoire, il y a lieu cependant de mieux identifier et de mieux simuler la différence entre le haut et le bas des parcelles du point de vue quantitatif surtout lors des simulations avec aménagement et labour. On voit dans ces variations entre lames ruissellées simulées et lames observées, un inconvénient à utiliser pour ce modèle des pluies journalières reconstituées lorsqu'on les confronte aux lames observées.

En 1987 : lames ruissellées;

	l.r. modélisées	observées
Témoin	33 mm	40 mm
Aménagée	60 mm	32 mm
Labourée	27 mm	—
Amén. Lab.....	7 mm	15 mm

Le signal ETR constitue un bon indicateur du fonctionnement relatif des parcelles les unes par rapport aux autres et des différences de fonctionnement entre le haut et le bas de celles-ci. Ce signal est conforme au signal observé pour l'ETR.

Les évapotranspirations accusent un écart croissant dans le temps entre le haut et le bas de toutes les parcelles.

On constate de même un écart croissant des évapotranspirations de la parcelle témoin à la parcelle aménagée, à la parcelle labourée et enfin à la parcelle aménagée-labourée. Sur le terrain, cet effet n'apparaît que de façon limitée au niveau des stocks hydriques, il est alors la trace du laminage de la crue par les aménagements et/ou par les diguettes; les résultats culturaux semblent néanmoins attester de cet effet d'écrêtage plus ou moins rapide de la crue en provenance de l'impluvium.

Le modèle montre assez bien l'effet de stockage en début de cycle après labour et les effets de drainage ou d'assèchement relatif par rapport aux parcelles cultivées de façon traditionnelle et/ou avec aménagement seul dans le courant de la saison.

Si pour l'année 1987 les simulations montrent que les différences entre parcelles témoin et aménagée sont faibles, par contre le traitement labouré aménagé assure les stocks les plus favorables et la meilleure élaboration du rendement. Il n'y a notamment pas de stress à la phase de remplissage.

La simulation montre également que le labour associé à la diguette est plus favorable que le labour seul (figures 7 à 11).

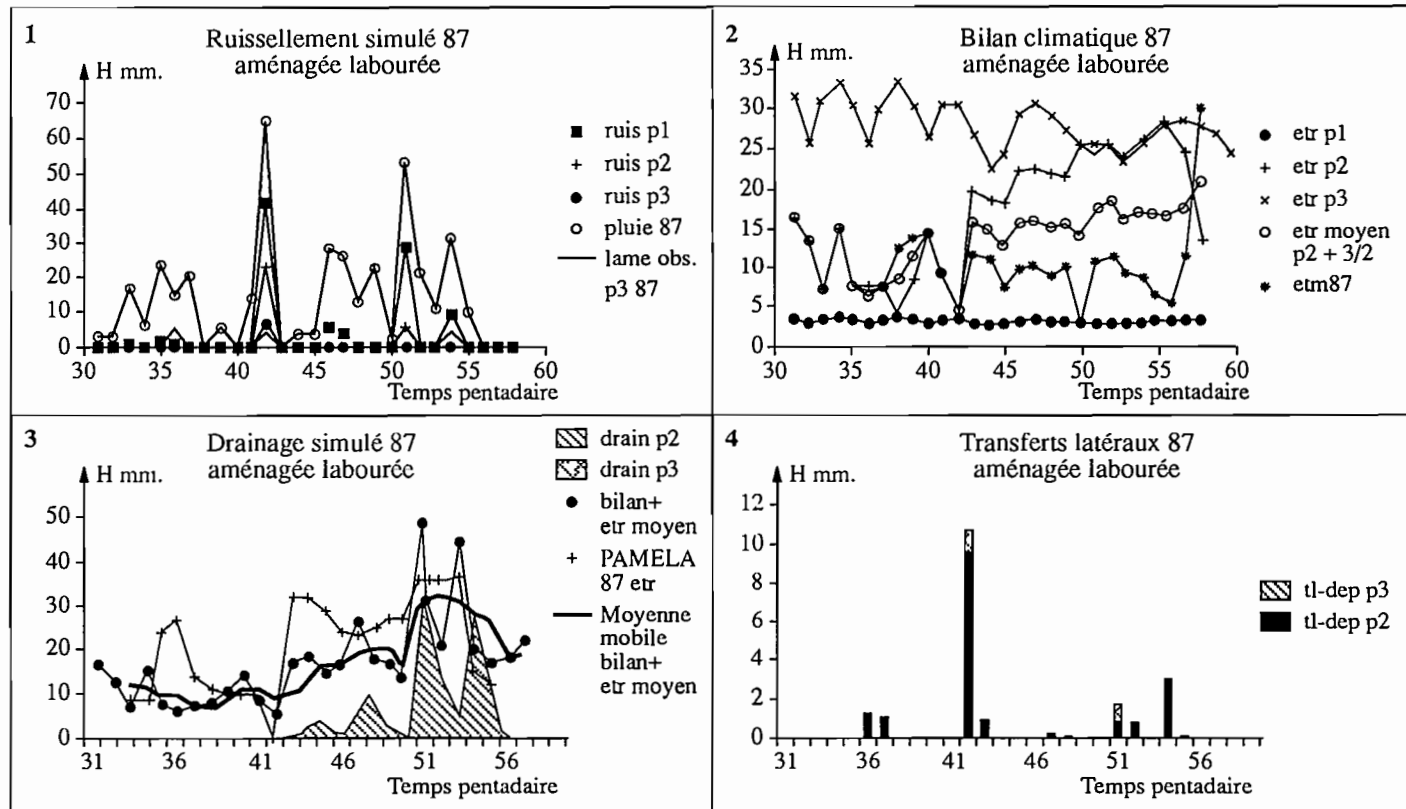


Figure 9. Simulation sur « Source ». Pluviométrie 1987. Différents termes du bilan dans les trois pédons constitutifs du micro-bassin versant — « Aménagé et labouré ».

Aménagement des conditions de ruissellement

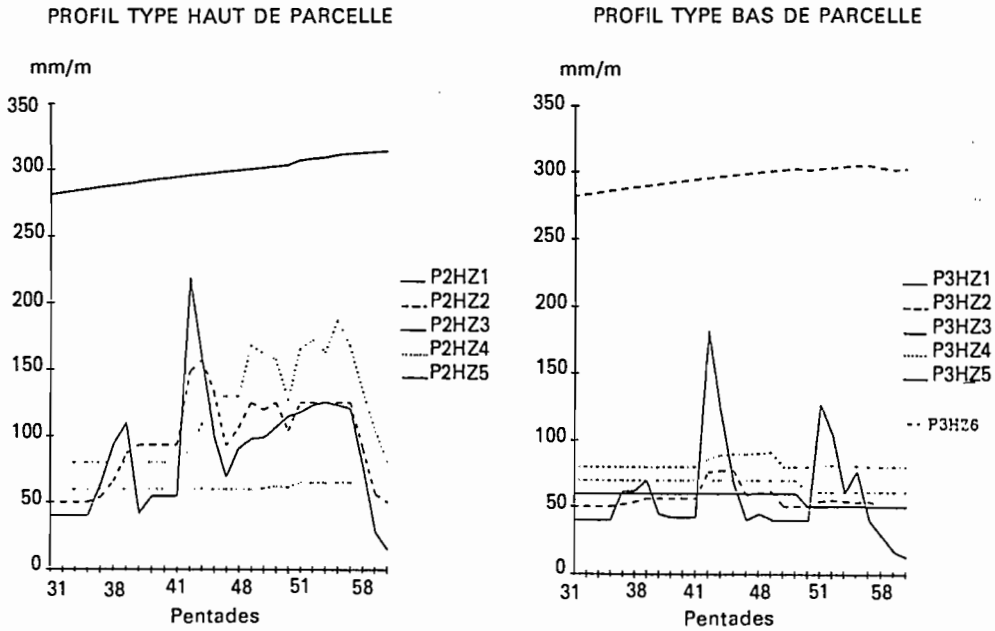


Figure 10. Evolution des humidités simulées de différents horizons (HZ) des deux pédon cultivés P2 et P3. Pluviométrie 1987. « Aménagé et labouré ».

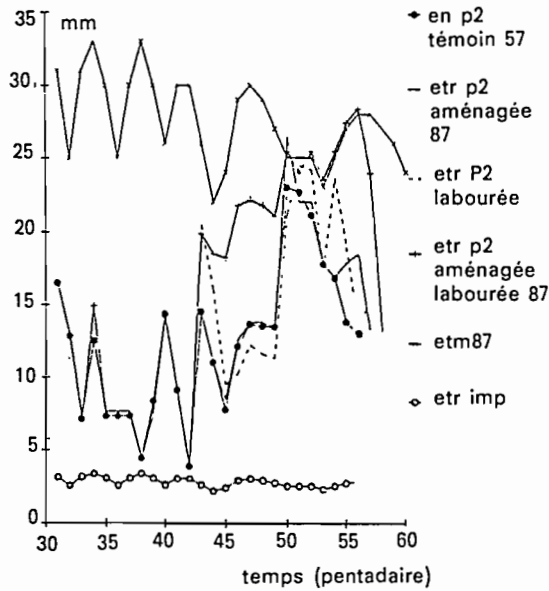


Figure 11. Comparaison ETR simulé entre différents traitements pour le haut de pente (pédon P2).

Le labour seul en 1987 n'apparaît pas apte à améliorer le bilan hydrique⁽¹⁾. En effet, en 1987, la végétation démarre très vite sur les parcelles labourées, la simulation montre cet effet sur l'ETR. Alors que dans la parcelle labourée aménagée le niveau ETR se maintient par suite de la meilleure utilisation des petites pluies, il chute dans la parcelle labourée. On peut estimer là, la fin de l'effet labour. Aux périodes « pluvio favorables » les niveaux ETR sont comparables mais la parcelle labourée aménagée n'a pas subi de stress notable. Au niveau des rendements, les observations confirment les simulations.

Critiques des simulations

De façon générale, les simulations 1986 et 1987 semblent réagir à l'« effet diguette ». Cet effet est toutefois plus marqué en 1987 qu'en 1986. C'est en 1987 sur la parcelle aménagée labourée que l'effet est le plus significatif. En 1986, la sécheresse de fin de cycle a probablement masqué un résultat plus positif. Ces considérations sont conformes aux données expérimentales [16].

Le modèle exagère les différences entre le pédon 2 et le pédon 3, ce qui tendrait à prouver que la définition pédologique du site n'est pas optimale : le pédon 2 bénéficie fortement de l'impluvium amont et ses caractéristiques sont très voisines du pédon 3; le modèle adéquat du terrain devrait soit se réduire à deux pédons, l'impluvium et le glacis, soit augmenter le contraste entre le pédon 2 et le pédon 3. Cette exagération est confirmée par l'évolution des stocks haut de parcelles et bas de parcelles.

Le modèle ne prend en compte que des ruissellements de nappe qui étalent totalement la lame d'eau ce qui n'est sans doute pas la réalité au niveau de la parcelle et donne des erreurs d'estimation de stock. Cette règle peut être aisément modifiable au niveau du modèle (drains de surface).

Les signaux « consommation en eau » reconstituées (ETR + drainage) et simulés calculés sont homothétiques.

Les périodes et les intensités de drainage calculées correspondent aux événements observés, sauf dans les périodes intenses de transfert latéral ce qui montre bien la difficulté de représenter le pas de temps de ce phénomène et son effet sur la porosité.

Il apparaît que l'effet de l'impluvium est double :

- irrigation complémentaire par ruissellement direct;
- micro irrigation par écoulement retardé sur les cuirasses; nous avons d'ailleurs observé que la surface de l'impluvium restait humide longtemps après la pluie.

La simulation d'une parcelle labourée virtuelle avec le modèle est démonstrative de son aptitude à produire des scénarios.

Cette simulation permet de resituer l'effet du labour par rapport à l'effet diguette sans avoir à l'expérimenter.

(1) Plus que l'aménagé seul.

Conclusions

La simulation ne doit pas seulement être synonyme de construction d'un univers hypothétique, mais également conçue comme une étape essentielle de la démarche expérimentale (Sebillotte, 1988).

Sans la démarche expérimentale, pas de résultat ni même d'hypothèses de départ.

Chaque étape de la démarche est établie en fonction de l'idée que l'on se fait du processus étudié et conduit à une nouvelle représentation de celui-ci.

Les résultats de l'enquête sont simples mais ne permettent pas de tirer de conclusions des phénomènes physiques.

L'expérimentation permet de les aborder, de créer des situations hypothétiques mais nécessite un grand nombre de répétitions des événements étudiés.

La modélisation permet d'approcher cette situation par des moyens restreints.

Elle permet une représentation efficace du processus étudié. En retour, l'expérimentation permet la validation de différents aspects du modèle. Le modèle permet la gestion de nouvelles hypothèses et de critiquer à l'occasion le protocole expérimental.

Sur le plan hydrologique, le modèle n'est pas pleinement satisfaisant, mais permet une représentation de la réalité observée cohérente.

Sur le plan agronomique, il complète l'analyse des schémas d'élaboration du rendement. Il permet également d'approcher l'effet des interventions culturales et des aménagements sur le bilan hydrique. Il permet enfin de raisonner au sein du système de culture et de son support spatial.

Références

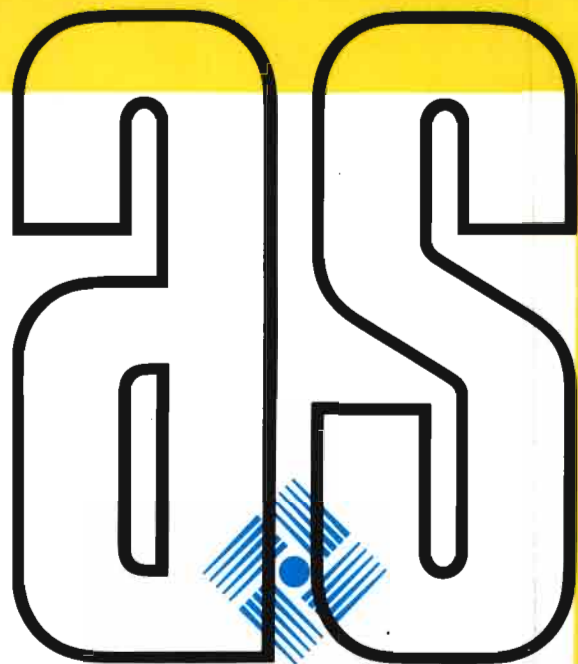
1. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de l'Université de Paris VI, Paris, Col. Etudes et Thèses de l'ORSTOM, 336 p.
2. Baulier V., Sabatier J.-L. (1989). Logiciel Source version 2, Document IRAT.
3. Bellman (1970). On structural identifiability. *Math Biosciences*, 7, 392-339.
4. Bertalanffy (1973). Théorie générale des systèmes. In : Dunod ed, Boisvieux J.-F., 1977. Modélisation et commande de processus biologiques. Aspects théoriques et mise en œuvre. Thèse Paris VI, ed.
5. Boulet R. (1974). Cartes pédologiques du Centre Nord de la Haute-Volta. ORSTOM, Dakar.
6. Buisson J.-B., Bousquet, Sabatier J.-L. (1988). Modèle de simulation des transferts hydriques à l'échelle d'un bassin versant : le logiciel Source. Document IRAT.
7. Callot G. *et al.* (1982). Les interactions sol-racines, incidence sur la nutrition minérale. INRA, 300 p.
8. Casenave A., Valentin C. (1988). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Rapport CEE-ORSTOM.

9. Collinet J. (1988). Comportements hydrodynamiques et érosif des sols de l'Afrique de l'Ouest, 513 p. + ann. Thèse de l'Université de Strasbourg.
10. Cornet A. (1981). Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. Thèse USTL, Montpellier.
11. Franquin P., Forest F. (1977). Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. L'Agronomie tropicale XXXII-I.
12. Girard M.C. (1983). Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région de plateaux jurassiques de Bourgogne. Thèse d'état INAPG.
13. Girard M.C., Dufaure L. (1988). Présentation d'un modèle de transfert de l'eau dans les sols : Source. INRA R. Calvet ed.
14. Lamachère J.-M., Serpantie G. (1988). Aridification du climat subsahélien, conséquence de trois méthodes d'amélioration des bilans hydriques au champ pour une culture pluviale. ORSTOM, 39 p., multig.
15. Roose E. (1981). Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Collection travaux et documents. ORSTOM, 576 p.
16. Serpantie G. (1988). Aménagements de conditionnement des ruissellements des pentes cultivées soudano-sahéliennes. In recueil d'expériences d'aménagement du ruissellement. CILSS ed., 19 p.
17. Serpantie G., Lamachère J.-M. (1989). Pour une connaissance des conditions de mise en œuvre des aménagements de ruissellement. Communication à l'atelier sur les systèmes de collecte du ruissellement, Ouagadougou, avril 1989. 24 p.
18. Serpantie G., Lamachère J.-M. (1989). Improvement of cultivated slopes in sudano sahelian areas thanks to permeable microdam systems. An existing need to improve setting up and cropping conditions. 6th ISCO Conference, 6-18 nov. 89, Addis-Abeba.
19. Serpantie G., Martinelli B. (1987). La confrontation paysans-aménageurs au Yatenga. Analyse d'un agronome et d'un ethnologue, in Les Cahiers de la Recherche Développement, pp. 29-62, n° 14-18.
20. Wright P. (1985). La conservation des eaux et des sols par les paysans. PAF Ouahigouya, I, 2 p.

André Kergreis
Jacques Claude

**UTILISATION
RATIONNELLE**
de L'EAU
des
**PETITS
BASSINS
VERSANTS**
en **ZONE
ARIDE**

AUPELF



actualité scientifique

British Library Cataloguing in Publication Data

Kergreis, André

Utilisation rationnelle de l'eau des petits
bassins versants en zone aride.

1. Hydrology

I. Title

551.49

ISBN 0-86196-315-6

Editions John Libbey Eurotext

6, rue Blanche, 92120 Montrouge,
France

Tél : (1) 47 35 85 52

John Libbey and Company Ltd

13 Smith Yard, Summerley Street,
London SW18 4HR, England

Tél : (81) 947 27 77

John Libbey CIC

Via Spallanzani 11,
00161, Rome, Italy

Tél : (06) 862.289

© 1991, Paris

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage — loi du 11 mars 1957 — sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français du Copyright, 6 bis, rue Gabriel-Laumain, 75010 Paris, France.

UTILISATION RATIONNELLE DE L'EAU DES PETITS BASSINS VERSANTS EN ZONE ARIDE

Journées scientifiques du Réseau
« Génie Para-Sécheresse » de l'UREF
organisées avec la collaboration
du Réseau Recherche Résistance à la Sécheresse (R3S)
et de l'Ecole Inter Etats d'Ingénieurs de l'Equipement
Rural (EIER)
EIER, Ouagadougou, 12-15 mars 1990

COORDINATION

André Kergreis

Jacques Claude

