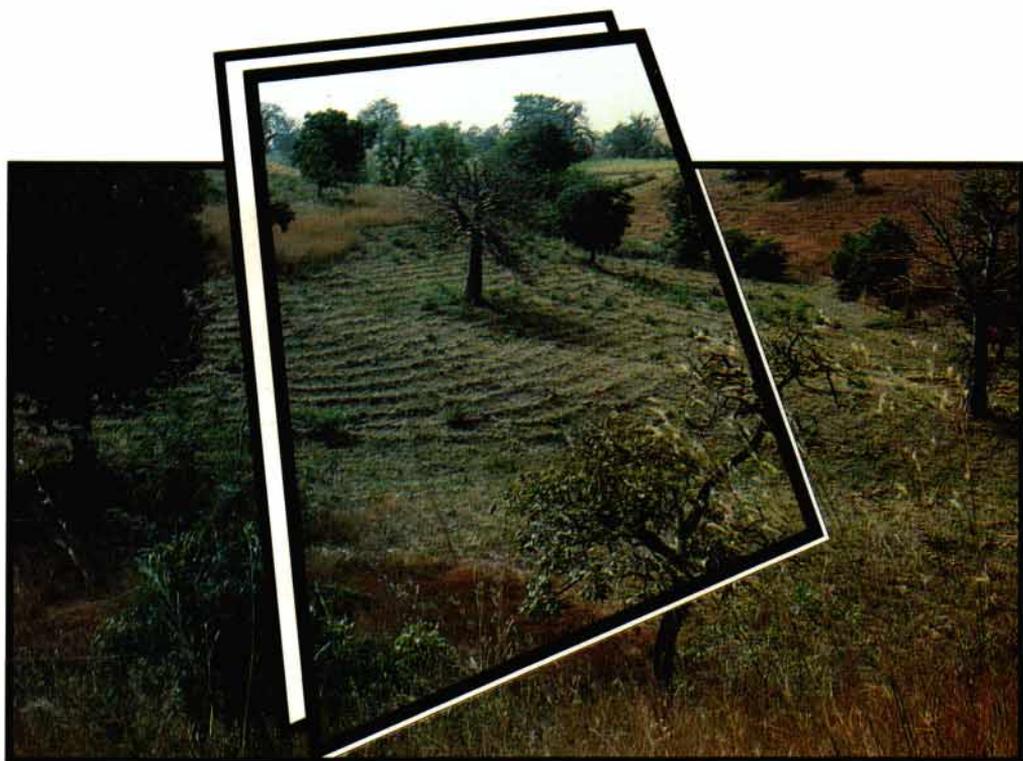


USAGE AGRICOLE DE L'EAU

Textes réunis et présentés par
Paul CARRÉ



Sixièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM
Montpellier
12 et 13 septembre 1990

SIXIÈMES JOURNÉES HYDROLOGIQUES DE L'ORSTOM

Montpellier

12 et 13 septembre 1990

USAGE AGRICOLE DE L'EAU

Textes réunis et présentés par

Paul CARRÉ

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection **COLLOQUES** et **SÉMINAIRES**

PARIS 1992

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un 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 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

SOMMAIRE

Première journée "L'hydrologie rurale : gestion rationnelle de l'eau d'irrigation"

P. POURRUT Approche conceptuelle et principes d'une "hydrologie rurale"	9
Y.M. CABIDOUCHE ET H. OZIER-LAFONTAINE Gestion agricole de l'eau a la parcelle et systèmes de culture irriguée dans la zone caraïbe	13
J. ALBERGEL, D. BRUNET, G. DUBEE, J.P.MONTOROI, P. ZANTE Gestion d'un barrage anti-sel en Basse Casamance (Sénégal).....	33
L. SEGUIS Cultures de décrue et périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal.....	47
A. LARAQUE Critères de qualité des eaux pour un usage en irrigation (évolutions et prévisions dans les açudes du Nordeste brésilien semi-aride).....	65
J.L. SABATIER, F. GUILLET Modélisation de l'alimentation hydrique des bassins versants et maîtrise de l'eau en situation de bas-fonds	99
Discussion	131
M. MORELL Variabilité et gestion des ressources en eau de la Guadeloupe.....	139
J.C. POUGET HYDRAM. Aide à la gestion d'HYDRo-AMénagements. Application à l'irrigation en Gadeloupe.....	151
E. CADIER, F. MOLLE, C.H. CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE, F.R. DOHERTY, M. MONTGAILLARD Dimensionnement de petits barrages dans le Nordeste Brésilien semi-aride	173
P. LE GOULVEN, T. RUF L'eau et sa gestion dans la planification de l'irrigation traditionnelle des andes équatoriennes	201

Table ronde : Modèles de simulation pour l'exploitation et la planification des ressources des systèmes d'eau	225
--	-----

P. POURRUT Clôture de la première journée	233
---	-----

Deuxième journée
"Maîtrise de l'eau : aspects agronomiques"

F. FOREST Introduction au thème "Maîtrise de l'eau : aspects agronomiques	237
---	-----

J. ALBERGEL, P. PEREZ, M. VAKSMANN Gestion agricole des pluies au Sahel. Une méthode d'estimation du ruissellement dans le bilan hydrique des cultures	243
--	-----

J.M. LAMACHERE, G. SERPANTIE Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne (Burkina Faso - Province du Yatenga - région de Bidi)	257
--	-----

C. VALENTIN Cartographie et suivi des états de surface induits par les systèmes de culture	277
--	-----

F. FOREST Introduction à la discussion	295
--	-----

Discussion

Table ronde : Le rôle d'un réseau de recherches dans la lutte contre la sécheresse en Afrique de l'Ouest : cas du R3S	309
--	-----

F. MONIOD Clôture des Sixièmes Journées	
Liste des auteurs de communication	333
Liste des participants	335

Avant propos

Organisées par la Commission Scientifique d'Hydrologie-Pédologie de l'ORSTOM, avec l'appui du Laboratoire d'Hydrologie du Centre ORSTOM de Montpellier, les sixièmes Journées Hydrologiques ont été consacrées à des exposés et tables rondes sur "**l'Usage agricole de l'Eau**".

L'amphithéâtre du CNEARC (Centre National d'Etude Agronomique des Régions Chaudes), à Montpellier, a été mis à la disposition des participants, les 12 et 13 septembre 1990.

Première Journée, 12 septembre 1990

"L'hydrologie rurale : gestion rationnelle de l'eau d'irrigation"

Animateur : **Pierre Pourrut**

Deuxième Journée : 13 septembre 1990

"Maîtrise de l'eau : aspects agronomiques"

Animateur : **Francis Forest**

Les Actes ont été édités avec les concours de **Fatima Benmehdi** pour la dactylographie des discussions et tables rondes, et de **JP.Debuiche** pour la préparation de la maquette de couverture.

Ouverture des 6eme journées hydrologiques de l'ORSTOM

Le 12 septembre 1990 à 9 h, F. Moniod, Vice-Président de la Commission Scientifique Hydrologie-Pédologie, souhaite la bienvenue à l'assemblée et salue la présence de G. Pedro, Président de la Commission.

Il se félicite de la présence d'une assistance nombreuse de techniciens et chercheurs venus cette année encore manifester leur souci commun : contribuer à identifier, mieux comprendre et prévoir les déplacements de l'eau dans des environnements variés.

Il rappelle les thèmes qui ont déjà donné l'occasion de réunir, depuis 1985, une bonne partie des participants d'aujourd'hui :

1985 : Les techniques de simulation de pluies, et leurs contributions aux analyses et modélisations des systèmes hydrologiques.

1986 : Les données et l'analyse de la distribution spatio-temporelle des précipitations.

1987 : Techniques nouvelles en hydrométrie et pluviométrie

1988 : La physico-chimie des eaux continentales

1989 : Le fonctionnement Hydrologique d'un petit bassin versant soudanien de Côte d'Ivoire.

Il espère que le thème traité, à l'occasion des Journées de 1990, suscitera le même intérêt qu'à l'habitude.

Il remercie les principaux acteurs de ces journées, les auteurs de communications et les deux animateurs et coordonnateurs des sous-thèmes, **Francis Forest**, agronome de l'IRAT (Institut de Recherches en Agronomie Tropicale) à Montpellier, et **Pierre Pourrut**, hydrologue de l'ORSTOM en Equateur.

Il invite ce dernier à introduire les présentations de la première journée : "L'hydrologie rurale : gestion rationnelle de l'eau d'irrigation".

12 Septembre 1990

L'hydrologie rurale : gestion rationnelle de l'eau d'irrigation

Coordonnateur : Pierre Pourrut

ORSTOM (Quito - Equateur)

Approche conceptuelle et principes d'une "hydrologie rurale"

Pierre POURRUT
Ingénieur hydrologue ORSTOM, Montpellier

Un peu comme l'ORSTOM a réformé ses structures pour atteindre son nouvel objectif de contribution au développement des pays du Tiers-monde, l'hydrologie a aussi évolué. Autrefois science pure et dure par tradition, combinant à la fois l'effort de terrain et le traitement mathématique sophistiqué des données recueillies, elle a dû s'adapter à une **situation mondiale où l'économie de l'eau acquiert chaque jour une nouvelle dimension**. Cette évolution tient surtout au fait que la confrontation des ressources aux besoins en eau pour l'agriculture n'est pas du tout aussi simple qu'en matière de production d'énergie. Selon le choix fait entre la gamme étendue des options politiques, économiques et agricoles, les besoins traduits en demande en eau varient énormément. Comme le souligne F. MONIOD, "les solutions arithmétiques des problèmes de robinets ont alors peu de chance de donner satisfaction et donc d'être retenus". On se rend compte que la gestion des eaux est en fait une pratique sociale et le concept d' "hydrologie rurale" n'y échappe pas.

Dans les régions arides, où il est de règle que les pluies présentent une très forte irrégularité interannuelle, l'eau généralement peu abondante destinée à l'irrigation doit être économisée au maximum et distribuée judicieusement. Même si les études d'hydrologie classique, qu'on pourrait qualifier de "naturelle" (quantification, répartition spatiale et distribution au cours de l'année des potentiels hydriques, prévision statistique des risques de défaillance, etc.), en constituent le fondement indispensable, elles ne peuvent à elles seules fournir **tous les éléments nécessaires à l'établissement des processus conduisant à l'utilisation rationnelle de l'eau**. Face aux nécessités de développement, c'est la constatation de cette carence qui a donné naissance à l'hydrologie rurale.

Il faut par ailleurs souligner que "la demande en eau" a pris une signification nouvelle. Elle ne doit pas seulement être considérée sous ses aspects spatiaux et temporels les plus divers (qu'il s'agisse de la variation des besoins hydriques ponctuels des cultures au cours de leur cycle végétatif, des débits nécessaires en fonction des surfaces irriguées, des sols et de l'efficacité du réseau des canaux de distribution ou encore de l'estimation des besoins selon les plans de développement régionaux ou nationaux) mais aussi sous l'angle social. Tout particulièrement en agriculture, un nouveau concept y est associé, celui de "l'acuité des besoins hydriques" qui s'exprime en priorité de la demande et se traduit en termes socio-économiques. La caractéristique première de l'hydrologie rurale est donc une pluridisciplinarité obligatoire qui fait appel, entre autres spécialistes, à des pédologues, des agronomes, des aménageurs et des agro-économistes, son objectif global étant de résoudre tous les cas d'es-pèce afin de programmer l'utilisation de l'eau disponible par les

mécanismes les plus appropriés. A l'aide d'indicateurs agro-socio-économiques, destinés à estimer les besoins en eau actuels et prospectifs, et en les associant à une évaluation fréquentielle des ressources disponibles en tout point de l'aire considérée, l'hydrologie rurale va donc s'appliquer à dresser un tableau synoptique des scénarios d'offre/demande selon diverses évolutions dans le temps ou dans l'espace. Parallèlement, en fonction de ces mêmes scénarios, elle va s'efforcer de proposer différentes options d'aménagements hydro-agricoles et de définir leurs modalités de fonctionnement en vue d'établir **les stratégies devant permettre une gestion adaptée des ressources hydriques ainsi que leur planification à terme.**

Quelle que soit l'échelle spatiale de travail, on peut parler d'une "économie de l'eau". Mais la réalité est évidemment bien plus complexe que cet énoncé synthétique étant donné le **nombre élevé ainsi que l'étendue du champ des variables.** Climat, disponibilité en ressources hydriques, sols, types de culture, surface et répartition des périmètres irrigués ou potentiellement irrigables, distribution de la population, réseaux de commercialisation et stratégies régionales, pour ne citer que quelques critères essentiels, se conjuguent pour donner une infinité de cas qui rend bien difficile tout transfert des résultats obtenus hors de la zone étudiée. Mais si le transfert direct est impossible, il n'en reste pas moins que certains processus logiques, une fois éprouvés, peuvent s'ériger en grands principes méthodologiques susceptibles d'être adaptés à un plus grand nombre de situations.

A l'heure actuelle, malgré l'existence de nombreux travaux monolithiques, par exemple purement agronomiques ou agroclimatologiques, peu d'études ont tenu compte de l'aspect multifactoriel qui doit conduire à dicter les règles d'une utilisation agricole de l'eau vraiment économique. C'est la raison pour laquelle il était urgent de confronter les quelques expériences déjà menées à bien ou en cours d'exécution. Au-delà d'une simple présentation de résultats et de la constitution d'un cadre de référence pour l'hydrologie rurale, les Journées Hydrologiques 1990 auront atteint leur but si elles permettent de **définir certains critères "universels"** (je pense, par exemple, à la détermination du concept de "nécessité d'irrigation") et **d'isoler certaines orientations méthodologiques** (entre autres celles relatives à la modélisation des phénomènes ou encore celles constituées par la séquence des étapes successives nécessaires à une planification régionale) qui pourraient être l'objet systématique d'études approfondies dans un futur proche.

Référence bibliographique en français: Pourrut (P.), "Estimation de la demande en eau du secteur agricole et des disponibilités pour la satisfaire - Eléments de base pour la planification de l'irrigation en Equateur", Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, vol. XVII-2, 1980, pages 91-127.

**GESTION AGRICOLE DE L'EAU A LA PARCELLE ET SYSTEMES
DE CULTURE IRRIGUES DANS LA ZONE CARAIBE**

Par

Y.M. CABIDOCHÉ

H. OZIER - LAFONTAINE

GESTION AGRICOLE DE L'EAU A LA PARCELLE ET SYSTEMES DE CULTURE IRRIGUES DANS LA ZONE CARAÏBE

Yves-Marie CABIDOCHÉ (*), Harry OZIER-LAFONTAINE (**)

RESUME:

Dans les agricultures paysannes pluviales des zones sèches, des travaux du sol tiennent les parcelles prêtes à stocker les premières pluies pour la plantation ou le semis; cette pratique n'est pas sans effet sur le risque d'érosion. Les effets de l'introduction de l'irrigation sont analysés à partir de l'exemple récent de la Grande-Terre de Guadeloupe. La disposition de l'eau agricole est perçue par les agriculteurs comme une ressource illimitée. De bonnes méthodes existent pour adapter la conduite de l'irrigation aux besoins des plantes déterminés par des simulations de bilans hydriques. Elles sont malheureusement inaccessibles aux paysans peu formés. Par ailleurs elles ne règlent pas les problèmes d'hétérogénéité d'apport et d'intensité d'application des doses que l'on rencontre systématiquement sur les sols argileux gonflants des zones à saison sèche marquée carribéennes. Gaspillage de la ressource, altération des rendements, et modification profonde des systèmes de culture, sont les traductions initiales d'une mauvaise maîtrise de l'eau. Pour y remédier des techniques simples de contrôle du stock d'eau des sols argileux sont mises au point à l'INRA Antilles-Guyane.

La relation étroite pluviométrie - constituants argileux des sols permet de généraliser le propos et de développer un schéma cohérent des risques de baisse de fertilité associés à l'irrigation (érosion, salinisation).

INTRODUCTION

Des périmètres agricoles irrigués fonctionnent depuis plusieurs décennies aux Antilles (Cuba, Haïti, St. Domingue, Jamaïque, Porto-Rico). Dédiée dans un premier temps aux grandes cultures d'exportation, l'irrigation concerne de plus en plus, depuis les années 1970, des régions dans lesquelles domine une petite paysannerie, cantonnée jusque là dans des systèmes de culture pluviaux vivriers. Aux Antilles françaises, avec les deux "grands périmètres" du Sud-Est de la Martinique (4500 ha irrigables depuis 1987) et de Grande-Terre de Guadeloupe (2500 ha en 1990, 6000 ha à l'horizon 1993).

Tout à fait logiquement, ces périmètres correspondent à des zones à saison sèche marquée, dans lesquelles le bilan hydrique est déficitaire pendant plusieurs mois. Ces zones montrent essentiellement des sols argileux gonflants. Leurs propriétés physiques particulières ont une grande influence sur les pratiques agricoles, mais aussi sur les difficultés rencontrées lors de l'introduction de l'irrigation.

(*) Station Agropédoclimatique de la Zone Caraïbe

INRA Antilles-Guyane BP 1232 F97184 Pointe-à-Pitre Cedex

(**) Développement Agricole Caraïbe, Université Antilles-Guyane
Campus de Fouillol, BP 810 F97174 Pointe-à-Pitre Cedex

Nous nous proposons de développer les difficultés rencontrées dans le domaine de la gestion de l'eau agricole à la parcelle, et plus généralement dans les systèmes de culture, sur des exemples du domaine des sols argileux gonflants de la Caraïbe.

I.-PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS ARGILEUX GONFLANTS ET PRATIQUES AGRICOLES ASSOCIEES.

Les argiles gonflantes (smectites, parfois associées à des halloysites) présentent une organisation élémentaire en quasi cristaux dont l'arrangement relatif détermine un réseau de pores fins (1 à 0.1 m) remplis d'eau en permanence. Ces réseaux sont à géométrie variable en fonction de l'énergie de l'eau (TESSIER, 1984)

Cette organisation en réseau saturé par l'eau a quatre conséquences principales:

- la conductivité hydraulique de l'argile "continue" est très faible, de 1 à 0.1 mm/jour; la diffusion de l'eau est très lente, même sous fort gradient de potentiel, à cause des points de constriction des réseaux. En conséquence, seuls les pores tubulaires d'origine biotique, et les fissures, lorsqu'elles existent, permettent l'infiltration profonde de l'eau.

- la cohésion de ces matériaux est très forte, surtout en sec.

- l'adhésivité est très élevée à l'état humide.

- la variation de géométrie du réseau se traduit macroscopiquement par d'importants mouvements de gonflement (fermeture complète du sol entraînant un excès d'eau) et de retrait, qui en raison de la forte cohésion, provoque l'ouverture de larges fissures délimitant des prismes de grande taille.

En régime pluvial, l'agriculteur est amené à préparer sa culture pour le début de la période pluvieuse; or les sols, en fin de saison sèche sont tellement cohérents que tout travail du sol manuel est épuisant. Tout travail mécanisé, sauf à disposer d'une puissance double par rapport à la puissance nominale pour un outil donné, est trop superficiel pour être efficace, tant vis à vis du désherbage que de la création d'une couche travaillée de structure fine. On attend donc les premières pluies pour effectuer un travail du sol; le sol mis-à-nu demeure exposé à plusieurs pluies dans un double objectif: permettre une recharge des réserves, et obtenir à la suite des alternances d'humectation-dessiccation une auto-fragmentation des grosses mottes, impossibles à fragmenter mécaniquement.

Les pluies thermo-convectives du début de l'hivernage (mai-juin en Guadeloupe, juin-juillet en Haïti) sont souvent brèves mais de hauteur importante et de très forte intensité. Ces pluies arrivant sur des sols nus ont une très forte capacité érosive: le splash est capable de transloquer des agrégats de plusieurs millimètres de diamètre, tandis que le fond de la couche travaillée devient quasiment imperméable par

regonflement, engendrant un ruissellement quasi total. On connaît le cas tristement célèbre des mornes basaltiques d'Haïti, caricature de ce phénomène pour plusieurs raisons (CABIDOCHÉ, 1989a) :

- les argiles des mornes basaltiques, de garniture cationique magnésio-sodique sont particulièrement instables,
- la pression de population a conduit à cultiver des terres de plus en plus pentues, et de plus en plus bas en altitude; le caractère aléatoire des pluies augmentant alors, les sols restent nus plus longtemps.
- dans un premier temps, le décapage des couches superficielles met à nu des horizons intermédiaires qui conservent une bonne fertilité chimique, et sont beaucoup plus faciles à travailler; on peut arriver au paradoxe d'une perception positive de l'érosion.

Les périodes pluvieuses durables, associées aux perturbations et dépressions tropicales des mois d'août à octobre, provoquent l'apparition d'importants excès d'eau, qui affectent gravement la croissance des plantes. Le modelage de la surface du sol a été autrefois pratiqué, mais ne l'est plus que dans les systèmes de culture traditionnels: buttes, billons et planches bombées permettaient de ménager un environnement aéré dans la partie supérieure de l'enracinement. L'introduction de la mécanisation a fait disparaître ces pratiques.

Dans certains cas, on a pu noter une utilisation positive de la faible conductivité de l'argile continue. Dans l'itinéraire technique de plantation de la canne à sucre l'utilisation d'une sillonneuse, sur un sol déjà réhumecté en fond de couche travaillée, crée une gouttière lissée, et donc quasiment imperméable. Ainsi la moindre petite pluie va être partiellement stockée sur cette gouttière, au voisinage de la bouture de canne.

Sans entrer plus avant dans le détail des pratiques agricoles en cultures pluviales, nous retiendrons donc:

- que les jours disponibles pour un travail du sol positif sont peu nombreux et extrêmement aléatoires dans le calendrier.
- que les sols restent en conséquence nus pendant une période de pluies érosives.
- qu'en cultures mécanisées, le passage répété d'outils crée des semelles lissées imperméables, qui ont un effet objectivement positif pour la plantation de la canne à sucre, mais peuvent engendrer un excès d'eau sous pluviométrie importante.
- que les risques d'excès d'eau en saison humide sont importants, cependant que les pratiques d'assainissement sont rares ou ont disparu.

II.-INTRODUCTION DE L'IRRIGATION DANS LES SOLS ARGILEUX GONFLANTS: UNE NECESSITE, MAIS UNE REVOLUTION DANS LES SYSTEMES DE CULTURE. Cas de la Grande-Terre de Guadeloupe.

2.1.-JUSTIFICATION INCONTESTABLE DE L'IRRIGATION

Les périmètres développés en sols argileux gonflants sont tous en deçà de l'isohyète moyenne 1500mm/an, qui correspond sensiblement à l'ETP annuelle; comme les mois de saison humide sont nettement excédentaires, de forts déficits, très variables selon les années, affectent les mois de janvier à juin: 330mm 8 années sur 10, 560mm 5 sur 10, et 720mm 2 sur 10. PELLERIN (1986) a montré dans l'Est de la Grande-Terre pour la période 1964-84 une relation linéaire expliquant 85% de la variance des rendements bruts en canne à sucre par le rapport ETR/ETM (fig.1), calculé à partir d'un modèle classique de bilan hydrique des cultures(2 réservoirs RDU et RFU, coefficients culturaux, ruissellement et drainage négligés en phase de remplissage).

Cette étude a permis de montrer en même temps l'effet dépressif des excès d'eau climatiques sur les rendements. Une analyse plus fine des relations rendements / profondeurs des sols obtenus sur une parcelle a permis de montrer que cet effet dépressif concerne essentiellement les sols profonds, vertisols au sens strict, dont le regonflement prolongé est générateur d'anoxie (fig.2). Dans les sols peu épais, la présence de cailloux, la pente et la proximité du calcaire sous-jacent permettent une évacuation de l'eau excédentaire.

2.2.-LES HYPOTHESES DE L'ETUDE PREALABLE (BUHLER, 1986)

L'aptitude des sols à l'irrigation croît avec la profondeur. Si cela est vrai concernant la dimension des réserves, nous avons vu que le risque d'excès d'eau croît aussi avec la profondeur; or aucun plan d'assainissement n'est prévu.

L'irrigation doit permettre d'augmenter les rendements en canne, et de régulariser les récoltes en permettant des plantations précoces. Ce point est particulièrement souligné, compte-tenu du rôle social considérable que joue la canne dans l'emploi, tant agricole qu'industriel.

Elle doit permettre une diversification et une intensification des cultures paysannes, en particulier dans le domaine fourrager.

2.3.-LA REALITE PRATIQUE DES CULTURES IRRIGUEES

2.3.1.-CANNE A SUCRE INDUSTRIELLE:

Seules les terres en faire-valoir direct de la sucrerie sont à ce jour très partiellement irriguées, à perte. Les utilisateurs de l'eau privilégient le coût de main d'oeuvre

Figure 1: RELATION ENTRE LE DEFICIT HYDRIQUE ET LE RENDEMENT EN CANNE-A-SUCRE EN GRANDE-TERRRE DE GUADELOUPE (d'après PELLERIN, 1986)

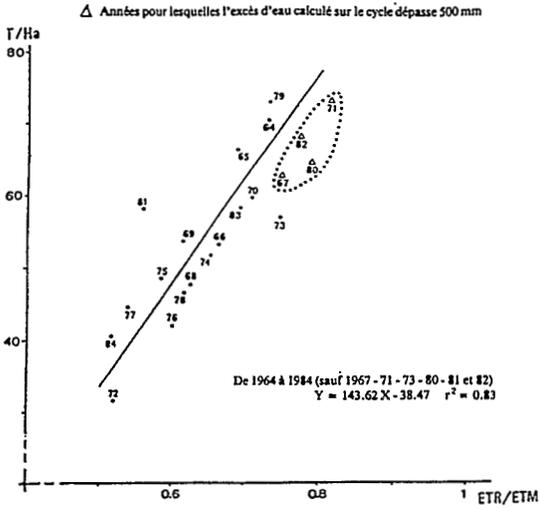
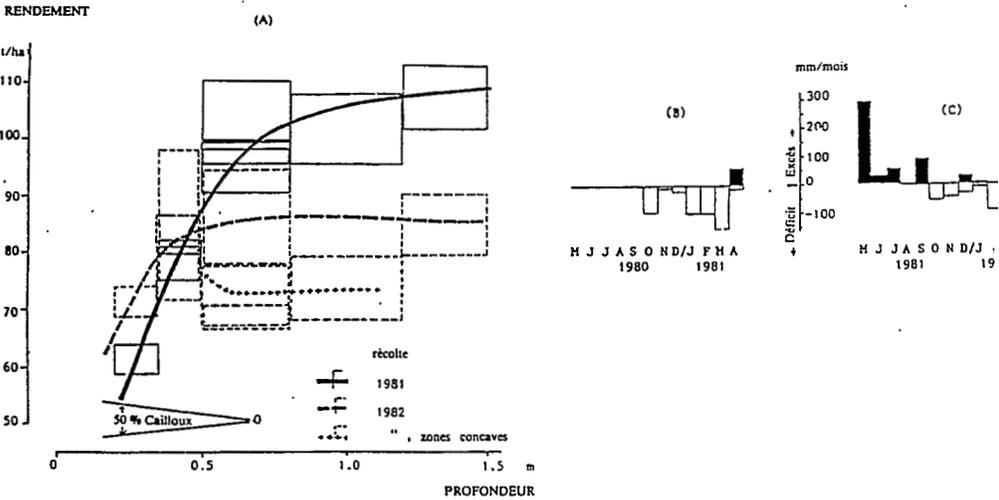


Figure 2: EFFET PROFONDEUR DU SOL SUR LE RENDEMENT EN CANNE-A-SUCRE ET SA VARIATION SELON LE BILAN HYDRIQUE (CABIDOCHÉ et NEY, 1986)

(A) Comparaison des relations rendement-profondeur sur les deux premières récoltes (mesures sur des placettes d'une même parcelle). Y.-M. CABIDOCHÉ et P. ARCHER.

(B) et (C) Distribution de l'excès et du déficit climatiques mensuel en eau, sur chacune des campagnes (Bilan calculé au pas journalier, pour des verticols de 1m, RU = 150 mm, RFU = 85 mm, S. PELLERIN, 1985).



comme facteur de décision. Le déplacement d'un canon coûte cher; une fois qu'il est en place sur une parcelle, on "met le paquet", avec des doses appliquées trop fortes et surtout très rapprochées.

La traduction agronomique de cette pratique est évidente, compte-tenu de ce qui précède:

- en période de plantation, la gouttière de sillonnage, dont on avait vu la rationalité en culture pluviale, provoque un arrêt de l'infiltration, et un excès d'eau à la base de la couche travaillée où se situe la bouture; les pourritures ou non levées des boutures sont fréquents, obligeant à des recourages, voire à reprendre des plantations.

- quel que soit le stade de la plante, le premier passage de canon réhumecte suffisamment les sols pour refermer la porosité d'infiltration rapide, au moins au fond de la couche travaillée qui a été lissée par les outils. Il s'en suit un ruissellement superficiel ou hypodermique, qui a deux conséquences:

- * gaspillage de l'eau (moindre mal)

- * transfert de l'eau excédentaire vers les parties concaves du relief, où dans une logique de toposéquence se trouvent les vertisols profonds. Même si on peut alors observer une augmentation de la vitesse de croissance sur les sols peu profonds et/ou caillouteux, celle-ci est alors fortement ralentie dans les vertisols à cause de l'excès d'eau. Les parcelles où les vertisols représentent une proportion importante montrent alors une chute de rendement par rapport à une culture pluviale!

Selon COMBRES (1989), c'est la faiblesse des marges obtenues en canne irriguée, qui retarde l'utilisation de l'irrigation, et ceci même dans l'hypothèse d'une rigueur technique importante, qui n'est pour l'instant qu'une perspective:

- utilisation de matériel mobile (canon à enrouleur),
- adaptation du parcellaire,
- augmentation des rendements en culture irriguée,
- utilisation d'un bilan hydrique de la culture par parcelle.

La situation actuelle laisse une inquiétude sur deux des hypothèses techniques évoquées par Combres: l'augmentation des rendements et l'utilisation d'un canon à enrouleur (fortes intensités instantanées). Les critères actuels de déclenchement de l'irrigation sont pour le moins approximatifs, puisqu'il s'agit d'un tour d'eau sur les cannes plantées (premier cycle) délivrant à chaque passage des doses trop fortes, en méconnaissance totale de l'état des réserves et de la pluviométrie locale. L'application d'un bilan hydrique par parcelle serait déjà un progrès, encore faudrait-il que les doses apportées soient maîtrisées. Un des nombreux problèmes pour cette maîtrise est la forte hétérogénéité d'arrosage obtenue avec un asperseur, compte-tenu du vent en particulier (NEY et al, 1986, fig.3). Ces hypothèses demandent un gros effort de formation pour être réalisées.

Figure 3 : HETEROGENEITE D'ARROSAGE OBTENUE AVEC DEUX PROCEDES D'IRRIGATION PAR ASPERSION EN GUADELOUPE (NEY et al., 1986)

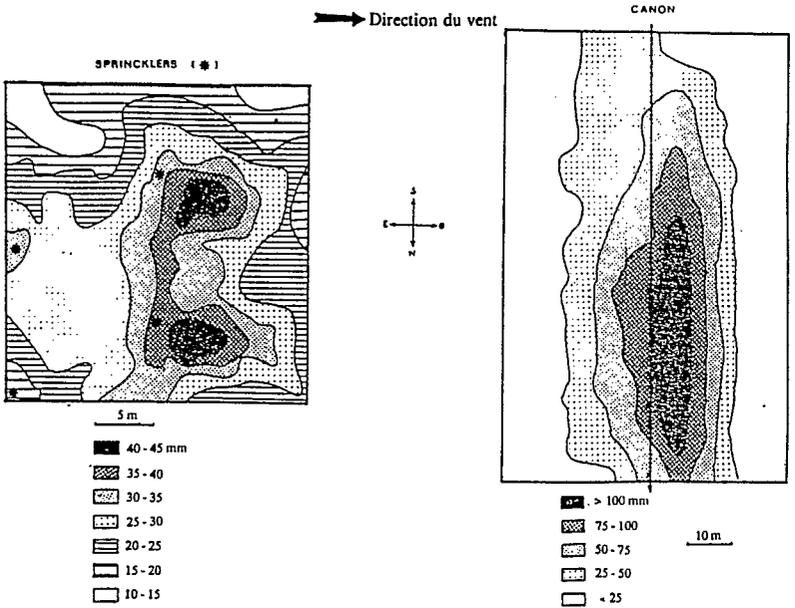
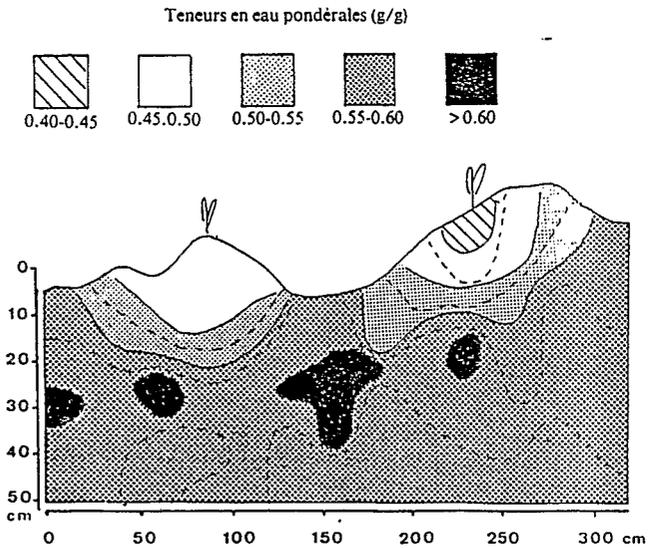


Figure 4 : COUPE DE TENEUR EN EAU D'UN VERTISOL SOUS TOMATE IRRIGUEE (NEY, 1986)
ZONES SURHUMECTEES ASSOCIEES AUX GOUTTIERES DE FOND DE LABOUR



Parmi les causes de la faiblesse de ces marges: les charges fixes élevées, liées à la couverture totale en réseau secondaire de distribution (800 ha, alors que seuls 150 ha peuvent être irrigués simultanément à la pression nominale de 10 bars). Une solution immédiate peut être une baisse tarifaire des bornes, que devrait supporter la collectivité.

2.3.2-EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE PAYSANS

L'introduction de l'irrigation a entraîné un développement considérable du maraîchage: tomates de 1982 à 1988, melon d'exportation vers l'Europe depuis 1987. Les très fortes marges associées à ces spéculations ont permis aux agriculteurs, quel que soit le niveau de leur compétence technique, d'utiliser sans compter l'eau agricole. Dans le cas de la tomate, un suivi d'exploitations effectué en 1983-85 (NEY, 1987) a montré que les rendements variaient de 3 à 1 en fonction de la pluviométrie d'irrigation apportée durant le premier mois. Ceci correspond à une stratification dans l'ancienneté, et donc dans la compétence technique des agriculteurs:

- au pôle rendement maximal, on trouve des maraîchers quasi-exclusifs, qui irrigaient à l'eau potable avant que l'eau agricole soit disponible; bien que n'appliquant pas un bilan hydrique, ils savent rationner l'eau, utilisant en particulier comme critère de déclenchement l'état hydrique au toucher du fond de la couche travaillée. Ils ont un itinéraire de travail du sol adapté à l'irrigation des vertisols: labour à la charrue à socs, plantation en sommet de billons pour éviter l'excès d'eau, pratiques de jachères herbacées pour restaurer la porosité structurale.

- au pôle rendement minimal, on trouve des systèmes de production mixtes canne + élevage + maraîchage, dont la composante maraîchère est récente. Le critère de déclenchement de l'irrigation est l'état hydrique de surface (or les vertisols montrent très rapidement un auto-mulch d'agrégats secs en surface, même si à 20cm le sol est saturé) combiné au début de flétrissement des plantes (l'excès d'eau provoque un flétrissement de la tomate!). L'irrigation excédentaire qui en découle est aggravée par un itinéraire de plantation dérivé de celui de la canne: labour à la charrue à disques provoquant une zone saturée sur les gouttières lissées (fig.4), plants installés en fond de sillon, au contact de la gouttière, ce qui induit une nécrose du pivot. Seule la couche travaillée, exploitée par des racines adventives développées ultérieurement après buttage, constitue la réserve utile. Les irrigations deviennent ainsi de plus en plus fréquentes.

Si la canne a connu une très légère augmentation des surfaces cultivées, ce n'est pas grâce à la disponibilité de l'eau agricole. Un soutien du prix de la tonne de canne a été mis en place depuis 1984, qui s'est révélé incitatif. Cependant, depuis cette date, il n'y a pas eu d'année véritablement sèche. Les agriculteurs perçoivent l'irrigation comme un secours éventuel en cas de sécheresse anormale. Les maraîchers considèrent la canne comme une jachère positive,

destinée à déparasiter les sols et à recréer une porosité structurale profonde (canne forcément pluviale).

Dans le domaine des pâturages enfin, l'installation de soles fourragères irriguées à haute valeur azotée ou énergétique reste exceptionnelle; l'utilisation des savanes résiduelles par des boeufs au piquet "caisse d'épargne" reste la règle générale.

2.4.-RESULTATS (d'après FABRI et al, 1989)

2.4.1: LES HYPOTHESES QUI ONT PRESIDE A L'ETABLISSEMENT DU RESEAU NE SONT PAS REALISEES.

Compte-tenu de la faible utilisation de l'eau sur la Canne (27% de la consommation pour 78% de la surface irrigable) et sur les pâturages, seulement 13% de la ressource est utilisée, ce qui incite à réviser les hypothèses de rentabilité économique de l'investissement. Les surfaces totales et rendements en canne n'ont pas augmenté significativement.

Le maraîchage a connu un essor considérable, qui représente 67% de la consommation en eau pour seulement 15% des surfaces irrigables; c'est dans ce domaine que le progrès social, initialement ciblé sur la canne, s'est déroulé. On atteint cependant des limites fragiles: toute surface supplémentaire en tomates de saison sèche peut conduire à un effondrement des cours, le marché du melon d'exportation est tenu par des groupes métropolitains qui peuvent décider du jour au lendemain de faire assurer leur production en contre saison par des pays ACP.

Malgré la sous-consommation globale, l'application généralisée de trop fortes doses, aux mêmes périodes, conduit aux limites des capacités du réseau: la pression tombe fréquemment à 5 bars, au lieu des 10 nécessaires pour faire correctement fonctionner les canons à enrouleur.

2.4.2 NECESSITE D'UNE MEILLEURE MAITRISE DE L'EAU A LA PARCELLE

Dans le domaine cannier, ce n'est que par un ajustement très soigneux de l'irrigation aux besoins de la culture, mais aussi aux caractéristiques hydrodynamiques variables et contraignantes des sols, que l'augmentation des rendements, et donc des marges positives en culture irriguée, pourront être atteints.

Dans le domaine maraîcher, les perspectives de resserrement du rapport demande/offre, font que l'on ne pourra pas longtemps considérer l'eau d'irrigation comme une ressource illimitée et "gratuite". On devra entrer bientôt dans la logique habituelle de diminution du coût des intrants et d'augmentation de rendement par optimisation de l'itinéraire technique.

2.5.- ELEMENTS D'UNE MEILLEURE MAITRISE DE L'EAU A LA PARCELLE

- changement de mode de travail du sol: éviter la création de semelles lissées est possible, en remplaçant la charrue à disques par la charrue à soc (fig.5) et en sillonnant moins profondément. Cette amélioration est en cours, se heurtant cependant au problème de formation des tractoristes au réglage des charrues.

- matériel d'irrigation: l'irrigation localisée, est techniquement possible, mais se heurte pour l'instant à un problème de coût; elle permettrait une meilleure maîtrise des doses, débits et fréquence.

- mise en place d'un système d'assainissement-drainage: à la parcelle, cela consiste à façonner la surface du sol en billons ou planches bombées, de manière à éviter la saturation prolongée de la partie supérieure de l'enracinement. Des essais de drains enterrés sont en cours, basés sur l'hypothèse que les tranchées de drainage peuvent permettre de manière discontinue l'évacuation du ruissellement hypodermique. Dans tous les cas, la réhabilitation ou la reconception d'un réseau d'émissaires est obligatoire.

- amélioration des critères de décision d'irrigation, et détermination des doses:

* en première urgence, inciter les irrigants à rationner, ne serait-ce qu'en testant au toucher l'humidité du fond de la couche travaillée.

* développer une meilleure connaissance du besoin en eau de la culture à chaque instant, compte-tenu de l'état des réserves: le logiciel de bilan hydrique multi-parcellaire IRRICANNE (ROBIN et al, 1989), callé sur des expérimentations rigoureuses de consommation en eau de la canne en Guadeloupe, est certes un progrès considérable.

* il n'en reste pas moins vrai qu'un modèle, aussi affiné soit-il, en particulier dans la détermination des besoins en eau dans les premiers stades de la culture, comporte encore beaucoup d'incertitudes dans le fonctionnement du réservoir sol; ces incertitudes, négligeables dans le cas de sols perméables, sont dangereuses dans le cas des sols argileux gonflants. Le moindre excès d'apport modifie les hypothèses d'évolution de la réserve du sol en empêchant la descente de l'enracinement efficace; dès lors, l'excès d'eau devient chronique. Dans un premier temps, le meilleur conseil possible, mais qui demande un fort encadrement et des parcelles démonstratives, est le rationnement systématique par rapport au modèle.

* amener des petits paysans à utiliser un modèle de bilan hydrique où même à relever une série de pluviomètres sur une parcelle ne peut être qu'un pari à long terme, au prix d'un effort considérable de formation et d'encadrement.

Figure 5 : EFFETS COMBINES DE L'IRRIGATION ET DU TRAVAIL DU SOL SUR UNE COMPOSANTE DU RENDEMENT DE LA TOMATE, EN VERTISOL

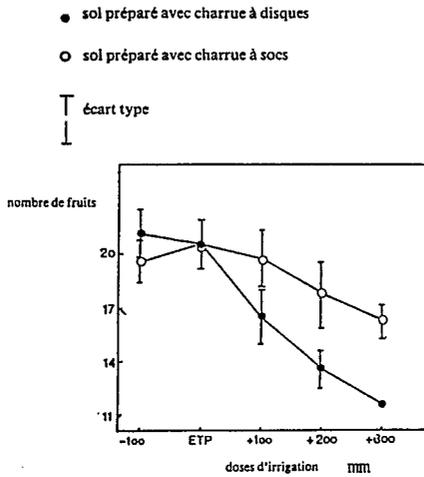
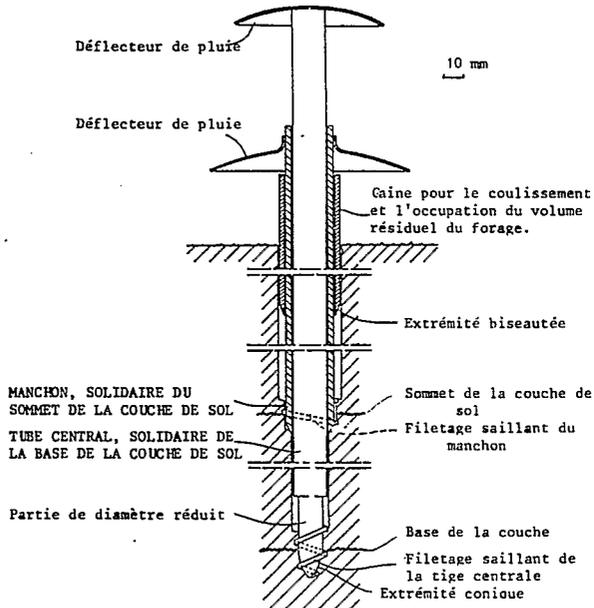


Figure 6 : LE CAPTEUR DE DEPLACEMENT DE SOL "T.H.E.R.E.S.A.", PARTIE MECANIQUE (CABIDOCHÉ ET VOLTZ, Brevet INRA 1987)



T.H.E.R.E.S.A.: Transferts Hydrauliques Evalués par le Retrait Equidimensionnel des Sols Argileux.

* l'urgence actuelle est bien de comprendre le fonctionnement des réserves en eau et du système variable de porosité des sols argileux gonflants. Les mesures de l'état instantané des stocks ou états de l'eau dans le sol (sonde à neutrons, tensiomètres) sont ici inopérantes. L'INRA Antilles-Guyane, Station agropédoclimatique, met au point dans ce but une méthode originale de mesure de l'état des réserves et de la fissuration basé sur la mesure des mouvements verticaux des sols (Système T.H.E.R.E.S.A, CABIDOCHÉ, Brevet INRA 1987). De conception très simple, il peut être instrumenté pour une acquisition automatique permanente (fig.6). Son principe est le suivant:

- . toute consommation de l'eau "texturale" se traduit par des mouvements à peu près équidimensionnels dont on mesure la composante verticale (CABIDOCHÉ et VOLTZ, 1988).

- . la réserve facilement utilisable correspond aux pores d'origine biotique, dont la vidange n'engendre pas de mouvement: les besoins en eau de la plante sont satisfaits tant qu'il n'y a pas de mouvement.

- . le début du retrait, à un certain seuil, correspond au début du stress hydrique de la plante: c'est le moment d'irriguer (fig.7).

- . le seul moteur d'une dessiccation texturale engendrant un retrait est l'enracinement. On obtient ainsi une équation profondeur maximale du retrait = profondeur maximale de l'enracinement, qui permet d'avoir la limite géométrique de la réserve.

- . tout retrait vertical indique une fissuration latérale; réciproquement tout gonflement indique une fermeture des fissures. On pourra décider que le moment d'arrêter l'irrigation est un gonflement relatif admissible, avant la fermeture complète des fissures, stade où l'excès d'eau se manifeste (fig.7).

On dispose là d'un outil permettant d'asservir la gestion de l'eau à l'évolution de l'état hydrique et poral du sol, tant dans la perspective d'une irrigation automatisée, que dans celle d'une utilisation par un petit agriculteur (version mécanique à effacement d'index). Par ailleurs, au niveau recherche, T.H.E.R.E.S.A. sera utilisé prochainement en collaboration avec l'ORSTOM, pour déterminer à l'aide de pluies simulées les enveloppes d'intensités infiltrables et les champs de réhumectation dans les vertisols, en fonction des états hydriques initiaux.

III.-GENERALISATION: IMPORTANCE ET DIFFICULTES DE L'IRRIGATION DANS LES SOLS ARGILEUX GONFLANTS DE LA CARAIBE

3.1.- CLIMAT TROPICAL A SAISON SECHE MARQUEE = SOLS ARGILEUX GONFLANTS

Il existe une relation étroite entre les zones à déficit hydrique sur l'année et la présence de sols argileux gonflants dans la Caraïbe. Les sols sont jeunes, monophasés, souvent développés à partir de matériaux volcaniques ou de roches ou sédiments pauvres en minéraux primaires hérités. Ce sont donc des minéraux secondaires argileux qui prédominent (fig.8): les

Figure 7 : RELATION ENTRE POTENTIEL FOLIAIRE DE LA CANNE-A-SUCRE (13 h) ET EPAISSEUR DES COUCHES D'UN VERTISOL

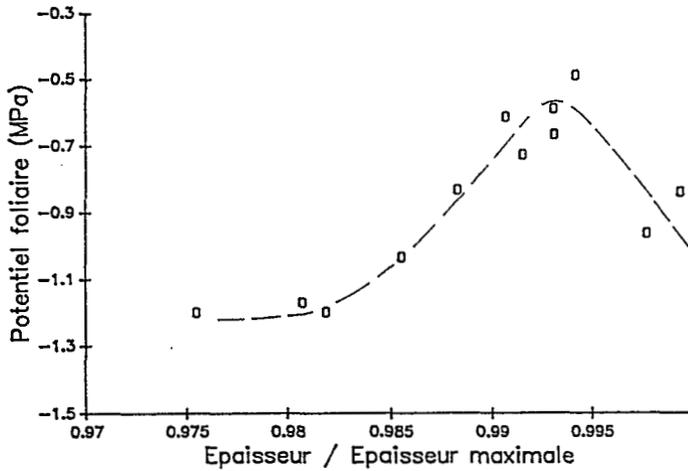
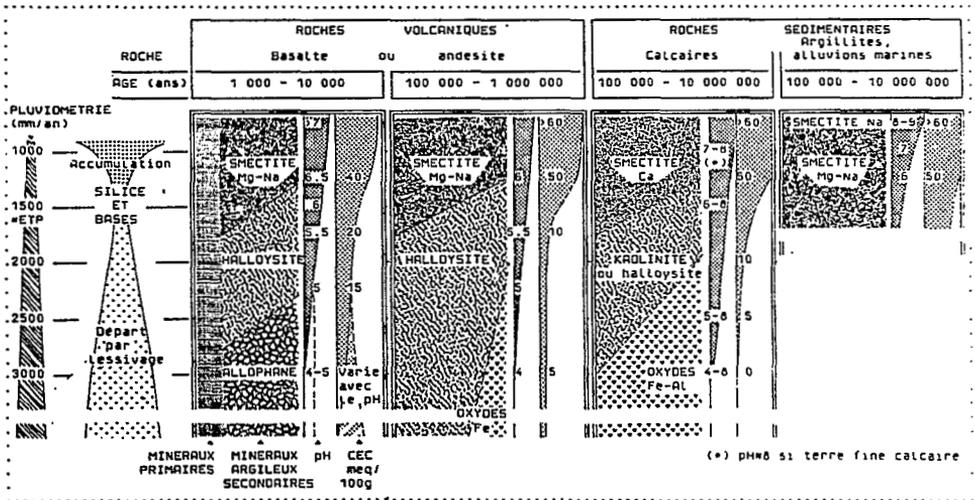


Figure 8 : TYPES DE MINERAUX ARGILEUX DES SOLS SELON LA GEOLOGIE ET LE CLIMAT : PREDOMINANCE DES SMECTITES DANS LES ZONES A DEFICIT HYDRIQUE SUR L'ANNEE (CABIDOCHÉ, 1989)



climats tropicaux à saison sèche marquée, permettant la conservation de la silice et des bases, permettent la formation de smectites qui constituent une part notable ou prédominante de la fraction minérale du sol (Domaine de la Sialferrisation, PEDRO, 1984) . A titre indicatif, les sols argileux gonflants représentent plus de 20000 ha en Guadeloupe, 7000 en Martinique, 20000 à la Barbade, 200000 en Haïti, et 1,2 million d'hectares à Cuba.

Les faits et diagnostics évoqués dans le cas de la Grande-Terre de Guadeloupe ont valeur de modèle quand aux perturbations et nécessaires évolutions des systèmes de culture et des itinéraires techniques qu'apporte l'irrigation.

3.2.- RISQUES DE BAISSSE DE FERTILITE ASSOCIES A L'IRRIGATION

Par baisse de fertilité, nous entendons une altération grave des propriétés agronomiques des sols, non facilement correctible par une adaptation des systèmes de culture.

3.2.1.- SALINISATION DES SOLS

Contrairement aux Antilles Françaises, qui disposent de ressources en eaux captées dans les bassins versants de sols acides, les barrages ou puisages développés à Cuba et St Domingue fournissent souvent une eau légèrement salée. De grands périmètres irrigués de sols argileux gonflants ont été stérilisés (300000 hectares en vertisols à Cuba, d'après ORTEGA et al, 1986). Le drainage vertical est nul, l'hydrographie superficielle des périmètres est cloisonnée par des pistes en remblais; ainsi la totalité des sels apportés s'accumule sous l'effet de l'évapotranspiration.

Même avec des eaux de bonne qualité, un deuxième type de salinisation s'est produit par mise en continuité de la zone superficielle saturée par l'irrigation et de nappes salées phréatiques, et installation de systèmes de culture à extraction d'eau superficielle (600000 ha à Cuba d'après ORTEGA et al , 1986).

3.2.2.- EROSION

Consécutives aux changements de systèmes de culture: sur les vertisols magnésio-sodiques du Sud de la Martinique, le passage de savanes ou prairies pâturées à du maraîchage intensif irrigué multiplie par 10 la quantité de particules détachables sous averses simulées représentatives (ALBRECHT, 1989). La cause en est la modification du système de porosité des agrégats et du comportement rhéologique du matériau due au changement du statut organique du sol.

Consécutives à des aménagements inadaptés: si la plupart des schémas actuels comportent des réseaux de tuyaux, certains périmètres plus anciens comportent des réseaux primaires et secondaires à ciel ouvert, destinés à une irrigation gravitaire. C'est le cas du périmètre de Delcer, dans le sud de Sainte-Lucie. L'érosion en nappe rapide sur les parcelles,

et l'incapacité de la ressource à répondre à la demande ont conduit à l'abandon du réseau. En période pluvieuse, le réseau intercepte le ruissellement; segmenté par des éboulements, il accumule des poches d'eau qui, en débordant, créent des rigoles et ravines d'érosion catastrophique. L'érosion a pris globalement une telle ampleur que la région se désertifie; le seul espoir de stabiliser ce qui reste de la population rurale, est... la réhabilitation de l'irrigation (sous tuyaux), afin d'intensifier les rares surfaces moins érodibles ou érodées (CABIDOCHÉ, 1989b).

CONCLUSION:

L'irrigation dans les zones tropicales à saison sèche marquée de la Caraïbe est une évidente nécessité bioclimatique. Les sols de ces zones sont très généralement des sols argileux gonflants aux propriétés hydrodynamiques extrêmes, les rendants extrêmement susceptibles d'excès d'eau, de ruissellement quasi-total, parfois d'érosion, et sensibles aux discontinuités culturelles. L'irrigation est extrêmement difficile à maîtriser sur ces sols.

L'attitude générale d'un irrigant débutant, apporter trop d'eau, aboutit dans ce cas à un gaspillage de la ressource, à une baisse de rendement, à des disfonctionnement du réseau, voire à des baisses de fertilité par salinisation ou érosion. Dans un premier temps on assiste à une profonde mutation des systèmes de culture, sans acquisition d'une meilleure maîtrise de l'irrigation. Rapidement, celle-ci deviendra nécessaire, mais pose d'énormes difficultés:

- changement d'itinéraires techniques, vers un risque minimal d'accidents structuraux dans la préparation du sol, vers la lutte contre l'excès d'eau dans la couche travaillée, et vers des mesures anti-érosives.

- insuffisance des modèles de bilan hydrique des cultures, pour gérer convenablement l'eau: seule une connaissance instantanée de l'état et de la géométrie des réserves, et de l'état de porosité, permettant ou non leur recharge, permettra une gestion rationnelle de l'irrigation à la parcelle.

Dans un projet d'irrigation, le rôle des institutions ne doit évidemment pas se borner à la mise à disposition à la parcelle d'une ressource en eau, tarifée ou non. Les risques d'accidents sociologiques, économiques et écologiques associés à l'irrigation obligent à acquérir précocement des références et à prévoir des trajectoires évolutives des systèmes de culture et de production, quitte à développer des mesures incitatives pour orienter ces trajectoires. Deux des outils indispensables sont la formation et l'encadrement, diffusant si possible des références solides acquises au préalable par l'expérimentation rigoureuse. Les expériences caribéennes montrent qu'il est difficile de "prendre le train en marche".

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT A., 1989.- Comparaison de la détachabilité de particules terreuses, sous deux systèmes de culture contrastés, sur vertisol. Colloque inter-régional sur l'éducation et la formation relative à l'environnement, Abymes, 18-20 avril 1989. Ed. Conseil Général de Guadeloupe - UNESCO, sous presse.
- BUHLER J.-L., 1986.- Périmètres irrigués en Guadeloupe, Etat actuel et perspectives. Bull. agron. Antilles-Guyane, 4, 33-36.
- CABIDOCHÉ Y.-M., 1987. Eléments pour une demande de de Brevet concernant le dispositif de capteurs de déplacements verticaux de sols argileux "T.H.E.R.E.S.A.". Doc. interne INRA. Brevet INRA n° 8711063.
- CABIDOCHÉ Y.-M., 1989a.- Gestion de la fertilité et conservation des sols dans la Caraïbe. Colloque inter-régional sur l'éducation et la formation relative à l'environnement, Abymes, 18-20 avril 1989. Ed. Conseil Général de Guadeloupe - UNESCO, sous presse.
- CABIDOCHÉ Y.-M., 1989b.- Evaluation des capacités des sols et des précautions à prendre pour l'irrigation du périmètre de Delcer (District de Choiseul, Sainte-Lucie). Rapport de mission, INRA, DSRI, 10p.
- CABIDOCHÉ Y.-M. et NEY B., 1986.- Quelques problèmes de gestion de l'eau lorsque les sols varient fortement au sein d'une même parcelle. Bull. agron. Antilles-Guyane, 4, 53-62.
- CABIDOCHÉ Y.-M. et NEY B., 1986.-Travail du sol et irrigation en vertisols. Bull. agron. Antilles-Guyane, 4, 63-70.
- CABIDOCHÉ Y.-M. et NEY B., 1987.- Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés. II.Analyse expérimentale des fonctionnements hydriques associés à deux états structuraux en vertisol irrigué. Agronomie, 7 (4), 257-270.
- CABIDOCHÉ Y.-M. et VOLTZ M., 1988.- Modélisation des variations macroscopiques de volume d'un sol argileux gonflant. II-Contrôle expérimental dans le cas d'un vertisol calcique de Guadeloupe. In: "Transferts en milieux déformables", Séminaire de l'Isle s/Sorgues 7-8 octobre 1987, Ed. INRA, Paris, 143-159.
- COMBRES J.-C., 1989.- Evaluation des coûts de production en culture de canne-à-sucre irriguée à la Guadeloupe. Bull. agron. Antilles-Guyane, 9, 6-12.
- FABRI C., GARGANTA E., PETIT J.-M., PINDARD A., et SIZAM-BASTAREAUD S., 1989.-Irrigation de l'Est de la Grande-Terre et valorisation de l'eau par les systèmes de production en place. Bull. agron. Antilles-Guyane, 9, 13-19.
- NEY B., ARCHER P., PELLERIN S., 1986.- Hétérogénéité d'arrosage obtenue par irrigation par aspersion en Grande-Terre de Guadeloupe. Bull. agron. Antilles-Guyane, 4, 47-52.
- NEY B., 1987.- Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés.I.-Analyse des influences du travail du sol et de l'irrigation sur le fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante dans les exploitations de Guadeloupe. Agronomie, 7 (4), 247-256.
- ORTEGA SASTRIQUES F., OBREGON A., HERNANDEZ A. et BORRETO M., 1986. Los suelbs salinos y salinizados de Cuba. In "Sol et Eau", Séminaire de la Havane, 8-20 avril 1985. Ed. ORSTOM, Paris, 623-640.
- PEDRO G., 1984.- La genèse des argiles pédologiques, ses implications minéralogiques, physico-chimiques et hydriques. Sci. Géol., Bull., 37, 4, 333-347.

PELLERIN S., 1986.- Etude d'une série chronologique de rendements en canne-à-sucre obtenus en Guadeloupe à partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique. Agronomie, 6 (1), 91-98.

ROBIN P., COMBRES J.-C. et KAMENIARZ C., 1989.- Un logiciel d'aide à la décision pour conduire l'irrigation de multiples parcelles de canne-à-sucre. Bull. agron. Antilles-Guyane, 9, 39-45.

TESSIER D., 1984.- Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Thèse doct., Univ. Paris VII. Ed. INRA, Paris, 361 p.

**GESTION D'UN BARRAGE ANTI-SEL EN BASSE CASAMANCE
(SENEGAL)**

Par

J. ALBERGEL

D. BRUNET

G. DUBEE

J.P. MONTOROL

P. ZANTE

RESUME

Les années sèches des décennies 1970 et 1980 ont provoqué de graves bouleversements sur le milieu naturel de la CASAMANCE et ont obligé à réviser la politique d'aménagement. Les populations locales ont réagi vigoureusement et ont favorisé l'édification de petits barrages anti-sel avec l'appui de financements extérieurs.

La vallée de DJIGUINOM, en rive droite du fleuve Casamance à 60 km de l'embouchure, fait partie de ces nombreux bas-fonds protégés de l'invasion marine par une digue à batardeaux. Depuis la construction du barrage en 1984, plus de la moitié des zones rizicoles sont restées très salées. Depuis 1987, l'ORSTOM et l'ISRA mènent une recherche en vue de la réhabilitation des terres salées et acides.

Cette étude a pour objectif d'optimiser la gestion de l'ouvrage anti-sel eu égard aux deux contraintes majeures que sont la salinité et l'acidité des sols. Après la présentation du site de DJIGUINOM, cette communication décrit l'expérimentation qui a eu lieu pendant l'hivernage 1989 et qui comprend la modification du système d'ouverture du barrage, la mise en place d'un essai rizicole et le suivi des bilans hydrologique et hydrochimique. Les conséquences de cette gestion sur la qualité des sols et sur la production végétale sont ensuite discutées.

1. INTRODUCTION

La période de sécheresse 1969-1985, bien connue au Sahel, a eu également des conséquences graves dans les zones soudano-guinéennes mieux arrosées, en particulier sur les écosystèmes fragiles des zones côtières. La Casamance a été durement éprouvée. La baisse de la pluviométrie et de l'écoulement fluvial a eu pour conséquences: l'invasion des eaux marines dans tout le réseau hydrographique, la baisse généralisée du niveau des nappes, la salinisation et l'acidification des vasières occupées par la mangrove qui a disparu sur de grandes étendues. De nombreuses rizières, aussi bien salées (zones de mangrove) que douces (vallées inondées), ont été abandonnées. Les activités, liées à l'exploitation de la mangrove (ostréiculture, chasse, pêche, collecte de bois) comme celles liées à la production halieutique, ont nettement diminuées. Il s'en est suivi un important exode rural (ISRA/CRODT, 1986; DACOSTA, 1989; MONTOROI et ZANTE, 1989).

Au plus fort de la période sèche, au début des années 80, deux types d'aménagements ont vu le jour pour combattre les effets de la salinité. D'une part, des grands projets de barrages anti-sel (Affiniam et Guidei) ont été construits, d'autre part, à l'instar des populations locales et des organismes de développement, de petits ouvrages anti-sel ont été édifiés pour arrêter l'entrée des eaux salées à l'intérieur des petites vallées alluviales (BARRY, 1986; BARRY et al., 1988; USAID/SOMIVAC/ISRA, 1985).

Cette communication présente un travail, mené par l'ORSTOM et l'ISRA, sur la gestion d'une digue anti-sel qui a permis la réhabilitation d'une petite vallée de basse Casamance, abandonnée en grande partie par les paysans.

2. LE SITE DE DJIGUINOM

La vallée de Djiguinom se localise à environ 15 km au nord-est de Ziguinchor et à 60 km de l'embouchure du fleuve Casamance, sur sa rive droite. La superficie du bassin versant est de 26,52 km² et celle de la vallée de 271 ha dont 150 ha pour le bas-fond inondable.

Le bassin versant de Djiguinom se localise dans les formations sédimentaires du Continental Terminal. Le bas-fond est constitué par des dépôts quaternaires appartenant au domaine fluvio-marin de basse Casamance, qui s'est constitué au cours de transgressions successives (KALCK, 1978).

En 1988, BRUNET classe les sols du bas-fond en deux grands ensembles: les sols sulfatés acides et les sols hydromorphes.

Le premier ensemble occupe la zone basse, qui était, avant la construction du barrage, soumise au balancement des marées à partir d'un marigot central. Actuellement, cette zone est ennoyée pendant l'hivernage par les eaux météoriques. Les sols sont très salés ainsi que la nappe phréatique. Cette salure est surtout chlorurée sodique. Le pH est faiblement acide (4.5 à 5.5) et la texture est surtout argileuse.

Le second ensemble se situe principalement en bordure de plateau et en tête de vallée. On distingue deux sous-ensembles:

- une zone de terrasses et d'anciens lits de marigot comblés par colluvionnement. Cette zone n'était pas atteinte par les marées. Les sols et la nappe sont peu salés mais très acides: pH de 4 en surface à 3.5 en profondeur pouvant descendre à 2.5 localement. La nappe est riche en aluminium dissous. En lisière de la palmeraie, apparaissent des précipitations de sulfate d'aluminium, en particulier de tamarugite (LE BRUSQ et al., 1987). Les sols sont argileux et sableux.

- Le second ensemble occupe la tête de vallée et la zone de transition avec les sols des versants de plateaux. Ces sols sableux sont ni salés, ni acides. Occupés par la palmeraie, celle-ci peut être affectée localement par la salure et/ou l'acidité de la nappe.

Pour encourager la reprise des activités agricoles dans cette vallée un barrage anti-sel a été édifié sur le site de DJILAKOUN en 1984. Cet ouvrage comprend une digue en latérite et un petit édifice en béton au niveau du lit principal, présentant trois ouvertures munies de batardeaux, dont la hauteur est prévue pour empêcher l'intrusion des plus hautes marées. Jusqu'en 1987 aucun dessalement tangible des sols n'a été observé (BOIVIN & BRUNET, 1990). A partir de cette constatation, il est apparu indispensable d'initier une gestion rationnelle de ce barrage, qui doit permettre d'évacuer les sels lessivés pendant toute la période de culture en profitant des niveaux aval de marées basses.

En 1988, le dispositif d'ouverture a été modifié pour permettre la vidange par le fond des eaux de remplissage du barrage. Il s'agit d'une porte pleine actionnée verticalement par une crémaillère. Ce système a l'avantage d'être fonctionnel pendant tout l'hivernage et simple d'utilisation. De plus, il reste peu onéreux. En 1989, les deux autres ouvertures du barrage ont été également équipées, afin d'accroître la capacité de vidange. L'ensemble du système d'ouverture fait une largeur de 15 m. En même temps, un dispositif d'observation des bilans hydrologiques et hydrochimiques a été mis en place et un essai rizicole est pratiqué dans une zone où les contraintes «sel et acidité» sont des plus fortes.

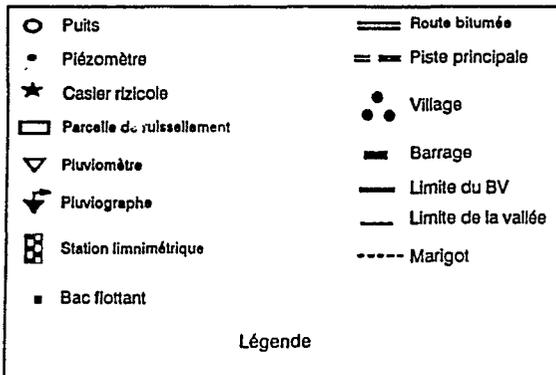
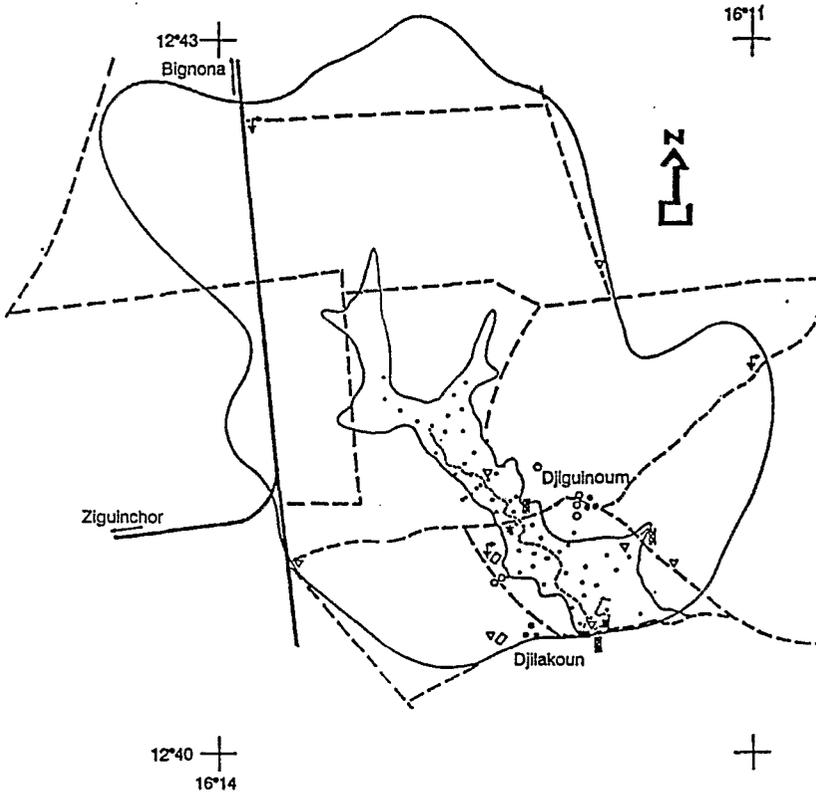
3. DISPOSITIF ET PROTOCOLE EXPERIMENTAUX

Le dispositif expérimental est présenté sur la fig. 1. Il comprend 64 piézomètres, 3 stations hydrométriques dont une d'acquisition automatique des hauteurs à l'amont et à l'aval du barrage, 10 points de mesures des précipitations dont trois pluviographes, un bac flottant de mesure de l'évaporation, deux parcelles de mesure du ruissellement (50 m²) et un casier rizicole comprenant 8 parcelles de 220 m² chacune et équipées de bougies de prélèvement de la solution du sol.

3.1. Le dispositif hydrologique et hydrochimique

En début de saison des pluies, les règles de gestion du barrage ont été adoptées en fonction de quatre objectifs.

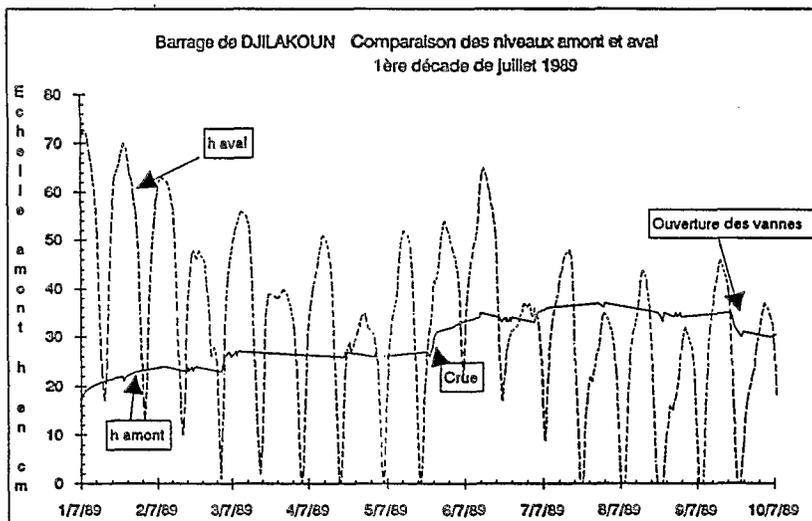
Fig. 1 Le site expérimental de DJIGUINOM



La première règle répond à une préoccupation des villageois de Djilakoun: éviter l'inondation de la piste qui relie ce village à la route de Ziguinchor. Il a donc été décidé de réaliser des lâchers d'eau, à marée basse, afin de maintenir une cote inférieure à 90 cm à l'échelle située dans le drain principal du casier rizicole.

La seconde règle a été dictée par la nécessité de pouvoir étalonner les débits sortant au barrage en fonction des hauteurs lues à l'échelle amont de celui-ci. Un ensemble de jaugeages, réalisé début juillet, a montré qu'il était nécessaire d'avoir une différence de cote de 3 cm entre les échelles amont et aval. La durée du flot et du jusant étant pratiquement constante pendant la saison des pluies, le temps de vidange est donc fonction du niveau de remplissage amont (fig. 2).

Figure 2



La troisième règle est de conserver une quantité d'eau suffisante pour la pratique du riz inondé. La fréquence des vidanges est ralentie lorsque la cote à l'échelle du casier rizicole se situe en dessous de 90 cm et que le repiquage du riz est effectué.

La quatrième règle est d'évacuer le maximum de sel en faisant le maximum de lâchers.

Les paramètres mesurés pendant la saison des pluies doivent servir à réaliser le bilan hydrologique et hydrochimique de la vallée. Tous les lâchers d'eau ont été jaugeés en continu et des prélèvements réguliers ont permis de suivre l'évolution de la qualité des eaux évacuées (salinité, pH, aluminium, fer).

Après chaque pluie, le ruissellement a été mesuré sur les parcelles de 50 m² installées sur les sols de palmeraie et les sols de plateau.

Le niveau et la qualité des eaux de nappe ont été mesurés sur l'ensemble du dispositif piézométrique au début et à la fin de l'hivernage. Deux transects ont été choisis pour un suivi bimensuel.

3.2 L'essai agronomique

L'ensemble de l'aménagement occupe une aire de 2500 m². Les travaux culturaux ont été réalisés suivant les techniques traditionnelles de la riziculture en basse Casamance. Trois variétés connues pour leur tolérance au sel ont été employées. Le calendrier cultural a comporté les phases suivantes:

- désherbage et billonnage dans la dernière décade de juillet,
- mise en place d'une pépinière sur les sols de plateau du 11 au 22 juillet,
- repliquage le 6/9 pour les variétés ROCK5 et ETOUHAL et le 16/9 pour la variété DJ684D,
- récolte du 8 au 12/12,

Un dispositif de contrôle in situ des paramètres physico-chimiques (pH, Eh, et température) associé à des boucles de prélèvement de la solution du sol ont permis de suivre l'évolution de la qualité de l'eau dans l'essai rizicole.

Pendant toute la période culturale, des observations agronomiques et des prélèvements de sol ont été réalisés. Le niveau de remplissage des parcelles et des drains est mesuré sur des mires limnimétriques.

4. RESULTATS EN 1989

Dans cette communication, nous présentons les principaux résultats relatifs à la gestion du barrage et son impact sur la qualité de l'eau et sur la production agricole.

4.1. Bilan hydrologique et hydrochimique

La pluviométrie enregistrée cette année reste déficitaire (1200 mm). Sa répartition dans le temps a été bonne, excepté deux périodes de sécheresse (du 3 au 10 août et du 17 au 22 août).

En suivant les règles de gestion préétablies, 55 lâchers ont été réalisés, dont le plus important est celui du 22/09 avec 50280 m³. Le volume total évacué pendant tout l'hivernage a atteint 1,025 million de m³.

La figure 3 présente le volume de chaque lâcher, rapporté à la différence de cote entre le début et la fin du lâcher, en fonction de la cote au début du lâcher ($dV/dH=f(H)$). La primitive de cette fonction donne la courbe des volumes d'eau disponibles dans la retenue en fonction de la cote à l'échelle. Cette courbe est différente de celle obtenue à partir de la topographie de la vallée (fig. 4). En effet, des volumes importants sont stockés par des digues latérales dans la partie aval de la vallée. Ce résultat se retrouve dans l'étude des transects piézométriques.

Figure 3

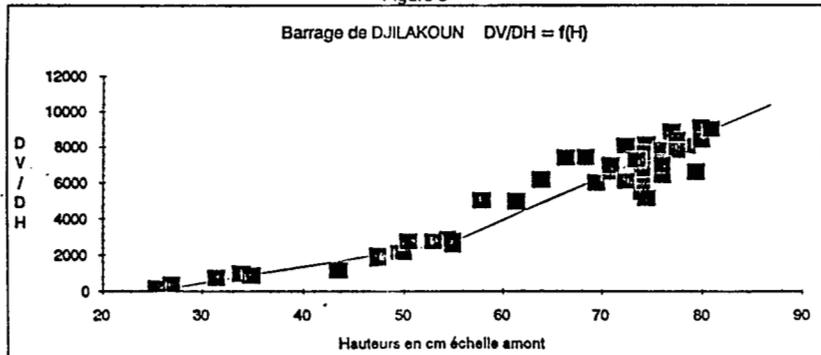


Figure 4

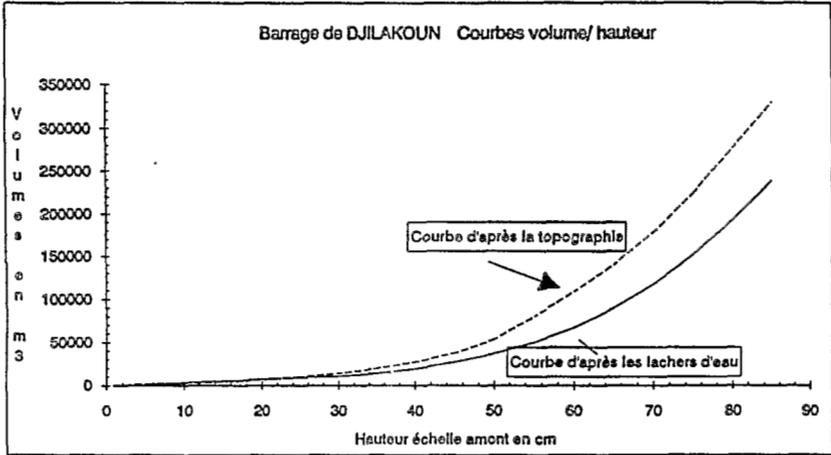
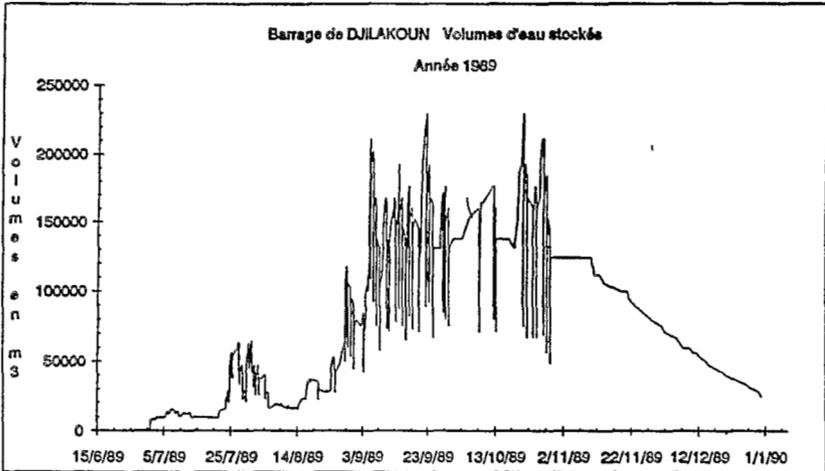
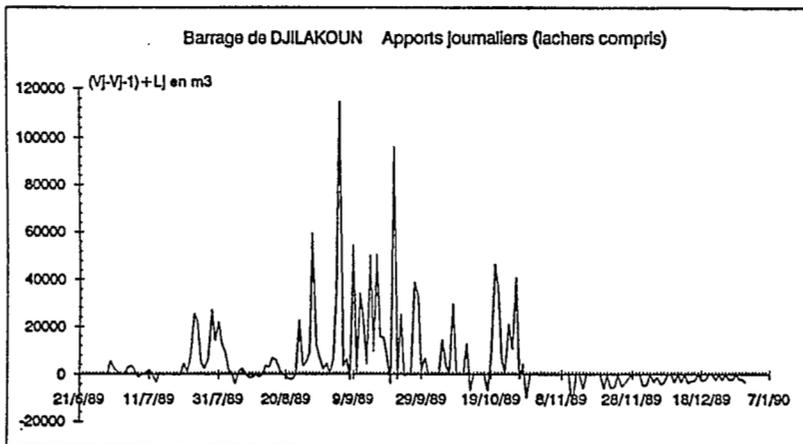


Figure 5



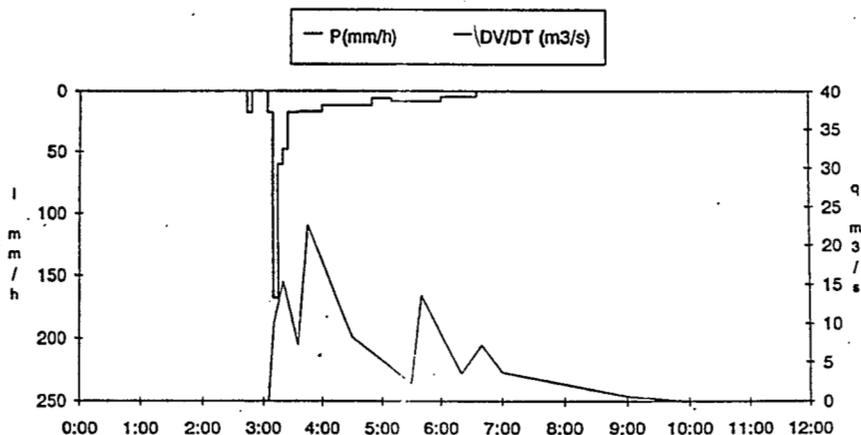
Les limnigrammes de la retenue ont pu être traduits en volumes disponibles (fig. 5). On remarque la période de sécheresse des deux premières décades d'août. Les volumes journaliers ont été calculés, en rajoutant le volume des lâchers s'il y a lieu. La figure 6 donne la variation des apports journaliers en fonction du temps.

Figure 6



Les limnigrammes ($H=f(t)$) ont été discrétisés au pas de temps de 5 minutes et transformés en hydrogrammes ($dV/dT=f(T)$) pour l'étude des crues. Huit crues résultant des principales averses ont été analysées. Pour toutes les pluies supérieures à 30 mm, ces hydrogrammes présentent deux pics: le premier survient quelques minutes après le corps de l'averse et correspond au volume précipité sur le plan d'eau, le second arrivant 2 à 3 heures après est généralement moins haut mais plus long et correspond au ruissellement du bassin. Les coefficients de ruissellement sont de l'ordre de 1 à 5% (fig. 7). La limite de 30 mm et la faiblesse de ces coefficients sont confirmées par les observations sur parcelles.

Figure 7 Crué du 5/09/89



L'échantillonnage des eaux évacuées indique une baisse significative de la salinité qui passe de 20 à 2 mS/cm en fin d'hivernage. Une remontée importante a été enregistrée durant la période sèche du mois d'août (fig. 8). La quantité de sel exporté est estimée à 2250 T, ce qui correspondrait à une évacuation de 15 T/ha, la salinisation est cependant loin d'être uniforme.

La figure 9 donne l'évolution du niveau hydrostatique de la nappe d'eau souterraine et de la nappe d'eau libre sur le transect aval de la vallée. En amont comme en aval, on observe un creux piézométrique sous la terrasse alluviale. A partir de la mi-août, on distingue nettement une alimentation de la retenue par la nappe des plateaux. C'est d'ailleurs elle qui contribue le plus au remplissage du barrage (comparaison des volumes ruisselés et des apports journaliers). Le suivi physico-chimique montre un pic de salure au voisinage du lit du marigot (lieu des anclennes intrusions marines). Le dessalement au cours de l'hivernage est plus marqué en bordure de plateau qu'au milieu de la vallée. Le pH et les teneurs en aluminium indiquent une forte dissymétrie de la vallée, surtout en aval. C'est sous la terrasse de rive gauche que l'on rencontre les concentrations aluminiques les plus fortes s'exprimant sous forme de précipités minéraux en surface (tamarugite, alunite...).

4.2. L'essai agronomique

Signalons tout d'abord qu'en 1988, la gestion du barrage avec une seule porte n'a pas permis de mener cet essai jusqu'à la production. Depuis la création du barrage, aucune parcelle paysanne, située dans la zone dégradée, n'a produit de riz (BRUNET, 1989).

Un dessalement significatif du sol de toutes les parcelles a été constaté jusqu'à une profondeur de 55 cm sous les billons. A 25 cm de profondeur, la salinité de la solution du sol est passée de 55 à 12 mS/cm au cours du mois de juillet. Une remontée a été observée après le billonnage d'avant repliquage. Elle s'est stabilisée aux alentours de 20 mS/cm à partir du 15/9. Cette évolution est confirmée par la mesure sur extrait de sol 1/5 où la salinité a chuté de 10 à 1,5 mS/cm (moyenne sur les parcelles) de juillet jusqu'au moment du repiquage.

Le lessivage des sels et l'inondation des parcelles entraîne une élévation du pH du sol in situ sur tous les points de mesure (de 0,5 à 0,7 unité).

Le rendement moyen en riz paddy est de 2732 kg/ha, (calcul fait sur la totalité de la récolte, le taux d'humidité moyen est de 6%). Le tableau suivant donne la répartition des rendements selon les variétés et la situation topographique.

Tableau 1 Rendements de l'essai rizicole

Variété	Parcelle	Rendement kg/ha	Observation
DJ 684 D	2	2886	
DJ 684 D	5	3572	
DJ 684 D	8	1300	fort dessalement parcelle la plus haute
ROCK 5	1	2136	
ROCK 5	4	2450	
ROCK 5	6	3936	fort dessalement
ETOUHAL	3	2690	
ETOUHAL	7	2886	

Une transformation radicale de la vallée semble s'opérer. Cette année, toutes les surfaces visibles de tannes (terres nues stérilisées par une hyper-salinisation) ont disparu de la vallée. La colonisation par les cypéracées de tous les sols incultes et l'apparition, par tache, de graminées rampantes ou à tige sont la preuve d'une régénération rapide de l'écologie de cette vallée.

Figure 8

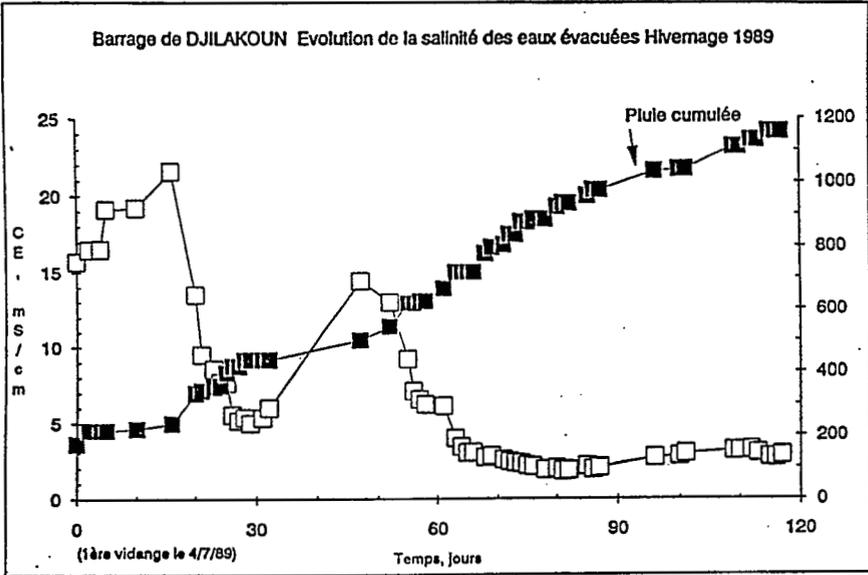
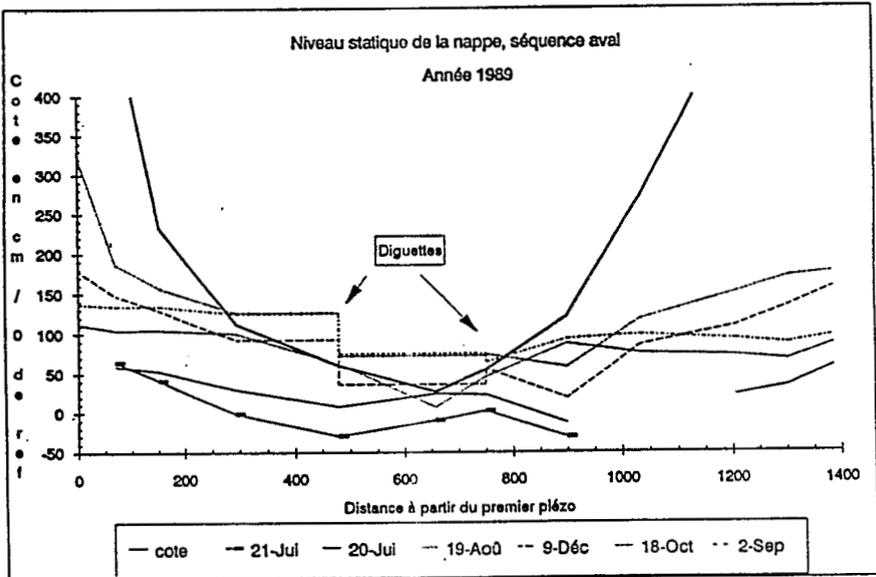


Figure 9



5. CONCLUSION

Après une première année de gestion rationnelle du barrage anti-sel et une première bonne récolte, les paysans de la vallée de Djiguioum ainsi que ceux des vallées environnantes ont retrouvé l'espoir de cultiver leurs rizières. Si cet espoir n'est manifestement pas vain, il se doit de ne pas être déçu. Les résultats de l'essai agronomique ont démontré que la culture traditionnelle du riz est possible dans ces vallées à sols sulfatés acides, moyennant un aménagement sommaire et le respect de règles de gestion simples. Il reste à vérifier par la modélisation hydrologique que la gestion préconisée peut se faire en année plus sèche.

L'objectif, qui consistait à montrer la faisabilité d'une réimplantation de la riziculture sur des terres dégradées, a été atteint. Il demande à être confirmé au cours de la prochaine campagne. Cependant, il importe de bien restituer cette nouvelle donnée dans le contexte socio-économique actuel. Le manque de main d'oeuvre disponible, soit par suite de l'exode vers les villes, soit par la concurrence avec d'autres spéculations, plus rentables, sur les plateaux, peut constituer un frein au redémarrage de la riziculture. L'investissement humain que suppose ce type d'aménagement, même sommaire, constitue-t-il une contrainte trop importante eu égard aux revenus modestes dégagés? Le rôle des terres rizicultivées dans le système de production des paysans Diola sera-t-il aussi prépondérant que naguère? Autant de questions qu'il convient de ne pas occulter pour transformer une réussite ponctuelle en projet de développement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARRY B., 1986.

Situations des aménagements hydro-agricoles des terres salées de Basse Casamance. IIIème séminaire sur les aménagements hydro-agricoles et systèmes de production, 16-19 Décembre 1986, Montpellier.

BARRY B., BOIVIN P., BRUNET D., MONTOROI J.P., MOUGENOT B., TOUMA J., ZANTE P., 1988.

Evolutions des stratégies d'aménagement hydro-agricoles des sols salés en basse Casamance. Deuxièmes Journées de l'eau au Sénégal, UCAD, Dakar.

BOIVIN P., BRUNET D., 1990.

Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivimétrie électromagnétique et krigeage. Rapport de campagne. Multigr., ORSTOM/Dakar-Bondy, 12 p.

BRUNET D., 1988.

Etude pédologique de la vallée de Djiguioum (basse Casamance). Multigr., ORSTOM/Dakar, 28 p. + 2 cartes + annexes.

BRUNET D., 1989.

Dessalement des terres dans la vallée de Djiguioum. Bilan hydrique et salin de l'hivernage 88, ORSTOM/Dakar.

DACOSTA H., 1989.

Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance. Thèse 3ème cycle, Univ. CAD, Dakar.

ISRA/CRODT, 1986.

Actes du séminaire «L'estuaire de la Casamance: environnement, pêche, socio-économie». 19-24 juin 1986, Ziguinchor.

KALCK, 1978.

Evolution des zones à mangroves du Sénégal au Quaternaire récent. Etudes géologiques et géochimiques. Thèse 3ème cycle, ULP Strasbourg, 117 p.

LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., MOUGENOT B., CARN M., 1987.

Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et de leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. Science du Sol, 25(3), 173-184.

MONTOROI J.P., ZANTE P., 1989.

La mise en valeur des terres dégradées par la salinisation en basse Casamance (Sénégal). Séminaire «Estudio de las relaciones agua-suelo-vegetacion y ganado en la zona arida del norte de Mexico. Orientado a la utilizacion racional de estos recursos», 23-27 Octobre 1989, Mexico.

USAID/SOMIVAC/ISRA, 1985.

Actes de la 11ème Table Ronde sur les barrages anti-sel, 12-15 Juin 1985, Ziguinchor.

**CULTURES DE DECRUE ET PERIMETRES IRRIGUES DANS LA
VALLEE DU FLEUVE SENEGAL**

Par

L. SEGUIS

Cultures de décrue et périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal

L. SEGUIS

(ORSTOM Hydrologie - BP 1386 Dakar)

Introduction

Lorsqu'une région à très faible pluviosité a la chance d'être traversée par un cours d'eau pérenne, un éco-système où la vie est réglée par le régime du cours d'eau se développe. En Afrique, on peut citer les rives du Nil, du Niger et du Sénégal principalement. Le régime de ces cours d'eau est marqué par une crue sur 2 à 3 mois et un étiage fort le restant de l'année. Confrontés à des sécheresses persistantes, des besoins alimentaires croissants, les états possédant de telles rivières ont cherché à les régulariser par la construction de grands barrages, et à développer corollairement une agriculture irriguée.

La réussite d'un projet de mise en valeur agricole d'un grand bassin hydrographique que l'on définira comme l'utilisation rationnelle de la ressource en eau régularisée passe par la prise en compte de l'état du système antérieurement à l'aménagement. En effet, l'aménagement, sous peine d'être artificiel et voué à l'échec, ne doit pas être surimposé mais intégré au milieu pré-existant. Ainsi le développement d'une agriculture irriguée nécessite la connaissance de caractéristiques physiques (climat, pédologie) et humaines (démographie, structures sociales, modes de production, occupation foncière des terres aménageables etc.). De l'ensemble de ces caractéristiques se déduisent diverses options d'aménagement et implicitement divers scénarios d'utilisation de l'eau. En dernier lieu, l'aménagement d'un grand bassin s'étalant sur plusieurs dizaines d'années, des dérives entre les réalisations et les objectifs fixés initialement doivent être envisagées. Il convient donc de réactualiser périodiquement les contraintes de gestion de la ressource en eau en fonction du développement des aménagements.

Dans les pages suivantes, nous prenons l'exemple de l'aménagement de la vallée du Sénégal. Nous présentons succinctement le fleuve et le climat, puis le cadre et les caractéristiques des cultures traditionnelles de décrue. Nous exposons ensuite la prise en compte de leur spécificité dans l'élaboration des scénarios d'utilisation de l'eau définis lors de la construction des barrages. Avant d'aborder l'état présent de l'agriculture dans la vallée 5 ans environ après l'achèvement des barrages, nous retraçons l'histoire de la culture irriguée, nécessaire à la compréhension des formes d'aménagements actuels. Le constat actuel de l'agriculture traditionnelle et irriguée nous permettra d'introduire le nouveau programme ORSTOM de valorisation des aménagements hydro-agricoles.

1 Fleuve et climat

Le Sénégal, long de 1790 km, prend sa source dans le Fouta Djallon (Guinée) à une altitude de 800 m. Ses deux branches mères, le Bafing et le Bakoye ont un régime tropical de transition puis tropical pur. Au delà de Kayes, le Sénégal entre dans le domaine sahélien. Son dernier affluent conséquent est la Falémé, en amont de Bakel. A Bakel, le Sénégal quitte le «Haut bassin» et entre dans la «Vallée» caractérisée par une plaine alluviale de 10 à 20 km de large inondée annuellement. La pente moyenne jusqu'à l'embouchure est très faible (1,5 cm/km) (cf. figure 1).

Par le Bafing, branche la plus importante du Sénégal, transite 45 % (les années de forte hydraulité) à 70 % (les années sèches) du volume passant à Bakel. Sur la période 1904-1984, le volume médian de la crue à Bakel (juillet-novembre) était de 20 milliards de m³. Le barrage visant à régulariser le fleuve a donc été implanté sur cet affluent au site de Manantali (Mali).

Du fait de la faible pente du lit dans la vallée, une langue salée en période d'étiage remontait jusqu'au-delà de Dagana (190 km de l'embouchure), interdisant l'irrigation en saison sèche dans le delta. Cette situation a disparu à la suite de la construction du barrage anti-sel de Diama à 50 km de l'embouchure.

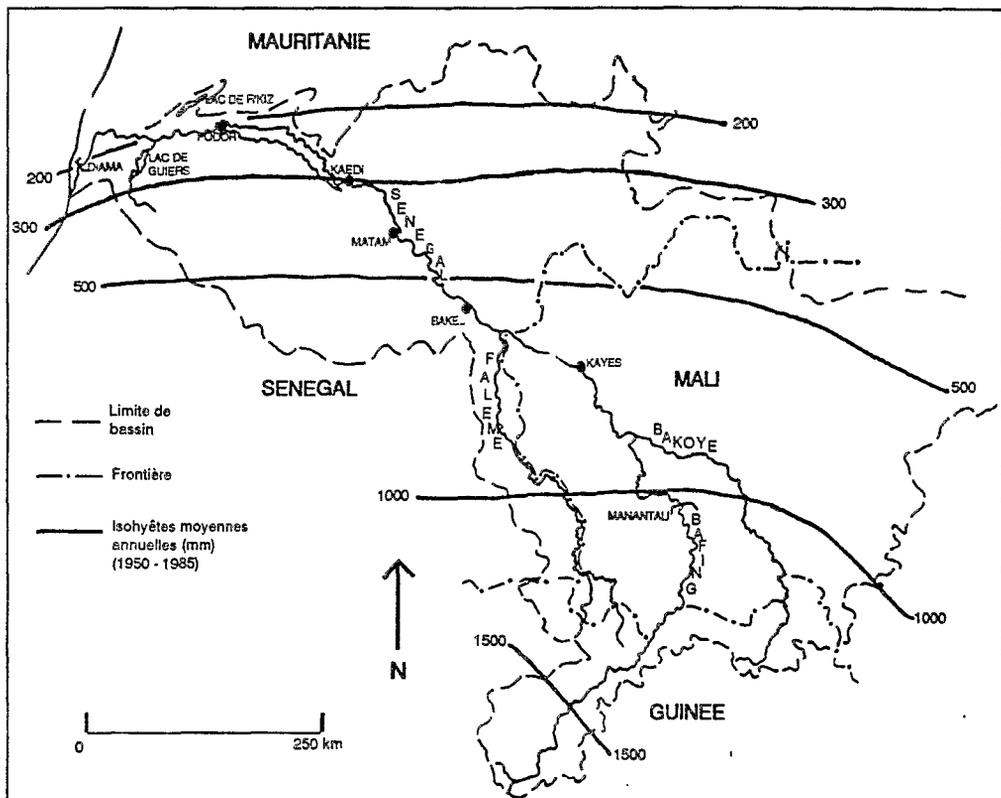


Figure 1 - Bassin du Sénégal

Les précipitations annuelles sur la vallée sont faibles (moins de 550 mm en aval de Baka). Sur la période 1970-1985, Podor à l'extrémité de la boucle du Sénégal a reçu 170 mm en moyenne annuelle. Les températures sont un facteur contraignant pour les cultures de saison sèche. Les faibles températures de décembre à février allongent les cycles culturaux tandis que des risques d'échaudage sont à craindre d'avril en juin.

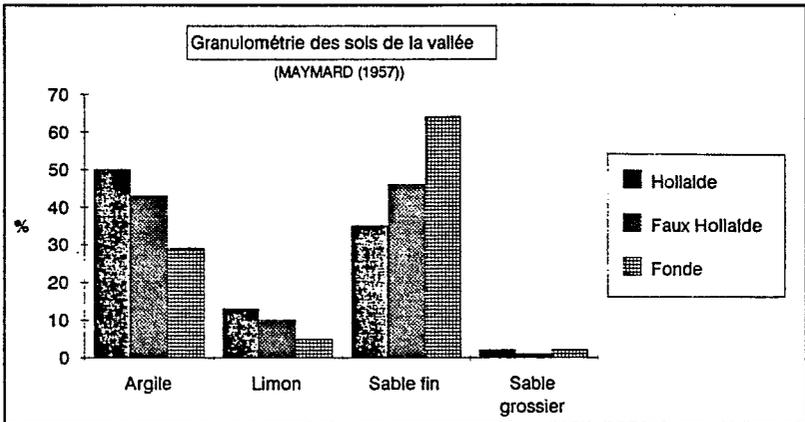
2 Les cultures traditionnelles

2.1 Situation et pédologie

Comme le Niger, le Sénégal possède un delta intérieur dans son tronçon septentrional. Le lit mineur sinueux présente de nombreux effluents dont le plus important est le Doué de Kaédi à Podor. La plaine alluviale (le *wallo*) couvrant environ un million d'hectares est constituée d'une succession de cuvettes

délimitées par des levées. La topographie règle l'importance de la submersion annuelle et donc la répartition des sols. On distingue ainsi :

- le *hollalde*, terre argileuse des bas-fonds. Sa capacité de rétention au champ serait de 25 % (MAYMARD, 1957). Par sa teneur en éléments fins (cf. figure 2), c'est une terre difficile à travailler.
- le *fonde* sur les bordures des cuvettes. Occupant les points hauts du paysage (les levées), ce sol rarement submergé est plus sableux. Sa capacité de rétention serait de 18 %.
- et en position intermédiaire, irrégulièrement inondé, le faux *Hollalde* (cf. figure 3).



- Figure 2 -

Les surfaces occupées par chacun de ces sols et les superficies nettes aménagées pour l'irrigation (à l'amont de Dagara) sont regroupées dans le tableau 1.

Sol	Surface	dont surface aménagée
Fonde	159000	119000
Faux Hollalde	137000	104000
Hollalde	150000	113000
Total	447000	336000

Tableau 1 - Surface occupée (ha) par les principaux sols de la vallée (CHAUMENY, (1973))

Enfin, les terrains sableux de *dieri* occupent la bordure de la vallée.

Les cultures pluviales étant limitées par l'isohyète 300 mm (à la latitude de Kaédi), les cultures traditionnelles de la vallée sont essentiellement des cultures de décrue. Les cultures du sorgho de décrue s'opèrent essentiellement sur les *hollaldes*. Le dessin du parcellaire s'inscrit dans la topographie. Au sens hydrologique strict, la qualité des cuvettes cultivées dépend de leur facilité à recevoir l'inondation, puis à assurer le drainage, notamment en fonction des seuils et de l'importance des marigots adducteurs.

Avant le développement de l'irrigation villageoise, les terrains de *fonde* étaient peu exploités. Quelques champs portaient des cultures pluviales de sorgho et de petit mil. Ces cultures prenaient d'avantage d'extension vers l'amont de la vallée où les précipitations sont plus importantes. Les villages sont installés sur ces terres hautes (cf. figure 3).

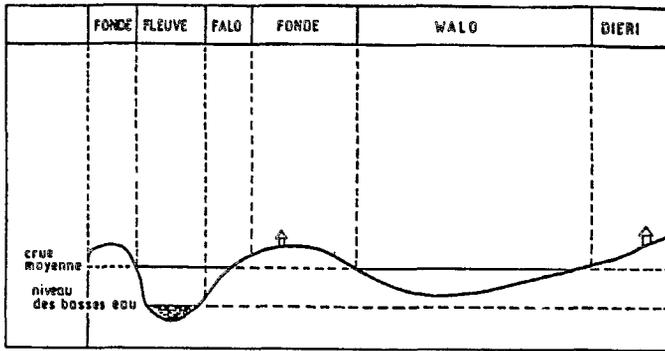


Figure 3 - Coupe de la vallée

Enfin, le *falo* constitue la dernière unité à être cultivée. Il occupe les rives convexes des méandres du fleuve et de ses bras. Ces terrains régulièrement enrichis en limon et humides plus longtemps de part la proximité du fleuve jouent le rôle de jardin de saison sèche. On y cultive maïs et haricot dans les parties hautes, courge, melon, tomate et patate douce dans les parties basses. Le parcellaire est perpendiculaire au fleuve, dessinée en fonction de la granulométrie des sables déposés. Sur les sables grossiers de l'amorce de la boucle, elles sont larges et vastes tandis que sur les alluvions limoneuses vers l'aval, elles sont de plus en plus serrées et exigües (cf. figure 4) (LERICOLLAIS et SCHMITZ (1984)).

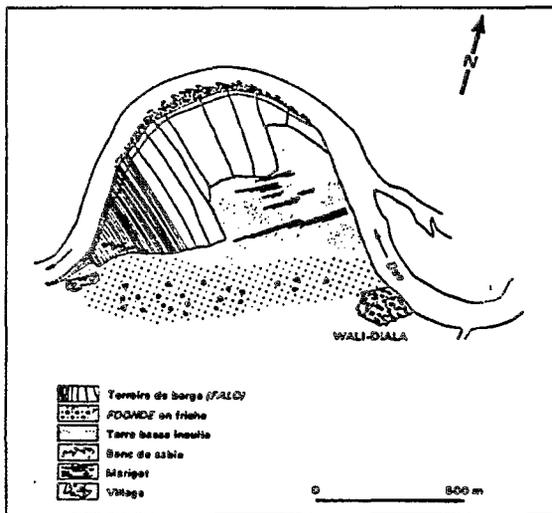


Figure 4 - Terroirs de Falo (LERICOLLAIS et SCHMITZ (1984))

2.2 Population concernée

D'après le recensement de 1988, la population sénégalaise totale de la vallée s'élève à 765 000 habitants dont 579 000 ruraux (125 000 dans le département de Dagana, 138 000 dans le département de Podor, 210 000 dans le département de Matam et 106 000 dans celui de Bakel). Déduit du recensement de 1972 à l'aide d'un facteur d'actualisation annuelle de 2.5%, la population mauritanienne

dans la vallée s'éleverait à 425 000 habitants en 1988. Près d'un 1,2 million d'individus occuperaient donc la vallée dont 700 000 pratiqueraient la culture de décrue en prenant le rapport population cultivant en décrue sur population totale déterminée par LERICOLLAIS (1979). Cependant, cette estimation n'a valeur que d'ordre de grandeur car ni la sécheresse des années 70, ni l'impact des aménagements sur les cultures traditionnelles ne sont pris en compte.

2.3 Techniques culturales et caractéristiques agronomiques

Le sorgho de décrue est une forme semi-hative (130 à 150 jours environ) de *Sorghum cereuum*. Les tiges courtes, 1 m à 1,5 m, relativement fortes, à tallage faible, portent des panicules ovoïdes aux grains plus ou moins gros et serrés. Le sorgho prélève l'eau jusqu'à 170-180 cm de profondeur et sa consommation est de l'ordre de 150 à 200 mm. Le rendement est faible (500 kg/ha). Il augmente en fonction de la précocité du semis, ce qui est explicable par le développement rapide des plantes avant les basses températures de décembre et par un moins grand risque d'échaudage à l'épiaison en janvier qu'en mars. Enfin, un semis précoce permet l'utilisation rapide de l'eau stockée dans les couches superficielles du sol avant que cette eau se perde suite à l'ouverture de fentes profondes. Semé à l'hivernage, sous des conditions climatiques plus propices, le rendement est triplé (MAYMARD, (1957), (RIJKS, (1976)).

Le semis débute en fonction de la date de retrait des eaux (d'octobre à novembre, d'amont en aval de la vallée) sur des terrains ayant été submergés environ 30 jours. Les terres cultivées dans les cuvettes forment «un anneau» qui peut occuper le fond de la cuvette par crue faible à moyenne et le haut de la cuvette sur les terrains plus légers de *fonde* par crue forte à très forte (CHAUMENY, 1974). Pour limiter les risques liés aux fluctuations interannuelles des crues, les paysans les mieux dotés possèdent donc des terrains d'altitudes diverses (LERICOLLAIS, 1989). Le semis s'effectue 8 à 10 jours après le retrait des eaux lorsque la croute d'induration est suffisamment épaisse pour permettre le déplacement. Le mode de semis est immuable et adapté aux conditions difficiles du milieu. Quatre à cinq graines sont déposées dans un trou de 15 cm de profondeur fait à l'aide d'un pieu. Elles sont recouvertes d'une poignée de sable du fleuve ou de terre pulvérisée. La profondeur du semis permet au sorgho d'avoir suffisamment d'humidité lors du premier stade de son développement racinaire. Le bouchon de terre a une triple action : bloquer la remontée capillaire, créer un lit de semence et cacher les grains des prédateurs (Anonyme (1986)). La densité de semis est d'environ 10000 poquets à l'hectare.

Les travaux suivants le semis sont le sarclage et surtout le gardiennage qui vise à écarter les acridiens et les oiseaux manges-mil, principalement. La récolte se déroule de février en avril.

3 Les aménagements

L'O.M.V.S. (Organisation de Mise en Valeur du Fleuve Sénégal) coordonne ou dirige l'ensemble des aménagements sur le fleuve.

La construction des deux barrages de Manantali et de Diama doit permettre à terme :

- l'irrigation le long du fleuve de 375 000 ha de culture,
- le maintien pendant une période transitoire des cultures de décrue par la production d'une crue artificielle,
- la production de 800 GWh/an, 9 ans sur 10,
- le maintien d'un tirant d'eau suffisant pour permettre la navigation entre Kayes et St Louis,
- l'arrêt de la langue salée à Diama,
- la réduction des hauteurs de pompage dans le delta,
- l'amélioration du remplissage des dépressions naturelles telles le lac de R'Kiz et surtout le lac de Guiers, réservoir d'eau potable pour Dakar.

Actuellement, la centrale hydro-électrique de Manantali n'est pas installée. Les consignes à court terme de gestion de Manantali sont par ordre d'importance décroissante

- le remplissage du barrage,
- la production d'une crue artificielle,
- le maintien d'un débit d'étiage (30 à 50 m³/s) en saison sèche.

En fonction des particularités du milieu et de la culture du sorgho de décrue, les caractéristiques de la crue artificielle sont :

- une montée de crue rapide, afin que l'eau pénètrent au fond des fentes et imbibent rapidement une large tranche de sol,
- une durée d'inondation de l'ordre de 15 à 30 jours,
- un maximum à Bakel entre le 20 août et le 20 septembre soit un semis début octobre vers Bakel et en novembre à l'aval, soit avant la période froide.
- une décrue progressive afin que les agriculteurs soient à même de suivre le retrait.

GIBB (et O.M.V.S., (1987) a développé un modèle simple (modèle UNE) délivrant les surfaces inondées par cuvette du lit majeur, en considérant que le niveau dans la cuvette est celui dans le lit mineur au droit de la cuvette. Sur cinq années, la comparaison des relevés aériens des surfaces cultivées aux surfaces inondées moins de 45 jours et plus de 15 jours estimées par le modèle UNE donne un rapport moyen global de 0.5 à l'échelle de la vallée. En prenant 3 hypothèses de surfaces inondées, 3 scénarios de crues artificielles ont été définis :

Crue	S cultivée (ha)	Volume (10 ⁹ m ³)	Qmax (m ³ /s)	T(jour)>2000m ³ /s
A	50000	7.5	2500	10
B	75000	8.5	2750	15
C	100000	10.0	3000	20

Tableau 2 - Caractéristiques des crues artificielles (GIBB et O.M.V.S., 1987)

D'après les simulations effectuées par GIBB, sans production électrique, les demandes de l'irrigation (180 à 250 m³/s pour 150000 ha avec une intensité culturale de 200%) seront compatibles avec le lâcher d'une crue artificielle de 10 milliards de m³.

4 Les cultures irriguées, historique et diversification actuelle

Au cours du XIX siècle, afin de rentabiliser les investissements coloniaux, des projets d'irrigation à des fins de production de coton, de riz et de plantes tinctoriales furent lancés dans le delta, mais ils échouèrent tous. Au début du siècle, l'aménagement du delta fut mis en sommeil avec le développement du bassin arachidier. L'extension de l'arachide aux dépens de la culture du mil, associée à l'exode rural entraîna des importations de riz de plus en plus massives. C'est dans ce contexte que fut créée en 1938 la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) avec pour objectif la production locale de riz par irrigation. Le périmètre de Guédié alors équipé d'une station de pompage fonctionnant au bois date de cette époque. Dans le delta, des terres inondables furent endiguées et gérées en submersion contrôlée. A l'indépendance, la MAS fut remplacée au Sénégal par les organisations autonomes du delta (O.A.D.) et de la vallée (O.A.V.). Les aménagements en submersion contrôlée eurent des résultats désastreux. Les raisons invoquées étaient l'irrégularité de la crue d'une année sur l'autre, l'absence de matériel propre aux organisations, la concurrence foncière avec les terroirs traditionnels de décrue, la méconnaissance de la structure sociale des habitants.

Devant ce constat, l'état sénégalais, en 1965, remplaça l'O.A.D. par la SAED (Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta) dotée d'une autonomie financière et de matériels. Les aménagements passèrent du stade primaire (submersion contrôlée) au niveau secondaire marqué par des diguettes et des canaux adducteurs. Enfin, dans les aménagements tertiaires, la maîtrise de l'eau est rendue totale par la présence d'une station de pompage, de digues, d'un réseau d'adduction jusqu'aux parcelles et d'un système de drainage. Le périmètre est grand (500 à 1000 ha et plus) et géré de manière industrielle afin de dégager un surplus commercialisable. Les parcelles d'abord collectives furent ensuite

distribuées aux paysans organisés en groupements de producteurs. Ceux-ci sont tenus de faire appliquer les consignes de la SAED quant à la gestion de l'eau et au calendrier cultural. La monoculture est de mise et l'on doit tendre vers la double culture annuelle. L'aménagement n'est pas intégré dans le système de production des paysans. Les grands aménagements de ce type, créés dans les années 1970, étaient Dagana, Nianga sur la rive gauche et Mpourie, Kaedi construit par la SONADER, équivalent mauritanien de la SAED. Les rendements en riz très bas à l'origine (2,5 t/ha) (DIEMER et VAN DER LAAN (1987)) sont maintenant en moyenne de 4.2 t/ha.

A la même époque, sur leur propre initiative, les paysans regroupés en groupements ou coopératives villageois aménagèrent les terres hautes de *fonde*. Ces terrains, rarement inondés et donc peu attrayants à cultiver, subissaient une faible pression foncière; de plus, les sols sableux les composant sont plus faciles à cultiver que les *hollalde* des cuvettes. Devant le succès de ces Périmètres Irrigués Villageois (PIV), l'état sénégalais étendit le domaine d'action de la SAED à toute la rive gauche (la SAED devint la Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du Sénégal, des vallées du Sénégal et de la Falémé). A la différence des grands périmètres tournés vers la commercialisation, les périmètres villageois ont pour objectif l'autosuffisance des irrigants. Les périmètres sont de petites tailles (20- 30 ha), à proximité des villages et aménagés sommairement. Le pompage est assuré par un groupe motopompe fourni par la SAED et installé sur un radeau flottant afin de suivre les variations du fleuve. Les principaux défauts des PIV (basse capacité des canaux, rareté des ouvrages hydrauliques (pariteur, régulateur), absences de planage et surtout de drainage (HUIBERS et SPEELMAN (1990)) s'expliquent par le désir de maintenir des coûts d'aménagement bas (0,3 à 0,7 million F. C.F.A./ha contre 3 à 4 millions F. C.F.A. pour les grands aménagements (SECK (1986))). Chaque paysan reçoit de la coopérative 10 à 30 ares qu'il exploite manuellement. Le schéma de culture, les tours d'eau sont décidés par les responsables du groupement au sein du village. Ce type d'aménagement a eu un grand succès dans la vallée. De 1975 à 1989, la surface couverte par les petits périmètres est passée de 1000 ha à 26000 ha, celle occupée par les grands périmètres de 6000 à 18000 ha. Les rendements moyens en riz sur les dix dernières années ont été de 4.7 t/ha (C.E.P.C. O.M.V.S. (sept. 1988), (déc. 1989)).

Cependant, les dettes contractées par les états pour les aménagements hydrauliques entraînent la nécessité de promouvoir l'irrigation sur une base commerciale à grande échelle. Depuis 1980, SAED et SONADER construisent des périmètres dits «intermédiaires» devant associer les avantages de gestion des périmètres villageois aux économies d'échelle des grands périmètres. Sur ces périmètres de l'ordre de 500 à 1000 ha, le maillage hydraulique correspond au maillage villageois: le périmètre est divisé en cuvettes autonomes (unité autonome d'irrigation selon la terminologie SAED) qui regroupent 30 à 50 parcelles de 0.5 à 1 ha attribuée aux familles d'un même village voir d'un même quartier. Les irrigants d'une ou plusieurs cuvettes constituent des groupements qui ont sensiblement autant de responsabilités que sur les petits périmètres avec en plus la gestion d'un parc de matériel d'exploitation. Cependant sur certains périmètres intermédiaires récemment construits (Diamondou au Sénégal), pour limiter les coûts d'exploitation, la mécanisation et la motorisation sont réduites voir absentes.

5 Etat des cultures dans la vallée du Sénégal en 1988, 1989

5.1 Les cultures de décrue

Du 1 juin 1989 au 1 juin 1990, la retenue de Manantali est passée de 3,82 à 6,04 milliards de m³. La pleine capacité n'étant pas encore atteinte (12 milliards de m³), la forme des crues à Bakel résulte des apports des affluents non régularisés (Bakoye et Falémé) mais aussi des contraintes de remplissage du barrage. Les volumes transités à Bakel de juillet à novembre sont respectivement de 13.2 et 11,6 milliards de m³, soit une fréquence empirique au dépassement d'environ 0,8 sur la période 1904-1984. En ce qui concerne les hauteurs maximales à Bakel, les crues des deux dernières années sont les plus fortes sur les 9 dernières années. A l'aide des hauteurs maximales aux principales stations de la vallée, le modèle UNE délivre les surfaces inondées suivantes :

- en 1988, 317058 ha dont 225504 en rive gauche,
- en 1989, 184215 ha dont 129177 en rive gauche.

En 1988, par photo-interprétation des images SPOT, l'O.M.V.S. avait évalué les surfaces inondées du lit majeur à 394295 ha dont 233 105 ha en rive gauche (C.E.P.C., O.M.V.S. (déc. 1989 c)).

A l'exception de la date de son maximum, la crue 1989 se rapproche par ces caractéristiques des crues GIBB (cf. figure 5).

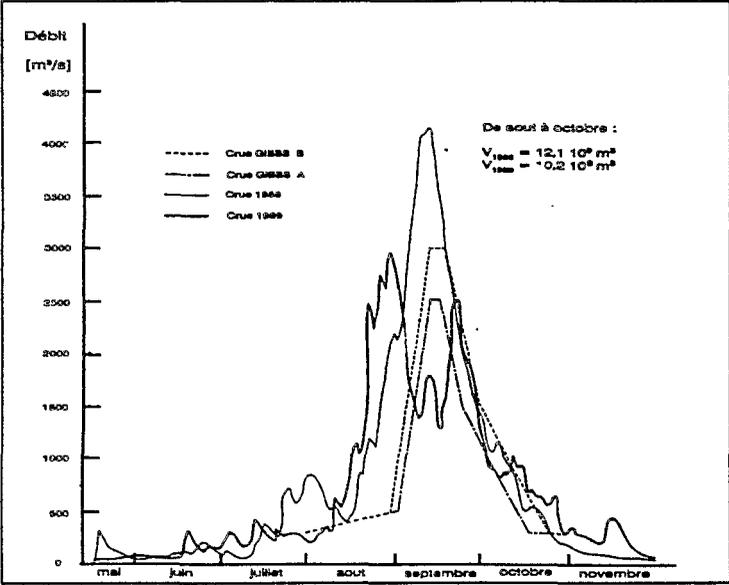


Figure 5 - Hydrogrammes des crues 1988, 1989 à Bakel

Le tableau 3 regroupe :

les surfaces et production en sorgho et maïs (principales cultures de décrue) de la région administrative du Fleuve (Département de Dagana, Podor et Matam) estimées par sondage.

les surfaces cultivées en décrue estimées par le modèle UNE. (Le calcul se fait en déterminant la valeur des surfaces inondées moins de 15 jours et plus de 45 jours que l'on multiplie ensuite par 0.5 pour obtenir les surfaces cultivées.)

Année	Surface cultivées(ha) estimées par		production (t)
	sondage	modèle UNE	
1988	24459	72600	16104
1989	29576	28500	15246

Tableau 3 - Surface cultivée en décrue et production (Inspection régionale de l'agriculture, (1989), (1990)

Les années de forte crue, les hypothèses sous-tendant l'estimation des surfaces cultivées par le modèle UNE semblent être mise en défaut. L'augmentation des surfaces emblavées de 1988 à 1989 va à l'encontre des caractéristiques des crues correspondantes. Elle résulte uniquement d'un accroissement des surfaces dans le département de Matam (+ 81%) car dans ceux de Podor et de Dagana, les emblavures diminuent de 11%. Si l'on exclut toute erreur dans l'évaluation par sondage, ceci est peut-être attribuable à une mise en culture plus importante des terres de la rive gauche suite à l'afflux des réfugiés de rive droite. Cette mise en culture de terres non travaillées généralement et donc à plus haut risque agricole expliquerait la stagnation de la production de 1988 à 1989.

5.2 Les cultures irriguées

5.2.1 Situation et importance des surfaces aménagées

Les surfaces aménagées en 1989 s'élevaient à 63790 ha pour les pays riverains (Mali, Mauritanie, Sénégal). Dans chaque pays, la répartition des sites par type de périmètre et secteur d'encadrement (cf. annexe) est résumée dans le tableau 4.

Les faits suivants se dégagent :

- déficit des aménagements dans la moyenne vallée par rapport au delta tant en Mauritanie qu'au Sénégal,
- prépondérance du secteur privé en Mauritanie (51%) (Sénégal : 28% en excluant l'agro-industrie C.S.S. (sucre) et SOCAS (tomate)),
- concentration du secteur privé sur le delta.

L'accroissement des surfaces irrigables au Sénégal de 1988 à 1989 (+ 7162 ha) est attribuable à 61 % au secteur privé sous la forme de petits aménagements (foyers, privés, et groupements d'intérêt économique). En un an, les périmètres privés et groupements dans le delta sont passés de 54 à 195 soit une augmentation de surface de 4302 ha (C.E.P.C., O.M.V.S., déc. 1989 b).

5.2.2 Surface cultivée et mise en valeur

Riz est la culture dominante. A l'hivernage, maïs et sorgho sont aussi cultivés dans la moyenne vallée. En contre-saison froide (novembre à février), une partie des périmètres est plantée en tomate destinée aux conserveries. Lorsqu'une seconde culture de riz est effectuée, elle se déroule en contre-saison chaude (mars à juin).

Pour la rive gauche, les taux de mise en valeur (surface cultivée / surface aménagée) des périmètres suivis par la SAED (grands et moyens périmètres, périmètres villageois encadrés) sont consignés dans le tableau 5. La faiblesse du taux de mise en valeur (65 % environ) est attribuable à des problèmes organisationnels (arrivée tardive des semences, des intrants), de maintenance (station de pompage) et de vieillissement précoce des périmètres.

Délégation	Hivernage 1988			Hivernage 1989		
	Surface aménagée (ha)	Surface cultivée (ha)	Taux de mise en valeur (%)	Surface aménagée (ha)	Surface cultivée (ha)	Taux de mise en valeur (%)
Dagana	12937	9641	74	13971	12627	90
Podor	8045	4285	53	8094	4522	56
Matam	5435	2512	46	5632	2625	47
Bakel	1842	1250	68	1994	1364	68
Total	28259	17688	62	29691	21138	71

Tableau 5 - Mise en valeur des surfaces aménagées par la SAED durant les hivernages 1988, 1989 (cultures : riz, maïs, sorgho) ((Inspection régionale de l'agriculture, (mai 1990)), (Statistiques SAED, (1989))

Pour les contre-saisons froides et chaudes, le taux de mise en valeur ne dépasse pas 25 % dans aucune des délégations de la SAED. En amont du delta, les taux de mise en valeur sont plus importants en contre-saison froide que chaude. En effet, sur les périmètres villageois majoritaires dans ce tronçon de la vallée, les paysans préfèrent le système riz d'hivernage et maïs de saison froide à la double riziculture.

	Hali	Hauritanie					Sénégal					Total Bassin
		Rosso	Boghé	Knedi	Gouraye	Total	Dagana	Podor	Hatam	Bakel	Total	
Grands, et moyens périmètres	0	1400	754	689	0	2843	11620	2216	857	0	14693	17536
Périmètres villageois encadrés	401	2052	1465	1309	488	5314	2351	5878	4775	1994	14998	20705
Foyers et périmètres non encadrés	0	3155	0	133	0	3288	2464	0	0	0	2464	5752
périmètres privés	37	5263	9	55	0	5327	6426	112	46	0	6592	11956
Recherches agronomiques	64	0	0	84	0	84	0	33	0	0	33	181
Agro- industries	0	0	0	0	0	0	7660	0	0	0	0	7660
Total	502	11870	2228	2270	488	16856	30521	8239	5678	1994	46432	63790

Tableau 4 - Répartition (ha) des types de périmètres irrigués par pays et secteur d'encadrement
(C.E.P.C., O.M.V.S. (déc. 1989 b))

Les raisons hydrologiques du faible développement de la double culture tiennent en des débits d'étiage peu soutenus (30 m³/s à Bakel de février à mai 1988) pour la moyenne vallée du fait des contraintes de remplissage de Manantali et à l'endiguement encore partiel de la rive droite de la retenue de Diama, pour le delta. Pour la double riziculture saison sèche chaude/ hivernage, les raisons techniques résident essentiellement en la difficulté de la succession rapide de la récolte et du battage du riz de saison sèche, puis de la préparation des sols sous la menace des pluies. Enfin, les problèmes de concurrence avec les cultures de décrue entrent en jeu dans la moyenne vallée. Là où existent des périmètres villageois, les paysans préfèrent sécuriser la production agricole en diversifiant les activités plutôt qu'en cherchant à rentabiliser au maximum le système le plus productif (JAMIN (1986)).

5.2.3 Rythmes d'aménagement et perspectives

Les cibles de planification fixant pour la rive gauche les objectifs d'aménagement à l'an 2000 (C.E.P.C., O.M.V.S., (déc. 1989 a)) ont été définies à travers les deux scénarios suivants :

scénario 1 : substitution des cultures de décrue par les cultures irriguées (suppression de la crue artificielle) (57250 ha à aménager sur la rive gauche, 33070 ha sur la rive droite, à l'exclusion du delta)

scénario 2 : aménagement en vue de l'autosuffisance alimentaire de la vallée (5000 ha/an jusqu'en 2000, pour le Sénégal). Les superficies aménagées dans les délégations de Podor, Matam et Bakel devront atteindre 71700 ha (Plan céréalier du Sénégal).

Par rapport aux cibles de référence, les taux d'aménagements au regard de la situation actuelle sont consignés dans le tableau 6. On constate la faiblesse des taux d'aménagements de la SAED dans une région où l'état assure pourtant l'essentiel des aménagements.

Délégation	Superficie aménagée en 1989		Superficie cible en 2000		Déficit en 1989 / 2000		Rythme annuel 1989 - 2000		Aménagmt. de 1988 à 1989
	Total	Part de de l'état	Scén. 1	Scén.2	Scén.1	Scén. 2	Scén. 1	Scén.2	
Podor	8239	8094	24650	30300	16411	22061	1492	2005	735
Matam	5678	5632	29200	37000	23522	31322	2138	2847	859
Bakel	1994	1994	3400	4400	1406	2406	128	219	137
Total	15911	15621	57250	71700	41439	55789	3758	5071	1731

Tableau 6 - Situation des aménagements en 1989 et rythmes d'aménagement (en ha) (C.E.P.C, O.M.V.S., (déc. 1989 a))

L'aménagement d'un périmètre irrigué passe par différents stades (projet de factabilité, avant-projet sommaire (A.P.S.), avant-projet définitif (A.P.D.) avant sa réalisation. L'examen du portefeuille d'avant-projets permet une bonne estimation des taux d'aménagement à court-terme. Par délégation au Sénégal, ou secteur en Mauritanie, le tableau 7 présente la situation actuelle.

Sénégal								
Délégation	Surface aménagée	Part de l'état	A.P.S.	A.P.D.	dont réhabilit.	Surface en aménagmt.	Total projet (sans réhabilit.)	Déficit des aménagmts. /scénario 1
Dagana								
1988	25133	13478	1445	8125	711	5		-
1989	30521	13971	1245	6475	5865	550	1855	-
Podor								
1988	7461	7359	16715	7575	500	1300		
1989	8239	8094	16715	8335	860	150	24190	16261
Matam								
1988	4819	4773	11180	1513	310	2217		
1989	5678	5632	11630	1863	310	1150	13183	22372
Bakel								
1988	1857	1857	2880	460	160	0		
1989	1994	1994	2880	1150	700	0	3330	1406
Secteur	Mauritanie							
Rosso								
1988	11870	3453	10100	5420	0	300	15520	excédent
Boghe								
1988	2228	2135	0	2600	0	300	2600	14802
Kaedi-Gouraye								
1988	2758	2756	5600	1200	0	2200	6800	10782

Tableau 7 - Situation des aménagements et avant-projets en 1988, 1989
au Sénégal et en Mauritanie
(C.E.P.C., O.M.V.S., (oct. 1988) .déc. 1985 a))

Ce tableau amène les remarques suivantes :

- le déséquilibre actuel des aménagements en faveur du delta ne paraît pas devoir diminuer dans un futur proche. L'ensemble des avant-projets (sommaire et définitif) susceptibles d'être réalisés dans un délai de 2 à 8 ans est inférieur aux surfaces restant à aménager (en vue de la satisfaction du scénario 1) dans la délégation de Matam et les secteurs de Boghe et Kaedi-Gouraye.
Plus en détail, on constate :
 - l'absence d'A.P.S. à Boghe, ce qui entrainera des retards dans la création de nouveaux aménagements lorsque ceux en A.P.D. seront réalisés,
 - la faible proportion d'A.P.D. par rapport aux A.P.S. à Matam (16%) et Kaedi-Gouraye (21%),
 - la stagnation des A.P.S. de 1988 à 1989 à Matam.
- sur les 7775 ha d'A.P.D. de réhabilitation au Sénégal, 5865 ha (76%) concernent la délégation de Dagana où les aménagements sont les plus anciens. On observe aussi un vieillissement des périmètres irrigués villageois où les réhabilitations passent de 970 ha à 1510 ha de 1988 à 1989.

Devant ce constat, nous rappellerons les principales mesures préconisées par l'O.M.V.S. pour atteindre les objectifs prédéfinis :

- réaliser un important programme d'études nouvelles à l'extérieur du delta,
- inciter les privés à investir à l'extérieur du delta,
- réduire les délais d'exécution des périmètres de l'A.P.S. à la mise en valeur,
- maintenir les aménagements en fonctionnement afin que les A.P.D. ne se réduisent pas aux réhabilitations.

Conclusion

A la fin de ce tour d'horizon de la vallée, il ressort que la haute et moyenne vallée, zone de forte population rurale (454 000 habitants sur la rive gauche), est sous équipée. Au vu du portefeuille d'avant projets de cette région, cette situation ne semble pas devoir s'inverser à court terme. Malgré le réel succès des périmètres villageois, les paysans préfèrent sécuriser production et revenu par le recours à la pluri-activité (culture de décrue, pluviale (vers Matam et Bakel), élevage, immigration). L'absence de centrale hydro-électrique à Manantali diminue les contraintes sur les ressources en eau et rend possible le maintien d'une crue artificielle conséquente parallèlement au développement de l'irrigation.

Devant la faiblesse des taux actuels d'aménagement et de mise en valeur, l'agriculture irriguée pourra difficilement satisfaire à moyen terme les objectifs d'autosuffisance alimentaire des populations de la vallée.

Dès lors, une étude visant à valoriser les cultures traditionnelles paraît opportune. De même que la réussite d'un périmètre irrigué ne se réduit pas à la connaissance de la dose optimale d'irrigation, les surfaces cultivées en décrue sont dépendantes de l'inondation mais aussi des caractéristiques humaines de la population exploitante. Notre projet d'étude est donc multi-disciplinaire. Il se portera sur quelques cuvettes de la région de Podor. Les hydrologues rechercheront les modalités de remplissage et de vidange des cuvettes, les temps de submersion des surfaces faisant l'objet de culture. Les pédologues chercheront à définir les paramètres pédo-hydriques décrivant la cinétique de recharge en eau des sols. Les géographes tenteront d'appréhender les relations temporelles, spatiales et économiques entre les différents secteurs d'activités. Cette phase d'analyse achevée, nous proposerons une typologie globale de fonctionnement des cuvettes. Nous tenterons alors de l'étendre à l'ensemble de la vallée afin d'être à même de proposer des modes d'aménagement et de gestion des ressources en fonction des spécificités de chaque site.

Bibliographie

Anonyme, 1986. "Le semis du sorgho de décrue au fuuta". ENDA Dakar, n° 4, 60 p.

Anonyme, 1989. "Statistiques SAED", 2p.

C.E.P.C. (Cellule d'Evaluation et de Planification Continue), O.M.V.S. (Organisation de Mise en Valeur du fleuve Sénégal) :

"Tableau de synthèse de la banque de données hydro-agricole". Dakar, sept 1988, 31p. + ann.

"Portefeuille des études (A.P.S.-A.P.D.) SONADER-SAED-O.V.S.T.M. dans le bassin du fleuve Sénégal". Dakar, Oct. 1989. 32 p. + ann.

"Portefeuille des études (A.P.S.-A.P.D.) dans le bassin du fleuve Sénégal". Dakar, déc. 1989 a., 28 p.

"Périmètres irrigués aménagés en maîtrise totale de l'eau, situation au 1 juillet 1989". Dakar, déc. 1989 b, 5 p. + ann.

"Notice explicative des cartes et méthodologie utilisées pour la localisation et l'inventaire des périmètres irrigués et des superficies inondées par la crue 1988-1989 du fleuve Sénégal (données du satellite SPOT). Dakar, déc. 1989 c, 9 p.

CHAUMENY J., 1973. "Etude sur les unités naturelles d'équipements". Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal, RAF 65/061, O.M.V.S. Saint Louis, 41p.

CHAUMENY J. 1974. "Utilisation des eaux du Sénégal". Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal, RAF 65/061, O.M.V.S. , 15 p.

DIEMER G. et van Der LAAN , 1987. "L'irrigation au Sahel". Karthala C.T.A. éd., 226 p.

GIBB et O.M.V.S., 1987 "Etude de la gestion des ouvrages communs de l'O.M.V.S., optimisation de la crue artificielle". Rapport phase 1, vol. 1B, 130p.

HUIBERS F. et SPEELMAN J.J., 1990. "Gestion de l'eau dans les périmètres irrigués villageois de la vallée du fleuve Sénégal : aspects techniques". ADRAO Dépt. d'irrigation et de génie civil Wageningen, 62 p.

JAMIN P.Y., 1986. "La double culture du riz dans la vallée du fleuve Sénégal : mythe ou réalité ?". Cah. de la Recherche - Développement, DSA-CIRAD, n° 12, pp 44-55.

Inspection régionale de l'agriculture, 1989. "Enquêtes sur les cultures de décrue 1988-1989 (rapport introductif)". Saint Louis, 16 p.

Inspection générale de l'agriculture, mai 1990. "Bilan hivernage 1989/1990. Préparation campagne hivernage 1990/1991". Saint Louis, 33 p.

LERICOLLAIS A., 1979. "Activités traditionnelles et insertion dans les casiers irrigués de la vallée du Sénégal". Coll. de Ouagadougou "Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale", Mém. ORSTOM n° 89, pp 265-273.

LERICOLLAIS A., 1989. "Risques anciens, risques nouveaux en agriculture paysanne dans la vallée du Sénégal". in " Le risque en agriculture", ORSTOM Paris, coll. à travers champs, pp419-436.

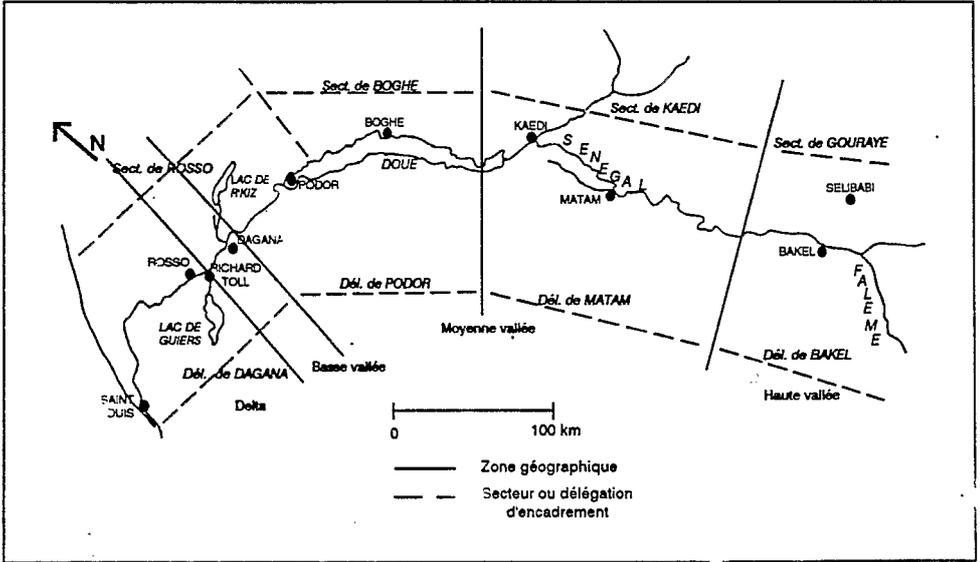
LERICOLLAIS A. et SCHMITZ J. 1984. " La calabasse et la houe". Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum., Vol XX, n° 3-4, pp 427-452.

MAYMARD J., 1957. "Etude expérimentale des facteurs naturels influant sur les cultures de décrue". MAS ORSTOM Dakar, 2 vol.,

RIJKS. 1976. "Mali, Mauritanie, Sénégal, agroclimatologie". O.M.V.S. PNUD F.A.O. 1976, 171p.

SECK S.M., 1986. " La maîtrise de l'eau et la restructuration sociale induite par l'organisation de la production irriguée dans le bassin du fleuve Sénégal. Cah. de la Recherche -Développement, DSA-CIRAD, n° 12, pp 13-20.

Annexe

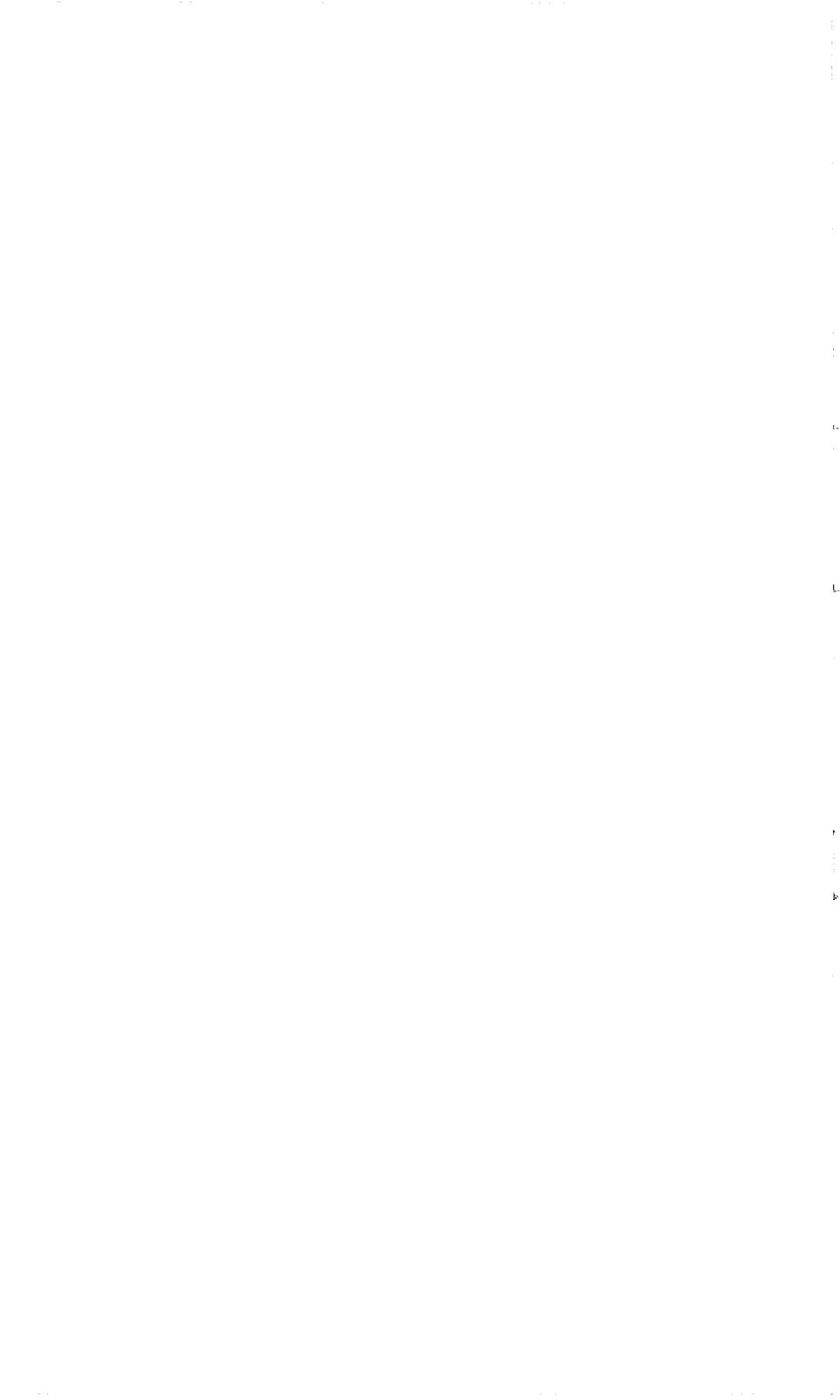


Carte de localisation des zones géographiques et des secteurs d'encadrement du bassin du Sénégal

**CRITERES DE QUALITE DES EAUX POUR UN USAGE
EN IRRIGATION**

Par

A. LARAQUE



CRITERES DE QUALITE DES EAUX POUR UN USAGE EN IRRIGATION

(évolutions et prévisions dans les açudes du Nordeste brésilien semi-aride)

A.LARAQUE

RESUME

L'intérieur du Nordeste brésilien est une vaste région semi-aride déséquilibrée.

Une valorisation de ses terres peut être réalisée par irrigation, à partir de milliers de retenues collinaires : les "açudes", déjà existantes.

La productivité et la pérennité d'un périmètre irrigué dépendent étroitement de la qualité des eaux utilisées, et en particulier de son risque de salinisation (apprécié d'après sa conductivité électrique : CE), et de son risque d'alcalisation (SAR).

C'est donc dans la finalité d'une meilleure gestion des eaux, que nous étudions :

- les caractéristiques hydrochimiques de ces açudes et leurs évolutions en saison sèche;
- les méthodes de prévision (par un modèle tenant compte de la thermodynamique des solutions) de l'évolution de la CE et du SAR dans les açudes en phase évaporatoire.

RESUMO

O interior do Nordeste brasileiro é uma vasta região semi-árida e sub-desenvolvida.

Uma valorização destas terras pode ser obtida através da irrigação com a utilização dos milhares de açudes já existentes.

A produtividade e a perinidade de um perímetro irrigado depende essencialmente da qualidade das águas utilizadas, e em particular de seu risco de salinização (avaliação através de sua condutividade elétrica : CE) e de seu risco de alcalização (SAR).

Portanto com objetivo de melhorar o manejo das águas é que nos estudamos :

- as características hidroquímicas dos açudes e suas variações em épocas de seca.
- os métodos de previsão (modelo que leva em conta a hidrodinâmica das soluções) da evolução da CE e do SAR dentro dos açudes em fase de evaporação.

INTRODUCTION

Depuis une quinzaine d'années l'ORSTOM⁽¹⁾ et la SUDENE⁽²⁾ étudient au travers d'accords de coopération, les comportements hydrologiques de petits bassins versants du Nordeste brésilien semi-aride. On prend conscience de l'utilité de ces travaux quand on sait que des dizaines de milliers de retenues collinaires : "les açudes", existent dans le Nordeste et continuent à être construites pour résister aux sécheresses périodiques qui affectent cette région, qui fait partie d'ailleurs du fameux "Polygone des sécheresses".

La concrétisation pratique de si longues recherches, pour le développement, voit le jour dans la volonté de plus en plus affirmée ces dernières années de favoriser l'irrigation à partir de ces réservoirs jusqu'ici largement sous utilisés. Les modèles hydrologiques et de gestion des petits açudes mis au point rendent dès lors possible l'optimisation de l'utilisation de leurs ressources.

Si l'aspect quantitatif de cette ressource en eau était bien évalué, il n'en était pas de même pour l'aspect qualitatif, dont l'importance en irrigation n'est plus à démontrer.

C'est pour cette raison, que dès 1987, ont été engagés des travaux dans ce domaine.

Après avoir rappelé les principaux critères d'interprétation des eaux d'irrigation, nous nous limiterons dans cet article à présenter les caractéristiques hydrochimiques générales des açudes nordestins, ainsi que la prévision de l'évolution de ces critères, durant la saison sèche, grâce à l'utilisation d'un modèle basé sur la thermodynamique des solutions et adapté à l'étude des açudes en phase évaporatoire.

I QUALITE DES EAUX ET RENDEMENT DES CULTURES

Dans les cultures irriguées, c'est la solution du sol qui est prélevée par la plante, et ce sont ses caractéristiques physico-chimiques qui agiront sur elle et sur la structure du sol. Quelles sont-elles et quelle est leur action ?

1.1 Principaux critères de qualité des eaux d'irrigation et leur importance

1.1.1 Paramètres clés de la solution du sol :

Pour l'agronome et le pédologue, les paramètres clés de définition de la solution du sol sont sa conductivité électrique (CEe), sa concentration en chlore (Cle) et son taux de saturation par rapport au sodium ($\text{Na}/\text{T}^{(3)}$), mesurés sur l'extrait de pâte saturée du sol.

1 ORSTOM = Institut de Recherche Scientifique pour Le Développement en Coopération.

2 SUDENE = Surintendance pour Le développement du Nordeste.

3 T (meq/100gr de sol) = $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{H}^+ + \text{Al}^{+++}$

Des valeurs limites de ces paramètres ont été établies expérimentalement pour éviter des problèmes de salinité, toxicité, perméabilité, qui pourraient affecter plantes et périmètres irrigués et se traduire par des baisses de rendement des cultures et des risques de perte des périmètres à plus ou moins long terme.

- la conductivité électrique ⁽⁴⁾ : représente les teneurs en sels dissous des solutions aqueuses. Leurs concentrations conditionnent la pression osmotique ⁽⁵⁾, qui peut, lorsqu'elle est trop élevée, rendre difficile l'absorption de l'eau par le végétal. Le rendement des cultures en sera alors affecté.

- la concentration en chlore : cet élément est choisi pour représenter les risques de toxicité ionique vis à vis du végétal. Il n'est pas le seul nocif, d'autres sont aussi incriminés comme par exemple le sodium, et le bore. Leur accumulation exagérée dans les tissus végétaux se traduit par des dommages à la plante (brûlures des extrémités foliaires, etc...) et parfois par des baisses de rendement.

Nous signalons que le chlore, élément très soluble n'intervient dans les précipitations salines qu'à de très fortes concentrations des eaux et n'est pas adsorbé par les sols. C'est donc lui qui a tendance à se concentrer le plus dans les eaux soumises à évaporation. Pour ces raisons, il est souvent choisi comme traceur pour mesurer les degrés de concentration des eaux par évaporation.

C'est pendant la phase de croissance succédant à la germination que la plante est la plus sensible à ces deux paramètres.

- le rapport "Na/T" :

Les pédologues évaluent le degré d'alcalisation du sol à partir de ce rapport exprimé en pourcentage où T représente la capacité totale d'échange cationique.

C'est en particulier l'ion sodium qui entraînera une perte de la structure du sol, en s'échangeant avec des anions du complexe adsorbant ⁽⁶⁾ des argiles. Il s'ensuit une défloculation des argiles qui rendra la circulation de l'eau plus lente au sein du sol. Cela entraînera un risque d'asphyxie des racines dont les effets seront là encore une baisse de rendement des cultures. Une perte souvent définitive du périmètre irrigué est également à craindre suite à son imperméabilisation.

4 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C) = Résidu sec (mg/l) / (0,64 à 0,72)

5 pression osmotique : $P_o = 0,36 \times \text{CEe}$ ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)

6 Complexe adsorbant d'un sol = ensemble des colloïdes (composés humiques et argiles) dotés de charges négatives susceptibles de retenir les cations sous la forme échangeable, c'est à dire pouvant être remplacés par d'autres cations dans certaines conditions. Les ions de ce complexe sont en équilibre avec les solutions du sol par échange.

1.1.2 Paramètres clés des eaux d'irrigation :

- Ces paramètres de la solution du sol sont contrôlés par leurs homologues des eaux d'irrigation, soit : CE_{ir}, SAR_{ir}(7), Cl_{ir}.

- Différentes relations et tables, que l'on peut rencontrer dans la littérature spécialisée, ont été mises au point pour relier les paramètres de la solution du sol à ceux des eaux d'irrigation.

La figure 1 par exemple, présente la tolérance des cultures à la salinité et les chutes de rendement consécutives à une augmentation de la salinité des eaux d'irrigation et donc de la solution du sol.

- L'intérêt du calcul du SAR des eaux d'irrigation, après avoir été durant longtemps sujet à discussion, peut, d'après le dernier bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO n°29 revu (1985), suite aux évaluations menées par plusieurs chercheurs, être définitivement conseillé pour représenter le degré d'alkalisation des eaux d'irrigation et le risque qu'elles peuvent apporter quant à la baisse de perméabilité des sols qu'elles irrigueront. D'après cette même source, la notion de "SAR ajusté" restée longtemps en vigueur, devrait être abandonnée en raison de sa tendance à surestimer les rapports de sodium.

1.2 Notion de fraction lessivante

Pour s'affranchir des problèmes de salinité, toxicité, perméabilité qui peuvent résulter de l'utilisation d'eau de mauvaise qualité, il faut adopter quelques précautions comme : un drainage approprié au niveau du périmètre irrigué, et la prise en compte dans la dose d'irrigation d'une fraction de lessivage : FL pour l'élimination des sels. Son calcul se fait en fonction des seuils de productivité des cultures que l'on se fixe (on accepte en général 10% de baisse du rendement optimum) et des degrés tolérés des risques au niveau du sol.

On détermine, grâce aux différentes tables et abaques existantes, quelles sont les valeurs critiques à ne pas dépasser pour les paramètres clés de la solution du sol : (CE_e, Na/T, et Cl_e).

La connaissance des paramètres correspondants des eaux d'irrigation (CE_{ir}, SAR_{ir}, et Cl_{ir}), permet le calcul de la FL pour chaque contrainte. On retient la FL limitante, c'est à dire la plus grande.

A contrario, si en raison d'une faible disponibilité des ressources, on doit se fixer une FL donnée, on déterminera alors les seuils des paramètres clés des eaux d'irrigation à ne pas dépasser.

1.1.3 Conclusion

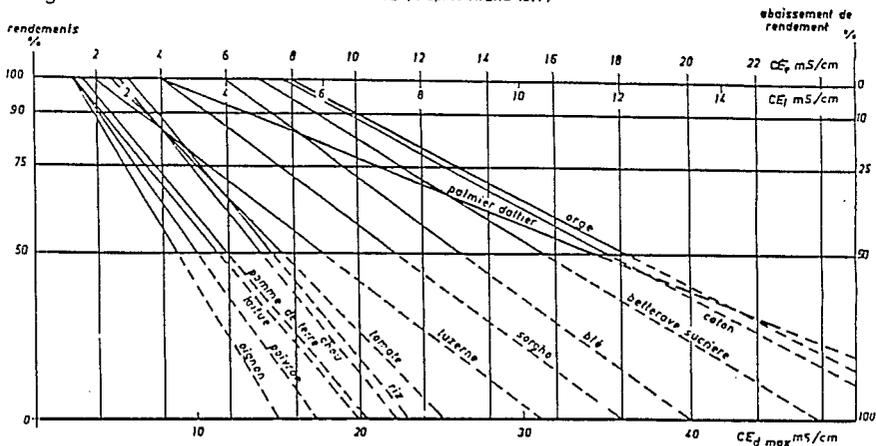
En irrigation on doit toujours tenir compte des caractéristiques de chaque terme du système "eau-sol-plante", qui sont étroitement liées, et dont la connaissance permettra le calcul de la dose de lessivage.

7 SAR = Na/((Ca+Mg)/2)^{0,5}

Sans entrer dans le détail de ce calcul, qui ne fait d'ailleurs pas l'objet de cet article, nous rappelons qu'il existe à cet effet, d'une part une méthode classique à base de formules et d'abaques établies empiriquement à partir d'expérimentations et d'autre part une méthode dite géochimique tenant compte des phénomènes physico-chimiques qui se réalisent à l'interface eau-sol.

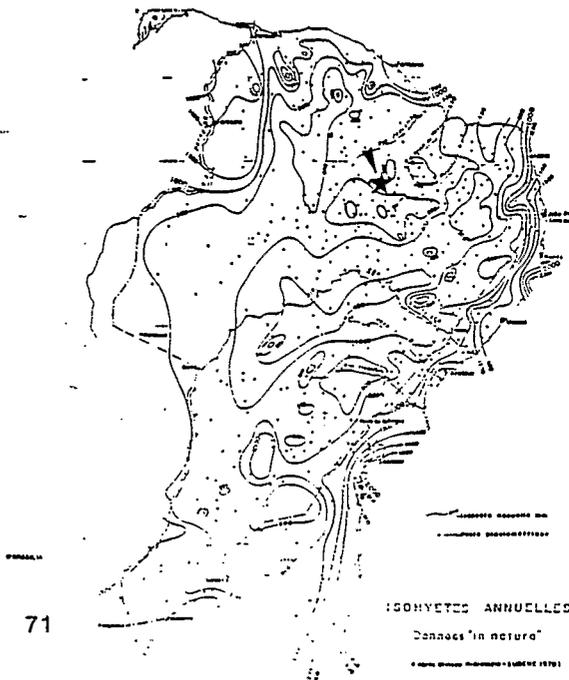
Ces deux approches nécessitent une bonne connaissance des caractéristiques des eaux d'irrigation, afin de calculer avec précision les doses de lessivage pour obtenir les meilleurs rendements culturaux tout en préservant les sols et en économisant l'eau.

Fig 1 - TOLÉRANCE DES CULTURES A LA SALINITÉ (d'après AYERS 1977)



- CEs = Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du sol
- CEi = Conductivité électrique de l'eau d'irrigation
- CEd = Conductivité électrique de l'eau de drainage à la base de la zone des racines

Fig 2 - Carte des isohyètes annuelles du Nordeste du Brésil et situation de l'açude Moquem (*)



II UTILISATION POUR L'IRRIGATION DES AÇUDES DU NORDESTE BRESILIEN SEMI-ARIDE

2.1 Présentation du climat nordestin et des açudes

* Le climat : L'intérieur du Nordeste brésilien appelé également "Sertao" a un climat qualifié de semi-aride en raison de sa faible pluviométrie annuelle (moyenne de 400 à 800 mm suivant les endroits), et de l'alternance d'une saison sèche et humide, avec un retour quasi périodique de sécheresses pluriannuelles tous les dix-treize ans. La principale caractéristique climatique reste sans aucun doute la très grande irrégularité des pluies tant en ce qui concerne leur répartition spatiale que leur distribution à l'échelle interannuelle et saisonnière. Ces pluies sont souvent très localisées, violentes et intenses.

L'évaporation très forte peut atteindre un centimètre par jour durant la saison sèche.

La région affectée par ce climat, couvre 950 000 km² et se situe entre les parallèles 3°S et 15°S et les méridiens 36°W et 44°W (Cf carte des isohyètes : fig.2).

* La géologie : plus de la moitié du Nordeste est constitué de roches cristallines (à dominance granitique) plus ou moins métamorphisées, du socle précambrien. Ces zones peu perméables favorisent l'écoulement de surface et sont donc propices à la construction de retenues collinaires. Le reste du Nordeste est composé de formations sédimentaires du phanérozoïque, plus perméables, souvent exploitées sur le plan hydrogéologique.

* Les açudes : pour résister aux sécheresses, l'homme a construit depuis le début du siècle des dizaines de milliers de retenues collinaires, en général sur les régions cristallines afin d'emmagasiner les eaux de ruissellement, pour l'alimentation du bétail et les besoins domestiques.

Ces réservoirs sont généralement sous utilisés et la majeure partie de l'eau stockée se perd par évaporation ce qui provoque des modifications hydrochimiques importantes de cette ressource.

Depuis quelques années, des programmes de développement rural visent à utiliser ces açudes pour favoriser l'irrigation. Il devenait alors urgent de connaître la qualité générale de ces eaux et leurs comportements hydrochimiques lors des saisons sèches pendant lesquelles ces ressources seront le plus sollicitées.

Les retenues concernées par cette étude, ont des volumes variant entre 10 000 et 1 000 000 m³ pour des profondeurs allant de 2 à 10 mètres. Ce sont ces types d'açudes que l'on rencontre d'ailleurs le plus fréquemment dans le Nordeste.

2.2 Caractéristiques physico-chimiques générales des eaux d'açudes

Sur une soixantaine d'açudes caractéristiques des diverses tailles, formes et degré de salinité existant dans la partie cristalline du Sertao, ont été effectuées des analyses physico-chimiques des eaux, avec suivant les cas, des fréquences mensuelles à semestrielles, du début 1987 à la mi 1990.

455 analyses représentatives des différents stades évaporatoires de ces açudes ont pu ainsi être réalisées.

2.2.1 Répartition des analyses et typologie

La plage des conductivités rencontrées s'étale entre 50 et 45 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.

L'histogramme de la figure 3 montre en fonction des différentes classes de conductivité du tableau de l'USSL⁽⁸⁾, qui est la méthode de classification des eaux d'irrigation la plus répandue, la répartition de cet échantillonnage.

Près de 80% des analyses appartiennent aux classes C1, C2, C3 et environ 20% aux autres classes, (C4, C5, C6). Quant aux SAR, le nombre d'analyses par classe est le suivant :

- pour S1 : 361 soit 79,16% des analyses;
- pour S2 : 53 soit 11,62%;
- pour S3 : 18 soit 3,95%;
- pour S4 : 24 soit 5,26%.

C'est la classe C2 des conductivités et la classe S1 pour les SAR qui sont les plus représentées. D'une manière générale, la classe C2S1 est caractéristique des eaux des açudes étudiés.

Nous avons délimité dans le tableau de l'USSL (fig 4) un faisceau dans lequel se situent tous nos échantillons. Les limites supérieure et inférieure correspondent aux valeurs extrêmes de la CE et du SAR pour chaque classe du tableau. La courbe centrale passe par les échantillons moyens de chaque classe.

Nous constatons donc, que les eaux des açudes situés sur terrains cristallins (tous açudes et toutes saisons confondus) sont marquées par un risque de salinisation plus important que le risque d'alcalisation. Ceci est confirmé par le fait que dans chaque case du diagramme USSL, la classe de conductivité est supérieure à celle du SAR. LEPRUN (1988) à fait la même observation à partir de l'étude statistique d'environ 350 analyses d'eau d'açudes.

⁸ USSL = United States Salinity Laboratory situé à Riverside (Utah)

Il s'agit là d'un point très positif pour l'irrigation, car les problèmes liés à l'alcalisation des sols sont bien plus graves et plus difficiles à éviter que ceux liés à la salinisation. La récupération de sols salés est par contre possible et relativement simple par lavage avec des eaux de bonne qualité, ce qui n'est pas le cas pour les sols sodiques.

Les eaux dont la conductivité dépasse $5\ 000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C étant absolument impropres à tout usage en irrigation, nous étudierons ici plus particulièrement les eaux de conductivités inférieures à cette limite, qui représentent près de 90% de l'échantillonnage total, soit 404 analyses.

2.2.2 Variations tridimensionnelles

Les transects verticaux et horizontaux (mesures de température, pH, conductivité électrique, analyses chimiques) effectués montrent que les eaux des aqüdes sont en général bien homogénéisées, sans présence de stratifications verticales (LARAQUE, 1988).

2.2.3 Hydrochimie générale

La composition chimique moyenne des eaux étudiées (tout aqüde ayant une CE $< 5\ 000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C , et toute saison confondue) visualisée sur le diagramme de STABLER (tab.1), enseigne que ces eaux sont très pauvres en sulfates et potassium et met en évidence leur faciès chloro bicarbonaté-mixte dominant.

2.2.4 Etats de saturation :

Une cinquantaine de mesures in situ du pH et de l'alcalinité, menée sur différents aqüdes à diverses époques de l'année ont permis de calculer la pression partielle en gaz carbonique dissous ($p\text{CO}_2$), et montrent que les eaux sont pratiquement toutes sursaturées en CO_2 dissous (fig.5).

La pression partielle en gaz carbonique dissous moyenne dans ces milieux est de $10^{-2,296}$, soit seize fois supérieure à la $p\text{CO}_2$ atmosphérique moyenne ($10^{-3,5}$), qu'ils devraient avoir s'il y avait équilibre.

Des constatations similaires, s'adressent à d'autres milieux lacustres tel le lac Tchad (CARMOUZE, 1976), le lac de Guiers au Sénégal (CARN, 1985), etc..., et pourraient s'expliquer par exemple par une activité biologique, qui dégagerait du gaz carbonique dans des eaux stagnantes.

La calcite peut présenter de légères sursaturations, son produit d'activité ionique pouvant être quatre fois supérieur à son produit de solubilité.

La figure 5 montre que les états de saturation des eaux par rapport à la $p\text{CO}_2$ sont indépendants de leur force ionique, celle-ci représentant les degrés de salinité des eaux. Par contre, l'état de saturation par rapport à la calcite a tendance à augmenter avec cette dernière. Il en est de même pour la magnésite et la dolomite.

Fig 3 - Répartition des échantillons étudiés dans les classes de conductivité de l'USSL.

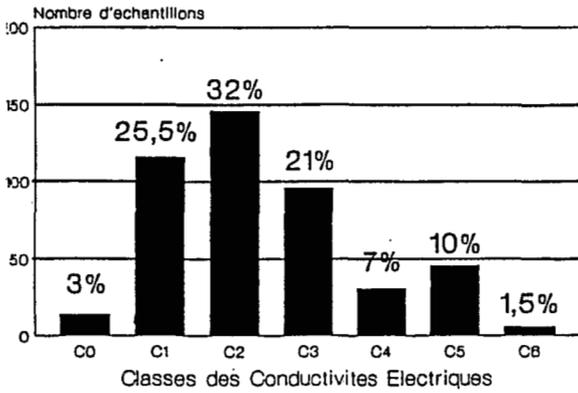


Fig 5 - Etats de saturation des eaux par rapport à la pCO2 et à la calcite.

Saturations / pCO2, et / calcite
 • IS pCO2
 • IS calcite

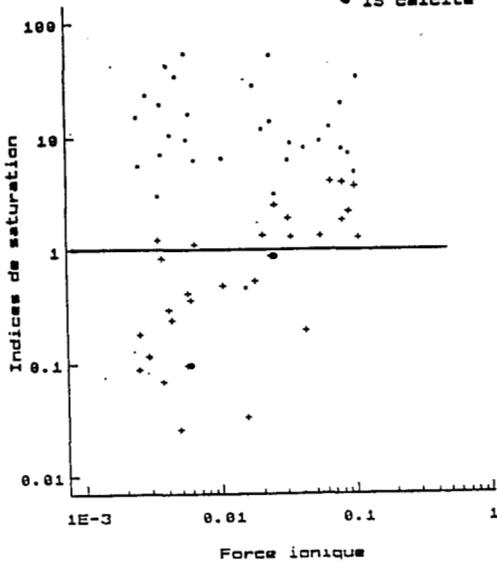
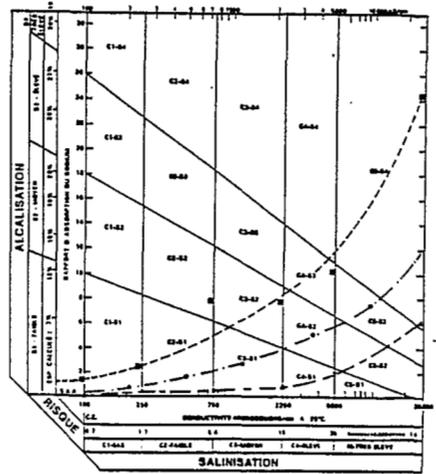


Fig 4 - Représentation des eaux étudiées dans le diagramme de l'USSL.



CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION (FAO/WHO - 1985)

tableau 1 - Composition moyenne des eaux des aqües étudiées suivant la méthode de STABLER (pour des conductivités allant de 50 à 5000 uS/cm à 25°C, soit 404 analyses)

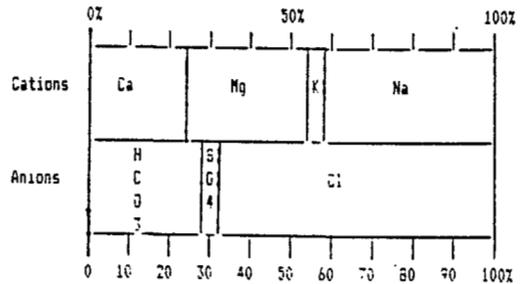


Fig 6 - Evolution moyenne des eaux des açudes en phase évaporatoire dans les diagrammes de PIPER.

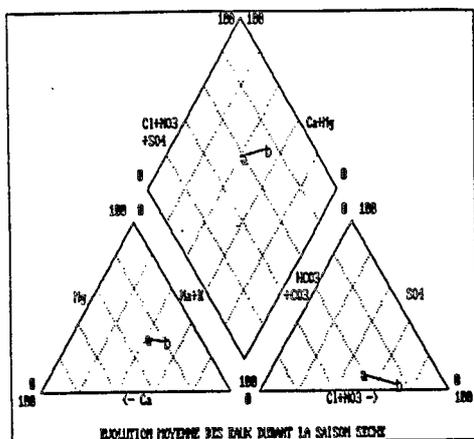


Fig 7 - Situation moyenne des eaux des açudes sur le diagramme de SCHOELLER en début et fin de saison sèche.

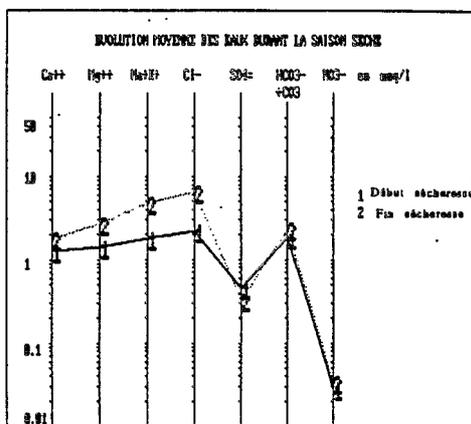


Tableau 2 - Classification des eaux étudiées en fonction des problèmes qu'elles peuvent apporter en irrigation

Critères d'interprétation et unités	Valeurs limites (1)	Intensité des problèmes	lot A nombre:	lot A %	lot B nombre:	lot B %	lot C nombre:	lot C %
Conductivité électrique (aS/cm à 25°C)	< 0,7	pas de problème	264	65,55	27	79,41	23	67,65
	0,7 à 3	problème croissant	121	30,02	6	17,65	7	20,60
	> 3,0	problème grave	18	4,47	1	2,94	4	11,75
Cl (meq/l)	< 4	pas de problème	274	68,00	26	76,47	23	67,65
	4 à 10	problème croissant	58	14,39	4	11,76	4	11,75
	> 10	problème grave	72	17,87	3	8,82	7	20,60
SAR	< 3	pas de problème	309	76,67	32	94,12	24	70,59
	3 à 9	problème croissant	94	23,32	2	5,88	8	23,53
	> 9	problème grave	0		0		2	5,88
HCO3 (meq/l) (2)	< 1,5	pas de problème	115	28,53	14	41,18	6	17,65
	1,5 à 8,5	problème croissant	288	71,46	20	58,82	28	82,35
	> 8,5	problème grave	0		0		0	
pH	6,5 à 8,3	pas de problème	385	95,53	37	100,00	26	76,47
	< 6,5 et > 8,4	problème	18	4,46	0		8	23,53

(1) = valeurs tirées de FAD n°29 (1976) et FAD n°29 revu (1985)

(2) = uniquement dans le cas d'irrigation par aspersion

remarques : lot A = totalité des 403 analyses dont la CE < 5 aS/cm à 25°C

lot B = données de 34 açudes en début de saison sèche

lot C = données de 34 açudes en fin de saison sèche

2.3 Conséquences de l'évaporation sur la qualité des eaux des açudes

Une étude précise a été menée sur 34 açudes durant le processus évaporatoire amorcé à la saison sèche, pour décrire les principales caractéristiques de leurs évolutions hydrochimiques.

On a reporté sur le diagramme de PIPER de la figure 6 l'évolution moyenne des eaux pendant la saison sèche. Celle-ci se dirige nettement vers la voie saline neutre, avec augmentation relative du chlore et des alcalins consécutive à une diminution simultanée des alcalino-terreux et des bicarbonates ne pouvant provenir que de précipitations carbonatées.

Le diagramme de SCHOELLER de la figure 7 montre que le chlore en valeur absolue, est l'élément qui se concentre le plus. Les autres éléments dissous étant soustraits de la solution par précipitations salines ou par des phénomènes d'adsorption avec les argiles des sédiments.

Des analyses aux rayons X des argiles des sédiments ont d'ailleurs mis en évidence la présence dominante de calcite.

2.4 Facteurs physico-chimiques limitants pour l'irrigation

Nous pouvons grâce aux données du tableau 2, classer par ordre d'importance les paramètres limitants en irrigation définis d'après les directives de la FAO (1976, 1985).

Les valeurs limites pour l'ion HCO_3 ne concernent que l'irrigation par aspersion. Dans ce dernier cas il constitue alors le facteur limitant le plus fréquemment rencontré.

Pour les autres types d'irrigation on a par ordre d'importance dégressif : Cl , CE > SAR > pH .

Ceci étant vrai tant en début qu'en fin de saison sèche, avec cependant dans ce dernier cas une augmentation nette du pourcentage des eaux présentant des problèmes de chlore.

La première colonne présentant la totalité de l'échantillonnage étudié (tous açudes et toutes saisons confondus) a la même ordonnance des facteurs limitants.

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux d'açudes entre début et fin de saison sèche (provenant de l'étude de 34 açudes)

	CE	SAR	classe	pH	Ca	Mg	Na	K	Cl	SD4	HCO3	NO3
	µS/cm		USSL		←----- meq/l -----→							
	à 25°C											
début saison												
sèche	416,60	1,15	C2S1	7,49	1,263	1,402	1,614	0,157	2,141	0,350	1,820	0,028
fin saison												
sèche	958,18	2,18	C3S1	7,31	2,425	3,225	4,374	0,390	6,765	0,600	2,967	0,033
facteur de												
concentration:	2,30	1,89			1,92	2,30	2,71	2,49	3,16	1,71	1,63	1,18

Le tableau 3 enseigne que pour un facteur de concentration moyen de 3,16 calculé à partir des concentrations en chlore de début et de fin de saison sèche, la conductivité électrique moyenne des eaux étudiées passe de la classe USSL C2 à C3 alors que le SAR reste dans la classe S1.

Il est donc surtout à craindre pour l'irrigation à partir des aqüdes, des problèmes de salinité et de toxicité dus au chlore, problèmes d'autant plus importants que la saison sèche est avancée.

D'après les constatations précédentes et l'ordre d'importance des facteurs de concentration ioniques (tab.3): $FN_{a} > FK > FMg > FCa$ et $FCI > FSO_{4} > FHCO_{3}$, nous pouvons considérer que l'évolution hydrochimique des eaux en phase évaporatoire est essentiellement contrôlée par la précipitation de la calcite.

2.5 Dynamique hydro-saline des aqüdes en saison sèche

La salinité des eaux d'aqüdes dépend à la fois de la quantité et de la qualité des flux d'entrée (pluies, ruissellements, apports souterrains) et de sorties (évaporation, infiltration, prélèvements divers).

Les quelques considérations théoriques suivantes nous aideront à mieux comprendre les comportements hydro-salins des aqüdes en saison sèche, où nous considérerons que les flux entrants sont négligeables par rapport aux flux sortants (fig.8). Nous décrirons ces derniers ainsi :

- les pertes par évaporation de charge ionique nulle.
- les pertes par infiltrations et prélèvements, de charge dissoute à tout moment identique à celle des eaux de la retenue. Plusieurs dynamiques peuvent avoir lieu :

.cas 1 :

Le réservoir n'est pas alimenté et subit uniquement des pertes par évaporation. Le volume diminue et la concentration saline augmente, la masse saline reste constante puisque l'exportation de sels par évaporation est négligeable.

En fonction de l'importance des pertes volumiques V_0-V_1 uniquement dues à l'évaporation, la concentration résultante des eaux variera entre les droites CC_0 et CC_1 , puisque la masse saline reste constante. C'est le cas de l'exportation hydrique, sans exportation saline.

.cas 2 :

Le réservoir perd de l'eau par infiltrations et prélèvements (pour l'irrigation, par exemple). Il en résulte une diminution proportionnelle du volume et de la masse saline, la concentration saline reste par conséquent identique. Les pertes par infiltrations et prélèvements peuvent être du point de vue qualitatif assimilées lorsque les eaux du réservoir sont bien homogénéisées, ce qui, nous le savons maintenant, est le cas de la grande majorité des petits et moyens aqüdes.

Il y a ici exportations hydrique et saline simultanées car les eaux soustraites sont de même charge ionique que celles de l'açude. La diminution de la masse saline ($M_0 - M_1$), consécutive à la perte de volume ($V_0 - V_1$) respectera toujours l'égalité : $V_0 \times M_0 = V_1 \times M_1$.

cas 3 :

Les pertes ont lieu par évaporation, infiltration, et prélèvements. La masse et le volume diminuent avec le temps, ainsi que la concentration.

C'est à ce dernier cas que nous avons à faire dans les conditions naturelles; chacune de ces pertes étant d'une importance variable en fonction bien sûr de l'évaporation régionale, de la géométrie de l'açude (qui impliquera un volume évaporé plus ou moins important par rapport au volume restant) et des caractéristiques du fond de l'açude et de construction de la digue qui joueront sur les quantités infiltrées. Il est évident que plus les volumes infiltrés et prélevés seront importants, plus l'augmentation des facteurs de concentrations salines sera atténuée.

Dans l'optique de notre travail, la saison sèche est la période sensible à suivre de très près. En effet, c'est pendant cette période que les besoins en eau se font sentir le plus crûment et que les risques de salinisation des açudes, surtout par évaporation, sont les plus exacerbés.

Ce schéma met en évidence l'intérêt d'une utilisation rapide des eaux des açudes à la fin de la saison des pluies pour éviter d'une part une perte de cette ressource par évaporation et d'autre part une salinisation de l'açude. Une telle gestion permettrait d'irriguer de plus grandes surfaces avec un meilleur rendement sans risque pour le périmètre irrigué.

Fig 8 - EVOLUTIONS DE LA CONCENTRATION SALINE D'UNE RETENUE EN SAISON SECHE

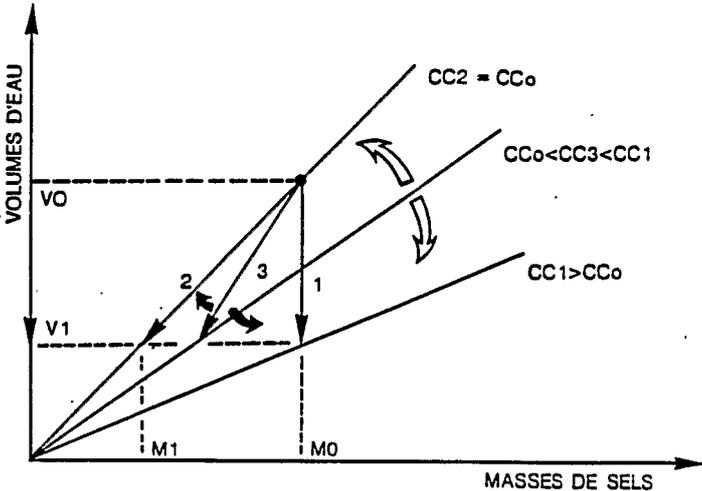
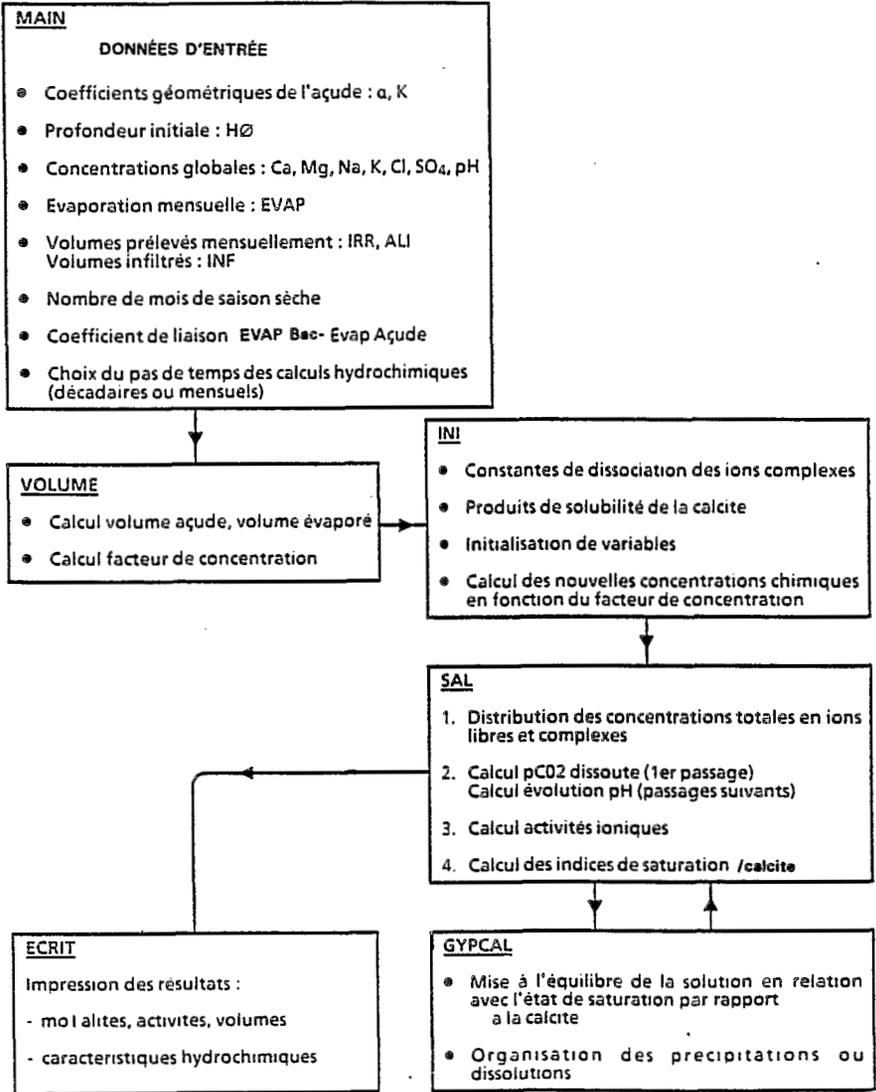


Fig 9 - ORGANIGRAMME SIMSAL simplifié



III SIMULATION DE L'EVOLUTION DANS LES AÇUDES EN PHASE EVAPORATOIRE, DES PARAMETRES LIMITANTS EN IRRIGATION

- Lorsque l'eau s'évapore, elle se concentre en sels, et à partir de certains facteurs de concentration dépendant de la composition chimique de la solution initiale, surviennent des précipitations salines. Les éléments dissous qui entrent dans leurs compositions seront donc soustraits à la solution. Les premiers sels formés sont en général les moins solubles et ceux qui ont leur indice de saturation les premiers atteints. C'est souvent le cas des alcalino-terreux qui consomment ainsi une partie des ions Ca et Mg dissous. Cela aura pour effet d'accroître d'autant plus les valeurs du SAR.

- L'évolution de la CE et du SAR ne sera par conséquent pas proportionnelle au facteur de concentration volumique dû à l'évaporation, comme le considère la méthode classique. Si l'on ne tient pas compte de ces précipitations, les doses de lessivage calculées à partir de la CE seront surestimées (conduisant à des gaspillages d'eau) et celles calculées à partir du SAR seront sous-estimées (ce qui pourra entraîner un risque d'alcalisation des sols).

- Ce chapitre présente une méthode permettant d'évaluer avec plus de précision l'évolution des trois principaux paramètres de classification des eaux d'irrigation, lorsque celles-ci sont en phase évaporatoire. Cela permettra de déterminer les différentes valeurs du facteur de concentration des eaux d'irrigation à ne pas dépasser pour pouvoir s'affranchir des trois grands préjudices menaçant les projets d'irrigation. Seule la méthode géochimique permet de se rapprocher de la réalité des faits.

3.1 Principes et présentation du modèle SIMSAL

Il s'agit d'un modèle déterministe permettant de simuler l'évolution de la conductivité électrique, du SAR et des concentrations en chlore des eaux des açudes en phase évaporatoire (LARAQUE, 1989).

Le programme (écrit en FORTRAN IV) à partir de ce modèle, tient sur une disquette pour micro-ordinateur, et est ainsi facilement "transportable".

Il est composé de trois sous-routines (voir l'organigramme simplifié de la figure 9) permettant le calcul de l'évolution hydro-saline des açudes.

3.1.1 Le module volumétrique :

La sous-routine "VOLUME" calcule quotidiennement l'évolution du volume d'un açude sous l'influence de l'évaporation et des pertes d'eau par infiltrations et prélèvements (irrigation, alimentation du bétail, etc,...).

On obtient avec une bonne précision le volume de l'açude (VA), grâce à la formule suivante : $VA = K \times H^\alpha$ (MOLLE, 1985), où H est le niveau de l'eau dans l'açude, et α et K sont des coefficients de forme et d'ouverture calculés à partir d'un relevé bathymétrique préliminaire.

Le facteur de concentration volumétrique FCvol est uniquement dû aux volumes évaporés (VEV), et l'on a $FCvol = VAD / (VAD - VEV)$ où VAD représente le volume initial de l'açude.

Lorsqu'il se produit des pertes par infiltrations ou prélèvements, nous avons vu (P.2.5) que l'accroissement des concentrations salines sera d'autant plus atténué que ces pertes seront importantes.

Il est tenu compte de ces deux types de pertes volumétriques pour le calcul du facteur de concentration de la solution, ce facteur étant uniquement dû à l'évaporation.

A des intervalles de temps décennaires ou mensuels, choisis par l'opérateur, la partie géochimique calcule l'évolution des caractéristiques hydrochimiques de l'eau.

3.1.2 Le module chimique :

Il est constitué de deux sous-routines : SAL et GYPCAL. Cette partie provient de l'association de deux programmes développés par RIEU (la sous-routine GYPCAL vient du programme SIMUL en FORTRAN IV (1983), et SAL correspond au programme ACTIVE, en GWBASIC (1988)), établis à partir des algorithmes de DUFÉY et al (1979) utilisés dans le sous-programme EQU SOL du programme SOPREC (en FORTRAN IV).

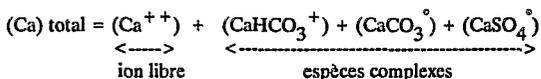
Ce module nécessite comme données d'entrée, les résultats globaux des dosages des ions principaux (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄) effectués sur un prélèvement d'eau, retiré à la fin de la saison des pluies. C'est à ce moment que le degré de remplissage de l'açude est le plus élevé et que les concentrations salines sont les plus faibles.

Le pH pris autant que possible in situ au moment de la collecte est également indispensable.

La sous-routine "SAL" distribue les concentrations ioniques totales données par le laboratoire d'analyses d'eau en ions simples et complexes et calcule leurs activités ioniques. Cela permettra de vérifier leurs états de saturation par rapport à différents sels dont notamment la calcite qui nous l'avons vu est le principal minéral à précipiter.

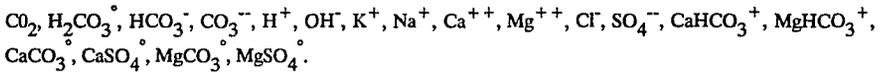
En effet, l'état de saturation par rapport à un sel se vérifie en comparant son produit de solubilité au produit des activités ioniques de ses composants pris à l'état libre (ou simple). Or, nous savons que les résultats des analyses de laboratoire donnent les concentrations totales de chaque espèce ionique, c'est à dire la somme de ses diverses formes : simple ou complexe.

Par exemple pour le calcium on a :



Comme le précise RIEU (1987), on ne cherche pas ici à obtenir une distribution exhaustive de toutes les espèces en solution, mais d'établir simplement et avec une bonne précision l'activité des principaux ions libres quelle contient.

A cette fin on cherche à déterminer la molalité et l'activité des 18 espèces suivantes :



On sait d'après les lois de la thermodynamique que l'activité et la molalité d'un ion ainsi que la force ionique de la solution peuvent être reliées par les trois formules suivantes :

$$\log \gamma_i = \frac{-A \times Z_i^2 \times \sqrt{I}}{1 + c_i \times B \times \sqrt{I}} \quad \text{loi de DEBYE-HUCKEL (1)}$$

$$a_i = \gamma_i \times m_i \quad (2)$$

$$I = 0,5 \times \sum m_i \times Z_i^2 \quad (3)$$

avec,

γ_i = coefficient d'activité de l'espèce i

Z_i = valence de l'ion i considéré

a_i = activité de " " "

m_i = molalité de " " "

c_i = coefficient tenant compte du diamètre de l'ion hydraté i et dépendant de la température

A, B = constantes dépendant de la température

I = force ionique

Les molalités " m_i " de toutes les espèces ne peuvent être déterminées qu'après le calcul de la distribution des espèces totales en ions simples et complexes (eq.2). Mais le calcul de cette distribution suppose connu les coefficients d'activité, qui dépendent de la force ionique de la solution (eq.1). Et cette dernière nécessite la connaissance de la distribution ionique (eq.3) !

Un tel problème peut alors se résoudre par itérations convergentes à partir d'une valeur initiale arbitraire de la force ionique. Un système d'incrémentations positives ou négatives portant sur les valeurs calculées devra vérifier les équilibres thermodynamiques suivants :

* *Equilibres de dissociation (A)*

$$[\text{H}_2\text{CO}_3^\circ] / \text{pCO}_2 = K_0 = 10^{-1.46}$$

HELGESON (1969)

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3] = 10^{-6.35} = K_1$$

Calculé à partir de HELGESON (1969) et de

LANGMUIR (1969)

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{CO}_3^{--}] / [\text{HCO}_3^-] = 10^{-10.32} = K_2$$

LANGMUIR (1969)

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = K_w = 10^{-14}$$

LATIMER (1952)

$$[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{CO}_3^{--}] / [\text{CaCO}_3^\circ] = 10^{-3.20} = K_4$$

HELGESON (1969)

$$[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] / [\text{CaSO}_4^\circ] = 10^{-2.31} = K_5$$

HELGESON (1969)

$$[\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{CaHCO}_3^+] = 10^{-1.27} = K_8$$

Calculé à partir de LANGMUIR (1969) et

BERNER (1971)

$$[\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{CO}_3^{--}] / [\text{MgCO}_3^\circ] = 10^{-3.40} = K_6$$

KHARAKA et BARNES (1973)

$$[\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{--}] / [\text{MgSO}_4^\circ] = 10^{-2.25} = K_7$$

HELGESON (1969)

$$[\text{Mg}^{++}] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{MgHCO}_3^+] = 10^{-0.9} = K_9$$

KHARAKA et BARNES (1973)

(les valeurs et références des constantes thermodynamiques proviennent de FRITZ, 1975).

* *Conservation de masse (B)*

$$K_t = K^+$$

$$\text{Na}_t = \text{Na}^+$$

$$\text{Cl}_t = \text{Cl}^-$$

$$\text{Ca}_t = \text{Ca}^{++} + \text{CaCO}_3^\circ + \text{CaSO}_4^\circ + \text{CaHCO}_3^+$$

$$\text{Mg}_t = \text{Mg}^{++} + \text{MgCO}_3^\circ + \text{MgSO}_4^\circ + \text{MgHCO}_3^+$$

$$\text{SO}_{4t} = \text{SO}_4^{--} + \text{CaSO}_4^\circ + \text{MgSO}_4^\circ$$

* *Electroneutralité (C)*

$$2x(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} \cdot \text{SO}_4^{--} \cdot \text{CO}_3^{--}) + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{H}^+ + \text{CaHCO}_3^+ + \text{MgHCO}_3^+ - \text{HCO}_3^- - \text{OH}^- - \text{Cl}^- = 0.$$

Le pH étant connu, on a à résoudre un système de 17 équations à 17 inconnus.

Aucune donnée initiale sur l'alcalinité n'étant introduite et la pCO₂ n'étant pas déterminée, les équilibres carbonatés (les trois premières équations de dissociation du groupe "A") ne peuvent être résolus.

Le calcul est initialisé avec une pCO₂ arbitraire (10⁻³). La méthode utilisée ici consiste à répéter le calcul de distribution par incrémentation successive de la pCO₂, en déterminant à chaque fois la charge électrique résiduelle (éq. C). Lorsque cette dernière devient inférieure à une valeur déterminée (par ex. 10⁻⁵ équiv./litre), le calcul est interrompu.

. La subroutine "GYPCAL" provoque les précipitations ou dissolutions nécessaires en fonction de l'état de saturation par rapport à la calcite, afin d'équilibrer la phase liquide et la phase solide, tout en respectant les équilibres thermodynamiques modifiés par ces opérations. En effet, à chacune de ces opérations, une interaction permanente avec la subroutine "SAL" permet le calcul de la redistribution ionique afin de respecter les équilibres de dissociation.

Les équations de conservation des masses et celle de l'équilibre de l'électroneutralité sont constamment vérifiées à la fin des calculs. L'exactitude de ce contrôle est une garantie de leur bon déroulement.

- Calcul de la conductivité électrique de la solution :

Celle-ci est déduite de sa force ionique grâce à la régression suivante :

$$CE \text{ (mS/cm à } 25^{\circ}\text{C)} = 76,92 \times I - 0,011 ; r = 0,986 ,$$

obtenue à partir de l'étude de près de 400 analyses d'eau d'açudes provenant du Nordeste brésilien semi-aride en zones cristallines.

3.1.3 Hypothèses initiales et considérations diverses

. La relation (1) de DEBYE-HUCKEL permet de calculer des coefficients d'activité avec une précision convenable pour des solutions dont la force ionique ne dépasse pas 0,1.

. Pour des forces ioniques < 0,1, on admet que les ions Na, K, Cl, restent sous la forme simple : $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Cl}^-$.

. On néglige les paires d'ions formés avec OH^- .

. On considère que la prise en compte des paires d'ions principales : $\text{H}_2\text{CO}_3^{\circ}$, CaHCO_3^+ , MgHCO_3^+ , CaCO_3° , MgCO_3° , CaSO_4° , MgSO_4° , implique une correction suffisante sur les concentrations totales de Ca, Mg, SO_4 , HCO_3 et CO_3 pour déterminer avec une bonne précision les concentrations des ions libres correspondants. On fait l'approximation que les paires d'ions non chargées ont un coefficient d'activité égal à 1 et que les paires d'ions monovalentes ont un coefficient d'activité sensiblement égal à celui de HCO_3^- (HELGESON, 1969).

. Les activités des espèces neutres sont assimilées à leurs concentrations.

. Dans nos cas d'étude ce modèle ne tient pas compte de l'équilibre avec une phase solide initiale, puisqu'en fin de saison des pluies les eaux sont diluées et les stocks salins supposés dissous sont donc nuls au départ des simulations. Seules des précipitations pourront être provoquées pour conserver la solution à l'état d'équilibre, lorsqu'elle se concentrera.

- La question de la pCO₂ :

Les calculs de la pCO₂ dissoute effectués sur plusieurs açudes, à partir de mesures in situ du pH et de l'alcalinité, ont montré la sursaturation de ces milieux.

Par rapport à un équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse (l'atmosphère), cette sursaturation a tendance à diminuer le pH et l'activité de CO₃. En conséquence, les indices de saturation des espèces carbonatées seront atteints plus tardivement et les précipitations carbonatées se réaliseront pour des facteurs de concentration plus élevés.

Les études de terrains révèlent que la pCO₂ fluctue légèrement dans le temps. Ces variations peuvent dépendre de nombreux facteurs (action organique, brassage des eaux par le vent, température, insolation, etc...). Dans l'impossibilité de quantifier ces facteurs pour pouvoir prédire les fluctuations de la pCO₂, on calcule celle-ci à partir du pH mesuré in situ de la première analyse d'eau (début saison sèche), puis on la considère comme stable durant le reste du processus évaporatoire. Seul le pH sera alors modifié par la suite. Cette approximation est tout de même préférable à celle considérant la pCO₂ des eaux de surface en équilibre systématique avec l'atmosphère.

3.2 Etude d'un exemple : l'açude Moquem

3.2.1 Présentation :

Cet açude fait partie du bassin hydrologique de Taua suivi par la SUDENE à proximité de la localité du même nom dans l'Etat du Ceara (représenté par une étoile sur la figure 2). Son volume maximum avoisine un million de m³ pour une profondeur de 10,6 mètres. Lors de la période d'étude (saison sèche 1987), son volume maximum atteint en fin de saison des pluies était de 443 000 m³ pour une profondeur de 8,5 mètres. Cette retenue n'est pas utilisée par l'homme et ses infiltrations sont considérées comme négligeables par rapport au volume qu'elle contient. Les seules pertes d'eau durant la saison sèche proviennent ainsi uniquement de l'évaporation.

La saison sèche de l'année hydrologique 1987-88 a duré dix mois, commençant le 10 avril 1987 pour s'achever le 14 février 1988.

Le tableau 4 montre les données du poste météorologique de Taua (équipé d'un bac "A" du Weather bureau) relatives à cette saison sèche.

Tableau 4 - Evaporations (EVAP) et pluies enregistrées au poste de Taua durant la saison sèche 1987-88.

Mois	AVR	Mai	JUI	JUIL	AGU	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV**	TOTAL
EVAP	130	245	215	211	245	228	283	273	250	255	91	2426 mm
PLUIES	30,2	16,4	47,5	0,6	0	0	0	0	0	7	0	111 mm

note : * = à partir du 10 du mois ** = jusqu'au 14 du mois

3.2.2 Evolution hydrochimique durant la saison sèche :

Le tableau 5 montre l'évolution hydrochimique de l'açude pendant cette période et le tableau 6 présente le résultat de la simulation de l'évaporation sur les caractéristiques hydrochimiques.

Le tableau 7 enfin, résume la bonne correspondance entre la conductivité électrique et le SAR calculés d'après les observations et ceux obtenus par simulation, entre le début et la fin de la saison sèche.

C'est donc la conductivité électrique et la concentration en chlore qui seront les paramètres à prendre en compte pour le calcul des doses de lessivage. En effet leurs valeurs respectives en fin de saison sèche (770 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C et 3,7 meq/l) sont proches des limites (Cf tab 2) définies par la FAO (1985) à partir desquelles des problèmes de salinité et toxicité peuvent se faire sentir.

Mais nous ne devons pas oublier que le jugement final que l'on peut apporter à une eau d'irrigation doit prendre en compte les caractéristiques des plantes cultivées comme celles des sols qui seront irrigués.

3.2.3 Comparaison des résultats des simulations et de ceux obtenus par la méthode classique :

. La méthode classique consiste à multiplier purement et simplement la conductivité et le SAR de début de saison sèche (au moment où les eaux sont les plus diluées) par les facteurs de concentration de la solution dus à l'évaporation.

Les figures 10 et 11 montrent que pour l'açude étudié, la méthode classique surestime la salinisation de l'eau de 25% pour un facteur de concentration de 2,90 et donne une conductivité de l'eau pour la fin de la saison sèche égale à 963 au lieu de 769 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C, ce qui peut inciter à surestimer les doses de lessivage.

Cependant cette même méthode sous-estime le SAR de l'eau de 12%, et prévoit 1,6 au lieu de 1,82, ce qui tend à sous estimer les problèmes d'alcalisation et ainsi les doses de lessivage.

. Les prévisions de la méthode géochimique tenant compte des phénomènes de précipitation saline sont plus proches de la réalité observée, que celles de la méthode classique. Cela permet de calculer avec une meilleure adéquation les doses de lessivage et donc celles d'irrigation nécessaires pour conserver un bon rendement des cultures tout en préservant les sols irrigués et en économisant l'eau.

Tableau 5 - Caractéristiques physico-chimiques de l'acide Moquea durant la saison sèche 1987-88.

DATE	volume x1000 m ³ /us à 25C	C.E	S.A.R	pH	Alcali -nité	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	Résidu sec	FCCI
								(en mg/l)					(%)
09/04/87	443.09	333.33	0.94	7.40	2.25	22.40	14.60	23.40	7.20	45.00	0.01	242	1
15/05/87	414.29	364.26	1.01	7.80	2.16	22.40	17.01	26.00	8.00	60.00	0.10	255	1.33
15/06/87	376.06	397.14	1.14	7.70	2.24	25.20	14.60	29.20	6.00	51.50	6.21	276	1.14
15/07/87	352.49	405.71	0.95	6.24	2.48	24.40	19.92	26.00	6.30	56.00	5.82	264	1.24
16/08/87	311.19	436.57	1.25	7.19	2.48	27.20	16.52	33.40	6.50	61.00	6.98	307	1.35
15/09/87	279.13	530.00	1.38	8.00	2.56	30.40	16.50	38.00	9.20	68.00	6.69	371	1.51
13/12/87	182.71	595.71	1.60	8.61	3.47	36.80	24.30	51.00	12.75	100.00	4.50	417	2.22
17/01/88	154.76	675.71	1.76	8.56	4.06	36.40	26.24	57.00	14.20	115.00	4.50	473	2.55
14/02/88	139.92	769.23	1.82	8.45	3.84	36.00	33.04	63.00	14.30	130.00	5.80	484	2.89

Tableau 6 - Simulation par le modèle SIMSAL de l'évolution hydro-chimique de l'acide Moquea durant la saison sèche 1987-88.

DATE	Volume x1000 m ³ /us à 25C	C.E	S.A.R	pH	Alcali -nité	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	Résidu sec	FCCI
								(en mg/l)					(%)
09/04/87	443.09	330.00	0.96	7.40	2.19	22.40	14.60	23.40	7.20	45.00	0.01	261	1
18/05/87	398.47	367.00	1.01	7.44	2.43	24.91	16.23	26.02	8.00	30.04	0.11	289	1.11
17/06/87	364.65	401.00	1.06	7.48	2.65	27.22	17.74	28.43	6.75	54.68	0.12	314	1.21
15/07/87	335.20	436.00	1.10	7.51	2.88	29.61	19.30	30.93	9.52	59.48	0.13	341	1.32
16/08/87	306.14	477.00	1.16	7.55	3.14	32.42	21.13	33.97	10.42	65.13	0.14	372	1.45
15/09/87	277.53	526.00	1.22	7.59	3.45	35.76	23.31	37.36	11.49	71.84	0.16	409	1.60
14/12/87	195.68	654.00	1.59	7.65	4.03	33.01	33.06	52.99	16.30	101.90	0.23	504	2.26
13/01/88	174.28	713.00	1.73	7.68	4.31	32.82	37.12	59.49	18.30	114.41	0.25	547	2.54
12/02/88	152.79	764.00	1.93	7.70	4.47	28.10	42.34	67.86	20.88	130.50	0.29	584	2.89

Tableau 7 - Comparaison des principales caractéristiques physico-chimiques pour l'irrigation mesurées au laboratoire avec celles de la simulation par SIMSAL et de la méthode classique entre le début et la fin de la saison sèche 1987-88 pour l'acide Moquea.

	ANALYSES DE LABORATOIRE		SIMULATIONS (SIMSAL)		Méthode CLASSIQUE	
facteurs de concentration (%)	1	→ 2,89	1	→ 2,89	1	→ 2,89
Conductivité électrique (uS à 25°C)	333	→ 769	330	→ 764	333	→ 963
S.A.R	0,94	→ 1,82	0,96	→ 1,93	0,94	→ 1,60
Résidu sec (mg/l)	242	→ 484	261	→ 473	242	→ 699,38
Na (mg/l)	23,4	→ 63	23,4	→ 67,86	23,4	→ 67,63
Cl (mg/l)	45	→ 130	45	→ 130,50	45	→ 130,05

(%) FCCI = facteur de concentration basé sur le chlore

3.3 Critique du modèle SIMSAL

Ce modèle se limite à l'étude des solutions aqueuses dont les forces ioniques ne dépassent pas 0,1, ce qui correspond à des conductivités électriques inférieures à 8 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C.

De toute façon des eaux aussi chargées sont totalement impropres à tout usage en irrigation (classe C5 du diagramme de l'USSL). L'étude de leurs évolutions hydrochimiques en phase évaporatoire n'entre pas dans le contexte de ce travail orienté sur celle d'eaux initialement propices à l'irrigation.

Les imprécisions du modèle sont liées :

- pour la partie volumétrique :

. à la qualité de la bathymétrie de l'açude de laquelle dépend le calcul des coefficients géométriques α et k , qui permettent d'obtenir les volumes de l'açude en fonction de ses niveaux d'eau lus sur une échelle limnimétrique.

. à l'existence proche d'un bac évaporatoire suivi pendant de nombreuses années pour obtenir une série d'évaporations mensuelles moyennes la plus précise possible.

. à l'approximation apportée pour chaque açude par le coefficient moyen de liaison entre l'évaporation du bac "A" et l'évaporation des açudes.

. à la connaissance plus ou moins précise des volumes d'eau retirés par l'homme (irrigation, etc...).

. aux incertitudes quant aux volumes infiltrés.

La précision de toutes ces données conditionnera l'exactitude du calcul du facteur de concentration durant la saison sèche.

- pour la partie chimique :

. au fait de ne pas prendre en compte d'éventuelles variations de la pCO_2 dissoute. On considère qu'elle reste fixe durant tout le processus évaporatoire.

. au maintien de l'équilibre de la solution uniquement par rapport à la calcite. Cependant d'autres sels, notamment de magnésium (calcite magnésienne, magnésite, dolomite, ...) doivent également précipiter.

Cela explique que, dans le contexte de l'exemple précédemment traité, les teneurs en magnésium obtenues par simulation soient plus élevées que celles observées. En ne considérant pas les précipitations magnésiennes, le modèle a tendance à donner plus de poids aux précipitations de la calcite (les teneurs en Ca simulées baissent plus rapidement que celles observées (tab 5 et 6).

Cependant, l'excès de précipitation de calcite compense en partie le manque de précipitations magnésiennes, et permet l'obtention d'un SAR plus proche de la réalité observée.

. au choix des constantes thermodynamiques : leurs valeurs varient quelque peu d'un auteur à l'autre.

. au choix d'une température stable de 25°C pour les eaux de l'açude et par conséquent pour les constantes thermodynamiques basées sur cette température (la température des açudes varie surtout entre le jour et la nuit entre 22 et 32°C).

. à l'absence de prise en compte de la cinétique chimique, qui peut provoquer des états de sursaturation par rapport à un minéral sans qu'il y ait obligatoirement précipitation de ce sel.

. à la méconnaissance des interactions chimiques à l'interface "eau - sédiment" (adsorption ou désorption d'ions par les argiles des sédiments).

Figure 10 - CE observée et prévue par la méthode classique et par SIMSAL

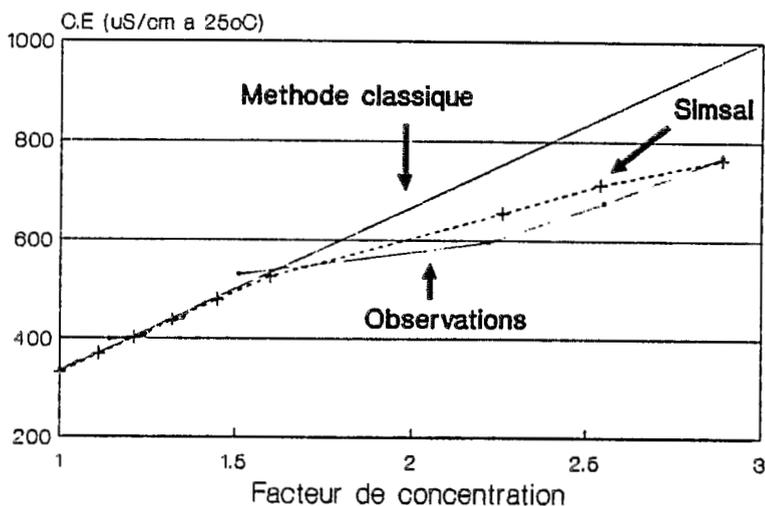
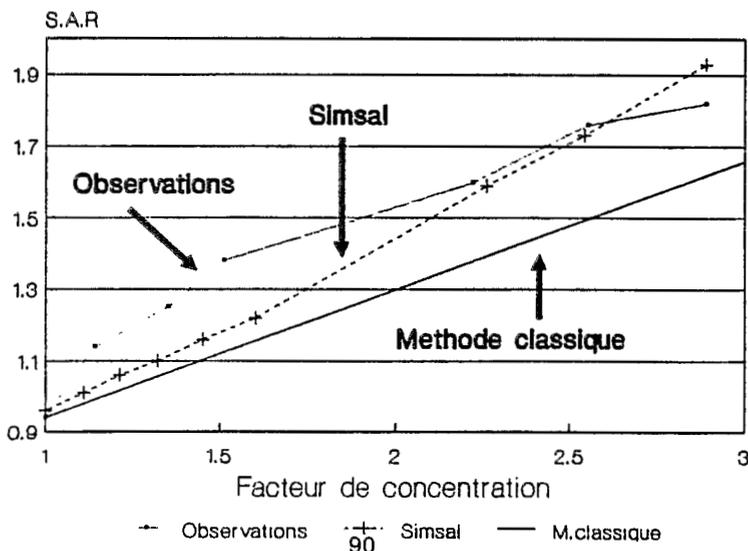


Figure 11. SAR observé et prévu par la méthode classique et par SIMSAL



3.4 Application du modèle SIMSAL à la gestion d'un açude pour l'irrigation

Nous illustrons ici à l'aide du modèle SIMSAL l'influence de l'irrigation sur la qualité des eaux d'açudes et en particulier sur le comportement des paramètres limitants pour l'irrigation (CE, SAR, Cl).

En faisant tourner le modèle toujours sur le même açude avec des doses d'irrigation mensuelles de 0, 5, 10, 20 et 50 000 m³/mois, durant toute la saison sèche, nous mettons en évidence, comme il a été déjà mentionné dans le paragraphe 2.5, l'intérêt d'utiliser l'eau pour éviter à la fois d'importantes pertes volumétriques uniquement par évaporation et une salinisation de l'açude (Cf les graphiques 12(a,b,c,d)).

Pour un même volume restant dans l'açude les courbes "12a" montrent que les facteurs de concentration sont d'autant plus petits que les volumes d'irrigation sont élevés, ce qui a pour effet de diminuer la reprise par évaporation.

- exemple : pour 150 000 m³ restant dans l'açude la concentration des eaux aura varié du simple au double (de 2,8 à 1,3) pour des volumes d'irrigation allant de 0 à 50 000 m³ par mois.

En fait, les eaux de cet açude ne présentent pas de véritables problèmes de qualité pour l'irrigation et le calcul de doses de lessivage est ici inutile. Celui-ci est d'ailleurs largement assuré par les pertes d'eau dues à l'efficacité de l'irrigation (on considère en général que cette dernière est de 50%). Aussi nous chercherons plutôt à titre d'exemple à définir en fonction des différentes politiques d'irrigation présentées, qu'elle sera celle souhaitable pour irriguer en continu durant toute la saison sèche, sans dépasser pour le principal facteur limitant (en l'occurrence, la conductivité électrique) sa première valeur seuil, soit 700 µS/cm à 25°C. Cela permettra de conserver un rendement cultural optimum de 100 à 90% (Cf fig.1).

D'après les résultats du tableau 8 et les courbes 12b, c'est en fonction de l'utilisation de 44, 88 et 156 000 m³, correspondant respectivement aux politiques d'irrigation de 5, 10, 20 000 m³/mois, que ce premier seuil sera atteint.

Sans utilisation d'eau, ce seuil est atteint alors que l'açude contient encore 180 000 m³, suite à la perte par évaporation de 262 000 m³ d'eau n'ayant servi à rien.

Pour une irrigation de 50 000 m³/mois, l'açude se serait vidé au bout de six mois avant la fin de la saison sèche, sans atteindre le seuil des 700 µS/cm à 25°C.

Il est donc conseillé d'irriguer avec 20 000 m³/mois pour traverser l'intégralité de cette longue saison sèche (10 mois) en conservant un rendement optimum à la production agricole et en évitant une salinisation de l'açude. Il restera à la fin de la saison sèche (mi février 1988) environ 20 000 m³ dans l'açude avec une conductivité électrique de 850 µS/cm à 25°C.

Les graphiques 12c et 12d montrent que les premières valeurs seuils des autres facteurs limitants (SAR, Cl) sont à peine dépassées.

SIMSAL permet donc de mieux gérer une retenue en fournissant aux agronomes à tout moment de la saison sèche les volumes d'eau disponibles et leur qualité en fonction de l'ampleur des prélèvements et des taux d'évaporation régionaux, des caractéristiques géométriques des retenues et du faciès initial des eaux au début de cette saison.

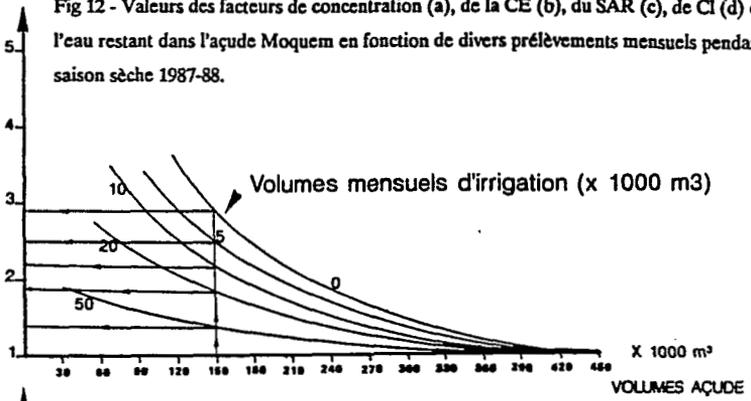
L'utilisation de ce modèle se justifie surtout pour des eaux initiales à la limite avec les eaux dites "à problèmes" définies par la FAO (CE = 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C, SAR = 3, Cl = 4 meq/l).

Tableau B - Valeurs des facteurs de concentration, des volumes restant dans l'acide mouée et évaporés en fonction de divers prélèvements mensuels durant la saison sèche 1987-88.

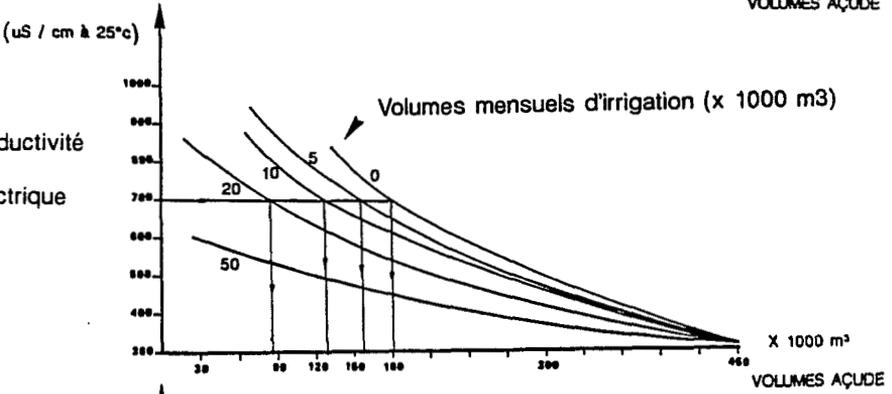
DATE	NJ	FC	VA			FC					
			VA	VEVc	VIRc	VA	VEVc	VIRc			
(VIR _m = 0 m ³)						(VIR _m = 10 000 m ³)					
9 4 87	1	1.000	443089.7	.0	.0	1.000	443089.7	.0	.0		
8 5 87	30	1.079	410827.9	32261.7	.0	1.079	401514.1	31986.8	9591.4		
7 6 87	60	1.181	375194.1	67895.5	.0	1.182	357062.1	66699.8	15333.3		
7 7 87	90	1.286	344558.7	98530.9	.0	1.289	317915.6	95914.3	29268.8		
6 8 87	120	1.401	316324.5	126765.1	.0	1.407	281966.5	122189.6	38946.3		
5 9 87	150	1.546	286643.2	156446.5	.0	1.559	245367.2	149072.8	48666.7		
5 10 87	180	1.709	259266.6	183823.0	.0	1.732	211429.7	173058.8	58623.7		
4 11 87	210	1.929	229755.5	213334.1	.0	1.969	176843.4	197941.3	68333.4		
4 12 87	240	2.181	203165.2	239924.4	.0	2.249	145501.8	219322.9	78301.2		
3 1 88	270	2.445	181239.1	261850.5	.0	2.551	119195.9	235960.0	87978.6		
2 2 88	300	2.770	159941.0	283148.9	.0	2.939	94432.4	251022.5	97690.5		
4 3 88	330	3.211	138008.3	305081.5	.0	3.493	69740.2	265121.1	108301.0		
(VIR _m = 5 000 m ³)						(VIR _m = 20 000 m ³)					
9 4 87	1	1.000	443089.7	.0	.0	1.000	443089.7	.0	.0		
8 5 87	30	1.079	406170.1	32124.3	4795.7	1.079	392207.4	31711.0	19182.8		
7 6 87	60	1.182	366125.2	67298.9	9666.7	1.184	338952.9	65495.1	38666.7		
7 7 87	90	1.288	331231.2	97226.1	14634.4	1.293	291326.6	93265.8	58537.7		
6 8 87	120	1.404	299133.2	124486.6	19473.1	1.415	247720.7	117534.0	77892.6		
5 9 87	150	1.552	265980.5	152779.9	24333.4	1.574	204311.6	141522.9	97333.5		
5 10 87	180	1.720	235304.5	178478.6	29311.9	1.759	163986.0	161960.9	117247.4		
4 11 87	210	1.948	203224.4	205705.3	34166.7	2.021	124624.2	181935.6	136666.8		
4 12 87	240	2.213	174214.7	229732.8	39150.6	2.344	88971.8	197698.8	156602.4		
3 1 88	270	2.493	150044.0	249066.6	43989.3	2.716	58883.3	208495.5	175957.1		
2 2 88	300	2.845	126934.6	267322.0	48845.2	3.246	31619.2	216441.3	195380.9		
4 3 88	330	3.332	103500.1	285454.3	54150.5	4.226	6141.2	221048.1	218602.0		
Légende :						DATE NJ (VIR _m = 50 000 m ³)					
NJ = durée en jours						9 4 87	1	1.000	443089.7	.0	.0
FC = facteur de concentration du à l'évaporation						8 5 87	30	1.080	364327.0	30877.8	47957.0
VA = volumes de l'acide						7 6 87	60	1.188	284765.0	61820.5	96666.7
VEVc = volumes évaporés cumulés						7 7 87	90	1.305	211936.0	85094.8	146344.1
VIRc = volumes d'irrigation cumulés						6 8 87	120	1.443	145837.9	102967.9	194731.3
VIR _m = volumes d'irrigation mensuels (les volumes sont exprimés en m ³)						5 9 87	150	1.640	83023.7	117439.4	243333.5
						5 10 87	180	1.919	25741.1	125549.4	293118.4

Fig 12 - Valeurs des facteurs de concentration (a), de la CE (b), du SAR (c), de Cl (d) dans l'eau restant dans l'aqûde Moquem en fonction de divers prélèvements mensuels pendant la saison sèche 1987-88.

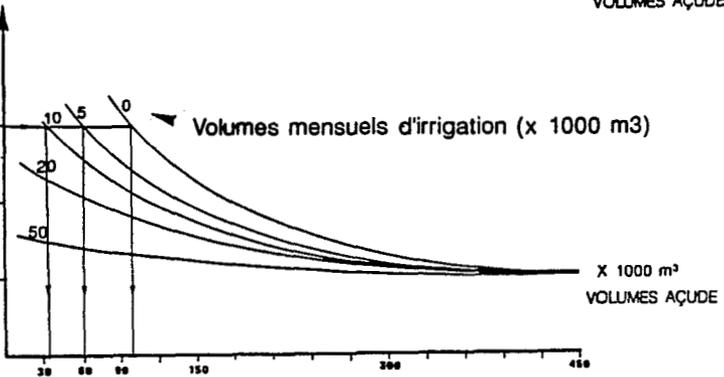
a) Facteur de concentration



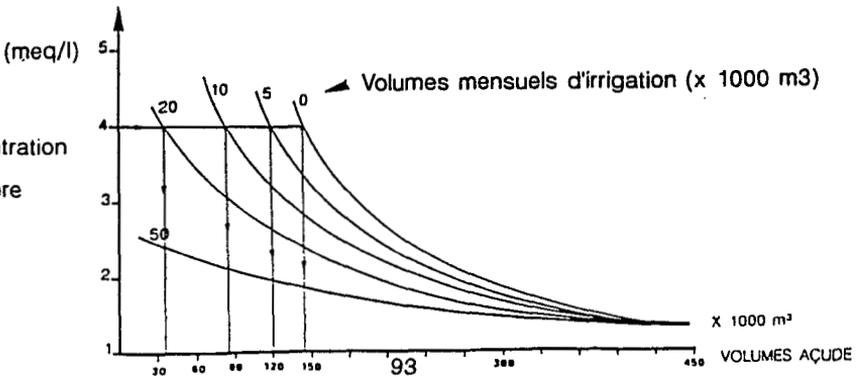
b) Conductivité électrique



c) SAR



d) Concentration en chlore



CONCLUSIONS

La qualité des eaux des açudes évolue durant la saison sèche sous l'influence de l'évaporation, principalement en régions semi-arides, où celle-ci est particulièrement forte.

Cet article a permis d'identifier les principales caractéristiques hydrochimiques des açudes et leurs évolutions durant la saison sèche.

Nous avons ainsi mis en évidence que ces eaux toujours sursaturées en gaz carbonique dissous et aux faciès moyens "chloro bicarbonaté - mixte" évoluent vers la voie saline neutre en phase évaporatoire et que les facteurs limitants à prendre en considération pour l'irrigation sont les risques de salinité et de toxicité, ce dernier étant essentiellement dû au chlore; le SAR quant à lui, atteint rarement des valeurs préoccupantes.

La méthode traditionnelle de prévision de l'évolution de la salinité des eaux en phase évaporatoire surestime les concentrations ioniques et par conséquent les doses de lessivage. Cela implique un gaspillage des ressources hydriques d'autant plus mal venu qu'il s'agit de régions où l'eau est rare.

C'est le contraire pour le SAR qui en général est sous-estimé.

Une meilleure précision dans l'évaluation de l'évolution de ces deux paramètres indispensables pour la classification des eaux d'irrigation, peut s'obtenir uniquement par la méthode géochimique qui tient compte de l'état de saturation des eaux par rapport à différents sels et provoque leurs précipitations, à partir d'un certain facteur de concentration dépendant du type d'eau initial, pour conserver à la solution son état d'équilibre.

Malgré de nombreuses hypothèses simplificatrices et des facteurs divers d'imprécisions, l'emploi de modèles géochimiques simples comme le modèle SIMSAL qui fournit des simulations convenables, car adapté aux particularités hydrochimiques des milieux étudiés, est à préconiser pour améliorer la gestion des eaux d'açudes pour l'irrigation et pouvoir prévoir avec plus d'exactitude les rendements cultureaux.

L'utilisation des eaux dès le début de la saison sèche est à préconiser pour éviter des pertes importantes par évaporation et une salinisation excessive de l'açude.

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

- CARMOUZE J.P., 1976. "La régulation hydrogéochimique du Lac Tchad". Travaux et documents de l'ORSTOM n°58. Paris. 418 p.
- CARN M., 1985. "Etude expérimentale de l'évolution chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) concentrées par évaporation". Mémoire DEA, Université de Dakar. 79 p.
- DUFFEY J.E., PETIT C.M., GOBLET Y. et all., 1979. "Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau électrolyte". Annales Agronomiques, 30 (1). Université de Louvain, Belgique. p. 53-62.
- FAO, 1976 (June). "La qualité de l'eau en agriculture". Bull. Irrigation et Drainage n°29. Rome. 81p.
- FAO, 1985. "Water quality for agriculture". Bull. Irrigation and Drainage paper n°29 rev 1. Rome. 173p.
- FRITZ B., 1975. "Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations des eaux continentales". Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mémoire Sci. Géol., 41, 152 p.
- GARRELS R.M., CHRIST G.L., 1968. "Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses". Ed. Gauthiers Villars. Paris. 335 p.
- HELGESON H.C., 1969. "Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. American Journal of Science, vol. 267, Department of Geology, Northwestern University, Evanston, Illinois 60201, USA. p. 720-801.
- LARAQUE A., 1988 (sept.). "Evolutions hydrochimiques de retenues collinaires dans le Nordeste semi-aride du Brésil". Colloques et Séminaires de l'ORSTOM, Quatrième Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier 14-15 septembre 1988. p. 47-79.
- LARAQUE A., 1989 (nov.). SIMSAL : "Um modelo de previsao da salinização dos açudes do Nordeste brasileiro". Anais do VIII Simposio Brasileiro de Recursos Hidricos, Foz do Iguaçu PR. Recife, Brésil. 13 p.
- LEPRUN J.C., 1988. "Manejo e conservação de solos do Nordeste brasileiro. Primeira avaliação da qualidade das águas superficiais no Nordeste". Convênio SUDENE/ORSTOM, SUDENE/DPG/PRN/HME. Recife, Brésil. p. 88-144.
- MOLLE F., 1985. "Potentialités des Açudes du Nordeste brésilien pour un usage en irrigation". Mémoire ENGREF-USTL, Montpellier. 150 p.
- MONTOROI J.P., RIEU M., 1987. "Calcul des activités ioniques dans une solution aqueuse". Programme ACTIVE pour IBM-PC et compatibles. Cah. ORSTOM, série Pédol., vol. XXIII, n°2. Paris. p. 133-150.
- RIEU M., 1983. "Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité des sols". ORSTOM, Paris. 161 p.
- United States Salinity Laboratory Staff, 1954. "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils". Agriculture Handbook n°60. L.A. Richards, édit. Washington. 159 p.

LISTE DES FIGURES

- Fig 1 - Tolérance des cultures à la salinité (d'après AYERS, 1977).
- Fig 2 - Carte des isohyètes du Nordeste (SUDENE, 1970).
- Fig 3 - Répartition des échantillons étudiés dans les classes de conductivité de l'USSL.
- Fig 4 - Représentation des eaux étudiées dans le diagramme de l'USSL.
- Fig 5 - Etats de saturation des eaux par rapport à la pCO_2 et à la calcite.
- Fig 6 - Evolution moyenne des eaux des açudes en phase évaporatoire dans les diagrammes de PIPER.
- Fig 7 - Situation moyenne des eaux des açudes sur le diagramme de SCHOELLER en début et fin de saison sèche.
- Fig 8 - Dynamique hydro-saline d'un açude en saison sèche.
- Fig 9 - Organigramme simplifié du modèle SIMSAL
- Fig 10 - Conductivité électrique observée et prévue par la méthode classique et par le modèle SIMSAL durant le processus évaporatoire.
- Fig 11 - SAR observé et prévu par la méthode classique et par le modèle SIMSAL durant le processus évaporatoire.
- Fig 12 - Valeurs des facteurs de concentration (a), de la CE (b), du SAR (c), de CI (d) dans l'eau restant dans l'açude Moquem en fonction de divers prélèvements mensuels pendant la saison sèche 1987-88.

LISTE DES TABLEAUX

- Tab 1 - Faciès hydrochimique moyen des eaux étudiées dans le diagramme de STABLER.
- Tab 2 - Classification des eaux étudiées en fonction des problèmes qu'elles peuvent apporter en irrigation.
- Tab 3 - Variations physico-chimiques moyennes des eaux d'açudes entre début et fin de saison sèche.
- Tab 4 - Evaporations et pluies mesurées au poste de Taua durant la saison sèche 1987-88;
- Tab 5 - Caractéristiques physico-chimiques de l'açude Moquem durant la saison sèche 1987-88.
- Tab 6 - Simulation par le modèle SIMSAL de l'évolution hydro-chimique de l'açude Moquem durant la saison sèche 1987-88.
- Tab 7 - Comparaison des principales caractéristiques physico-chimiques pour l'irrigation mesurées au laboratoire avec celles de la simulation SIMSAL et de la méthode classique entre le début et la fin de la saison sèche 1987-88 pour l'açude Moquem.
- Tab 8 - Valeurs des facteurs de concentration, des volumes restant dans l'açude Moquem et évaporés, en fonction de divers prélèvements mensuels pendant la saison sèche 1987-88.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

- I **QUALITE DES EAUX ET RENDEMENT DES CULTURES**
 - 1.1 **Principaux critères de qualité des eaux d'irrigation et leur importance**
 - 1.1.1 Paramètres clés de la solution du sol
 - 1.1.2 Paramètres clés des eaux d'irrigation
 - 1.2 **Notion de fraction lessivante**

- II **UTILISATION POUR L'IRRIGATION DES AÇUDES DU NORDESTE BRÉSILIEN SEMI-ARIDE**
 - 2.1 **Présentation du climat nordestin et des açudes**
 - 2.2 **Caractéristiques hydro-chimiques générales des eaux des açudes**
 - 2.3 **Conséquences de l'évaporation sur la qualité des eaux des açudes**
 - 2.4 **Facteurs physico-chimiques limitants pour l'irrigation**
 - 2.5 **Dynamique hydro-saline des açudes en saison sèche**

- III **SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DANS LES AÇUDES EN PHASE ÉVAPORATOIRE, DES PARAMÈTRES LIMITANTS EN IRRIGATION**
 - 3.1 **Principes et présentation du modèle SIMSAL**
 - 3.1.1 Le module volumétrique
 - 3.1.2 Le module chimique
 - 3.1.3 Hypothèses initiales et considérations diverses
 - 3.2 **Étude d'un exemple : l'açude Moquem**
 - 3.2.1 Présentation
 - 3.2.2 Évolution hydrochimique durant la saison sèche
 - 3.2.3 Comparaison des résultats des simulations et de ceux obtenus par la méthode classique
 - 3.3 **Critique du modèle SIMSAL**
 - 3.4 **Application du modèle SIMSAL à la gestion d'un açude pour l'irrigation**

CONCLUSIONS

**MODELISATION DE L'ALIMENTATION HYDRIQUE
DES BASSINS VERSANTS ET MAITRISE DE L'EAU
EN SITUATION DE BAS-FOND**

Par

J.L. SABATIER

F. GUILLET

MODELISATION DE L'ALIMENTATION HYDRIQUE DES BASSINS VERSANTS

ET MAITRISE DE L'EAU EN SITUATION DE BAS-FOND

J.L.SABATIER - F.GUILLET

RESUME

Les auteurs proposent une représentation des transferts hydriques dans un bassin versant du Yatenga à l'aide d'un modèle hydro-pédologique précédemment présenté à l'échelle d'une toposéquence sur parcelles agronomiques aux journées de l'UREF de Ouagadougou (mars 90). Après avoir rappelé les résultats obtenus à cette échelle, on pose les problèmes inhérents à la modélisation du bassin versant et ceux appréhendés lors du changement d'échelle. On présente une simulation sur des données réelles. Le modèle est expliqué sommairement.

GUILLET F.
SABATIER J.L.

MODELISATION DE L'ALIMENTATION HYDRIQUE
D'UN BASSIN VERSANT

Cas de BIDI (Burkina Faso)

Les effets cumulés de la sécheresse et de la croissance démographique en région Soudano sahélienne ont suscité des politiques de protection des espaces cultivés à partir des années 80 : aménagement D.R.S. en particulier. Ces politiques n'ont pas porté leurs fruits au regard de l'absence de motivation paysanne vis-à-vis de ces aménagements. Ce constat fut le point de départ de recherches en vue d'une meilleure gestion des ressources naturelles Eau et Sol principalement (ROOSE E. : Gestion conservatoire des eaux et du sol - DSA 1986 - (SERPANTIE G. et LAMACHERE J.M.,1989)) .

De la démarche D.R.S. classique , limitée au strict espace cultivé, on est passé aujourd'hui à l'échelle du bassin versant ou des grandes unités de paysage. On cherche à comprendre notamment les caractéristiques hydriques de ces unités, et à les traiter contre l'érosion et le ruissellement de façon sélective à l'intérieur du système bassin versant.

Ce changement de perspectives s'est ordonné à partir d'un ensemble de connaissances scientifiques, d'une politique de gestion de l'espace et des techniques à mettre en oeuvre dont le coût est à minimiser.

On retrouve dans cette démarche les principes de la recherche opérationnelle.

Dans cet état d'esprit, partir d'une représentation simplifiée du "connu", on propose un modèle conceptuel simulant les flux hydriques entre unités de paysage d'un petit bassin versant (modèle spatial) et son calage à une situation du Burkina Faso.

On tente d'apprécier l'effet pluriannuel d'une transformation des facteurs susceptibles d'intervenir sur l'infiltration, sur les stockages et les transferts potentiels du bassin versant. On reprend l'idée développée par M. C GIRARD (GIRARD et DUFAURE, 88¹). Ils assimilent la couverture pédologique d'un petit bassin versant à un système d'organisation spatiale d'unités de référence pour la circulation de l'eau. Le modèle est orienté vers l'application au travers de la simulation des petits aménagements de surface. L'effet de diguettes filtrantes ou compactes sur l'écrêtement des crues et les bilans hydriques de parcelles soumises à différents travaux du sol ont fait l'objet d'un travail antérieur mais à l'échelle de micro-bassins versant (sur parcelles de ruissellement à BIDI (GUILLET, LAMACHERE, SABATIER, SERPANTIE;1990)) . L'étude de l'impact d'aménagements à l'échelle étudiée dans cette communication.

II - SOURCE : un essai de modélisation des transferts hydriques de la couverture pédologique

II.1 - Le modèle conceptuel

Le bilan hydrique ou hydrologique, même sommaire, s'emploie dans l'approche de l'économie de l'eau à la parcelle ou du bassin versant (FOREST, VALENTIN). L'analyse hydrologique néglige le sol et le réduit le plus souvent à un facteur faisant état de sa réserve (GIRARD M.C., DUFAURE L. 88) ce qui est insuffisant lorsque l'on veut procéder à l'analyse spatiale.

La notion de régime hydrique des sols est une notion bien appréhendée en pédologie (BOULAINÉ J, 1981) et se définit comme la succession des états de l'humidité d'un sol au cours d'une période de temps. Il se caractérise sur une épaisseur donnée de sol appelée section de contrôle. Pour étudier le régime hydrique d'un sol à une échelle cohérente : parcelle ou petit bassin versant, Girard élargit la notion de section de contrôle et considère la couverture pédologique comme un ensemble organisé de volumes de référence (GIRARD M.C. 1983). Chaque volume de référence réagit de la même manière à la circulation de l'eau. La description du volume nécessite la prise en compte des variables aptes à traduire l'état de remplissage du sol ; les relations entre volumes se déduisent du système d'orientation spatiale des unités de référence dont la trame est donnée par la carte pédologique en horizons (Une succession d'horizons constitue une séquence verticale de volumes de référence que nous appellerons SVR). (S.V.1)

La carte pédologique en horizon, associée à des principes de compartimentation horizontale de l'espace pédologique (PEDRO 89², GIRARD 83-88, GAVAUD 86³) permet de construire un modèle conceptuel à réservoirs, architecture courante des modèles hydrologiques. (S.V.2)

Cette approche traduit la volonté de leurs auteurs de faire mieux coïncider la réalité et la complexité du milieu naturel avec les contraintes d'un modèle hydrologique : production et transfert d'eau sur un pas de temps défini et une échelle spatiale choisie.

Sur le plan mathématique l'information contenue dans le bassin versant (ensemble de SEVERE) peut être organisée en réseau : graphe dont les arcs représentent la capacité maximale de transport de l'eau de chaque horizon.

Si chaque horizon est redécoupé lui même en petites unités élémentaires (les TEP), le graphe devient "vulnérable" (CICERI M.-F., MARCHAND B., RIMBERT S., 1977⁴). Il comprend un grand nombre de coupes de capacité minimale. D'un point à un autre du bassin versant, il existe toujours une coupe minimale qui rend le flot dans le réseau maximal (algorithme de FORD-FULKERSON). La représentation choisie : (ensemble de SVR redécoupés en TEP) permet de transférer de l'eau dans le plus grand nombre d'arcs du graphe ; en particulier le chemin de l'eau dans un horizon.

S'il existe une barrière de potentiel entre deux horizons ou dans un horizon donné (saturation), le chemin latéral est une coupe minimale.

Dans la couverture pédologique, l'épaisseur d'un SVR est très inférieure à la distance aux SEVERE voisins, ceci revient à privilégier dans le graphe les cheminements verticaux.

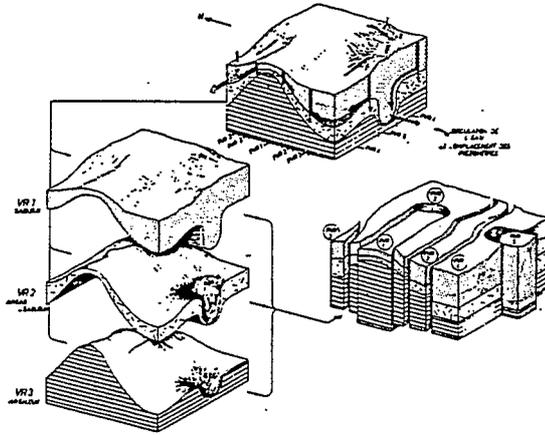


Figure 1 : Analyse de la couverture pédologique. (M.C. GIRARD, L. DUFAURE, 1986)
 A gauche, comme un ensemble de Volumes de Référence (VR)
 A droite, comme un ensemble de "Profils de Volumes de Référence"
 (PVR/SEVERE)
 Les flèches indiquent les sens des écoulements.

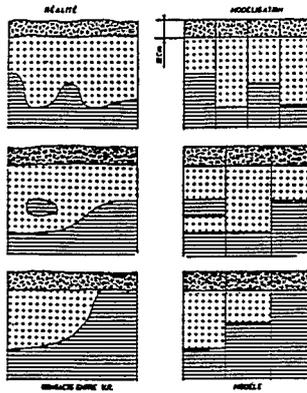


Figure 2 : Modélisation des contacts entre Volumes de Référence.
 Modelization of contacts between reference volumes
 (M.-C. GIRARD,

figure 3

Organisation hydraulique d'un SEVERE (dynamique)

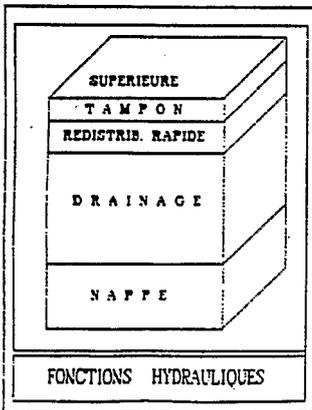
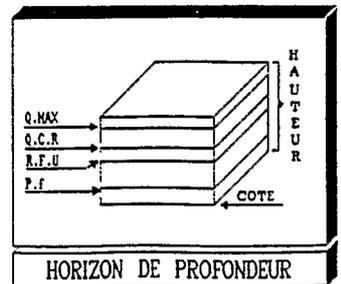


Figure 4

Organisation d'un réservoir (statique, capacitive)



Toutefois, pour qu'il y ait écoulement, il est nécessaire qu'il y ait contraste entre volumes. GIRARD et DUFAURE ont développé la notion de seuil de passage dynamique à cet effet. Au sein d'un volume, l'homogénéité prédéfinie confère un seuil maximal aux différentes tranches de sol du volume en conditions hydriques non limitantes. Au voisinage des limites d'un volume, les seuils dépendent des perméabilités respectives des volumes.

On peut ainsi simuler des vitesses d'écoulements de l'eau dans le sol sur un pas de temps choisi ad-hoc.

A ce stade de la démonstration, on n'a pas encore abordé la représentation des différentes fonctions de production d'un modèle hydrologique classique : drainage vertical lent ou rapide, formation de nappe, évapotranspiration, remontée capillaire et ruissellement.

En ce qui concerne le ruissellement, il est à noter que la surface de contact avec l'atmosphère peut être représentée par un volume de profondeur nulle qui sera caractérisé par des variables extrinsèques à la nature du sol, aptes à approcher les phénomènes de ruissellement : pente, couverture végétale, état de surface, etc. et un horizon de faible épaisseur : le tampon, mémoire des ruissellements antérieurs dont on peut déformer la porosité en fonction des pratiques anthropiques ou de la durée des épisodes pluvieux.

Les autres fonctions sont approchées par des algorithmes qui sont appliqués à des zones géographiques du SEVERE: évapotranspiration dans la zone de colonisation racinaire, drainage lent en dessous du front d'humectation maximum après la pluie spécifique à chaque SVR. Le puits de potentiel est représenté par la nappe. Ces fonctions sont nommées dans le modèle fonctions hydrauliques. Elles sont dynamiques en raison en particulier de l'évolution de la nappe dans le temps. (⧸:⧸)

Dans le paragraphe suivant, nous aborderons les problèmes de vidange et de calage après des considérations sommaires sur la mécanique interne du modèle .

Pour résumer, 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.

C'est un modèle conçu pour la recherche opérationnelle : "Où va l'eau et quand ?" mais qui ne se soucie pas de la réalité microscopique des écoulements. En quelle quantité, le problème est-il plus délicat, en raison de l'imprécision inhérente aux milieux naturels et à plus forte raison à sa modélisation (variables pédologiques choisies comme caractéristiques des volumes identifiés et donc des capacités des arcs du réseau capacité de rétention, stock à saturation, définition des seuils de passage entre horizons, ...)

Nous n'occultons pas en revanche la réalité des transports physiques. Les seuils de transfert entre horizons évoluent conformément aux lois des milieux insaturés : le seuil augmentent quand l'humidité de l'horizon augmente, le transfert latéral augmente suivant le gradient de potentiel, ...

On travaille à un pas de temps fixe relativement long : pentade, décade ; mais le moteur interne du modèle contient plusieurs horloges. En particulier, il génère des pluies journalières, il peut augmenter ou diminuer l'intensité du drainage.

Un drainage rapide est envisagé pour simuler les phénomènes de réhumectation .

Le drainage lent est traité comme un algorithme récursif dont on peut borner le nombre d'appels (image du piston léger et percé dans une colonne de liquide).

Le transfert latéral dont on admet que l'unité d'horloge est plus grande que le pas de temps considéré est traité grâce à la notion des files d'attente, scindant la quantité à transférer du moment où elle est effectivement transférée, chaque quantité étant traitée dans l'ordre de la file (FIFO¹). Cet artifice permet de traiter les vidanges de nappe au pas de temps choisi. On a supposé que le bassin hydrogéologique était confondu avec le bassin versant hydrologique ; ce qui n'est pas toujours le cas.

Tous les phénomènes envisagés dans le modèle correspondent à des pas d'horloge supérieurs ou égaux à la journée.

II 2 - QUELQUES ASPECTS DE LA MECANIQUE INTERNE DU MODELE

Le profil de volumes de référence ou séquence verticale de volumes de référence (SEVERE) est identifié par des horizons : $(\sum i a_i : H)$

a) un horizon de surface caractérisé par:

- la pente : néant, marquée, forte
- la couverture végétale : nulle, faible, moyenne, dense
- la morphologie : convexe, concave, plat (non utilisée)
- les états de surface réduits à quatre : très rugueux, rugueux, lisse, battant, tous facteurs pris hiérarchisés dans cet ordre permettant une approche simplifiée du coefficient de ruissellement (ruissellement direct)
- par l'identité de l'exutoire de surface unique permettant la fonction de transfert du ruissellement

b) des horizons profonds caractérisés par des indices de remplissage usuels en pédologie :

- humidité à la capacité de rétention (QCR)
- humidité au point de flétrissement (PF)
- stock à saturation (QMAX)
- perméabilité à saturation ne servant qu'à l'initialisation des seuils entre horizons
- la liste des SVR voisins qui permet de définir les relations topologiques entre SVR et la fonction de transfert latéral gérée de façon indépendante pour tout horizon profond d'un SVR.

Chaque horizon est repéré par sa cote par rapport à l'horizontale de référence.

- L'interface sol atmosphère est assurée par les fonctions "supérieure" et "tampon", laquelle coïncide en général avec le premier horizon profond. Le tampon peut se remplir jusqu'à saturation. Au delà, l'eau en excès ruisselle (ruissellement différé par opposition au ruissellement direct). Le tampon se ressuie jusqu'à QCR. Il peut se dessécher plus profondément sous l'effet du prélèvement par les racines ou l'évaporation du sol nu. (E i 3)

- La zone de drainage ou de redistribution rapide correspond à la progression du front d'humectation après la pluie. Elle occupe tout ou partie du deuxième horizon profond. Elle reçoit les eaux de ressuyage du tampon.

- La zone de drainage lent qui correspond au ressuyage brut jusqu'à QCR du SVR peut intéresser plusieurs horizons. En raison de la dynamique des seuils verticaux, des goulots d'étranglement peuvent apparaître dans le SVR (formation de nappes perchées) résolubles par la technique des essais récursifs. On continue à drainer sous le goulot d'étranglement jusqu'à la nappe, on reprend en séquence le drainage au goulot d'étranglement jusqu'au prochain échec et ce, autant de fois que le crédit d'itérations disponible le permet. On a un effet de piston.

On peut toutefois rechercher les nappes perchées et limiter le crédit d'itération.

- Le prélèvement racinaire s'effectue sur chaque TEP sur lequel existe des racines au prorata de l'eau facilement disponible et de la demande climatique. Quand le sol est submergé pendant le pas de temps, on prélève l'évaporation de la nappe d'eau libre sur la TEP supérieure. L'algorithme ne présente pas de difficultés.

- La remontée capillaire est définie dans le modèle comme la demande du compartiment racinaire vis-à-vis des réserves de la nappe pondérée linéairement par la distance de celles-ci à la nappe.

- Drainage et remontée capillaire permettent d'instancier descente et remontée de nappe par simple changement de fonction.

Les conditions de transfert latéral ne sont pas des conditions tout-à-fait identiques au drainage. Le transfert latéral a lieu comme le drainage si les conditions de saturation de l'horizon le permettent (humidité supérieure à la capacité de rétention dans la TEP de départ). L'écoulement a lieu prioritairement suivant la pente des volumes horizons, ce qui permet d'ordonner les voisins susceptibles de recevoir de l'eau. A l'intérieur d'un volume les transferts latéraux ne concernent que des TEP voisines à même côte. L'échange d'eau se fait dans le sens du gradient le plus élevé. Un algorithme de marquage permet d'éviter les circuits sur un pas de temps. Le gradient de pression est représenté par le rapport Q/QCR (quantité d'eau disponible à la capacité de rétention).

Tous les transferts verticaux par SVR sont réalisés d'abord. On revient ensuite pour réaliser s'il y a lieu les transferts latéraux.

A la fin de chaque pentade, les fonctions et seuils sont remis à jour. Les seuils peuvent recouvrir des valeurs de zéro à trois en fonction de l'état d'humidité. Ils sont calculés par TEP. La donnée des cotes initiales des différentes fonctions appelées "cotes hydrauliques" permet de les instancier en cours de simulation et de mettre à jour les fonctions par TEP.

Tous les échanges sont réalisés au niveau des TEP ; chaque TEP, en mémoire, est une image de l'horizon auquel elle appartient.

En Pascal, le SVR a une structure externe de "record" et une image interne de pile ou de liste chaînée correspondant à un ensemble idouane de TEP (au moins les TEP jusqu'à la nappe). Un pointeur d'adresse permet la mémorisation du tableau de voisinages. Ainsi, est représenté en machine le graphe dont on a développé les modalités de parcours auparavant.

Sur le plan hydrologique, le modèle est paramétré :

- en ce qui concerne le ruissellement, le fonctionnement du moteur nécessite la donnée de la pluie d'imbibition du bassin ainsi que la donnée des événements pluvieux ayant engendré les coefficients de ruissellement maximum. Le moteur ajuste la valeur réelle en fonction des caractéristiques du SVR considéré (ruissellement direct) et de l'état de remplissage de son tampon (ruissellement différé).

- en ce qui concerne le drainage, on peut régler l'intensité de drainage en fonction du bassin et des seuils de contact entre deux volumes.

- en transfert latéral, on peut décider de l'horloge à choisir par la limitation de la longueur des files d'attente.

- enfin la vidange automatique de la nappe par l'exutoire est réalisée par la donnée de la cote étiage de la nappe et le temps qu'il faut pour y parvenir à partir du début de la simulation.

La validation du modèle se fait par la confrontation avec les lames ruisselées sur le bassin et l'observation de l'évolution des stocks mesurés par rapport aux stocks simulés.

III -Avec SOURCE, de la parcelle au bassin versant

Nous renvoyons le lecteur aux minutes des conférences "génie parasécheresse" de l'U.R.E.F./A.U.P.-E.L.F. de Ouagadougou 1990 pour les principaux résultats obtenus sur parcelles expérimentales. Le dispositif simulé se composait des trois parcelles cultivées (SERPANTIE MARTINELLI 1986) : un témoin non aménagé, non labouré, deux parcelles aménagées dont l'une avec labour et une parcelle fictive labourée seulement.

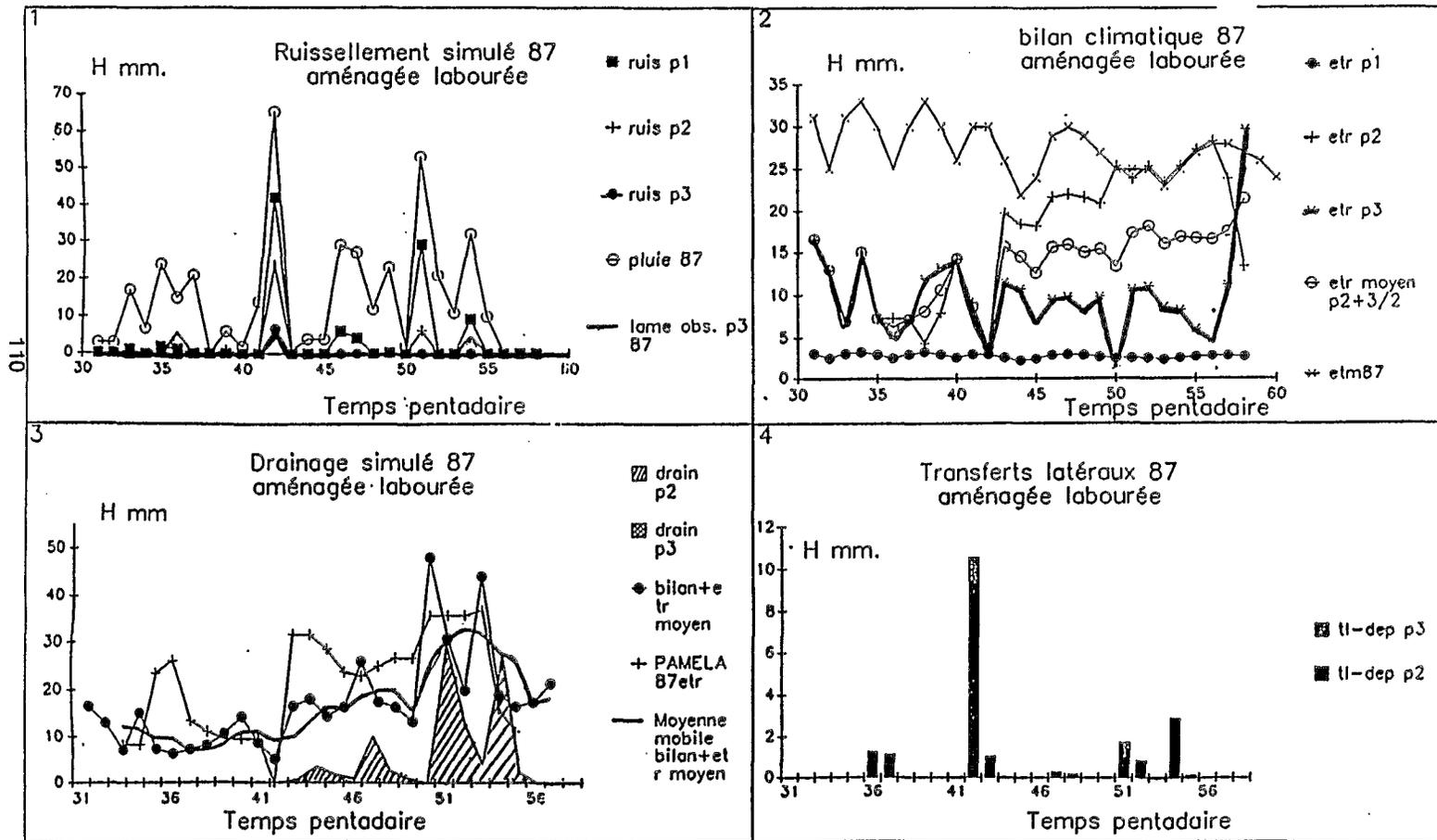
Les parcelles avaient été modélisées en quatre SVR en raison du cloisonnement suggéré par l'expérimentation: impluvium de haut de pente, sous parcelles de traitement, exutoire. La simulation avait porté sur deux années d'observation, 1986 et 1987 soient une année assez pluvieuse et une année sèche.

La modélisation était segmentée en sous périodes déterminées en fonction du calendrier cultural et des évolutions de la rugosité de surface et de la végétation. Pour mémoire, la modélisation de l'année sèche (1987) fait apparaître, compte-tenu des reports dans la toposéquence, des différences d'états de surface et d'état végétatif des cultures, une diminution de lame ruisselée par rapport à la parcelle témoin de 30 % pour la parcelle aménagée non labourée, de 20 % seulement pour la parcelle fictive labourée et non aménagée et de 80 % pour la parcelle aménagée labourée. Les lames observées diminuaient, elles, respectivement (sauf pour la parcelle fictive) de 20 % pour la parcelle aménagée non labourée et de 63 % pour la parcelle aménagée labourée. (fig 5)

Si les lames ruisselées étaient globalement conformes du point de vue évènementiel aux lames observées à l'exutoire, l'absence de contraste pédologique entre SVR 2 et 3 a conduit le modèle à exagérer les transferts entre l'impluvium et le SVR 2 d'une part, à les minimiser entre le SVR 2 et le SVR 3 d'autre part. De plus à cette échelle (quelques milliers de mètres carrés, l'existence de transferts latéraux n'a pas grande signification).

figure 5 :

Simulation sur Source. Pluviométrie 1987. Différents termes du bilan dans les trois pédon constitutifs du micro-bassin versant - "Aménagé et labouré".



Comme le souligne GIRARD, la nécessité de mettre en oeuvre des unités de sol suffisamment contraintes suggère le travail à l'échelle du bassin versant, pour lequel le modèle a été conçu.

Nous présentons maintenant ce travail réalisé sans tenir compte d'autres aménagements que des façons culturales.

IV -Le bassin versant et sa modélisation hydro-pédologique

Nous avons souligné au paragraphe précédent que le modèle hydrologique auquel nous avons recours s'appuie sur une connaissance spatiale approfondie de l'organisation de la couverture pédologique. En raison de la complexité de la couverture pédologique à l'échelle du bassin versant, celle-ci est présentée dans le paragraphe suivant.

A: Le site de Samniweogo

Le bassin versant, présentation physiographique

Ce bassin versant de 3 Km² s'appuie au Sud sur un relief granitique peu accentué dont on observe deux témoins résiduels à l'amont. Le bassin s'oriente Sud-Nord d'amont en aval, l'axe structural qui préside à l'orientation NW-SE du talweg principal est recoupé par les cours secondaires selon les axes N10, N60, et N130. Ces directions commandent localement la fracturation du socle et ont été reconnues par une campagne d'investigation géophysique (traînes électriques et PS). Le versant NW du massif granitique est exposé face aux dépôts éoliens anciens, qui ont obturé les petits talwegs perpendiculaires à la mise en place de l'erg ancien. Les mares et marécages temporaires qui en résultent (formation locale d'un micro-endoréisme), ont, semble-t-il, un impact non négligeable sur la recharge hydrique.

Lors des grandes crues il y a un exutoire par débordement au Nord du bassin.

La ligne de partage des eaux est constituée :

- 1- de buttes cuirassées à l'Ouest
- 2- d'une marge carapacée ou gravillonnaire à cuirasse sous-jacente à l'Est.
- 3- d'un relief sableux mou sub-horizontale entre les deux chicots granitiques.

Le bassin est asymétrique.

Le versant Ouest, long, est flanqué sur la bordure de l'édifice schisto-volcanique Birrimien ; il est armé par le revers de quatre écaillés cuirassées en pseudo cuestas sur ce Birrimien. Une épaisse nappe de sable rouge est venue recouvrir ces altérites.

Le versant Est, très court, est armé, lui, par une formation ferrallitique résiduelle enfouie. Son raccordement au versant Ouest est un contact probable par faille (sur la bordure Est du talweg principal). Le ruissellement en nappe y est dominant.

L'amont du bassin est constitué d'une couverture d'altérites arénacées et de produits de démantèlement d'édifices cuirassés sous voiles dunaires.

Le bassin ne présente pas de phénomènes érosifs importants ; tout au plus, présente-t-il une érosion d'origine anthropique localisée.

La simplicité morphologique du bassin versant et le caractère apparemment homogène de sa couverture pédologique ont poussé au choix de celui-ci pour notre étude.

B: La modélisation pédologique

L'étude pédologique proprement dite donne lieu sur le terrain à l'identification d'un certain nombre de variables permettant la visualisation spatiale d'objets pédologiques ou géologiques. Elle procède de l'analyse de l'organisation spatiale en volumes de référence (GIRARD 83). Communément, les objets sont les horizons ; on peut cependant, selon ce que caractérisent les variables étudiées, sortir de la définition conventionnelle de l'horizon.

a: La prospection pédologique

Nous disposons de soixante quinze stations d'observations parmi lesquelles 60 sites d'observation pédologique à plus de 1 mètre, soit :

- 40 profils décrits de 150 à 600 cm
- 6 sondages à la tarière de fort diamètre à plus de 400 cm
- le restant étant constitué des sondages à la tarière de petite dimension dont une quinzaine à plus de 150 cm.

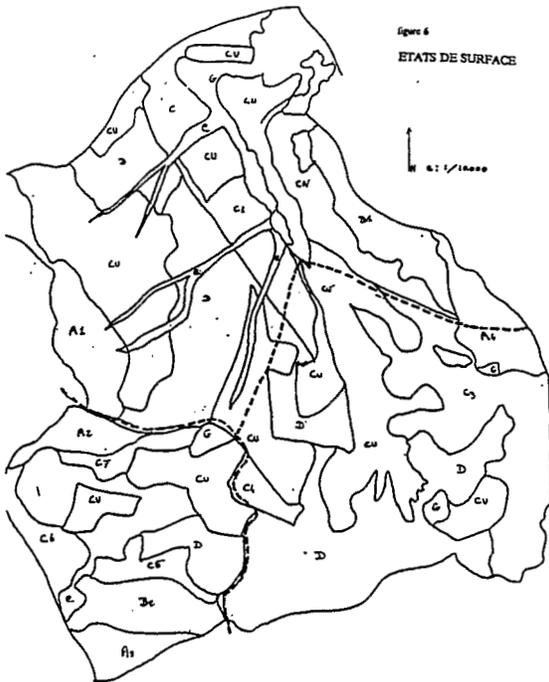
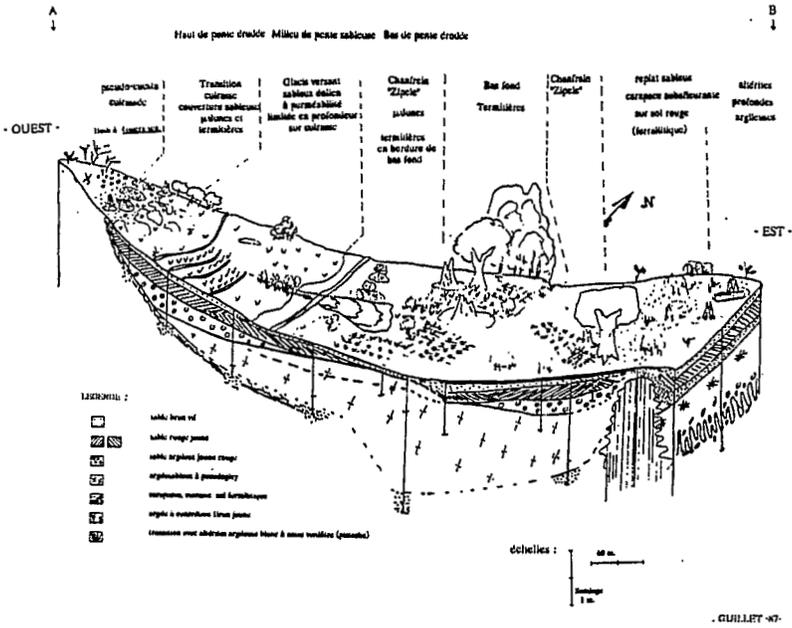
b: L'organisation pédologique

Dans un premier temps, l'ensemble des variables pédologiques a été retenu pour l'analyse de la couverture pédologique et l'individualisation de l'ensemble des limites potentielles. L'interprétation suivante en découle ; elle s'interprète au travers de la coupe ci-jointe. (Fig 7)

De façon générale, la couverture pédologique locale évolue entre deux pôles de différenciation pédogénétiques opposés : la dégradation des reliefs susjacents, cuirassés, granitiques ou éoliens ; la zone engorgée.

La profondeur exploitable du sol est partout assez réduite et partout la profondeur des horizons limitants avoisine deux mètres.

BASSIN VERSANT DE BIDI SAMNIWEGO
OCCUPATION DES SOLS, ETATS DE SURFACE ET PEDOLOGIE



1) Les horizons de surface

Sableux et très peu structurés dans leurs masse, ils se distinguent les uns des autres par leur organisation de surface, leur texture et l'activité organique qui s'y développe. En haut de toposéquence, ils sont tronqués ou issus du remaniement direct des horizons portés à l'affleurement. En milieu de toposéquence, ils sont sableux à faciès dunaire, souvent très dégradés par les cultures. En bas de pente, tronqués ou non, ils sont armés en surface par des pellicules structurales épaisses (Casenave, Valentin 88). Les façons culturales sur ces surfaces les transforment fondamentalement pour la saison.

2) Les horizons des glacis versants sableux

Sous les horizons de surface, s'est déposé sur les ensembles cuirassés un voile de sable atteignant deux mètres d'épaisseur. Dans le bas de pente, cette couverture repose sur une arène grossière. Ces sables éoliens se différencient en deux ensembles :

- Entre 30 cm, lorsque l'horizon de surface n'est pas tronqué, et 150 cm dans le haut de toposéquence, et s'amincissant à 50 cm dans le bas de pente, on trouve partout un horizon rouge sableux à ciment d'hydroxyde. Cet horizon se transforme à proximité des zones hydromorphes. Il devient rose et plus argileux. Il est alors très fortement remanié par les termites, dont les agrégations constituent sa seule structure. Le passage d'un faciès à l'autre est progressif mais se réalise sur une très courte distance (150m./1.5km de versant).

- Sous l'horizon rouge, on trouve, débutant plus tardivement que ce dernier, en descendant la toposéquence l'horizon sableux Jaune. Plus argileux que les horizons susjacentes, mais massif et bouillant, cet horizon présente particulièrement en son fond et dans le bas de pente des petites poupées d'hydroxydes concrétionnées. Il apparaît que ces faciès d'hydromorphie passagère sont le siège de transferts intenses (illuviation et éluviation conjointe).

L'activité biologique importante y développe une porosité de conduits et de cavités (chambres à meule des termites).

Diverses observations (GUILLET 87⁵) militent en faveur de l'existence de flux latéraux localisés au moins au toit de la cuirasse.

Entre horizons sableux et cuirasse, la ségrégation des matériaux aboutit à l'individualisation d'un horizon assez poreux, peu épais, gravillonnaire, à matrice d'argile kaolinique.

En bas de pente, de part et d'autre du bas-fond, et sur tout le glacis amont du sud du bassin versant, à partir de 2 mètres de profondeur, on se trouve en présence d'une arène quartzreuse à tendance grossière. Elle est plus ou moins argileuse et plus ou moins remaniée par les termites, corrélativement à l'hydromorphie l'affectant. Cette arène, même dans ces faciès les plus argileux, conserve une porosité de squelette assez grossière, laquelle est fréquemment recouverte d'enduits de natures diverses.

Ces arènes se développent ici autour des petits pointements granitiques.

figure 8 : Localisation statistique des volumes au sein des SEVERE

exemple pour 2 volumes

Volumes hydromorphes

Modalité 3	Total horizons = 4	Moyennes :	12.0	128.7
de 0 cm à 0 cm	2*****	0.	0.	0.
de 0 cm à 10 cm	0.	1*****	0.	2*****
de 10 cm à 20 cm	1*****	0.	0.	2*****
de 20 cm à 30 cm	0.	0.	0.	2*****
de 30 cm à 40 cm	1*****	0.	0.	3*****
de 40 cm à 50 cm	0.	0.	0.	3*****
de 50 cm à 60 cm	0.	0.	0.	3*****
de 60 cm à 70 cm	0.	1*****	0.	3*****
de 70 cm à 80 cm	0.	0.	0.	2*****
de 80 cm à 90 cm	0.	1*****	0.	2*****
de 90 cm à 100 cm	0.	0.	0.	1****
de 100 cm à 110 cm	0.	0.	0.	1****
de 110 cm à 120 cm	0.	0.	0.	1****
de 120 cm à 130 cm	0.	0.	0.	1****
de 130 cm à 140 cm	0.	0.	0.	1****
de 140 cm à 150 cm	0.	0.	0.	1****
de 150 cm à 160 cm	0.	0.	0.	1****
de 160 cm à 170 cm	0.	0.	0.	1****
de 170 cm à 180 cm	0.	0.	0.	1****
de 180 cm à 190 cm	0.	0.	0.	1****
de 190 cm à 200 cm	0.	0.	0.	1****
de 200 cm à 210 cm	0.	0.	0.	1****
de 210 cm à 220 cm	0.	0.	0.	1****
de 220 cm à 230 cm	0.	0.	0.	1****
de 230 cm à 240 cm	0.	0.	0.	1****
de 240 cm à 250 cm	0.	1*****	0.	1****
de 250 cm à 260 cm	0.	0.	0.	1****
de 260 cm à 270 cm	0.	0.	0.	1****
de 270 cm à 280 cm	0.	0.	0.	1****
de 280 cm à 290 cm	0.	0.	0.	1****
de 290 cm à 300 cm	0.	1*****	0.	1****

Argilo-sableux

Modalité 4	Total horizons = 4	Moyennes :	80.0	202.5
de 0 cm à 0 cm	0.	0.	0.	0.
de 0 cm à 10 cm	0.	0.	0.	0.
de 10 cm à 20 cm	0.	0.	0.	0.
de 20 cm à 30 cm	0.	0.	0.	0.
de 30 cm à 40 cm	0.	0.	0.	0.
de 40 cm à 50 cm	1*****	0.	0.	1****
de 50 cm à 60 cm	0.	0.	0.	1****
de 60 cm à 70 cm	1*****	0.	0.	2*****
de 70 cm à 80 cm	0.	0.	0.	2*****
de 80 cm à 90 cm	0.	0.	0.	2*****
de 90 cm à 100 cm	1*****	0.	0.	3*****
de 100 cm à 110 cm	0.	0.	0.	3*****
de 110 cm à 120 cm	0.	0.	0.	3*****
de 120 cm à 130 cm	0.	0.	0.	3*****
de 130 cm à 140 cm	1*****	0.	0.	4*****
de 140 cm à 150 cm	0.	1*****	0.	4*****
de 150 cm à 160 cm	0.	0.	0.	3*****
de 160 cm à 170 cm	0.	0.	0.	3*****
de 170 cm à 180 cm	0.	0.	0.	3*****
de 180 cm à 190 cm	0.	0.	0.	3*****
de 190 cm à 200 cm	0.	1*****	0.	3*****
de 200 cm à 210 cm	0.	1*****	0.	2*****
de 210 cm à 220 cm	0.	0.	0.	1****
de 220 cm à 230 cm	0.	0.	0.	1****
de 230 cm à 240 cm	0.	0.	0.	1****
de 240 cm à 250 cm	0.	1*****	0.	1****
de 250 cm à 260 cm	0.	0.	0.	0.
de 260 cm à 270 cm	0.	0.	0.	0.
de 270 cm à 280 cm	0.	0.	0.	0.
de 280 cm à 290 cm	0.	0.	0.	0.
de 290 cm à 300 cm	0.	0.	0.	0.

Argileux

Les volumes hydromorphes de bas de pentes et de bordure de bas fond sont en général assez homogènes, très argileux à squelette de sable très fin. Ils constituent des bancs de graviers et de concrétions ferrugineuses à des profondeurs irrégulières. Ces volumes sont en général très peu structurés. Dans la partie supérieure du bas-fond, la "structure sédimentaire" est complexe et accuse des variations texturales importantes avec des concentrations gravillonnaires.

Sous les surfaces cuirassées, se développent soit des altérites ferrallitiques en "mille feuilles" dont la porosité est très développée et l'humidité très forte, soit des argiles à concrétions au toucher sériciteux.

c: La classification des volumes de référence

Si certains volumes sont d'évidence bien différenciés et suffisamment contrastés par rapport aux autres volumes et ne nécessitent pas d'analyse statistique, il n'en va pas de même pour la plupart.

L'analyse statistique des données structurales et physiques et leur classification par la méthode des distances minimales de tri (DIMITRI) (GIRARD MC.1983⁶ ; KING D., GIRARD MC.88⁷) permet d'identifier les volumes de référence adaptés à notre thématique :

Par AFC, nous identifions un certain nombre de regroupements ou d'isolements relatifs d'individus que nous essayons d'améliorer en orientant et en précisant, éventuellement, en déplaçant les noyaux des groupes en fonction de l'interprétation recherchée par la méthode DIMITRI analogue à la méthode des nuées dynamiques. La constitution des noyaux se fera au cours d'approximations successives mais sera initialisée à partir de sites de références identifiés parmi les Unités d'Information donnés par l'AFC ;

Les variables retenues pour notre thématique d'étude des transferts d'eau, compte tenu des données disponibles sont les suivantes :

Texture, Concrétions, Bioturbations, Matière Organique, Conductivité hydraulique à saturation, masse volumique sur agrégat, Humidité à la capacité de rétention, Humidité au point de flétrissement.

On obtient la stabilité suffisante des 10 noyaux choisis pour une distance minimale intragroupe à la 9^{ème} approximation.

Les volumes représentatifs ainsi obtenus, on en déduit l'ensemble des caractéristiques modales des individus rattachés à chaque volume de référence. Ces résultats peuvent être regroupés en trois tableaux :

- 1) tableau des caractéristiques des volumes de références portant sur l'ensemble des variables actives (Tableau 1) ;
- 2) tableau des caractéristiques des volumes de références pour les autres variables représentées par leurs valeurs modales, notamment les dimensions et profondeur du volume ;

Tableau I : Caractérisation des volumes de référence par les variables actives

VHYPER	Text.	Biot.	Conc.	Pt. Flét	Cap.Ret.	D.A.	K.H.	Prof.Ht	Prof.Bs.	ép.
1	4as	2	1	50 - 90	175-200	1.55-1.65	c	0 -120	20 -150	20-40
2	1s	4	1	20 - 30	100-140	1.40-1.55	c	0 - 90	30 -170	30-90
3	Sarg	3	1	130-170	240-...	1.65-1.72	B	0 - 20	10 - 70	10-50
4	Sarg	1	2	90 -130	200-240	1.72-1.95	B	40 -160	140-240	100
5	3sa	4	2	30 - 50	175-200	1.40-1.55	c	20	30 -120	20-100
6	1s	1	1	20 - 30	200-240	1.55-1.65	c	0	10	10
7	2sl	2	1	30 - 50	175-200	1.40-1.55	c	0 - 10	30 - 40	30-40
8	1s	1	1	20 - 30	145-175	1.65-1.72	D	0	10 - 20	10
9	2sl	2	4	30 - 50	100	>1.95	A	180	220	40
10	2sl	3	1	30 - 50	145-175	1.55-1.65	D	40	80 -150	40-140

On donne 5 classes de texture
 Concrétions et Bioturbation sont données en classe d'abondance croissantes,
 Les humidités sont données en mm/m ,
 La Densité apparente n'a pas d'unité ,
 La conductivité hydraulique à saturation est donnée en classes croissantes de A à D
 La profondeur et l'épaisseur sont donnés en cm.

Tableau 2: des "cotes" hydrauliques principale des volumes et conditions initiales d'état de surface

Profils	Cote surface	Redistribution Rapide	Drainage	Nappe	Front d'humectation	Profond. Racinaire	Aire Hect.	Surface R V C P
1	0	10	400	1400	400	0	10	
2	200	210	230	1410	230	0	10	
3	210	220	480 (430)	1430	480	1	55	
4	230	240	425 (450)	1450	425	0	16	
5	200	210	360	1410	360	1	37	
6	210	230	350	1450	350	2	12	
7	200	200	350	1420	350	0	3	
8	210	220	320	1430	320	1	16	
9	220	230	420	1450	420	1	12	
10	210	230	280	1430	280	1	15	
11	220	240	310	1450	310	1	4	
12	210	220	330	1420	330	1	45	
13	220	230	430	1450	430	0	12	
14	230	240	425	1460	425	0	22	
15	240	250	425	1470	425	1	7	
16	350	370	420	1480	420	2	13	
17	400	420(450)	430 (500)	1490	430	3	3 290	

Figure 10 : COMPARTIMENTATION DU BASSIN VERSANT
Schemas en vue perspective par le Sud Est

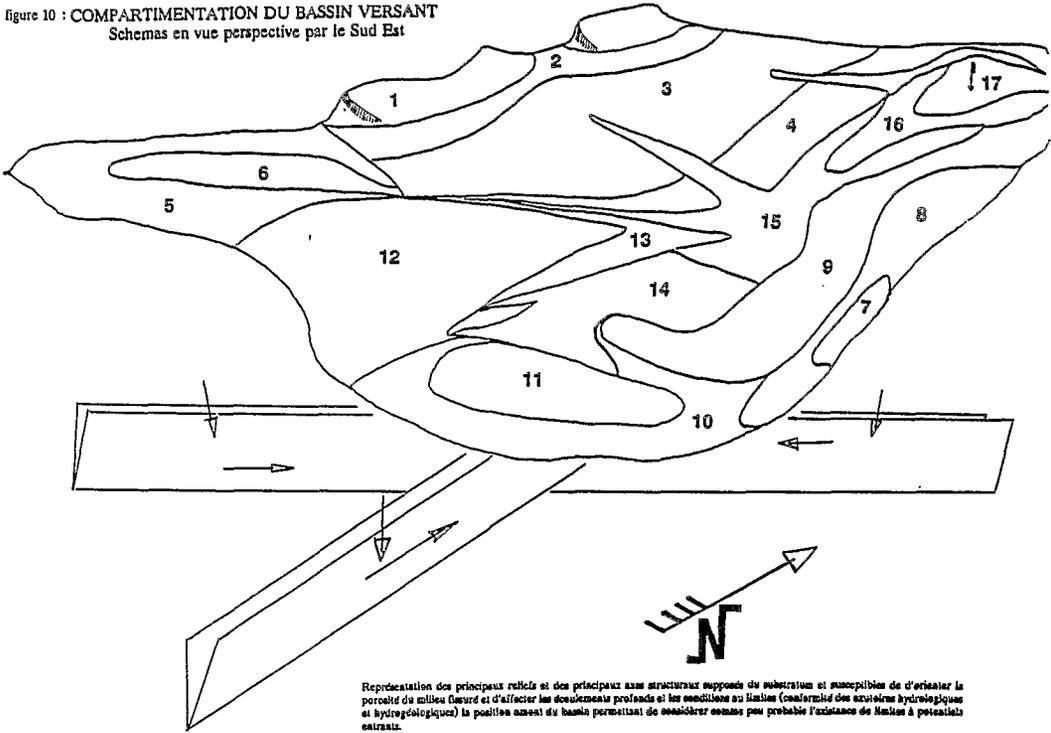
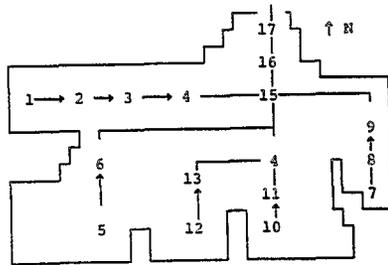


Figure 11: Organisation spatiale des
Séquences verticales de volumes de référence
(SEVERE) dans le bassin versant



d: Instruction de la base de données du modèle hydrologique

A partir des volumes précédemment identifiés (les dix noyaux précédents), et tenant compte des contraintes de surface, on compartimente en séquences de volumes de référence appelés ici SVR (Cf Tableau 2 Fig. 6 à 11 : La compartimentation retenue présente 17 unités).

V Cohérence des échelles de perception et de modélisation

Si l'identification des volumes de référence est très opérationnelle, la compartimentation en séquences verticales de volumes de référence (SVR), empilement de réservoirs dont les lignes de contact sont parallèles à une horizontale de référence, est moins évidente.

La représentation par tomographie (GIRARD M.C.83), c'est-à-dire en plans parallèles à la surface du sol, est agréable dès lors que le modelé n'est pas brutal, en gros lorsque la surface du sol n'est pas trop éloignée de l'horizontale de référence. En grands bassins versants, cette opération est réalisable sans trop de difficultés. A l'échelle du petit bassin versant qui nous intéresse, la variation du modelé implique une démarche légèrement différente.

La discrétisation tient compte de plusieurs contraintes :

- ne pas multiplier le nombre de SVR afin d'éviter le problème d'explosion combinatoire (20 SVR en machine donnent au minimum 2000 tranches élémentaires et $n!$ possibilités de transferts latéraux pour n voisins par tranches élémentaires).
- avoir des SVR voisins suffisamment contrastés qui assurent une circulation aisée de l'eau et en particulier permettent de définir des priorités aux transferts latéraux de façon manuelle.
- définir des épaisseurs d'horizon compatibles avec les intervalles de confiance de l'analyse statistique (DIMITRI).
- de plus l'expérience nous a montré qu'il ne sert à rien de découper l'espace en trop petites unités en raison de la perte de puissance des fonctions du modèle, pour la pente par exemple, si l'on découpe un segment de pente en trop petites unités, la pente relative entre les unités n'existe plus. Nous avons pris l'option de rechercher le nombre minima d'unités assurant la continuité entre horizons réservoirs. Par exemple, un horizon réservoir à capacité hydrique très faible peut être représenté dans le modèle avec une plus forte épaisseur si toutefois elle reste dans l'intervalle de confiance admis, dès lors qu'elle assure la continuité des volumes de même nature du SVR voisin.

RUISSELLEMENT SIMULÉ ET OBSERVÉ POUR UN BASSIN DE 3 KM²

figure 12:

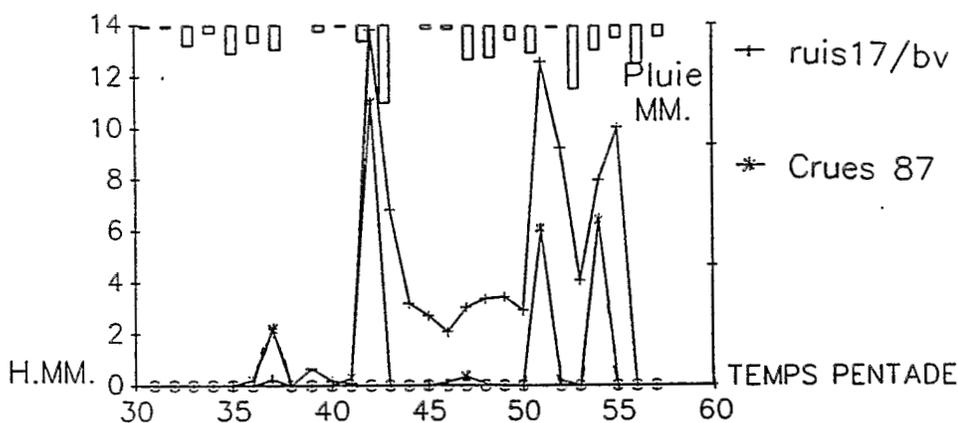
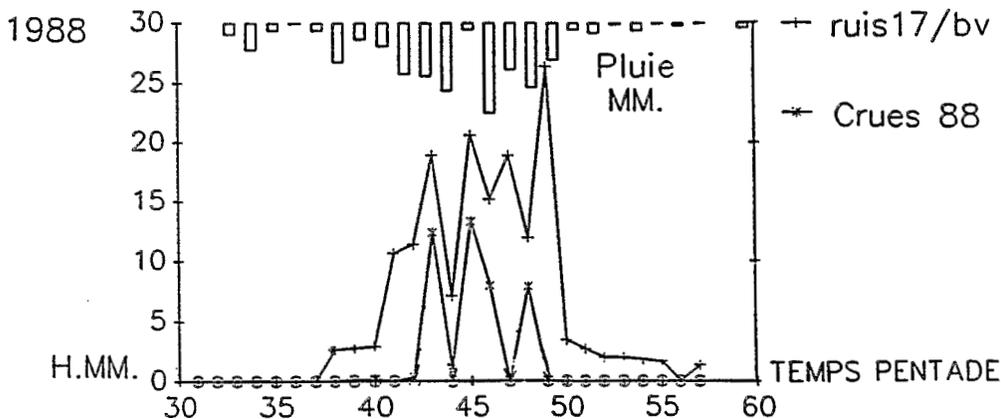


figure 13:



Légendes des graphiques des simulations

- ruis 17/bv : ruissellement simulé du SEVERE 17 en lame rapportée à la surface du bassin figure 12, 13
- Crués... : ruissellement observé pour l'année simulée rapporté au bassin figure 14, 17
- evatran ... : évapotranspiration réelle simulée du SEVERE considéré figure 15, 16, 19
- ETP... : évapotranspiration potentielle du SEVERE considéré
- tl-arr... et tl-dep... : transferts latéraux entrants et sortants relatifs au SEVERE considéré figure 18
- drain... : eau de percolation profonde dépassant 200 cm. pour l'exemple choisi
- remcap... : remonté capillaire (fonction de la distance nappe - enracinement)

La recherche de la meilleure discrétisation en est facilitée :

On choisit deux ou trois lignes de plus grande pente dans le bassin et on ordonne les SVR selon leurs relations de connectivité, ce qui permet de représenter mieux les transferts latéraux et de déterminer par ajustements successifs, les côtes définitives des horizons pour la simulation.

VI Interprétation des simulations du fonctionnement du bassin versant sur les années 87 et 88

L'interprétation des données à partir de chroniques graphiques du fonctionnement global du bassin mais aussi des volumes de références de chaque compartiment SVR permet le contrôle des résultats par les dispositifs de mesures à l'exutoire ou par les mesures d'humidités (neutrons) sur certains sites (parcelles témoins) mais également par l'observation des sites au cours des périodes de précipitation.

Ces mesures permettront l'amélioration de certains paramètres précités, rudimentaires mais vraisemblables.

Les deux années testées pour notre exemple se caractérisent l'une par rapport à l'autre par un fort contraste hydrologique : 87 est une année sèche avec des périodes de sécheresse en début et au milieu de la saison, en revanche 88 est une année plus humide régulièrement arrosée après un démarrage précoce des précipitations mais une interruption un peu précoce de celles-ci.

Les résultats obtenus permettent une classification comportementale des SVR (centres mobiles) ; ceux-ci se regroupent alors, soit selon un comportement unique s'il est très typé, soit avec un comportement donné à une période donnée. Les clés d'interprétation sont alors un jeu de carte des états des SVR sur chaque pas de temps (Fig. 11, 23, 24).

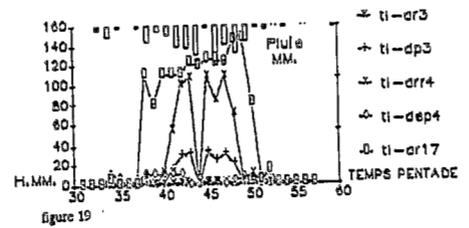
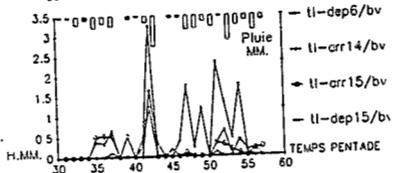
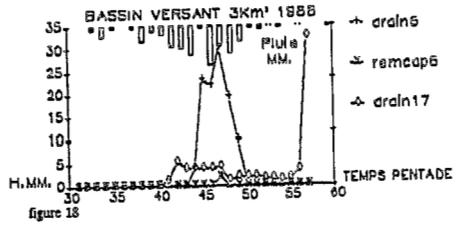
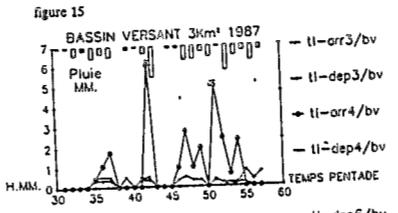
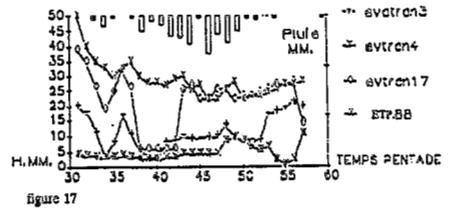
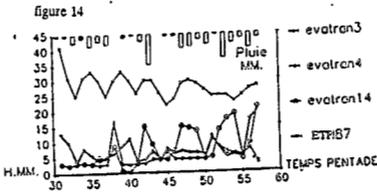
1) L'hivernage 87 (Fig. : 12, 14, 15, 16)

En 87, le modèle ne crée jamais de drainage.

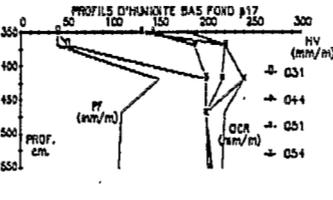
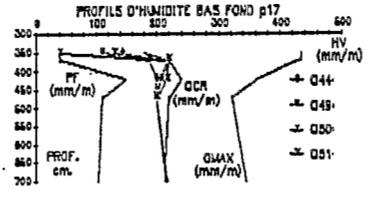
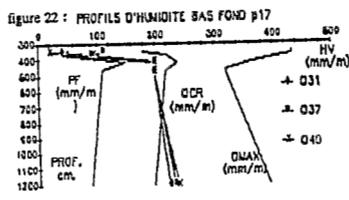
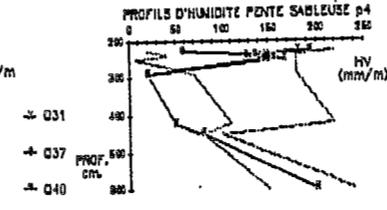
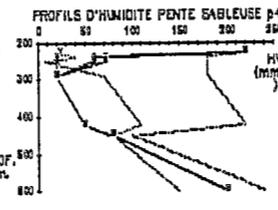
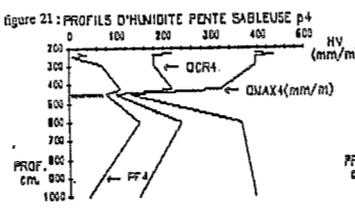
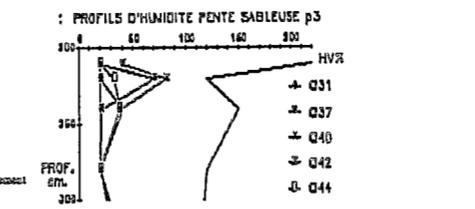
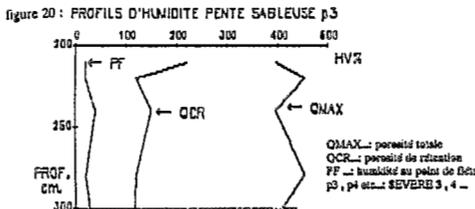
En début de saison des pluies (pentade 31 à 36) les seuls ruissellements observés se situent au niveau des cuirasses et des zones bordières érodées. Une évapotranspiration existe de fait sur les unités de glaciis sableux à végétation peu dense. Celle-ci est beaucoup plus importante au niveau des talwegs à végétation pérenne dense.

Les premières averses (pentades 35 à 37) montrent l'importance déterminante sur la réponse du modèle de l'effet de concentration. A la pentade 37 (l'averse du 2 juillet s'y rapporte), la mare est immédiatement remplie d'eau et le talweg du SVR 15 est parcouru par un fort débit ruissellant, celui-ci est attesté par la modélisation.

L'évapotranspiration, à cette époque, en raison d'un excès de satisfaction hydrique, devient plus faible dans les horizons de surface des talwegs et zones engorgées. Le SVR 4 en pentade 38 présente une forte évaporation du seul fait de son engorgement de surface.



PROFILS HYDRIQUE 87 SIMULES "SOURCE"



Les transferts latéraux apparaissent dans les SVR du glacis versant cuirassé et dans les SVR hydromorphes du bas-fond 6/11/15/16/17.

Des transects à la tarière, en haut de toposéquence perpendiculairement à un petit talweg, montrent que dans le talweg le profil est humecté sur son épaisseur, au moins jusqu'à la cuirasse, qu'une zone de soutirage existe au-dessus de la cuirasse, siège d'une importante circulation d'eau. Latéralement, le versant protégé par les O.P.S. ne présente pas d'humectation au-delà de 10 cm.

La mi-juillet est marquée par une période sèche ; l'évapotranspiration est maximum dans les pédons qui ont reçu de l'eau en haut de pente. La pentade 42 se caractérise par la réception de fortes quantités d'eau relativement étalées sur la pentade, après une pentade précédente déjà pluvieuse. La simulation montre un très fort ruissellement des zones lisses et des zones de concentration mais également un ruissellement des glacis sableux 3/5/9. L'évapotranspiration n'est élevée que sur les aires de concentration des écoulements et les talwegs excepté dans les cas d'engorgement à enracinement insuffisant. Les transferts latéraux ont lieu à partir des glacis sableux de haut de pente et des cuvettes de haut de pente. Les reports de transfert latéraux importants initiés en pentade 42 sont transmis au niveau du SVR 17 à la pentade 43 et jusqu'en 46.

En pentade 54, exception faite du SVR 15, l'évapotranspiration est partout forte dans le talweg et également dans l'ensemble de la zone amont (pedons 6/10/11/12/14 glacis sableux compris). Le ruissellement est partout important dans les hauts de pentes lisses mais également dans les zones engorgées.

En fin de cycle, à l'époque des récoltes (pentade 56), l'activité végétative reste importante dans les talwegs dont la réserve hydrique est suffisante à cette époque aux profondeurs racinaires étudiées et où persistent de hautes herbes. En dehors de ces zones, seul le glacis versant sableux sous cuirasse dispose encore de réserves suffisantes pour alimenter le restant de végétation. On peut dire, à ce stade, que cette végétation est alimentée par l'humidité mise en réserve au toit de la cuirasse.

2) L'hivernage 88 (13-17-18-19)

De la pentade 31 à 36, le modèle simule correctement le remplissage des mares de haut de pente ainsi que l'écoulement à partir de ces mares et les premières concentrations vers le bas fond. On note un engorgement de surface des SVR d'accumulation. Les zones actives du bas fond sont les zones de concentration, d'accumulation et de drainage.

De la pentade 38 à 39 on assiste à des transferts latéraux dans les axes de drainage et à des reports de ruissellement des cuirasses sur les versants. Jusqu'à présent, seuls et pour cause, ont eu une efficacité importante pour l'évapotranspiration les pédons correspondant aux axes de drainages.

De la pentade 45 à 47, en période de crue on obtient un ruissellement intense dans les SVR de concentration. Le démarrage de la végétation à lieu à partir de la pentade 41 (levée) et parvient à sa pleine efficacité à partir de la pentade 47.

A partir de la pentade 51 (2ème sarclage), les seuls SEVERE à ruisseler sont ceux correspondant aux deux mares du talweg principal. A cette période, le SVR 3 ou glacis versant sableux sur cuirasse atteint son maximum d'évapotranspiration. Il bénéficie des reports de ruissellement sous forme de transferts latéraux hypodermiques au contact de la cuirasse, du SVR 2 sus-jacent. Compte-tenu du décalage de report provoqué par le modèle, il y a lieu de tenir compte d'une situation plus favorable en évapotranspiration. Les SVR, très

Interprétation spatiale par période de l'organisation de
(SEVERE) dans le bassin versant

Figure 23

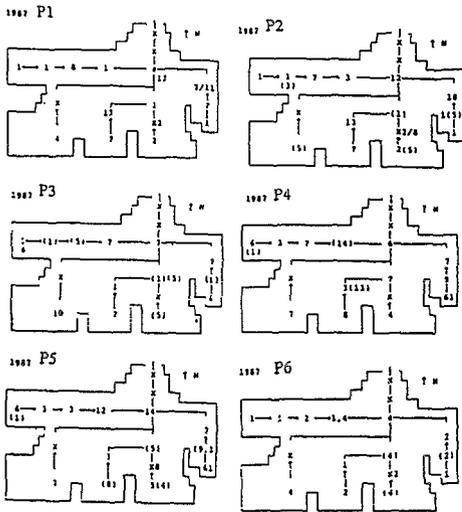
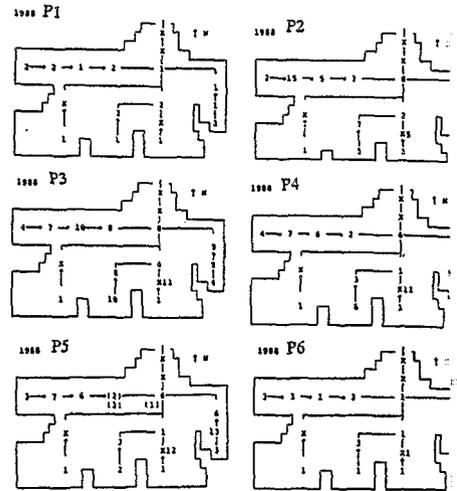


Figure 24



Les chiffres identifiés pour chaque SEVERE à chaque période (P1...P6) isolés au couer des ouvrages 87 et 88 correspondent aux classes obtenues par la méthode des centres mobiles pour chaque année

—CENTRES MOBILES—

Ruissellement Evapotranspiration
Transferts latéraux à l'arrivée et au départ

Selection courante des individus par suppression
des individus de groupe 6 16 17

Effectifs réduits à 331 individus
écart des unités de bas fond
6, 16, 17

Certains groupes sont répartis régulièrement sur chaque période
d'autre répartis dans des positions particulières différentes
au long de l'année hydrologique.

Sur l'analyse des groupes par les centres mobiles pour l'année le tirage présentant les plus fortes caractéristiques de moment d'inertie donne les indications suivantes de contribution des variables aux classes :

Légende figure
23 et 24

REGIMES HYDRIQUES

87

Interprétation

- La classe 1 est dominée par une évapotranspiration élevée mais tous autres transferts nuls
- La classe 2 est caractérisée par un ruissellement nul à très faible aucun transfert latéraux
- La classe 3 est caractérisée par l'absence de ruissellement d'évapotranspiration et de transferts latéraux
- La classe 4 est caractérisée par un ruissellement très important quelques arrivées de transferts latéraux mais peu d'évapotranspiration
- La classe 5 par un ruissellement intense une évapotranspiration nulle
- La classe 6 est caractérisée par des arrivées de transferts latéraux assez importantes et un ruissellement intense
- La classe 7 est dirigée par les départs en transferts latéraux et les faibles ruissellement
- La classe 8 présente une activité d'évapotranspiration particulièrement forte.
- La classe 9 quant'à elle est dominée par des transferts latéraux intenses et une faible évapotranspiration et un ruissellement faible

REGIMES HYDRIQUES 88

- La classe 1 est dominée est sujette à un ruissellement très fort et à une évapotranspiration très faible
- La classe 2 a aussi une évapotranspiration très faible mais un transfert latéral entrant très fort
- La classe 3 a une évapotranspiration très faible mais des transferts latéraux sortant très forts
- La classe 4 a une évapotranspiration forte et des transferts latéraux nuls
- La classe 5 a un ruissellement nul une évapotranspiration élevée des transferts latéraux entrant forts et sortant très faibles
- La classe 6 a un ruissellement très faible une évapotranspiration très forte et des transferts latéraux sortant faibles
- La classe 7 a une évapotranspiration très faible à nulle et des transferts latéraux élevés

favorables en évapotranspiration, sont ceux constitutifs des talwegs et aires de concentrations notamment les aires de concentration autour des cuvettes de l'amont.

En conclusion à ces interprétations on constate que les versants sableux sont peu humectés et rapidement asséchés en 87 et que les cuvettes et bas-fond ont seuls, garanti des aléas. En 1988, les réserves de bas-fonds en fin d'hivernage sont bonnes mais les engorgements importants en début de cycles et d'abondance des transferts latéraux gêne les cultures. L'année 88, marquée par l'abondance des précipitations efficaces relativement à 87, s'est caractérisée également par une grande abondance des transferts latéraux et un drainage intense dans les axes d'écoulement, les cuvettes et les bas-fonds.

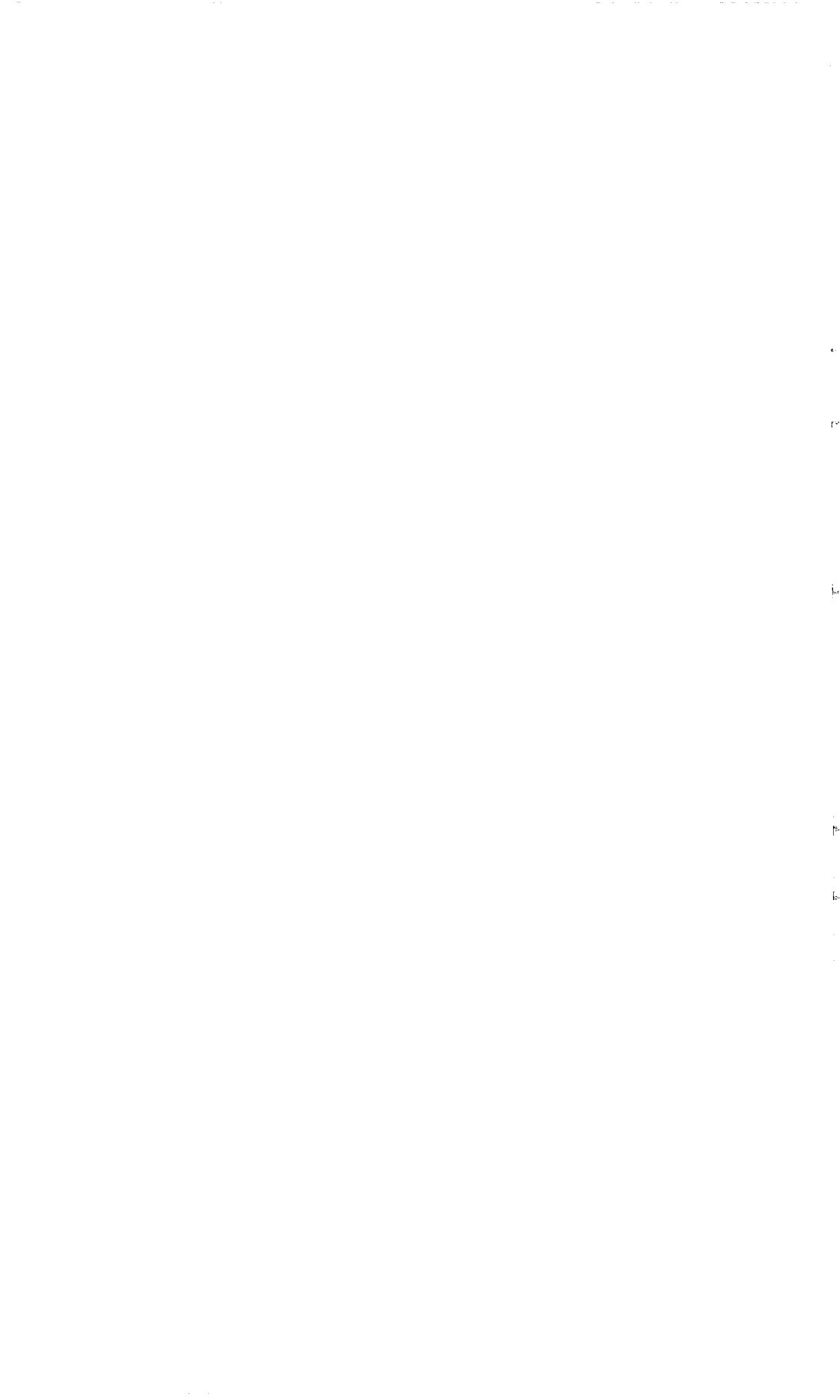
Les enseignements, issus des simulations, sont, qualitativement, grossièrement conformes aux observations, mais sont affectées particulièrement en ce qui concerne les simulations de lames ruisselées d'exagérations notables de leur puissance. Néanmoins, malgré le déficit de lame infiltrée qui en découle, le fonctionnement du sol ne paraît pas en être trop affecté, du moins en ce qui concerne les couches superficielles, les seules dont nous ayons effectivement quelques informations. Ceci nous permet cependant de penser qu'à la condition d'harmoniser les prospections de données de base et les vérifications de terrain dans l'esprit du modèle, ce qui diffère peu des contraintes d'étude ordinaire, il est possible de bien calibrer les paramètres.

VIII CONCLUSIONS

S.O.U.R.C.E. permet, à partir d'une approche naturaliste du bassin versant, de modéliser le comportement hydrologique des organisations pédologiques. L'exemple présenté rend compte du fonctionnement hydrologique et hydropédologique d'un petit bassin versant de savane soudano sahélienne. Le modèle selon l'échelle de définition retenue pour le milieu naturel simule le fonctionnement des compartiments identifiés: micro bassins amonts, talwegs, bas fonds cultivés ou non, versants cultivés ou non, aménagés ou non, chanfrein battants érodés ou non. Les résultats sur deux années hydrologiquement très contrastées établissent les situations d'aléa climatiques de chacune d'elles (versants asséchés en 1987, bas fonds engorgés début 1988 et assurant seuls les réserves en fin d'hivernage) et les contextes favorables aux cultures.

On montre, par cette approche, qu'entre autres, la recherche opérationnelle offre des outils de modélisation rapides et simples à mettre en oeuvre et ne nécessitant pas nécessairement des callages mathématiques dispendieux. Néanmoins, la validation du modèle, une bonne identification de certains paramètres, nécessiterait une amélioration des protocoles de mesures adaptées.

Que nos camarades de l'ORSTOM (1) qui nous ont permis la réalisation de ce travail et l'accès à leurs données en soient chaleureusement remerciés.



BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., RIBSTEIN P., VALENTIN C.-1985- : L'infiltration, quels facteurs ? Simulation de pluies au BURKINA FASO, EXPLICATIFS, ORSTOM
- ARRIVETS J.-1972- : Résultats de rizicultures sans aménagement en zone soudanienne, exemple de bas-fonds du centre BURKINA FASO AGR.TROP.
- BIZE J.-1966- : Application d'observations géomorphologiques et hydrodynamiques à la prospection des nappes des terrains d'altération en Côte d'Ivoire et en Haute Volta - BURGEAP/CIÉH .
- BOULAINÉ J.-1977- : Le régime hydrique du sol - Cours INA/PG - Extrait de "Hydrologie" - .
- CHAROY, FOREST, LEGOUPIL -1978- : Evapotranspiration, besoins en eau des cultures, relations eau-sol-plante IRAT 1978
- CHAUVEL A., PEDRO G., TEISSIER D.-1976- : Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques, études expérimentales. Sciences du sol 1976 N.2 AFES
- CICERI M.-F., MARCHAND B., RIMBERT S. -1977- : Introduction à l'analyse de l'espace ; Masson, collection de géographie applicable (173 p.)
- COLLINET J., VALENTIN C. : Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle Cah. ORSTOM Scé PEDO Vol XXII N. 4 1979 28 3-328.
- CORNET -1981- : Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au SENEGAL. Thèse USTL. ORSTOM
- DUCHAUFOR P., SOUCHIER B.-1983- : Pédologie Tome 1 Pédogenèse et classification ; Masson.
- DUFAURE L., GIRARD M.C.-1982- : Présentation d'un modèle de transfert de l'eau dans le sol. SOURCE INAPG-INRA.
- FRANQUIN P., FOREST F.-1972- : Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle en terme de bilan hydrique. Agro. Trop. 22,1
- GAVAUD M., BLANCANAU P., DUBROEUCQ D., POUYLLAU M.-1986- : Les paysages pédologiques de l'Amazonie vénézuélienne. Cah. ORSTOM , série Pédol.,XXII
- 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'Etat 430 p. Paris Grignon.

- GIRARD M.C., DUFAURE L.-1988- Le modèle SOURCE . "Modèles hydrologiques" INRA Calvet éditeur.
- GUILLET F.-1987- Rapport de mission pédologique à BIDI - SAMNIWEOGO ; ORSTOM/CIRAD 18p.4 cartes.
- GUILLET F., LAMACHERE J.M., SABATIER J.L., SERPANTIE G. -1990- : L'aménagement des conditions du ruissellement sur les pentes cultivées soudano-sahéliennes ; résultats d'une approche triple enquêtes, expérimentation, modélisation. Communication du colloque UREF/AUPELF OUAGADOUGOU.
- HILLEL D. -1974- : L'eau et le sol, principes et processus physiques Ed. VANDER 1974
- KING D., GIRARD M.C. -1988- : Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique : DIMITRI; science des sols vol.26 n°2.
- LELONG F. -1966- : Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altérations tropicales conséquences pour la pédogénèse. Sciences de la terre XI N° 2 p. 201 à 244.
- PEDRO G. -1989- L'approche spatiale en pédologie ; fondement de la connaissance des sols dans le milieu naturel ; réflexion liminaire. Sciences du sol vol. 28 Juillet, Août, Septembre, bull. AFES
- POSS, VALENTIN-1983- : Structure et fonctionnement d'un système Eau-Sol-Plante-Végétation : Une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola - C.I.) Cah. ORSTOM série Pédologie. Vol. XX N. 4, - 341360.
- RAUNET M.-1985- : Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Z. Geomorph. MFSuplbd ; 52.25.62 Berlin Stuttgart -
Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative Agr. Trop. 1985, 40-3
Les terrains agricoles du bas glacis de la vallée de la Volta Noire Agr. Trop. 38-3 1984.
- ROOSE E.-1985- : Terrasse de diversion ou micro-barrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan Ouest Africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. Maracay - Brésil-
-1980- : Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale 1980. Thèse D (ES) Orléans.
- SERPANTIE G., MARTINELLI B.-1986- : La confrontation paysans aménageurs au Yatenga. Analyse d'un agronome et d'un ethnologue ; D.S.A. actes du troisième séminaire Aménagement hydro-agricoles et systèmes de production Montpellier 22p.

TRICARD J. : Géomorphologie des régions chaudes - 1974

VALET S. : Première approche du fonctionnement hydrique des paysages agraires au Siné Saloum 1985
IRAT/ISRA (Institut Sénégalais de Recherche Agronomique).

- 1.GIRARD M.C., DUFAURE L.-1988- Le modèle SOURCE . "Modèles hydrologiques" INRA Calvet éditeur
- 2.PEDRO G.-1989- L'approche spatiale en pédologie; fondement de la connaissance des sols dans le milieu naturel; réflexion liminaire. Sciences du sol vol.28 Juillet, Août, Septembre, bull. AFES
- 3.GAVAUD M., BLANCANAU P., DUBROEUCQ D., POUYLLAU M.-1986-: Les paysages pédologiques de l'Amazonie vénézuélienne. Cah.ORSTOM , série Pédol.,XXII
- 4.CICERI M.-F.,MARCHAND B.,RIMBERT S. -1977- : Introduction à l'analyse de l'espace; Masson, collection de géographie applicable (173 p.)
- 5.GUILLET F. -1987- Rapport de mission pédologique à BIDI - SAMNTWEOGO; ORSTOM/CIRAD 18p.4 cartes.
- 6.GIRARD M.C. -1983- : Recherche d'une modélisation en vue de représentation spatiale de la couverture pédologique. Sols n°12, INAPG, Grignon, 429p..
- 7.KING D.,GIRARD M.C. -1988-: Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique: DIMITRI; science des sols vol26 n°2.

DISCUSSION

Discussion

G.Aubert souhaite faire une remarque à propos de ce qui a été dit par A.Laraque le matin, qui a cité en début de son exposé le tableau donné par la FAO sur les limites acceptables de la qualité des eaux d'irrigation. Suite à sa longue expérience, plus de cinquante ans !, sur l'étude des sols salés en Afrique du Nord, Tropicale et surtout Occidentale, G.Aubert n'est pas entièrement d'accord sur le caractère définitif des règles d'application de ces normes.

Sur la conductivité électrique : ce qui est donné par la FAO est assez bon, et si l'on a affaire à un sol très sableux comme dans le Sud Tunisien ou de l'île de Djerba, on utilise depuis des dizaines d'années, des eaux allant jusqu'à 6 et 7 millimohs/cm, soit 6000 à 7000 micro Siemens/cm, parfois plus...

Sur les limites concernant l'alcalinité des eaux d'irrigation il faut être prudent. Car l'alcalisation est infiniment plus grave : il est difficile de récupérer le sol, une fois alcalisé. Les règles d'utilisation peuvent être extrêmement différentes du fait de la nature minéralogique des argiles du sol. Par exemple, on peut utiliser des eaux fortement alcalines avec certaines kaolinites, ou des montmorillonites en même temps que des oxydes de fer. Par contre avec des mélanges de kaolinite et de produits argileux colloïdaux gonflants comme dans la vallée du Niger, il faut utiliser des eaux très peu alcalines.

A.Laraque remarque que son exposé ne contredit pas ces observations. Il a pris les normes moyennes proposées par la FAO. Mais en fait, ce modèle pourra fonctionner avec les impératifs que vont imposer les agronomes et pédologues. Si un agronome et/ou un pédologue considère, en fonction du sol et de la plante qu'il pense cultiver, que la conductivité limite est de 2000 ou 3000 micro Siemens/cm, nous retiendrons cette valeur comme limite. Ce qu'il faut montrer, c'est qu'il est indispensable de faire tourner les modèles géochimiques, afin d'évaluer l'évolution de la conductivité avec le plus de précision possible et envisager des précipitations salines. Voilà le message.

Les normes de la FAO sont, bien sûr, globales. En fonction de chaque région étudiée, de chaque sol, de chaque type de cultures, on aura des seuils de ces paramètres qui seront différents.

J.Y. Loyer rappelle que les pédologues qui ont travaillé en Afrique du Nord, à partir de 1958, ont proposé de nouvelles normes qui introduisaient des plages d'utilisation des eaux qui allaient de 7 à 20 milli-Siemens/cm, soit 7000 à 20000 micro-Siemens/cm. Ce sont des normes encore trop simplistes qui ne tiennent pas compte exactement des sols et, malheureusement, qui n'ont pas été affinées depuis une trentaine d'années.

On est en train de revoir cette question des normes de qualité d'eaux utilisables pour l'irrigation, en fonction de la nature des sols, du type de plante et de son cycle.

A. Laraque croit aussi qu'il faut insister sur ce que vient de dire J.Y. Loyer : en irrigation, il faut toujours garder à l'esprit le fait qu'on a affaire à des sols spécifiques, à des plantes, des eaux qui ont un faciès bien particulier, et il faut bien voir les liaisons entre ces trois ensembles, avant de conclure à l'opportunité de telle ou telle pratique d'irrigation.

J.Y. Loyer veut insister également sur le fait qu'il est difficile, en cas de dépérissement d'une plante pour cause évidente de salinité excessive des eaux, de faire (i) la part de la toxicité spécifique liée à l'assimilation de l'ion chlorure, (ii) et la part de la nuisance de nature physiologique liée à l'existence, dans le système Eau Plante, de pressions osmotiques peu compatibles avec le maintien de son alimentation en eau. La part de chacune des deux nuisances est difficile à cerner.

G. Pedro constate que A. Laraque a bien montré l'importance de la qualité de l'eau qu'on pouvait utiliser pour l'irrigation, et de la stratégie à suivre pour qu'elle soit préservée le plus possible. Ces recommandations sont-elles suivies d'effet ?

A. Laraque rappelle que le modèle hydro-chimique développé, les stratégies d'utilisation des réserves des "açudes" qui en découlent, sont récents ou en cours d'identification. Les applications, en particulier par la sensibilisation de la population, seront à long terme.

Rien que pour l'utilisation même de l'eau en irrigation, il y a blocage psychologique de la part de la population. Celle-ci hésite à utiliser cette eau, considérée comme un trésor à garder le plus longtemps possible pour traverser la saison sèche. En fait cette eau est perdue, devient même inutilisable voire nocive, alors qu'utilisée au début de son stockage elle pourrait servir à l'irrigation et être transformée en productions maraîchères...

E. Cadier dit que ces conclusions doivent être incluses dans un manuel de conception, de construction et de gestion des "açudes" ; cet ouvrage en préparation sera mis à la disposition des organismes de développement qui contrôlent tous les projets et leurs financements et on peut envisager une sensibilisation mais qui ne pourra être que progressive.

F. Monlod récapitule d'abord, à propos de l'aménagement de la vallée du Sénégal, les possibilités de contrôle et les objectifs de l'aménagement du système d'eau qui ont été présentés.

Les possibilités de contrôle et de modulation de l'hydrogramme du fleuve Sénégal ne s'exercent qu'à partir du barrage de Manantali.

Les objectifs envisagés concernent :

l'irrigation à l'aval, prévue pour le grand aménagement.

la production d'électricité, la navigation etc.,

l'amélioration des cultures de décrue par l'utilisation de l'hydrogramme maîtrisé dans les cuvettes inondables ; ce dernier et nouvel objectif est hydrologiquement peu compatible avec les précédents.

On voulait au départ s'affranchir le plus vite possible des cultures de décrues pour mettre en valeur de grands périmètres irrigués.

On insiste aujourd'hui sur la possibilité offerte de renforcer les cultures traditionnelles.

F. Moniod pense que la démarche pourrait paraître inconséquente, à moins que L. Séguis ne puisse en donner des raisons ?

L. Seguis convient qu'effectivement, à la suite d'un état des lieux, l'OMVS (Organisation de Mise en Valeur du Sénégal) et les trois Etats riverains recherchent à mieux valoriser les atouts offerts, dont la possibilité de crue artificielle, par la période transitoire avant aménagement complet, dont on s'aperçoit qu'elle risque de durer plus longtemps que prévu.

En effet, l'usine électrique n'est toujours pas construite, et les besoins effectifs en irrigation ne sont pas aussi importants qu'envisagé. D'autre part, on observe que le paysan ne se lance pas dans le tout-irrigué et conserve toujours une partie de ses champs en cultures traditionnelles.

D'où réflexion et définition d'une nouvelle stratégie d'exploitation : il paraît intéressant d'améliorer les cultures traditionnelles dans les zones les plus basses. Des expériences sont faites en Mauritanie par exemple autour du lac de Rkiz où l'on a fait des aménagements en submersion contrôlée.

On atteint un rendement de 2,5t/ha avec du sorgho de décrue. Le coût des aménagements n'est pas connu.

F. Moniod se demande si, en vue de la modélisation physique de l'onde de crue dans ces surfaces inondables, il existe une connaissance suffisamment précise de la topographie de ces zones inondées pour pouvoir caler éventuellement un modèle de stockage et de propagation ?

L. Seguis confirme qu'un modèle a pu être développé pour l'inondation des cuvettes, par SOGREAHA.

On dispose de fonds topographiques assez précis, avec des équidistances de l'ordre du mètre, et de points cotés intermédiaires.

M. Roche peut apporter des précisions qui intéressent (i) l'historique des conceptions en matière de priorité des objectifs hydro-agricoles des

aménagements (ii) et la qualité des supports topographiques pour la modélisation hydrodynamique.

types d'irrigation

Le premier point remet à l'ordre du jour tout un débat sur l'opportunité de développer d'abord tel ou tel type d'irrigation. Au début des années 60 et bien avant, la question n'était pas de savoir s'il convenait de ménager une période transitoire avec culture de décrue avant de passer à une irrigation totale, mais s'il était opportun de commencer à faire d'emblée de l'irrigation en l'absence de toute tradition et d'éducation préalable aux pratiques nécessaires. Pratiquement l'accent était mis au départ sur les conditions de l'amélioration des cultures de décrue. C'était l'objectif d'études conclues vers les années 71/72.

Plus tard, le problème a intéressé les Nations Unies et la FAO, qui a fait une nouvelle étude aboutissant aux modèles de la SOGREAH.

Modélisation hydrologique et topographie

En ce qui concerne les possibilités techniques de calages topographiques des modèles de propagation et d'inondation, à l'époque, elles étaient excellentes. La Mission a fait faire des relevés au 1/2000e sur toute la région ce qui était largement suffisant, avec des équidistances en altitude nettement inférieures à 50 cm, et parfois de 10 cm.

C'est là-dessus qu'a été construit le modèle d'irrigation de décrue dans la vallée. Et les données étaient tellement intéressantes et détaillées que la SOGREAH avait du mal à accorder le modèle et les écoulements : le modèle, pour une fois, était légèrement en-dessous de ce qu'on pouvait tirer des études topographiques.

J. Rodier rappelle que lorsqu'a été faite la prospection hydro-électrique en Guadeloupe et à Grande Terre, la position officielle des ingénieurs était qu'il n'était pas possible d'aménager des réserves importantes dans des conditions pareilles. On n'arriverait pas à bout des problèmes d'étanchéité.

Pour des réserves moins importantes, deux millions ou trois millions de m³, c'est peut-être plus facile.

Il a été fait référence, par M., Morell, à deux réserves existantes dans la Grande Terre et on a parlé d'un barrage. Y a-t-il eu des problèmes d'étanchéité ?

M. Morell confirme que le barrage n'existe pas en fait : c'est un projet.

Pour l'instant, c'est le BRGM qui est chargé d'en étudier l'étanchéité. Le problème existe effectivement, puisque nous constatons des pertes au niveau des lits mineurs.

F. Molle se demande, à propos de la salinisation, si l'on peut penser que l'absence de problème en Guadeloupe, comme à Cuba, est simplement liée au fait que l'irrigation a débuté il y a seulement cinq ans ? N'y a-t-il pas de remontées de nappes et de sels ?

Y.M. Cabidoche confirme que l'on a la chance, par le couplage Basse Terre/Grande Terre, la Basse Terre fournissant l'eau, que celle-ci soit de conductivité extrêmement faible. C'est une grande chance qui n'existe pas dans toute la Caraïbe, en particulier à Cuba.

Dans le cas des périmètres de Guadeloupe qui sont développés sur des calcaires coralliens, l'altération a donné des argiles du type smectites (60 à 80 méq/100gr de charges en cations) saturées par le calcium au départ.

A ce jour, on n'a pas vu d'évolution significative des garnitures cationiques sous irrigation.

Par contre, c'est quelque chose qui mérite d'être suivi dans le cas de la Martinique où les garnitures cationiques sont plus défavorables au départ et où, de plus, les eaux d'irrigation provenant des bassins versants d'alimentation peuvent comporter certains risques.

F. Molle pense que ces risques diminueront avec la maîtrise des taux d'irrigation. Quelles sont donc les structures et les conditions de gestion des périmètres en Guadeloupe ?

Y.M. Cabidoche précise qu'il y a deux types de gestion.

Les périmètres industriels sont bien structurés ; les personnels chargés du contrôle de l'irrigation lisent des compteurs de débits qui sont placés à chaque borne, ils savent estimer la pluviométrie,....et se sont appropriés tout un savoir élémentaire.

Quant aux périmètres paysans, ils sont soumis à la vigilance souvent fantaisiste de l'exploitant. Il y a une borne pour trois ou quatre exploitations contiguës et les compteurs ne sont pas relevés.

A. Musy souhaite savoir l'origine des chiffres mentionnés sur Cuba : 900 000 ha de sols affectés par le sel. Est-ce que ce sont des chiffres reconnus officiellement par le gouvernement cubain ?

Y.M. Cabidoche confirme que ces valeurs ont été citées à l'occasion d'un Congrès, qui a eu lieu à la Havane en 1985 sur le thème "Sols et Eaux". L'exposé a été fait par le chef du Service des Etudes des Sols de Cuba. Ce sont des chiffres crédibles. Les communications sont présentées dans la collection Colloques et Séminaires de l'ORSTOM.

F. Molle revient sur l'existence, à Cuba, de la salinisation de 500 000 ha de sols, à partir de la nappe.

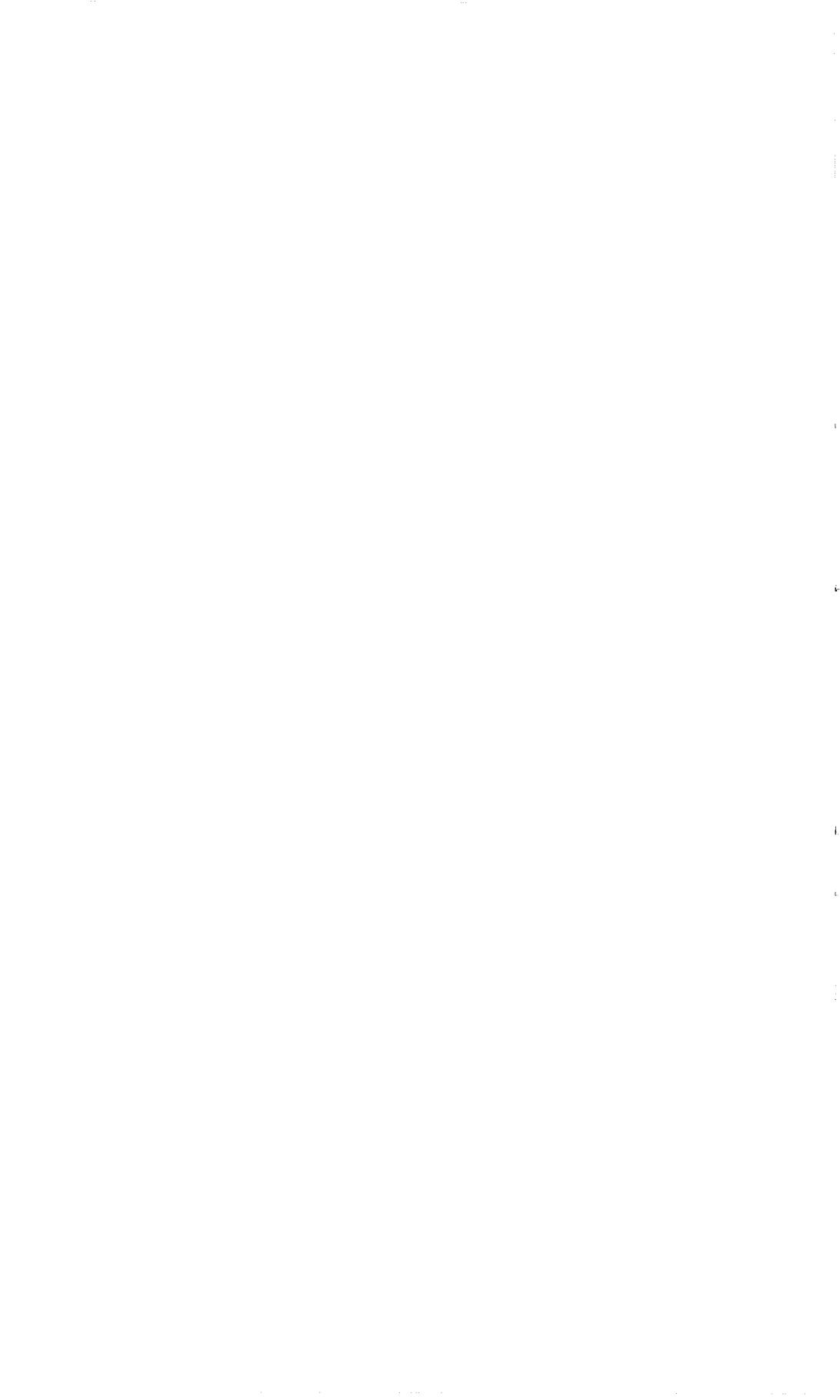
Des techniques de prévention ou d'amélioration sont-elles mises en oeuvre ?

Y.M. Cabidoche nous informe du fait qu'il y a, à l'heure actuelle, un programme de coopération entre l'INRA et plusieurs Institutions cubaines sur les techniques de drainage ; ces programmes comportent des essais de drain enterré, sans doute pas dans l'espoir de voir la nappe générale se rabattre - car la conductivité hydraulique des argiles est extrêmement faible - mais au moins de permettre le lessivage des couches superficielles et l'infiltration à l'occasion de tranchées à écartement périodique. La récupération semble possible.

**VARIABILITE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU
DE LA GUADELOUPE**

Par

M. MORELL



Variabilité et gestion des ressources en eau de la Guadeloupe

par

Marc Morell ¹

Résumé

La Guadeloupe est un archipel caractérisé par une grande diversité de reliefs, de végétations et de sols, et par une forte variabilité spatiale de la pluviométrie. La répartition des ressources en eau de surface est très inégale et leur exploitation nécessite une attention particulière pour satisfaire la demande et respecter l'équilibre des écosystèmes.

En période de sécheresse, les ressources en eau de surface sont inexistantes en Grande-Terre, et limitées en Basse-Terre à des écoulements relativement faibles. Or, la demande en eau potable, touristique et surtout agricole, localisée pour les deux tiers en Grande-Terre, s'accroît sensiblement pendant ces périodes déficitaires en précipitations.

La confrontation des ressources disponibles et des besoins en eau potable et à usage agricole nécessite d'aménager l'exploitation de l'eau en régularisant sa production et en acheminant une fraction des ressources de la Basse-Terre vers la Grande-Terre. Il devient impératif de considérer la ressource en eau de façon globale et d'en prévoir une gestion rigoureuse.

Une synthèse régionale des ressources en eau de surface porte sur les données hydropluviométriques collectées jusqu'en 1978. L'information hydrométrique acquise représente aujourd'hui plus de 400 stations années. Des études approfondies de la répartition spatio-temporelle des précipitations et des séries climatiques, concourent à l'analyse des séquences déficitaires et à la prédétermination des sécheresses exceptionnelles.

Actuellement, les travaux des hydrologues du Centre ORSTOM de Pointe-à-Pitre s'orientent vers la modélisation de la production et de la gestion de la ressource. Appliquant leur recherche à la Guadeloupe, ils envisagent le transfert des acquis à d'autres milieux insulaires de la Caraïbe.

A l'occasion de l'exposition "Vive l'eau" de la Cité des Sciences et de l'Industrie, un document vidéo présente "L'eau dans l'île".

¹ Ingénieur d'études
Directeur du Centre ORSTOM de la Guadeloupe
ORSTOM - BP 1020 - 97178 Pointe-à-Pitre

"L'eau dans l'île"

Le film vidéo "L'eau dans l'île" a été réalisé dans le cadre de l'exposition "Vive l'eau" qui a lieu à la Cité des Sciences et de l'Industrie. Projeté sur une maquette en trois dimensions de l'île, il présente certains aspects liés à l'exploitation de l'eau à des fins agricoles en Guadeloupe. Voici le texte intégral du commentaire :

"L'ouragan Hugo, le troisième à dévaster l'île en un siècle, a récemment placé la Guadeloupe au devant de l'actualité. Formé sur les côtes africaines, Hugo s'est renforcé en traversant l'Atlantique. L'œil de l'ouragan, zone de calme autour de laquelle tournoient des vents très violents, a balayé la Grande-Terre puis le Nord de la Basse-Terre, dans la nuit du 16 au 17 septembre 1989. Des rafales de près de 300 km/h ont causé des dommages considérables.

Si les catastrophes naturelles, ouragans, séismes, éruptions volcaniques constituent une menace permanente pour les îles, le manque d'eau représente aussi un péril majeur qu'on aurait tort de sous-estimer. En effet, l'évolution des modes de vie, le développement économique et touristique de l'île, l'amélioration des productions agricoles ont augmenté sensiblement les besoins en eau. Cette demande, en croissance rapide, implique de gérer au mieux les ressources disponibles. Il faut préserver la qualité de l'eau, et maintenir dans les rivières les débits minimums nécessaires à l'équilibre écologique du milieu aquatique.

La Guadeloupe est caractérisée par une forte diversité des paysages, conséquence de reliefs, de végétations, de sols et de conditions climatiques très variés). Elle est composée de la Basse-Terre, île volcanique montagneuse et boisée, la Grande-Terre au faible relief, Marie-Galante, la Désirade, les Saintes et les "îles du Nord", Saint-Martin et Saint-Barthélemy.

Son climat tropical océanique est régulé par un flux permanent d'alizés d'Est, chauds et humides. On distingue deux saisons : le carême, saison relativement sèche, de janvier à avril, et l'hivernage, saison des pluies, de mai à décembre. Alors que sur l'océan, il tombe, en moyenne, 1 mètre d'eau par an, les précipitations sur les îles sont plus importantes du fait de l'élévation de l'air par réchauffement au-dessus des terres pendant la journée, et du refroidissement des masses nuageuses qui doivent s'élever pour franchir les montagnes. Ainsi, la pluviométrie est généralement comprise entre 1 et 1.5 mètre sur les petites îles : Marie-Galante, la Désirade, les Saintes, Saint-Martin ou Saint-Barthélemy. Ces îles n'ayant aucune rivière permanente, les besoins en eau sont satisfaits par des citernes individuelles de récupération d'eau de pluie, par des forages, par des retenues d'eau artificielles, et, surtout, par des usines de dessalement. De plus, la Désirade sera prochainement alimentée par une conduite sous-marine.

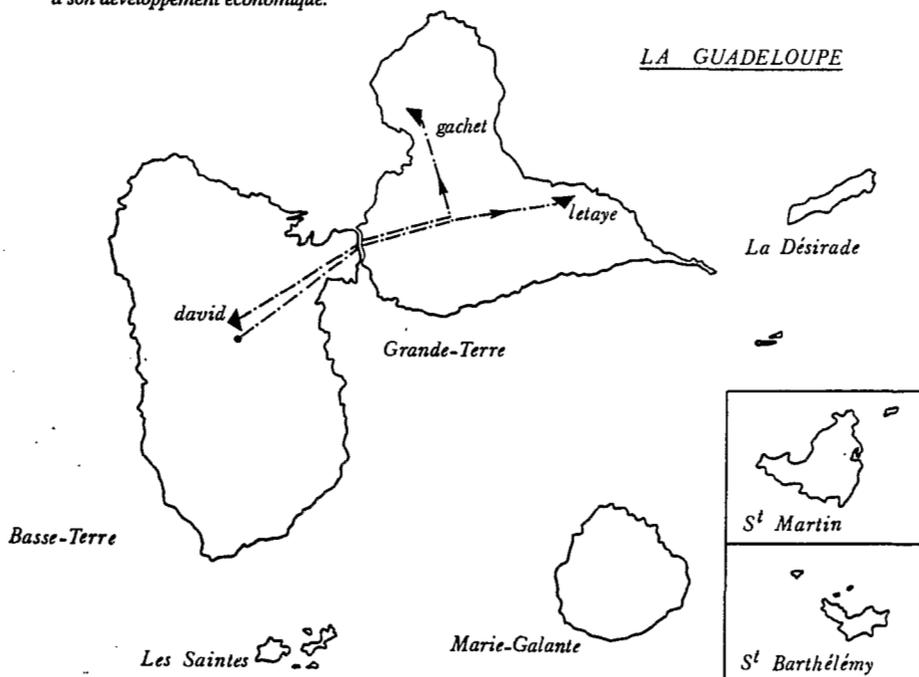
La Grande-Terre a une pluviométrie moyenne de l'ordre de 1,5 mètre. Ses sols, formés de l'altération des projections volcaniques sur un sous-bassement de calcaires récifaux, sont fertiles. Leur forte teneur en argiles gonflantes assure une réserve d'eau importante, que seules les plantes à enracinement dense et profond, comme la canne à sucre, parviennent à utiliser. Aussi, la canne constitue-t-elle, en Grande-Terre et à Marie-Galante, la culture traditionnelle. Comme sur les petites îles, les ravines ne coulent qu'à la suite de fortes averses. Aussi, les ressources en eau de surface de la Grande-Terre sont inexistantes pour subvenir aux besoins des cultures lorsque celles-ci subissent de fortes sécheresses. La Basse-Terre, en revanche, est abondamment arrosée et les précipitations atteignent 11 mètres par an sur les sommets de la Soufrière. Les sols ont une réserve en eau importante et facilement exploitable par les plantes. La production bananière, première culture d'exportation, occupe les versants du massif. Les nombreuses nappes d'eau souterraines sont approvisionnées par l'infiltration d'eau de pluie, favorisée par la présence de la forêt. En période de basses-eaux, ces nappes soutiennent le débit des cours d'eau permanents qui drainent les bassins sur les versants montagneux.

Les chercheurs de l'ORSTOM travaillent à l'inventaire des ressources en eau de surface, et, en collaboration avec l'INRA, à la définition des conditions optimales de leur gestion. Grâce à des stations de mesure observées depuis plus de 30 années, les hydrologues de l'ORSTOM étudient la répartition des précipitations et les écoulements des cours d'eau. Le réseau de surveillance pluviométrique et hydrométrique est constitué d'appareils automatisés. Equipés d'émetteurs ARGOS, ils transmettent par satellite l'information qui est traitée au Centre ORSTOM de Pointe-à-Pitre. Sur la base des données acquises, les hydrologues ont réalisé la synthèse régionale des ressources en eau de surface de la Guadeloupe.

L'agriculture bénéficie d'un climat chaud et humide à fort ensoleillement, mais des périodes de sécheresse prolongée nécessitent une irrigation d'appoint. C'est pourquoi, le programme d'irrigation, engagé par le Conseil Général et la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, doit permettre d'améliorer la qualité de la production bananière en Côte-au-vent, d'augmenter la productivité de la canne à sucre, et de développer le maraîchage et l'élevage, en Grande-Terre.

Les ressources en eau, sont, on l'a vu, essentiellement localisées en Basse-Terre, véritable château d'eau de la Guadeloupe. Mais, en période d'étiage, les écoulements naturels des rivières de la Basse-Terre ne suffisent pas à la demande croissante. C'est pourquoi, les cours d'eau doivent être équipés de retenues de stockage. Actuellement, une conduite issue de la prise d'eau à la cote 130, et passant en siphon la rivière Salée, permet d'alimenter en Grande-Terre les barrages de Letaye-Amont et de Gachet. Ces retenues permettent de stocker les importantes quantités d'eau destinées à l'irrigation.

La complexité des problèmes de gestion de ces aménagements implique leur simulation sur ordinateur. Cette modélisation consiste à simuler le fonctionnement d'un système d'eau sur une période de plusieurs années, pour évaluer les performances des aménagements projetés. Le logiciel "HYDRAM", développé par l'ORSTOM avec le soutien du Conseil Général, constituera, dès 1991, une aide à la conception des hydro-aménagements de la Guadeloupe. Ainsi, ce département d'Outre-Mer se donne les moyens de planifier la gestion de ses ressources en eau, élément indispensable à son développement économique. "



Au-delà du film, quelques précisions...

La place de l'agriculture dans l'économie guadeloupéenne

L'utilisation du sol en Guadeloupe se répartit sur 1 700 km² : forêt (41 %), savanes et friches (12 %), zones urbaines (14 %) ; la surface agricole utile représente 33 % du territoire.

La culture de la banane, implantée sur 6 500 ha, assure une production régulière d'environ 120 000 tonnes étalée sur l'année avec un débouché à l'export garanti ; elle dispose d'une organisation professionnelle performante et de recherches spécialisées (IRFA). La culture bananière est cependant très exposée aux tempêtes qui frappent régulièrement la Guadeloupe.

La culture de la canne à sucre a été introduite au 17^{ème} siècle. Elle demeure encore aujourd'hui une culture traditionnelle répartie sur 15 000 ha à Marie-Galante, au Nord-Est de la Basse-Terre, et en Grande-Terre. La production annuelle moyenne au cours de cette décennie atteint près de 800 000 tonnes de cannes fournissant 70 000 tonnes de sucre. Le rendement actuel moyen de 58 tonnes par hectare et par an peut être relevé à plus de 70 tonnes par hectare et par an, en améliorant le choix variétal, les traitements et les amendements, et en développant les techniques de mécanisation et d'irrigation. La filière Rhum utilise chaque année environ 30 000 tonnes de canne.

Les cultures maraîchère, vivrière et fruitière couvrent actuellement 65 % de la consommation locale. Elles se développent rapidement avec l'appui de l'irrigation en Côte-sous-le-vent, et surtout en Grande-Terre avec des cultures d'exportation de contre-saison comme le melon.

Au sein de l'économie guadeloupéenne, l'agriculture représente, avec 30 % des richesses produites, pratiquement la contribution du tourisme (35 %). Les agriculteurs constituent 20 % de la population active.

Les handicaps de l'agriculture sont essentiellement les affections phytosanitaires des plantes, les ouragans qui touchent l'île plusieurs fois par siècle, et les coûts de production élevés. Elle bénéficie cependant d'un potentiel productif important lié à des moyens d'amélioration de la production (études de l'INRA), à la présence de sols favorables, et à une pluviométrie généralement abondante relayée par l'irrigation.

La pluviométrie

La variabilité spatio-temporelle des précipitations dans les zones de culture et en altitude est maintenant bien connue. Par exemple, le coefficient d'irrégularité interannuel (rapport de la pluviométrie décennale humide à la pluviométrie décennale sèche) varie de 1.8 à l'extrémité Est de la Grande-Terre à 1.3 sur les sommets de la Basse-Terre. Les déficits pluviométriques annuels d'une période de retour de 50 années varient entre 40 % en Grande-Terre (pour 1.2 m à 1.5 m de hauteur d'eau moyenne interannuelle) et 20 % sur les sommets de la Basse-Terre (pour 8 à 11 m de hauteur d'eau moyenne interannuelle). L'étude des régimes pluviométriques sur de courts pas de temps a permis de caractériser l'effet orographique, en altitude, par la persistance des précipitations de faible intensité, et, sur les pentes, par le renforcement des averses de forte intensité.

Une relation a été mise en évidence entre la manifestation du phénomène "El nino" et l'apparition de carêmes secs aux Antilles, notamment en 1983 et en 1987. Cependant, ces anomalies de la circulation générale de l'atmosphère peuvent se traduire par une distribution spatiale hétérogène des déficits. Ainsi, la sécheresse de 1983 affectait essentiellement la Grande-Terre avec un déficit annuel atteignant 50 % et de période de retour voisine du siècle, alors qu'en 1987 la diminution de l'effet orographique due à une orientation anormalement Sud des vents accentuait la sécheresse dans le Sud de la Basse-Terre (période de retour de 40 années du déficit global des mois de février, mars et avril 1987).

En fait, les cultures souffrent régulièrement de périodes déficitaires en précipitations de durée atteignant plusieurs semaines voire plusieurs mois, et parfois liées à ces années exceptionnelles. Cela justifie, pour améliorer les productions agricoles, la mise en oeuvre d'une irrigation de complément.

Les ressources en eau de surface

Les lames d'eau écoulees par les bassins versants de la Basse-Terre aux sites de prélèvement, sont généralement comprises entre 2 et 6 m selon l'altitude et l'exposition des bassins. L'écoulement des ravines de la Grande-Terre représente des apports 50 à 100 fois inférieurs et très irréguliers (coefficient d'irrégularité de l'ordre de 20).

En période de sécheresse, les ressources en eau de surface sont inexistantes en Grande-Terre, et limitées en Basse-Terre à des écoulements relativement faibles (de l'ordre du quart des modules). En étiage, au cours d'un carême en année normale, les ressources minimales en eau de surface de la Basse-Terre équivalent globalement à un débit de l'ordre de 10 m³/s ; les apports des bassins versants évoluent alors, généralement, entre 20 et 30 l/s/km² (valeurs extrêmes de 10 à 100 l/s/km²). Les débits d'étiage centennaux sont de l'ordre de 50 à 60 % des valeurs médianes.

Or, la demande en eau potable, touristique et surtout agricole qui s'accroît pendant ces périodes déficitaires en précipitations représente alors une part importante des ressources mobilisables de la Basse-Terre.

Besoins en eau des cultures et irrigation

Globalement, les besoins en eau de la Guadeloupe, exprimés en débit virtuel continu pendant les périodes de pointe, ont été évalués par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt à environ 1.5 m³/s (soit 130 000 m³ par jour) pour l'alimentation en eau potable, industrielle et touristique, et, à terme, à 3.8 m³/s (soit 330 000 m³ par jour) pour l'irrigation, dont les 2/3 des besoins (2.5 m³/s ou 220 000 m³ par jour) sont localisés en Grande-Terre.

Le programme d'irrigation de la Grande-Terre concerne les périmètres Est - Grande-Terre (retenue de Letaye-amont), et Nord - Grande-Terre (retenue de Gachet).

La retenue de Letaye-amont (périmètres Est Grande-Terre) a été mise en eau en 1978 et permet, depuis 1985, d'irriguer une surface d'environ 2 000 ha. Il s'agit de cultures de canne à sucre pour les 3/4, alors que les périmètres irrigués de maraîchage se multiplient au dépens de l'élevage et de la canne. On relève notamment une forte progression de la culture du melon avec près de 300 ha en 1989. L'irrigation se fait par gravité ou à partir du pompage dans la retenue de Letaye-amont d'une capacité de 700 000 m³. Ainsi, la seule réserve de la retenue permet d'assurer les besoins des cultures irriguées seulement pendant une dizaine de jours. L'alimentation de la retenue de Letaye-amont est actuellement assurée par une prise au fil de l'eau à la cote 130 sur le bassin du Bras David et par une conduite dont la capacité de transfert atteint 50 000 m³/jour.

A terme, le périmètre Nord - Grande-Terre doit intéresser 4 000 ha qui doivent être irrigués à partir de la retenue de Gachet d'une capacité de 2.5 millions de m³, mise en eau en 1989. L'essentiel des apports proviendra du Bras David et de la Grande Rivière à Goyaves, mais, aussi, d'autres cours d'eau sollicités pour l'irrigation de la Côte-au-vent.

Si la rentabilité économique du programme d'irrigation n'est pas évidente, son rôle se traduit par le maintien d'une activité indispensable à l'équilibre socio-culturel des populations. En outre, les ouvrages de régularisation et de transfert réalisés servent à renforcer l'adduction en eau potable de la Grande-Terre.

Confrontation des besoins aux ressources

On constate dès à présent que la disponibilité des ressources au fil de l'eau en période de sécheresse n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins en préservant l'équilibre des milieux naturels.

Compte-tenu de la méconnaissance des milieux dulcaquicoles guadeloupéens, nous préconisons actuellement de maintenir à l'aval des prises d'eau en Basse-Terre, un débit réservé minimal égal à 10 % du module (loi "pêche" du 29 juin 1984) lorsque le prélèvement est temporaire en cours d'année (cas d'une prise pour l'irrigation). Par contre, nous estimons que le débit réservé ne doit pas être inférieur au débit minimal annuel de fréquence médiane (soit environ 20 % du module) lorsque le prélèvement est continu (cas d'un aménagement hydroélectrique).

Les ressources au fil de l'eau étant insuffisantes en période de sécheresse, il est d'ores et déjà nécessaire de mobiliser des ressources nouvelles par une plus grande sollicitation des eaux souterraines et par le stockage des eaux de surface dans des retenues de régularisation. A cet effet, une première réalisation verra le jour en Basse-Terre, avec l'implantation sur le Bras-David à la cote 140 d'une retenue de 2.5 millions de m³. D'autres aménagements sont projetés en Côte-au-vent (Grande Rivière à Goyaves, Lézarde, etc...).

A ce stade, une gestion globale des ressources intégrant l'ensemble des besoins s'impose.

Les programmes de recherche en hydrologie

La planification d'une gestion globale des ressources en eau doit se baser sur :

- la prospective des besoins à l'horizon choisi,
- la caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des ressources,
- l'inventaire des solutions techniques visant à la mobilisation de ces ressources (sites de prélèvements, ouvrage de stockage et de transfert...),
- et la simulation des différents scénarios envisagés.

La Direction de l'Agriculture et de la Forêt a établi le "schéma d'utilisation" des eaux estimant les besoins à l'horizon 2 000 et dressant l'échéancier des implantations des ouvrages hydrauliques.

Les hydrologues de l'ORSTOM, afin de répondre à cette demande induite par le développement économique de l'île, et de dégager des connaissances transférables à d'autres milieux insulaires caraïbéens, centrent aujourd'hui leurs travaux sur :

- la valorisation des données hydrométriques acquises pendant plus de trois décennies et des résultats des recherches entreprises récemment sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations
- la modélisation de la production des ressources en eau de surface et la modélisation de la gestion de ces ressources.

La valorisation de l'information acquise a contribué à l'inventaire des ressources et à la compréhension des phénomènes qui interviennent dans leur renouvellement (monographie régionale, nombreuses études hydrologiques ponctuelles...).

La modélisation des écoulements, programme récemment mis en œuvre, a comme objectif essentiel la mise à disposition à l'entrée du modèle de gestion d'hydro-aménagements (HYDRAM) de séries chronologiques journalières d'écoulement étendues, sur des bassins versants observés. De plus, les résultats de ces travaux pourraient ouvrir la voie d'une recherche tournée vers un modèle discrétisé à faible pas de temps du fonctionnement hydrodynamique de bassins versants montagneux qui seraient caractérisés par leur rugosité et leur morphologie (utilisation de modèle numérique de terrain).

La modélisation de la gestion des ressources se concrétise par le développement d'un logiciel original de simulation de fonctionnement d'un système d'eau (HYDRAM) dont la conception interactive et l'expertise automatisée seront les principaux atouts. Ce logiciel constituera un outil d'aide à la conception et à la gestion d'hydro-aménagements. Appliqué à la gestion en temps réel des aménagements, ce logiciel pourra mettre en application les résultats des recherches en bioclimatologie et en agro-pédologie entreprises par l'INRA et devra exploiter les éléments probabilistes tirés des analyses des précipitations, qu'il serait idéal de coupler à des prévisions météorologiques.

Conclusion

Les acquis reposent sur :

- la valorisation d'une information hydropluviométrique conséquente (ORSTOM)
- et les travaux sur les besoins en eau des cultures (CIRAD, INRA) et le fonctionnement hydrodynamique des sols (INRA).

Le problème s'exprime par :

- la demande croissante en eau dans un contexte de mutation socio-économique
- et l'insuffisance de la production d'une ressource au fil de l'eau.

La réponse des hydrologues de l'ORSTOM s'est traduite par l'étude de la variabilité des ressources à différentes échelle d'espace et de temps, et s'oriente vers la modélisation de la production et de la gestion des ressources.

Les recherches conduites par l'ORSTOM et les instituts de recherche présents en Guadeloupe (INRA, CIRAD-IRFA) devraient aider les aménageurs, les gestionnaires et les agriculteurs à mettre en oeuvre une irrigation parfaitement maîtrisée permettant une augmentation, une régularisation et une diversification des productions agricoles.

Caractéristiques des principales rivières de la Guadeloupe

Rivières de la Basse-Terre			
Rivière	Cote m	S km ²	QM l/s (l/s/km ²)
Grande Rivière à Goyaves	5	130	9000 (69)
Lézarde	85	8.4	945 (112)
Moustique Petit-Bourg	105	11.5	1580 (137)
La Rose	75	10.6	1600 (150)
Petite Rivière à Goyaves	10	27.9	3600 (129)
Sainte Marie	10	7.6	320 (42)
Grande Rivière de Capesterre	95	18.6	3000 (161)
Grand-Carbet	15	13.4	2150 (160)
Bananier	340	1.84	245 (133)
Grande-Anse	5	18.0	2000 (110)
Galion	25	10.5	730 (70)
Rivières aux Herbes	25	8.7	310 (36)
Rivière des Pères	25	23.3	2350 (100)
Du Plessis	500	2.1	200 (95)
Grande Riv. de Vieux-Habitants	22	28.2	3700 (131)
Beaugendre	75	11.8	600 (51)
Losteau	70	8.0	500 (62)
Petite Plaine	125	8.8	480 (55)
Ferry	35	4.7	200 (43)
Nogent	65	5.6	180 (32)
Moustique Sainte-Rose	140	6.1	180 (30)

Ravines de la Grande-Terre				
Rivière	Station	Cote m	S km ²	QM l/s (l/s/km ²)
Gachet	pont RN 6	3	63.8	140 (2.2)
Grande Ravine	pont RN 4	3	15.9	26 (1.6)

QM représente les modules d'écoulement en année normale

Bibliographie

CHAPERON (P.), L'HOTE (Y.), VUILLAUME (G.)

Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe

2 tomes, 834 pages, 4 cartes, 3 microfiches

ORSTOM - Paris, 1985

HOEPPFNER (M.), MORELL (M.) et ROSSIGNOL (D.)

La sécheresse de 1983 en Guadeloupe

Cah. ORSTOM, Sér. hydrol, vol XXI, n°4 1984-1985, p. 51 à 73.

ORSTOM - Paris, 1985

DIRECTION DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORET

Schéma d'utilisation pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation de la Guadeloupe

D.A.F. - Basse-Terre, 1986

- HOEFFFNER (M.), MORELL (M.), ROSSIGNOL (D.)
 Variabilité des pluies et des ressources en eaux de surface en Guadeloupe.
 Numéro Spécial : Besoin en eau des cultures et irrigation aux Antilles.
 Bulletin Agronomique des Antilles et de la Guyane INRA n°4, p. 17 à 31
 I.N.R.A. - Pointe-à-Pitre, février 1986
- MORELL (M.)
 Le carême de l'année 1987 dans le Sud de la Basse-Terre
 39 p., 18 fig., Annexes, photos
 ORSTOM, C.C.E.E. (Conseil Régional) - Pointe-à-Pitre, octobre 1988
- FABRI (A.), GARGANTA (E.) et al.
 Le périmètre irrigué de l'Est Grande-Terre
 Etat actuel de l'utilisation de l'irrigation, impacts et perspectives
 D.A.C. - Pointe-à-Pitre, 1989
- SICA-ASSOBAG
 Banane Guadeloupe - perspectives d'avenir
 Numéro spécial
 ASSOBAG - Basse-Terre, juin 1989
- ROSSIGNOL (D.)
 Régimes pluviographiques de la Guadeloupe
 ORSTOM - Pointe-à-Pitre, juillet 1989
- KLEIN (J.C.), MORELL (M.), CALVEZ (R.), JOUVE (D.)
 Programme d'irrigation de la Côte-au-vent de la Basse-Terre
 Etude d'impact
 ORSTOM - Pointe-à-Pitre, septembre 1989
- MORELL (M.), BRIZIO (M.)
 Etude hydrologique du bassin versant de la ravine GACHET
 Campagne 1988 et récapitulatif
 ORSTOM - Pointe-à-Pitre, novembre 1989
- CONSEIL GENERAL DE LA GUADELOUPE
 L'industrie sucrière
 Conseil Général - Basse-Terre, 1989
- I.N.R.A.
 Spécial canne
 Bulletin agronomique Antilles-Guyane - n° 4
 I.N.R.A. - Pointe-à-Pitre, décembre 1989
- MORELL (M.), CABIDOCHÉ (M.Y.)
 Exposition "Vive l'eau" - Cité des Sciences et de l'Industrie
 ORSTOM/CONSEIL GENERAL - Pointe-à-Pitre, janvier 1990
- MORELL (M.), BRIZIO (M.)
 Etude du bilan hydrologique de la retenue de Letaye-Amont - Année 1988
 ORSTOM - Pointe-à-Pitre, avril 1990, 34 p., 28 tab., 31 fig.
- ROSSIGNOL (D.)
 Relation entre la variabilité des pluies en Guadeloupe et les cycles climatiques
 ORSTOM - Pointe-à-Pitre, avril 1990
- POUGET (J.-C.)
 Etat de conception HYDRAM - Outil d'aide à la gestion d'hydro-aménagements
 Application à l'irrigation de la Grande-Terre
 ORSTOM/CONSEIL GENERAL - Pointe-à-Pitre, avril 1990, 34 p., 28 tab., 31 fig.
- MORELL (M.), CALVEZ (R.), JOUVE (D.), PLANTIER (E.)
 Les ressources en eau de surface de la Basse-Terre
 Recueil des débits moyens mensuels de l'origine des stations à 1989
 ORSTOM - Pointe-à-Pitre, juin 1990

HYDRAM
AIDE A LA GESTION D'HYDRO-AMENAGEMENTS
APPLICATION A L'IRRIGATION EN GUADELOUPE

Par

J.C. POUGET

HYDRAM
Aide à la gestion d'HYDRo-AMénagements
Application à l'irrigation en Guadeloupe

J.C. POUGET
Centre ORSTOM Guadeloupe
BP 1020 97178 - Pointe à Pitre

Résumé

Le projet, financé par le Conseil Général de la Guadeloupe, consiste à réaliser un outil informatique, HYDRAM, pour dresser un bilan des capacités et limites d'hydro-aménagements en fonction de scénarios de développement. L'expertise est fondée sur l'analyse de la simulation du fonctionnement "hydrologique" du système à étudier.

Une des originalités de l'outil réside dans sa fonction de conception interactive, permettant de construire des hydro-aménagements en kits par sélection de composants existants (retenue, prise en rivière, conduite, demande AEP, périmètres d'irrigation...).

HYDRAM est ainsi conçu pour pouvoir envisager facilement différentes évolutions spatiales et temporelles (aménagements, cultures, gestion...), assurer un fonctionnement basé sur une satisfaction variable des besoins.

Outil d'aide à la planification dans le programme d'irrigation de la Grande-Terre, HYDRAM doit apporter aux décideurs des évaluations claires de la fiabilité de desserte en eau selon divers scénarios envisagés. Il doit ainsi préciser la possibilité de développement des périmètres irrigués, la gestion à adopter au niveau des retenues, l'échéance pour envisager la sollicitation de nouvelles ressources, la construction d'autres barrages...

Environnement logiciel dédié à l'aide à la décision dans la gestion des hydro-aménagements, HYDRAM veut fournir et faciliter l'utilisation d'outils simples intégrant des démarches de spécialistes complémentaires (hydrologues, agronomes, analystes...). La nécessaire extension de cet environnement, pour envisager les multiples facettes d'une gestion rationnelle des ressources en eau, est permise par le choix du mode de développement, basé sur la réalisation de "composants logiciels" réutilisables [MEYER 1989].

Mots-clés

évaluation d'un système d'eau - outil informatique
conception en kits - simulation - analyse interprétée
multidisciplinarité - extension - composants logiciels

1 Présentation

Comment concevoir et développer un système informatique pour qu'il apporte une aide effective dans la planification et la gestion d'hydro-aménagements?

L'idée de base est qu'il faut rendre disponible facilement, rapidement, de manière claire et synthétique les conséquences prévisibles de scénarios de développement, d'alternatives de gestion [FEDRA 1985] [LOUCKS 1985].

Prenons la planification de l'irrigation en Guadeloupe telle qu'elle était prévue en 1986 (voir figure 1.). On constate des décalages importants entre prévision et réalité de l'aménagement tant au niveau offre que demande. On rappelle que le point important de ce programme est d'atténuer les déficits en eau de la Grande-Terre, où les ressources sont faibles et difficilement mobilisables, en amenant de l'eau de la Basse-Terre, véritable château d'eau de la Guadeloupe [MORELL 1990].

Actuellement le périmètre d'irrigation du Sud-Est connaît un réel développement avec l'extension des cultures maraîchères, alors que la rentabilité de l'irrigation de la canne est aujourd'hui encore remise en question. Ce périmètre est alimenté par l'intermédiaire de la retenue de Letaye-Amont, réserve de stockage pouvant assurer environ 10 jours d'autonomie en période d'irrigation intensive. Le transfert de l'eau prélevée en Basse-Terre sur le Bras-David est assuré par une conduite \varnothing 800 mm. Mais, encore récemment c'est cette seule conduite, le \varnothing 1400 mm n'étant pas en place, qui alimentait la station de traitement, qui permet de renforcer l'adduction d'eau potable de la Grande-Terre, et le périmètre Nord encore peu développé. La retenue de Gachet, au nord, ne devrait être opérationnelle que d'ici deux ans. Le barrage de Bras-David est encore au stade d'étude. La sollicitation des autres ressources de la Côte-au-vent n'est qu'au stade de projet.

Des problèmes de gestion des aménagements existants commencent à se poser, de plus de grandes reconversions sont envisageables.

En 1989, l'ORSTOM a passé une convention avec le Conseil Général de la Guadeloupe pour réaliser un système d'aide à la planification et la gestion des aménagements pour l'irrigation.

L'outil développé doit être appliqué, dans le cadre de cette étude, au programme d'irrigation de la Grande-Terre. Les scénarios à envisager s'étendent à la mise en service du barrage de Bras-David.

C'est à la lumière de cette application que nous allons voir comment est conçu HYDRAM pour répondre à notre problème. En résumé l'approche doit pouvoir:

- modéliser un système où interviennent divers types de besoins, de ressources et envisager facilement différentes évolutions spatiales et temporelles (aménagements, cultures...)
- assurer un fonctionnement basé sur une satisfaction variable des besoins selon un mode se rapprochant des conditions réelles
- fournir des analyses claires, synthétiques des résultats de simulation.

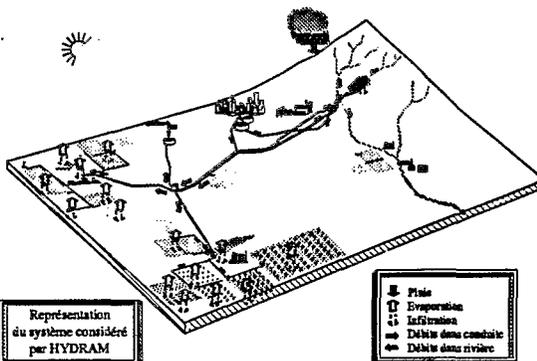
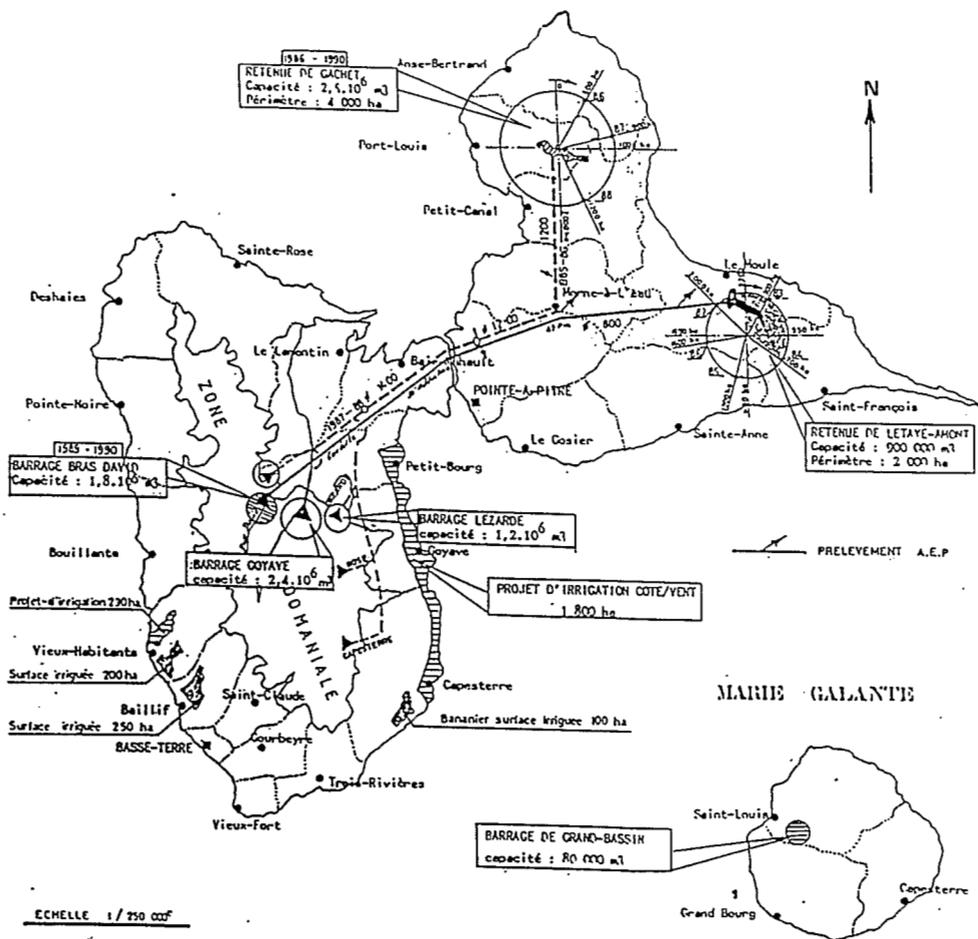


Figure 2.

Figure 1. Etat et projets
des périmètres irrigués en Guadeloupe



Tiré de l'article de J.L. BUHLER: *Périmètres irrigués en Guadeloupe Etat actuel et Perspectives* dans le numéro spécial du Bulletin agronomique Antilles-Guyane de février 1986

2 Conception

2.1 Préalable

Il faut, avant de pouvoir construire un hydro-aménagement, planter le décor et définir l'environnement spatio-temporel considéré.

Une session d'HYDRAM impose le choix d'une région. *Il correspond à la sélection d'un répertoire sur disque, où sont rassemblées toutes les données relatives à un même projet.*

La notion de région permet d'offrir un repère adapté pour les conversions de coordonnées. Les limites géographiques de la zone d'étude définissent la représentation graphique et des éléments descriptifs (contours, tracés de cours d'eau...) peuvent y être adjoints.

Les fichiers de chroniques de données climatologiques (pluie, évaporation, écoulement) à utiliser pour la simulation sont à placer sous le répertoire défini. Les extensions utilisées pour ces fichiers (.plj, .plm, .dbj, .dbm, .eva...) permettent leur sélection suivant le pas d'étude à considérer.

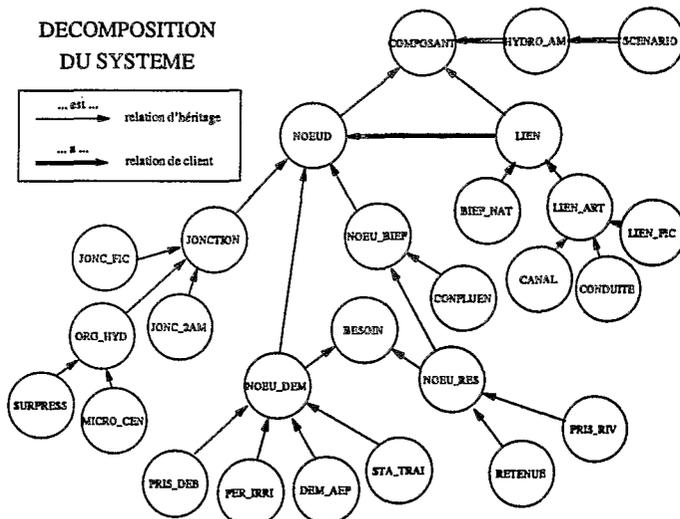
Ainsi pour le programme d'irrigation de la Grande-Terre des fichiers opérationnels de pluies et de débits vont être élaborés en mensuel et en journalier. Les chroniques s'étendront des années 1955 à 1980, période suffisante pour assurer la validité d'une analyse par simulation.

2.2 les bases

Un idée clé dans la conception d'HYDRAM est qu'un hydro-aménagement est un système hiérarchisé formé par un ensemble de composants physiques, avec des modalités de fonctionnement, de gestion et des buts que doit atteindre le système [VOTRUBA 1990].

Un hydro-aménagement peut ainsi être considéré comme un réseau constitué de noeuds et de liens (voir figure 3.). Construire un hydro-aménagement consiste donc à ajouter, modifier, supprimer des composants dans ce réseau. Les composants disponibles fournissent des spécifications plus ou moins complexes des caractéristiques de ces liens et de ces noeuds indispensables pour en assurer le fonctionnement : volume disponible, volume nécessaire, débit maximum de transit...

Figure 3.



La description externe du système d'eau est donc possible; pour la rendre facile et rapide, il faut favoriser la réutilisation de l'existant, l'agrégation, désagrégation de l'information.

De manière pratique l'ajout d'un nouveau composant (voir figure 4.) se fait au moyen d'une liste sur laquelle on sélectionne le composant approprié. Le choix peut porter sur:

- le composant par défaut
L'ensemble des composants par défaut, qui peuvent être redéfinis, est géré comme un hydro-aménagement classique, DEFAUT.HYD.
- les composants de même type déjà existants dans l'hydro-aménagement courant
- le chargement d'un hydro-aménagement existant sur la région, pour permettre la sélection d'un composant de même type qui s'y trouve.

Figure 4. Projet du menu de Gestion des composants

Région	Climato.	Conception	Simulation	Analyse	Utilitaires	Quitte
--------	----------	-------------------	------------	---------	-------------	--------

Gestion des composants Gestion des hydro-aménagements Précisions sur hydro-aménagement Gestion des scénarios Quitte	Ajout/modifie Supprime Composant par défaut Quitte	 V.O.O. 1990 © ORSTOM Région : <input type="text"/> Hydro-am. : <input type="text"/> Scénario : <input type="text"/> Sélection composant Retenue Prise en rivière Bief naturel Lien Jonction Prise débit dérivé Station traitement Demande A.E.P. Périmètre d'irrigation Haut | Bas X: <input type="text"/> Y: <input type="text"/> VUE <input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> <input type="button" value="↓"/> <input type="button" value="↑"/> ZOOM <input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> VUE TOTALE 1:1
--	--	---

Nom	Description
NOUVEAU	NOUVEAU
Composants de même type disponibles dans hydro-am.	
Sélection dans liste des hydro-aménagements disponibles	

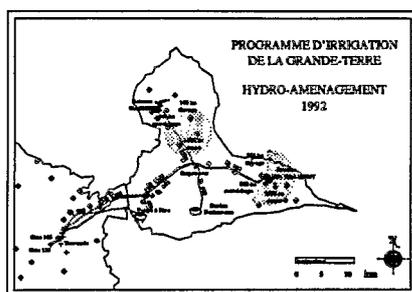
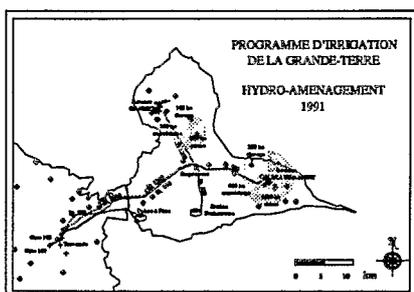
Ce mode de conception donne une grande latitude au niveau de la composition du système. Ainsi l'hydro-aménagement actuel du programme d'irrigation de la Grande-terre peut être aisément modéliser. Il est possible d'aller plus ou moins loin dans le découpage en périmètres d'irrigation (voir figure 6.).

A partir de ce système les autres hydro-aménagements du scénario envisagé peuvent être obtenus très facilement par copies puis modifications. Les graphiques suivants (voir figure 5.) présentent l'évolution probable du programme d'irrigation de la Grande-Terre.

Figure 5. Scénario probable du programme d'irrigation de la Grande-Terre.

1991 : une conduite mixte ϕ 1400 mm alimentera le périmètre nord et la station de Deshauteurs servant à renforcer l'alimentation en eau potable de la Grande-Terre. Les prélèvements sont effectués sur Bras-David et sur la Grande Rivière à Goyave.

1992 : les périmètres d'irrigation continuent à s'étendre. La conduite mixte ϕ 1400 mm alimente Pointe à Pitre.



1993 : la retenue de Gachet, possédant une réserve de stockage de 2,5 millions de m³, devient opérationnelle pour l'alimentation du périmètre nord.

1994 : le barrage de Bras-David pourrait être mis en eau et servir à la régulation de l'alimentation en eau de la Grande-Terre.

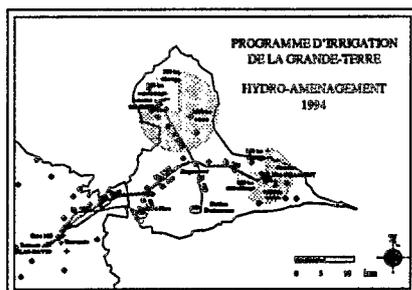
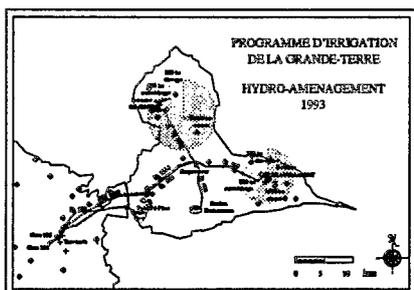
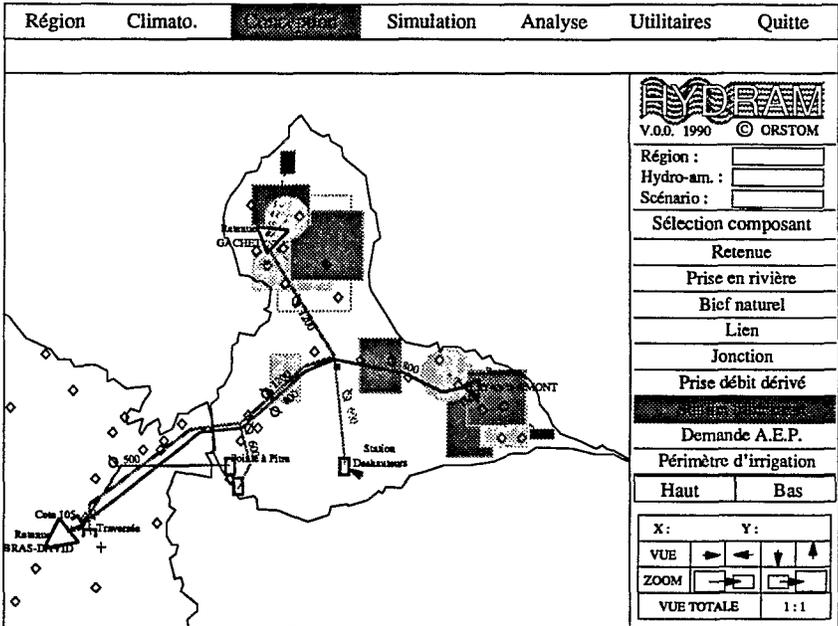


Figure 6. Projet de représentation graphique du système



Pour tenir compte du degré de connaissance variable des composants eux-mêmes, il faut disposer d'une grande flexibilité au niveau de leur description.

2.3 Exemples de composants

◆ Prise débit dérivé

C'est un des composants les plus simples, le besoin est exprimé par la demande de débit.

Certains attributs sont communs à tous les composants, tant les noeuds, que les liens :

nom : défini sur 8 caractères, sert à la désignation du composant

descriptif : défini sur 30 caractères, sert de complément, à titre d'aide

représentation : sert à la représentation graphique du composant : symbole associé, définition de l'affichage du nom

D'autres attributs sont communs à tous les noeuds :

localisation : elle pourra être définie indifféremment par les coordonnées X,Y relatives au repère lié à la région d'étude ou par la longitude, latitude

altitude : sa donnée est requise pour permettre une évaluation de la charge piézométrique dans le réseau

Δ pression requise : donnée de la surpression éventuelle attendue au niveau du noeud

Figure 7. Projet du menu de définition d'une prise débit dérivé

Demande de débit : définition de la demande de débit variable au cours de l'année, par l'entrée de couples date-débit; ce débit sera interpolé linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples (*Remarque : la donnée d'un seul couple définit une valeur de débit constante pour l'année*).

$$\text{vol}_{\text{néc_cour}} = \text{deb_dem}(\text{date}=\text{cour}) * \text{durée_pas} (j=1)$$

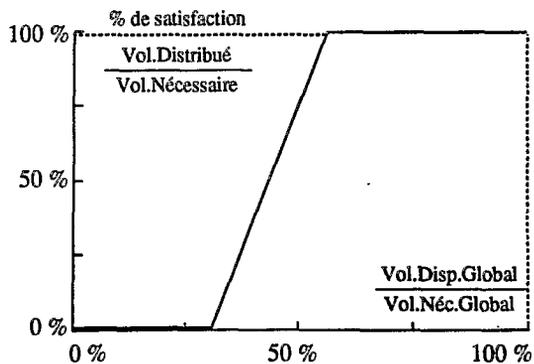
$$\text{vol}_{\text{disp_cour}} = 0$$

Un point important de la modélisation est de savoir reproduire la politique de distribution en cas de déficit, tous les besoins dans un système d'eau n'étant pas considérés comme également prioritaires.

La solution retenue est d'introduire pour chaque besoin un coefficient de satisfaction attendu. C'est la définition en fonction d'un état de disponibilité globale (rapport du volume disponible sur le volume nécessaire sur tout le système) du pourcentage du besoin satisfait par rapport au besoin objectif.

Ce coefficient induit une hiérarchie dans les besoins, les besoins assurés à 100% pour l'état de disponibilité le plus faible étant les plus prioritaires.

Figure 8. Coefficient de satisfaction attendu



◆ Périètre d'irrigation

Le problème, par rapport à la prise débit dérivé, est d'exprimer la demande, dont la spécification est plus complexe.

Le modèle classique simple à réservoir a été retenu pour le calcul du bilan hydrique [MOLLE 1985] [COMBRÉS 1989]. On considère ainsi que toute pluie arrivant sur le sol s'infiltré jusqu'à la saturation du sol, qui correspond au remplissage du réservoir dont la capacité constitue la réserve utile (RU), décomposée en réserve facilement utilisable (RFU) et en réserve difficilement utilisable (RDU).

Le bilan peut donc s'écrire simplement :

$$\text{état_rés_fin} = \text{état_rés_init} + \text{pluie} + \text{dose_apport} - \text{ETR}$$

où ETR, évapotranspiration réelle, est la consommation réelle de la culture en fonction du stress hydrique. ETR est difficile à approcher, on se contente des résultats semi-empiriques visant à donner sa variation en fonction de l'humidité du sol ou plutôt en fonction de l'état de la réserve.

L'ETM, évapotranspiration maximale d'une culture, correspond donc à la consommation du périmètre planté quand celui-ci est convenablement approvisionné en eau.

Dans la pratique, ETM est calculée par $ETM = Kc * ETP$, où Kc, coefficient cultural, dépend du stade de développement du végétal.

Tant qu'il y a de l'eau dans la RFU, c'est à dire que la réserve R reste supérieure à la RDU, on considère que la plante reste à son niveau de consommation optimal, $ETR=ETM$.

Lorsque R devient inférieur à RDU, la relation $ETR/ETM = R/RDU$ est considérée.

Figure 9. Projet du menu de définition d'un périmètre d'irrigation

Région	Climato.	Conception	Simulation	Analyse	Utilitaires	Quitte																																		
<table border="1"> <tr> <td>Valide</td> <td>Quitte</td> </tr> <tr> <td>Nom : <input type="text"/></td> <td>Représentation <input type="text"/></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Descriptif : <input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>X : <input type="text"/> 000.00</td> <td>Longitude : <input type="text"/> +00 00 00</td> </tr> <tr> <td>Y : <input type="text"/> 000.00</td> <td>Latitude : <input type="text"/> +00 00 00</td> </tr> <tr> <td>Altitude : <input type="text"/> 0.0</td> <td><input type="text"/> m</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Δ pression requise : <input type="text"/> 0.0 <input type="text"/> m d'eau</td> </tr> <tr> <td>Surface irriguée : <input type="text"/> 0.0</td> <td>ha Coeff. occupation : <input type="text"/> 1</td> </tr> <tr> <td>Pluie : <input type="text"/> Interpolation</td> <td>Chronique Coeff. sur pluie : <input type="text"/> 1</td> </tr> <tr> <td>Evaporation associée : <input type="text"/></td> <td>Coeff. sur évapo. : <input type="text"/> 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <input type="text"/> Réserve Facilement Utilisable <input type="text"/> Réserve Utile <input type="text"/> Coefficient cultural <input type="text"/> Seuil d'irrigation </td> </tr> <tr> <td colspan="2"><input type="text"/> Coeff. de satisfaction attendue</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Efficience technique d'irrigation : <input type="text"/> 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Limite d'apport : <input type="text"/> mm/jour</td> </tr> </table>		Valide	Quitte	Nom : <input type="text"/>	Représentation <input type="text"/>	Descriptif : <input type="text"/>		X : <input type="text"/> 000.00	Longitude : <input type="text"/> +00 00 00	Y : <input type="text"/> 000.00	Latitude : <input type="text"/> +00 00 00	Altitude : <input type="text"/> 0.0	<input type="text"/> m	Δ pression requise : <input type="text"/> 0.0 <input type="text"/> m d'eau		Surface irriguée : <input type="text"/> 0.0	ha Coeff. occupation : <input type="text"/> 1	Pluie : <input type="text"/> Interpolation	Chronique Coeff. sur pluie : <input type="text"/> 1	Evaporation associée : <input type="text"/>	Coeff. sur évapo. : <input type="text"/> 1	<input type="text"/> Réserve Facilement Utilisable <input type="text"/> Réserve Utile <input type="text"/> Coefficient cultural <input type="text"/> Seuil d'irrigation		<input type="text"/> Coeff. de satisfaction attendue		Efficience technique d'irrigation : <input type="text"/> 1		Limite d'apport : <input type="text"/> mm/jour		<table border="1"> <tr> <td>Menu</td> <td>Affichage nom</td> <td>Quitte</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Cercle</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Retour</td> </tr> </table>	Menu	Affichage nom	Quitte	Cercle			Retour			 <p>V.0.0. 1990 © ORSTOM</p> <p>Région : <input type="text"/></p> <p>Hydro-am. : <input type="text"/></p> <p>Scénario : <input type="text"/></p> <p>Sélection composant</p> <p><input type="text"/> Retenue</p> <p><input type="text"/> Prise en rivière</p> <p><input type="text"/> Bief naturel</p> <p><input type="text"/> Lien</p> <p><input type="text"/> Jonction</p> <p><input type="text"/> Prise débit dérivé</p> <p><input type="text"/> Station traitement</p> <p><input type="text"/> Demande A.E.P.</p> <p>Périmètre d'irrigation</p> <p><input type="text"/> Haut <input type="text"/> Bas</p> <p>X : <input type="text"/> Y : <input type="text"/></p> <p>VUE <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/></p> <p>ZOOM <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/></p> <p>VUE TOTALE 1:1</p>
Valide	Quitte																																							
Nom : <input type="text"/>	Représentation <input type="text"/>																																							
Descriptif : <input type="text"/>																																								
X : <input type="text"/> 000.00	Longitude : <input type="text"/> +00 00 00																																							
Y : <input type="text"/> 000.00	Latitude : <input type="text"/> +00 00 00																																							
Altitude : <input type="text"/> 0.0	<input type="text"/> m																																							
Δ pression requise : <input type="text"/> 0.0 <input type="text"/> m d'eau																																								
Surface irriguée : <input type="text"/> 0.0	ha Coeff. occupation : <input type="text"/> 1																																							
Pluie : <input type="text"/> Interpolation	Chronique Coeff. sur pluie : <input type="text"/> 1																																							
Evaporation associée : <input type="text"/>	Coeff. sur évapo. : <input type="text"/> 1																																							
<input type="text"/> Réserve Facilement Utilisable <input type="text"/> Réserve Utile <input type="text"/> Coefficient cultural <input type="text"/> Seuil d'irrigation																																								
<input type="text"/> Coeff. de satisfaction attendue																																								
Efficience technique d'irrigation : <input type="text"/> 1																																								
Limite d'apport : <input type="text"/> mm/jour																																								
Menu	Affichage nom	Quitte																																						
Cercle																																								
Retour																																								

Les éléments retenus pour décrire un périmètre irrigué (voir figure 9.) sont donc les suivants:

Surface irriguée : définition de la surface couverte par les cultures irriguées.

Coefficient d'occupation : sa définition permet de déduire la superficie réelle couverte par les cultures. Dans la représentation des périmètres un choix sur des formes simples (cercle, rectangle) peut être fait. Ce choix implique dans la couverture géographique du périmètre la définition des coordonnées du noeud, considéré comme le barycentre de la figure associée. Ceci permet un calcul automatique de la pluie moyenne sur le périmètre par interpolation à partir des postes pluviométriques voisins.

Pluie : choix de calcul automatique ou sélection dans la liste des chroniques disponibles de la pluie à associer au périmètre.

Coefficient sur pluie : coefficient correcteur facultatif (par défaut vaut 1) à appliquer à la pluie associée pour évaluer la pluie efficace à considérer.

Évaporation associée : sélection dans la liste des chroniques disponibles de l'évaporation à associer au périmètre pour représenter l'E.T.P.

Coefficient sur évaporation : coefficient correcteur facultatif (par défaut vaut 1) à appliquer à la lame évaporée associée.

Réserve Facilement Utilisable : définition de la variation de la Réserve Facilement Utilisable au cours de l'année, par l'entrée de couples date-hauteur; la réserve sera interpolée linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples (remarque : la donnée d'un seul couple définit une valeur constante sur l'année).

Réserve Utile : définition de la variation de la réserve utile au cours de l'année, par l'entrée de couples date-hauteur; la réserve sera interpolée linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples.

Coefficient cultural : définition de la variation du coefficient cultural au cours de l'année, par l'entrée de couples date-coefficient; la valeur du coefficient sera interpolée linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples.

Seuil d'irrigation : définition de la variation du seuil d'irrigation au cours de l'année, par l'entrée de couples date - % de remplissage de RFU; si l'état de la réserve devient inférieur à ce seuil d'alerte, il y a demande d'irrigation. Par convention si ce seuil est nul, il n'y a pas d'irrigation.

Coefficient de satisfaction attendue : définition en fonction de l'état de disponibilité globale du pourcentage du besoin satisfait par rapport au besoin objectif ou optimal.

Efficience technique d'irrigation : définition du coefficient de perte en volume entre l'eau fournie au niveau du périmètre et l'eau utilisable par les plantes.

Limite d'apport : définition de la limite technique maximale de desserte en eau de l'équipement d'irrigation.

Il faut noter l'approche dynamique dans la prise en compte de la pluie, la définition de la variabilité des caractéristiques au cours de l'année.

Le calcul de la demande s'exprime donc :

```
vol_néc_cour    si          seuil_irri = 0
                alors        vol_néc_cour    = 0
                sinon si def_cour < alert_irri
                alors        vol_néc_cour    = 0
                sinon        vol_néc_cour    = def_cour * surf_irri / eff_irri * coeff_unité
def_cour        = ru (date=cour) - res_init + etr (res_init) - plu_cour
```

Exemple :

A et B : 2 retenues, C: conduite A → B

a et b : coefficients de sollicitation attendue respectifs
coef. relatifs ⇒ b = 100%

bilan apports et besoins propres → A% et B%

transfert dans conduite C → A' % et B' %

si B% ≥ 100% ⇒ pas de transfert → A%=A' % et B%=B' %

si maintenant B% < 100% → transfert dans conduite C défini tel que:
 $a \cdot A' \% \leq b \cdot B' \%$ ou C saturée

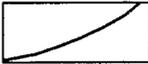
2 cas extrêmes de politique:

- politique d' "égalité des pourcentages de stockage utile":
a = 100% → transfert → A' % = B' %
- B entièrement prioritaire:
a = 0% → transfert → saturation de C ou A' % = 0

Figure 11. Projet du menu de définition d'une retenue

Région	Climato.	Conception	Simulation	Analyse	Utilitaires	Quitte
--------	----------	-------------------	------------	---------	-------------	--------

Valide		Quitte	
Nom :	<input type="text"/>	Représentation	
Descriptif :	<input type="text"/>		
X :	<input type="text" value="000.00"/>	Longitude :	<input type="text" value="+ 00 00 00"/>
Y :	<input type="text" value="000.00"/>	Latitude :	<input type="text" value="+ 00 00 00"/>
Altitude :	<input type="text" value="0.0"/>	m	
Δ pression requise :	<input type="text" value="0.0"/>	m d'eau	
Ecoulement associé :	<input type="text"/>		
Pluie associée :	<input type="text"/>	Coef. sur pluie :	<input type="text" value="1"/>
Evaporation associée :	<input type="text"/>	Coef. sur évapo. :	<input type="text" value="1"/>
Volume en fonction hauteur	<input type="text"/>	Formule	Barème
Surface en fonction hauteur	<input type="text"/>	Formule	Barème
Infiltration en fonction hauteur	<input type="text"/>	Formule	Barème
Q évacué en fonction hauteur	<input type="text"/>	Formule	Barème
Hauteur minimale absolue :	<input type="text"/>	m	
Hauteur minimale	<input type="text"/>	Hauteur maximale	<input type="text"/>
Hauteur objectif		<input type="text"/>	
Coef. de sollicitation attendue			
Limite débit de prélèvement :		<input type="text"/>	m ³ /s
Débit aval objectif sur l'année		<input type="text"/>	Formule Barème
Coef. de satisfaction attendue			



Modifs : Supprime Graphe Quitte

Hauteur	Unité	Valeur	Unité

HYDRAM	
V.0.0. 1990 © ORSTOM	
Région :	<input type="text"/>
Hydro-am. :	<input type="text"/>
Scénario :	<input type="text"/>
Sélection composant	
Retenue	
Prise en rivière	
Bief naturel	
Lien	
Jonction	
Prise débit dérivé	
Station traitement	
Demande A.E.P.	
Périmètre d'irrigation	
Haut	Bas
X :	Y :
VUE	<input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>
ZOOM	<input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> <input type="button" value="□"/> <input type="button" value="□"/>
VUE TOTALE	1:1

Ecoulement associé : sélection dans la liste des chroniques disponibles du débit naturel au site de la retenue. Il y aura vérification de l'identité de localisation de la retenue et du point d'écoulement associé.

Pluie associée : sélection de la pluie à associer à la retenue dans la liste des chroniques disponibles. Elle permet de définir la quantité d'eau tombant directement sur la surface de la retenue.

$$\text{etr}(r) \quad \begin{cases} \text{si} & r \geq \text{rfu}(\text{date}=\text{cour}) \\ \text{alors} & \text{etr}(r) = \text{etm}(\text{date}=\text{cour}) \\ \text{sinon} & \text{etr}(r) = \frac{\text{etm}(\text{date}=\text{cour}) * r}{(\text{ru}(\text{date}=\text{cour}) - \text{rfu}(\text{date}=\text{cour}))} \end{cases}$$

$$\text{etm}(\text{date}) = \text{coef_cult}(\text{date}) * \text{eva_assoc}(\text{date}) * \text{eva_coef}$$

$$\text{vol_apport} \quad \begin{cases} \text{si } \text{def_cour} < \text{app_max_cour} \\ \text{alors} & \text{vol_apport} = \text{vol_néc_cour} * \text{satisf_att}(\text{disp_glob}) \\ \text{sinon} & \text{vol_apport} = \text{app_max_cour} \end{cases}$$

$$\text{alert_irri} = (100 - \text{seuil_irri}(\text{date}=\text{cour}) * \text{rfu}(\text{date}=\text{cour})) / 100$$

$$\text{app_max_cour} = \text{durée_pas}(\text{date}=\text{cour}) * \text{lim_app}$$

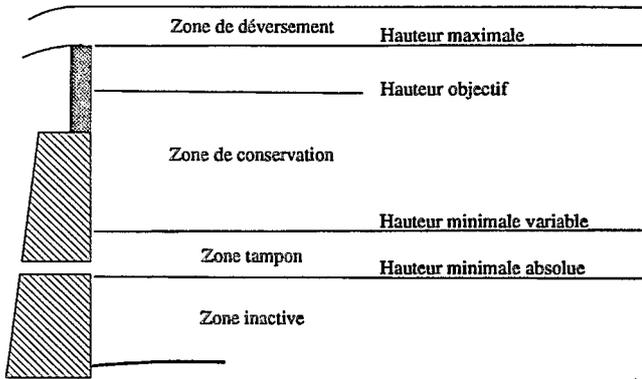
$$\text{plu_cour} = \sum_{p=1 \text{ à } \text{nbr_pas}} (\text{coef}(p) * \text{plu_ass}(p,j=1)) * \text{coef_plu}$$

$$\text{vol_disp_cour} = 0$$

◆ Retenue

La retenue est l'élément du système le plus complexe à spécifier de manière externe [SIGVALDASON 1976] [VOTRUBA 1990].

Figure 10. Conceptualisation d'une retenue



En effet la notion de volume disponible est difficile à cerner dans un système où les retenues doivent permettre d'échelonner les déficits d'eau. En effet, une politique de gestion doit introduire des restrictions d'eau avant que tout le volume de stockage des retenues ait été consommé.

L'introduction d'une hauteur minimale variable permet de définir une zone tampon. Le volume disponible au niveau des retenues est le seul volume de stockage utile.

$$\text{vol_stockage_utile} = \text{stock_h}(t) - \text{stock_h_mini_var}$$

La politique de gestion des retenues est établie en considérant un coefficient de sollicitation attendue. C'est la définition d'un pourcentage, variable sur l'année, qui donne l'état relatif attendu des pourcentages de stockage utile des différentes retenues d'un système.

$$\% \text{_stockage_utile} = \frac{\text{stock_h}(t) - \text{stock_h_mini_var}}{\text{stock_h_object} - \text{stock_h_mini_var}}$$

Ces coefficients de sollicitation donnent les priorités à considérer pour les transferts d'eau relatifs aux retenues.

Coefficient sur pluie : coefficient correcteur facultatif (par défaut vaut 1) à appliquer à la pluie associée pour évaluer la précipitation directe.

Évaporation associée : sélection de l'évaporation à associer à la retenue dans la liste des chroniques disponibles. Elle permet de définir la quantité d'eau perdue par évaporation en multipliant la lame évaporée associée par la surface de la retenue.

Coefficient sur évaporation : coefficient correcteur facultatif (par défaut vaut 1) à appliquer à la lame évaporée associée pour évaluer l'évaporation sur la retenue.

Volume en fonction hauteur : définition de la courbe hauteur-volume de la retenue soit par formule (définition de coefficients de formules types préétablies), soit par entrée de barème.

Surface en fonction hauteur : définition de la courbe hauteur-surface de la retenue soit par formule (définition de coefficients de formules types préétablies), soit par entrée de barème.

Infiltration en fonction hauteur : définition de la courbe hauteur-infiltration de la retenue soit par formule (définition de coefficients de formules types préétablies), soit par entrée de barème. Elle donne, connaissant la hauteur, une évaluation de la quantité d'eau perdue par infiltration.

Débit évacué en fonction hauteur : définition de la courbe hauteur-débit évacué de la retenue soit par formule (définition de coefficients de formules types préétablies), soit par entrée de barème. C'est par exemple la courbe d'étalonnage d'un évacuateur.

Hauteur minimale absolue : définition de la hauteur de la retenue en dessous de laquelle le volume d'eau stocké ne peut plus être utilisé.

Hauteur minimale : définition d'une hauteur minimale variable au cours de l'année, par l'entrée de couples date-hauteur; la hauteur minimale sera interpolée linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples (remarque : la donnée d'un seul couple définit une valeur minimale constante sur l'année). C'est en fait une règle de gestion s'interdisant de solliciter le volume d'eau stocké en dessous d'une hauteur considérée de la retenue.

Hauteur maximale : définition d'une hauteur maximale variable au cours de l'année, par l'entrée de couples date-hauteur; la hauteur maximale sera interpolée linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples. C'est en fait une règle de gestion se fixant de n'évacuer de débit par déversement qu'au-dessus d'une hauteur considérée de la retenue (valable pour le cas où les évacuateurs ont des organes mobiles).

Hauteur objectif : définition d'une hauteur objectif variable au cours de l'année, par l'entrée de couples date-hauteur; la hauteur objectif sera interpolée linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples. C'est en fait une règle se fixant de gérer les transferts d'eau pour atteindre cette hauteur considérée de la retenue.

Coefficient de sollicitation attendue : définition d'un pourcentage, variable sur l'année, qui donne l'état relatif attendu des pourcentages de stockage utile des différentes retenues du système

Limite débit de prélèvement : définition du débit maximal pouvant être transité dans le réseau.

Débit aval objectif : définition d'un débit aval objectif variable au cours de l'année, soit par formule (définition d'un pourcentage par rapport à l'écoulement amont), soit par entrée de barème (entrée de couples date-débit; le débit aval objectif sera interpolé linéairement pour la date considérée suivant les valeurs de ces couples). C'est en fait une règle de gestion imposant cette valeur de débit comme besoin extérieur.

Coefficient de satisfaction attendue : définition en fonction de l'état de disponibilité globale du pourcentage du besoin satisfait par rapport au besoin objectif. Le besoin correspond ici au débit aval objectif.

Il faut noter la flexibilité et l'homogénéité dans la définition des différents termes ci-dessus.

Les calculs des volumes disponible et nécessaire (le débit aval est considéré comme un besoin) s'expriment par:

```

vol_disp_cour      = vol_net_cour
                   + vol (haut_init) * vol (haut_mini (date=cour))
                   + (plu_cour + eva_cour + inf_cour) * surf (haut_init)
                   * coef_unité

plu_cour           si      pas_plu_ass
                   alors    plu_cour      = 0
                   sinon    plu_cour      = plu_ass (j=1) * plu_coef

eva_cour           si      pas_eva_ass
                   alors    eva_cour      = 0
                   sinon    eva_cour      = eva_ass (date=cour) * eva_coef

inf_cour           = inf (haut_init) * durée_pas (j=1)

vol_net_cour       si      pas_bief_amon
                   alors    vol_net_cour = vol_eco_cour
                   sinon    vol_net_cour = vol_eco_cour
                               - noeud_amon.vol_eco_cour

vol_eco_cour       = deb_ass (j=1) * durée_pas (j=1)

vol_néc_cour       si      pas_bief_aval
                   alors    vol_néc_cour = deb_av_obj (date=cour)
                               * durée_pas (j=1)
                   sinon    vol_néc_cour = 0
    
```

2.4 Les outils supplémentaires

Il est important d'avoir des outils qui permettent d'avoir une perception globale de l'hydro-aménagement en cours, de vérifier que sa construction correspond à notre attente et de l'affiner au besoin.

La fonction **Ordre de priorité des besoins** donne la liste classée des besoins rangés par ordre de priorité décroissante. Ce classement est très important pour la simulation, puisqu'il conditionne la fourniture en fonction de la disponibilité en eau. Pour modifier ces conditions de gestion, il sera possible de sélectionner plusieurs besoins et de modifier leur coefficient de satisfaction attendue. Cette flexibilité permettra d'envisager rapidement plusieurs cas de figures.

La fonction **Sollicitation des ressources** donne la liste classée des ressources à réserve (les retenues) par ordre de priorité décroissante. *Ce classement, pouvant être variable sur l'année, est un autre facteur de gestion, il conditionne les transferts d'eau entre les retenues. En effet des politiques de sollicitation différentes peuvent être élaborées dans un hydro-aménagement comprenant plusieurs retenues : les maintenir dans un rapport de stockage utile identique ou hiérarchiser ces retenues. Pour modifier ces conditions de gestion, il sera également possible de sélectionner plusieurs retenues et de modifier leur coefficient de sollicitation attendue.*

La fonction **Cohérence préalable** permet de tester si l'hydro-aménagement en cours de conception peut effectivement être simulé. La fonction renverra une liste des incohérences éventuelles relevées : besoin sans ressource, etc.

3 Simulation

La difficulté est de trouver un mode de simulation du fonctionnement du système à partir de la description du fonctionnement de chacun des composants. Ce mode doit reproduire les règles opérationnelles de gestion. De plus il doit offrir des fonctionnalités permettant de cerner les performances du système par rapport aux buts fixés, et de discriminer les origines des défaillances du système afin d'optimiser l'hydro-aménagement ou de définir les meilleures règles opérationnelles à l'issue d'un minimum d'essais.

Le but de notre système actuel est la satisfaction de besoins multiples. Les règles opérationnelles concernent :

- la politique de distribution, notamment en cas de déficit, dont on a vu précédemment qu'elle est prise en compte en introduisant pour chaque besoin un coefficient de satisfaction attendu.
- la gestion des retenues et leur fonctionnement simultané (voir § dans *exemples de composants*)

Afin de discriminer plus rapidement les disfonctionnements du système qui comporte des composants à réserve, il a été introduit la notion d'horizon prévisionnel. C'est la période prise en compte à partir du pas de temps courant à simuler pour décider de la gestion à adopter pour la satisfaction des besoins.

$$\begin{array}{rcl} \text{Horizon} & = & \text{Courant} + \text{Futur} \\ j = 1 \text{ à } J & & j = 1 \qquad j = 2 \text{ à } J \end{array}$$

En effet, nous pouvons calculer un état de disponibilité globale, rapport du volume d'eau disponible au volume nécessaire, sur l'horizon, en intégrant les résultats de ce calcul pour chacun des noeuds du système. Cette disponibilité globale peut conduire la politique de distribution et les restrictions éventuelles à prendre en compte.

Théoriquement, si l'horizon est suffisamment grand pour englober la fonction de régulation des retenues, on peut s'affranchir de la définition d'une zone tampon.

La simulation de fonctionnement sur un pas de temps consiste donc à :

- calculer les états de disponibilité sur l'horizon prévisionnel et sur le pas de temps courant et en déduire l'état de disponibilité global à considérer. On a :

$$\begin{array}{ll} \text{vol_disp_hori_glob} = \sum_{\text{noeuds}} \text{vol_disp_hori} & \text{vol_disp_cour_glob} = \sum_{\text{noeuds}} \text{vol_disp_cour} \\ \text{vol_néc_hori_glob} = \sum_{\text{noeuds}} \text{vol_néc_hori} & \text{vol_néc_cour_glob} = \sum_{\text{noeuds}} \text{vol_néc_cour} \\ \text{disp_cour_glob} = \frac{\text{vol_disp_cour_glob}}{\text{vol_néc_cour_glob}} & \text{disp_hori_glob} = \frac{\text{vol_disp_hori_glob}}{\text{vol_néc_hori_glob}} \\ \text{disp_glob} = \min (\text{disp_cour_glob}, \text{disp_hori_glob}) \end{array}$$

- appliquer la politique de distribution définie par les coefficients de satisfaction attendue et en déduire la "pression" de la demande sur les ressources et la mobilisation effective de celles-ci dans le respect des règles de gestion définies au niveau des retenues
- ajuster les transferts d'eau suivant les priorités définies au niveau des demandes pour assurer la validité du fonctionnement hydraulique du système. Ceci permettra d'avoir une image de la répartition des pressions moyennes dans le réseau.

Figure 12. Projet du menu de simulation d'un hydro-aménagement

Région	Climato.	Conception	Simulation	Analyse	Utilitaires	Quitte
--------	----------	------------	-------------------	---------	-------------	--------

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">Simulation hydro-aménagement</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Simulation scénario</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Suppression de simulations</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Quitte</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center;">Modifie</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Simule</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Quitte</td> </tr> </table> <p>Type de simulation</p> <p>Durée horizon prévisionnel : <input type="text" value="1"/> jour(s) Horizon moyen : moyenne glissante</p> <p>Prévision prise en compte : <input type="text" value="Prévision certaine : jours historiques"/></p> <p>Période de simulation</p> <p>Période disponible : <input type="text" value="1er avril 1955 au 31 mai 1981"/></p> <p>Simuler de : mois <input type="text"/> année <input type="text"/> à mois <input type="text"/> année <input type="text"/></p> <p>Conditions initiales</p> <p><input type="checkbox"/> Retenues</p> <p><input type="checkbox"/> Périmètres d'irrigation</p> <p>Conservation données simulées</p> <p>Conservé : <input type="checkbox"/> en cas de déficit toute la période simulée cumuls mensuels et cas de déficit</p> <p>dans fichier numéro : <input type="text"/></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Numéro</th> <th style="width: 80%;">Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Liste des simulations existantes sur l'hydro-am.</td> </tr> </tbody> </table>	Simulation hydro-aménagement			Simulation scénario			Suppression de simulations			Quitte			Modifie	Simule	Quitte	Numéro	Description	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Liste des simulations existantes sur l'hydro-am.		<div style="text-align: center;">  V.O.O. 1990 © ORSTOM </div> <p>Région : <input type="text"/></p> <p>Hydro-am. : <input type="text"/></p> <p>Scénario : <input type="text"/></p> <p>Sélection composant</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">Prise en rivière</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Bief naturel</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Lien</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Jonction</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Prise débit dérivé</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Station traitement</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Demande A.E.P.</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Périmètre d'irrigation</td></tr> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Haut</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Bas</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">X:</td> <td style="width: 50%;">Y:</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">VUE</td> <td style="text-align: center;"> <input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ZOOM</td> <td style="text-align: center;"> <input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">VUE TOTALE</td> <td style="text-align: center;">1:1</td> </tr> </table>	Prise en rivière	Bief naturel	Lien	Jonction	Prise débit dérivé	Station traitement	Demande A.E.P.	Périmètre d'irrigation	Haut	Bas	X:	Y:	VUE	<input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>	ZOOM	<input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/>	VUE TOTALE	1:1
Simulation hydro-aménagement																																								
Simulation scénario																																								
Suppression de simulations																																								
Quitte																																								
Modifie	Simule	Quitte																																						
Numéro	Description																																							
<input type="text"/>	<input type="text"/>																																							
Liste des simulations existantes sur l'hydro-am.																																								
Prise en rivière																																								
Bief naturel																																								
Lien																																								
Jonction																																								
Prise débit dérivé																																								
Station traitement																																								
Demande A.E.P.																																								
Périmètre d'irrigation																																								
Haut	Bas																																							
X:	Y:																																							
VUE	<input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/> <input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/>																																							
ZOOM	<input type="button" value="←"/> <input type="button" value="→"/>																																							
VUE TOTALE	1:1																																							

Les modalités de simulation à préciser portent sur :

- le type de simulation : il s'agit de définir l'horizon prévisionnel qui sera associé au pas de temps de la période à simuler. L'utilisateur peut choisir la durée de cet horizon et le type de prévision prise en compte par sélection dans une liste.

En effet, l'horizon considéré peut faire l'objet :

- d'une prévision certaine, les données de la période à venir étant constituées des données climatologiques des jours historiques de la période à simuler,
- ou d'une prévision moyenne, les données de la période à venir étant constituées par les moyennes glissantes des données climatologiques de toute la période disponible.

Considérer une prévision certaine peut sembler irréaliste mais il convient d'avoir à l'esprit l'objectif fixé: dresser un constat des hydro-aménagements. Ainsi ce type de simulation devrait permettre d'approcher plus facilement le fonctionnement optimal des systèmes d'eau.

Considérer une prévision constituée de moyennes glissantes est beaucoup plus proche de l'introduction d'une zone tampon saisonnière.

Mais reproduire la gestion opérationnelle peut consister en un compromis entre les deux approches, considérer un horizon à échéance rapprochée avec prise en compte de zones tampons.

- la période de simulation : l'utilisateur peut spécifier le mois-année début et le mois-année fin de la période à simuler.

- les conditions initiales : il s'agit de définir l'état, à considérer en début de simulation, des réserves pour les composants en possédant, retenues et périmètres d'irrigation. Cet état pourra être défini par le taux de remplissage : pourcentage de stockage utile pour les retenues et rapport de l'état de la réserve à la réserve utile pour les périmètres d'irrigation.
- la conservation des données simulées : le volume des données résultant de la simulation, notamment en journalier, peut être très important. Aussi l'utilisateur pourra choisir par sélection dans une liste le type de données à conserver, sachant que ce choix pourra être limitatif pour l'analyse ultérieure.

4 Analyse

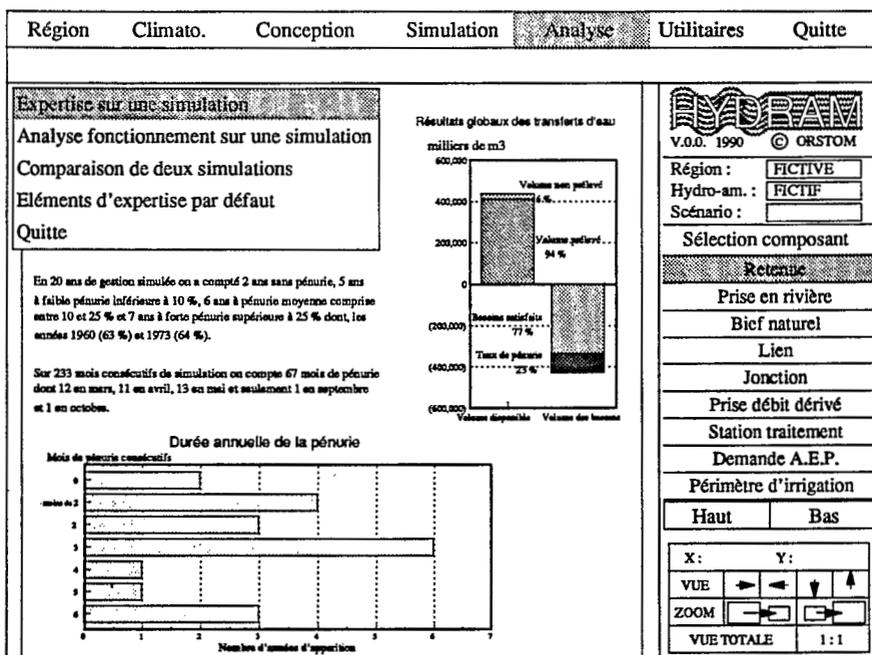


Figure 13. Projet de présentation d'une analyse interprétée

Les fonctions qui suivent ne font pas l'objet d'un long développement, car elles sont encore en cours de définition. Il convient de souligner l'esprit de réalisation, commun à tout l'environnement: fournir des outils à plusieurs niveaux de spécification, permettant des approches plus ou moins poussées suivant les buts recherchés ou la connaissance requise.

- **Expertise sur une simulation**

Cette fonction doit offrir une analyse interprétée présentée sous forme de textes, tableaux, graphiques des résultats de simulation. Elle s'attachera donc à présenter des résultats globaux reflétant le fonctionnement d'un hydro-aménagement, voire d'un scénario. Le constat reposera sur des calculs statistiques plus ou moins complexes, notamment sur l'analyse des défaillances.

Le constat sera en grande partie basé sur la "logique floue", à savoir le lien entre le quantitatif et le qualitatif, pour l'élaboration de textes clairs utilisant des notions telles que faible, moyenne, forte. Ces notions seront employées pour la classification de la pénurie, la hiérarchisation des besoins.

- **Analyse du fonctionnement sur une simulation**

Cette fonction permettra l'étude de points particuliers de fonctionnement, grâce à des outils de sélection et de calcul sur les données.

Ces éléments viseront à cerner au plus vite les causes de défaillance. Les résultats seront fournis sous forme de tableaux et graphiques.

- **Comparaison de deux simulations**

Cette fonction permettra de comparer directement les résultats globaux de deux simulations. Cette option sera utile en particulier pour dégager rapidement le gain apporté par de petites variantes sur un hydro-aménagement.

- **Éléments d'expertise par défaut**

C'est à ce niveau que seront formalisés les éléments de "logique floue", utiles pour assurer la convivialité mais aussi facilitant les combinaisons pour les classifications, les conclusions des expertises. La définition de ces liens quantitatif-qualitatif pourra se faire à partir de sélection dans une liste.

5 Conclusion

Le fil directeur dans la conception d'HYDRAM tient en l'abc suivant:

- un hydro-aménagement constitue un système hiérarchisé de composants avec des propriétés et des comportements similaires, mais de spécifications plus ou moins complexes.
- la simulation s'inscrit dans un cadre didactique et permet une grande souplesse dans la mise en oeuvre du modèle.
- une formalisation de l'analyse permet d'obtenir des bilans clairs et synthétiques à partir de résultats globaux.

L'application, construite sur ces bases, permet d'obtenir facilement et rapidement les conséquences prévisibles de différentes alternatives d'aménagement, en favorisant la description externe du système d'eau, la réutilisation de l'existant, le pouvoir d'agrégation et désagrégation de l'information, l'interactivité, le graphisme.

Notre objectif immédiat n'impliquait qu'une approche quantitative de la ressource. Il est évident qu'un outil de gestion des hydro-aménagements se doit de recouvrir bien d'autres aspects: production électrique, qualité de l'eau... Mais de même il doit pouvoir proposer facilement un éventail de démarches de spécialistes: hydrologues, agronomes...

C'est dans la nécessité d'extensions que le choix du mode de développement devient primordial. Alors pourquoi notre choix de conception et programmation par objets?

"L'idée de base est de s'écarter de toutes les méthodes informatiques traditionnelles en oubliant, au moins temporairement, les "fonctions" du système sur lequel on travaille pour privilégier les "objets" qu'il manipule. Cette idée a un corollaire, c'est ce qui caractérise un objet (pris au sens large, cela peut être une retenue, un système de gestion, une structure de données...), ce n'est pas ce qu'il est, mais ce qu'on en fait. C'est une autre façon de réintroduire les fonctions. De là toute l'approche -qui a une base théorique rigoureuse- des "types abstraits", qui consiste à spécifier des objets, de façon externe (et non interne) en leur donnant une axiomatique au sens mathématique (comme on décrit un corps, un anneau...)."

Tels sont les fondements, retranscrits avec un peu de *retenue*, vus par Bertrand MEYER [Monde Informatique 1989], principal concepteur du langage EIFFEL [Interactive 1989], environnement choisi pour le développement d'HYDRAM. Le but affiché de ce langage est de permettre la production de "composants logiciels" fiables et réutilisables.

De manière pratique, reprenons la décomposition de notre système d'eau (voir figure 3.). Les types abstraits de données qui y sont définis (NOEUD, LIEN,...) peuvent être décrits dans des classes. Une classe définit le moule permettant de produire des objets identiques, les actions caractérisant le comportement de ces objets. Les structures du système sont uniquement fondées sur la relation de client et la relation d'héritage.

Considérons un exemple concret de la puissance de ce mode d'architecture: l'introduction dans notre système du composant micro-centrale hydro-électrique. Ceci revient à créer une nouvelle classe: MICRO_CENT qui va hériter de JONCTION, c'est à dire adopter les propriétés et le comportement de cette classe. On complétera ou modifiera cet acquis par de nouvelles propriétés et actions, permettant par exemple de calculer la puissance électrique produite. L'approche est bien sûr similaire et plus aisée si nous voulons introduire un nouveau mode de calcul de besoins en eau des cultures par exemple.

La flexibilité obtenue est très claire au niveau conception des hydro-aménagements. Mais la même souplesse est recherchée au niveau de la conception de l'application elle-même. "En ingénierie, une bonne conception c'est d'abord une conception élégante, et ce n'est pas un hasard: dans le domaine technique en général, on ne sait bien maîtriser que ce qui est simple" [MEYER 1989]. La finalité est d'offrir un environnement logiciel d'outils permettant une approche attractive et graduelle de l'analyse des systèmes d'eau. Une première version devrait être opérationnelle début 1991.

6 Références

COMBRES 1989.

COMBRES, J.C., 'Besoins en eau et pilotage de l'irrigation de la canne à sucre en Grande-Terre', Rap. d'exécution Convention Régionale IRFA/CIRAD, feb. 89, 75 p.

FEDRA 1985.

FEDRA, K., LOUCKS, D.P., 'Interactive Computer Technology for Planning and Policy Modeling', Wat.Resour.Res., feb. 85, Vol. 21, NO. 2, p 114-122

FEDRA 1985a.

FEDRA, K., 'A Modular Interactive Simulation System for Eutrophication and Regional Development', Wat.Resour.Res., feb. 85, Vol. 21, NO. 2, p 143-152

Interactive 1989.

'EIFFEL : an Introduction', Interactive Software Engineering Inc., Version 2.2, 1989, 14 pages

LOUCKS 1985.

LOUCKS, D.P., KINDLER, J., FEDRA, K., 'Interactive Water Resources Modeling and Model Use : An Overview', Wat.Resour.Res., feb. 85, Vol. 21, NO. 2, p 95-102

MEYER 1989.

MEYER, B., 'Conception et Programmation par Objets', Actes du Séminaire du 18-19 sep. 1989, Paris, 218 p.

MOLLE 1985.

MOLLE, F., 'Potentialités des Açudes du Nordeste Brésilien pour un Usage en Irrigation', Rapport stage, Recife, dec. 1985, 142 p.

Monde Informatique 1989.

Dossier 'Approche Objet : Mode ou Révolution ?', le Monde Informatique, N° 376, 10 jul. 89, p 16-31

MORELL 1990.

MORELL, M., 'Variabilité et gestion des ressources en eau en Guadeloupe', Actes des 6èmes journées Hydrologiques "Usage agricole de l'Eau", ORSTOM Montpellier 12-13 sep. 90

SIGVALDASON 1976.

SIGVALDASON, O.T., 'A Simulation Model for Operating a Multipurpose Multireservoir System', Wat.Resour.Res., apr. 1976, Vol. 12, NO. 2, p 263-278

VOTRUBA 1989.

VOTRUBA, L., KOS, Z., NACHAZEL, K., PTERA, A., ZEMAN, V., 'Analysis of Water Resource Systems', Elsevier, Developments in Water Science, NO. 32, 1989, 454 p.

**DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE
BRESILIEN SEMI-ARIDE**

Par

E. CADIER

F. MOLLE

C. HENRIQUE CA VALCANTI DE ALBUQUERQUE

F.R. DOHERTY

M. MONTGAILLARD

DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE BRÉSILIEN SEMI-ARIDE

Par

Eric Cadier¹, François Molle², Carlos Henrique Cavalcanti de Albuquerque³, Frederico Roberto Doherty⁴ et Marc Montgaillard⁴

RESUME -- Utilisant la méthode de classification hydrologique de petits bassins versants proposée par l'équipe de la SUDENE et de l'ORSTOM, et avec l'aide du modèle de simulation POMAC, les auteurs présentent une méthode de dimensionnement de petites retenues collinaires en fonction des caractéristiques physico-climatiques du bassin d'alimentation, du type d'utilisation prévue et du risque de défaillance tolérable. L'optimum du dimensionnement varie beaucoup en fonction de la finalité de l'ouvrage et du critère choisi. Pour un module de 1.000.000m³, l'une des solutions recommandée est la construction d'un réservoir de 300.000m³ et l'implantation d'un périmètre de 10ha. Cette méthode sera utilisée dans un manuel de construction de petits barrages.

¹ Chercheur - SUDENE/ORSTOM

² Ingénieur - SUDENE/Coopération Française

³ Analyste - SUDENE/CISAGRO

⁴ Ingénieur - SUDENE/CISAGRO

DIMENSIONAMENTO DE PEQUENOS RESERVATARIOS SUPERFICIAIS DO NORDESTE SEMI-ARIDO

RESUMO -- Utilizando o método de classificação hidrológica das pequenas bacias hidrográficas proposto pela equipe da SUDENE et do ORSTOM, com ajuda do Modelo de Simulação de Operação dos Pequenos Açudes - POMAC, os autores apresentam um método de dimensionamento para um pequeno reservatório, em função das suas características fisiográficas, do tipo de utilização previsto e do risco assumido do não fornecimento de água. Esta metodologia será utilizada para a redação de um manual de construção de pequenas barragens a ser elaborado pelo PRONI com a assessoria do BUREAU of RECLAMATION (USA).

SIZE OPTIMIZATION OF SMALL DAMS IN THE NORTH EASTBRAZILIAN SEMI-ARID AREA

SUMARY -- Using a hydrological classification method of the small catchement basins put forward by SUDENE and ORSTOM's teams and the simulation model of the small dams management (POMAC), the authors present a dimensions optimization method for one small dam according to its: - physical characteristics - the kind of expected use - the accepted failure of the water supply. Then, they show the elaboration's details of the local dimensions optimization and management norms according to available datas and maps. Those norms will be used by PRONI and the BUREAU of RECLAMATION (USA) for the redaction of handbook of small dams building.

1. INFORMATIONS NECESSAIRES .

1.1 Cas général .

Le dimensionnement d'un barrage est une opération complexe qui s'effectue en fonction de trois principaux types d'information:

a) Des informations sur la finalité de l'aménagement et le niveau de risque que l'on peut accepter ; ceci peut être ,par exemple, la protection d'une région contre les crues, la régularisation des débits d'étiage pour la navigation ou encore l'alimentation en eau d'une ville ou d'un périmètre d'irrigation .

b) Des informations sur les ressources disponibles sur le site du barrage: hydrologie, climatologie, topographie, pédologie, population etc.

c) Des informations sur l'impact écologique, économique et social de l'ouvrage projeté qui seront utilisées pour l'optimisation du dimensionnement et de la gestion du réservoir .

1.2 Petits barrages destinés à l'irrigation .

Dans le cas particulier du dimensionnement de petits barrages destinés à l'irrigation dans les zones sèches, nous aurons plus précisément besoin d'évaluer :

a) La quantité d'eau disponible: variations saisonnières et interannuelles des écoulements, crues, pluies, évaporations et autres paramètres climatiques .

b) Les caractéristiques physiques et surtout topographiques du site du barrage qui permettront le calcul du volume maximum possible de la retenue, de la relation entre le volume d'eau stockée et le coût de l'ouvrage ainsi que de la surface maximum irrigable par gravité et/ou par pompage.

c) Les scénarios possibles d'utilisation et les caractéristiques techniques et économiques de l'aménagement prévu qui sont fonction de la main d'oeuvre agricole disponible, du volume d'eau qu'il faudra réserver pour l'alimentation humaine et animale, du niveau de risque de défaillance que l'on peut accepter, du type et du coût de construction du barrage (terre,béton etc), du système d'irrigation (aspersion, goutte-à-goutte), du capital disponible etc..

d) D'autres aspects, souvent plus difficilement quantifiables, tels que les impacts sociaux, économiques et l'incidence de l'ouvrage sur le milieu naturel; citons, par exemple, la modification des régimes hydrologiques ou la salinisation de la retenue et du périmètre d'irrigation.

Chacun de ces éléments peut être un éventuel facteur limitant. Ainsi , la dimension de l'aménagement est automatiquement limitée par la topographie du site , par la main d'oeuvre ou par le capital disponible.

Quand il n'y a pas, à priori, de limite claire à la taille de l'ouvrage, nous devons nous appuyer sur un ou plusieurs critères d'optimisation pour dimensionner l'ouvrage et définir sa gestion.

Dans les exemples présentés, nous supposons que la disponibilité des ressources en eau constitue le seul facteur limitant, ce qui veut dire que l'on peut implanter un açude ou un périmètre aussi grand que l'on veut. Nous montrerons donc comment effectuer le dimensionnement en nous basant sur des critères de rendement hydraulique et/ou économique du système.

1.3. Principaux facteurs incidents

La figure 1⁽¹⁾ présente les principaux facteurs à prendre en compte pour comprendre (et donc modéliser, gérer et dimensionner rationnellement) le fonctionnement du système Bassin versant + Açude⁽²⁾ + Périmètre irrigué (et autres usages). Certains de ces facteurs correspondent directement à des caractéristiques physiques du système étudié (pluviométrie, géométrie des réservoirs, évaporation etc.), tandis que d'autres sont des critères calculés à partir d'hypothèses contenant une part d'arbitraire, comme la rentabilité économique ou le rendement hydraulique du système.

Ne pouvant analyser ici, de manière exhaustive, tous ces facteurs, nous nous limiterons, à titre d'exemple, à quelques considérations sur les facteurs suivants: la caractérisation hydrologique des bassins versants d'alimentation, la géométrie des réservoirs, le rôle de l'évaporation, de l'infiltration, et des problèmes liés à la qualité de l'eau.

(1) Dans la partie droite de la figure 1, nous avons résumé les principaux objectifs du Programme de mise en valeur des petites retenues collinaires du NORDESTE Brésilien, dans le cadre duquel s'inscrit ce travail.

(2) Les barrages de toutes tailles ainsi que leurs retenues sont appelés Açudes dans le NORDESTE Brésilien.

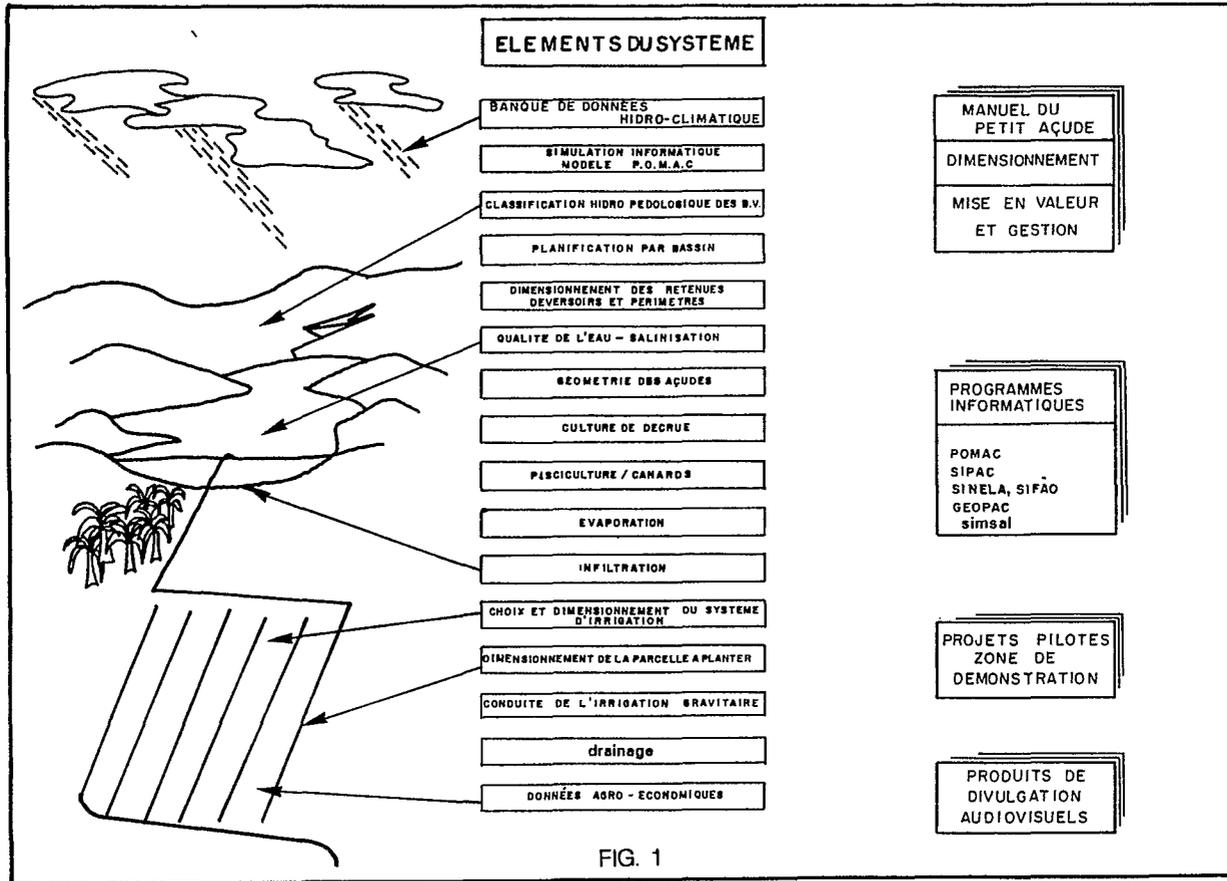


FIG. 1

1.3.1. Caractérisation hydrologique du bassin versant d'alimentation.

Il importe d'évaluer tout d'abord les ressources en eau disponibles.

L'évaluation des ressources pluviométriques et des autres caractéristiques climatiques ne présentent pas de difficulté particulière et peut être réalisée à l'aide d'une carte d'isoyètes et d'un annuaire climatologique.

L'évaluation des ressources en eau existantes dans le réseau hydrographique, sans lesquelles le réservoir ne peut être rempli, est plus complexe.

Compte tenu de l'impossibilité économique de réaliser une étude hydrologique classique pour ce type de petit aménagement, nous avons été amenés à mettre au point, à partir de toute l'information existante, une méthode de **classification hydrologique** des petits bassins.

Cette méthode est basée sur un classement **hydropédologique** des unités de sols qui composent le bassin. Ce classement est spécifique pour cette partie du Brésil. Les valeurs des lames annuelles écoulées ont été calculées à l'aide des résultats obtenus sur un réseau de près de 40 petits bassins versants élémentaires et ensuite comparées aux écoulements observés sur les stations du réseau hydrométrique général. Des corrections doivent être ensuite être appliquées en fonction de la pluviométrie, de la couverture végétale, de la densité de réservoirs existants et d'autres facteurs correctifs.

A titre d'exemple, la lame écoulée annuelle du groupe de sol le plus fréquent (55% de la surface) est de 37 mm, sous l'isoyète de 600mm, mais les écoulements peuvent varier entre 0 et 125mm, selon la classe de sol. La correction pluviométrique conduit à multiplier les écoulements par 1,4 pour chaque 100mm de pluie supplémentaire.

Une deuxième partie de cette méthode permet le calcul, indispensable pour le dimensionnement des déversoirs, des volumes écoulés et des débits de pointe des crues.

1.3.2. Géométrie des réservoirs.

La relation entre la profondeur (H), la superficie (S) et le volume (V) varie beaucoup avec la topographie et la géométrie naturelle du site du barrage. Nous avons choisi de la représenter par une fonction puissance de la forme $V = K.H^\alpha$ (qui fournit, en dérivant: $S = \alpha.K.H^{\alpha-1}$). Les ajustements de cette formule fournissent, en général, d'excellents résultats, moyennant quelques précautions quant à la détermination de K et de α , couple de paramètres géométriques caractéristiques de l'açude. Ce couple (K, α) est déterminé à partir de relevés topographiques en ajustant une régression sur les couples $(\log(H_i), \log(V_i))$, chaque point étant pondéré par V_i . En général, on obtient de bons résultats, avec des écarts moyens de l'ordre de 1% après avoir éliminé les "points bas", c'est à dire les volumes inférieurs à 15% du volume maximum; cette partie de l'açude correspond souvent à un volume mort; on y observe fréquemment des "anomalies" du profil topographique provoqués, par exemple, par des surcreusement ou des remblaiements.

Le coefficient (K) est appelé coefficient d'ouverture, car il est fonction du caractère plus ou moins encaissé de la vallée où se situe l'açude. Il varie communément entre 500 et 1500, mais peut atteindre plusieurs dizaines de milliers pour des grands açudes.

Le coefficient (α) est lié à la concavité des berges de la retenue; on convient de l'appeler coefficient de forme. Sa moyenne régionale est de 2,70; il varie couramment entre 2,2 et 3,4.

L'influence de la géométrie sur le type d'utilisation n'est pas négligeable:

- Pour garantir la sécurité d'un approvisionnement en eau, le facteur prépondérant est la profondeur, dont dépend la durée pendant laquelle la retenue restera en eau, les pertes par évaporation (qui peuvent s'exprimer directement en lame évaporée sur la retenue) ayant souvent un poids très important.

- Pour l'irrigation, c'est le volume disponible qui importe avant tout, le miroir d'eau devant être aussi réduit que possible.

- Pour la pisciculture et les cultures de décrue, le facteur important est la surface de la retenue. Dans le premier cas, il est souhaitable que la surface n'ait que peu de variation avec la profondeur, alors que dans le second c'est l'inverse, puisqu'il s'agit de libérer une surface maximum pour la culture de décrue.

Ces différences géométriques interviennent donc de manière significative dans le dimensionnement. La pérennité d'un açude ne dépend pas donc seulement de la relation entre son volume et le volume écoulé moyen, mais aussi, de sa profondeur.

1.3.3. Evaporation, infiltration et qualité de l'eau.

La moyenne annuelle de l'évaporation mesurée sur bac de classe A est de l'ordre de trois mètres dans la zone semi-aride du Nordeste brésilien appelée Sertão. Pour une même station, on observe des variations d'une année sur l'autre de plus ou moins 20%. Comme on pouvait s'y attendre, les années déficitaires sur le plan pluviométrique, correspondent souvent à des remplissages insuffisants de l'açude et sont aussi les années de plus forte évaporation.

Le rapport entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évaporation du bac de classe A est de l'ordre de 0,70, tandis que l'évaporation de l'açude peut-être estimée par $EVA = 0,83 \cdot EVT$. Ce dernier coefficient varie en fait entre 1,0 et 0,70 en fonction de la taille de l'açude.

Pour les plus petits açudes, il faudra tenir compte des infiltrations, qui représentent, par exemple et en moyenne, 23% du rabaissement naturel total d'un échantillon de près de 190 petits açudes. Ce rabaissement moyen est de l'ordre de 1cm par jour en saison sèche.

La qualité de l'eau d'irrigation doit toujours être contrôlée. Elle dépend tout d'abord des caractéristiques physico-chimiques des sols du bassin d'alimentation qui charge l'eau en sels, puis de phénomènes de reconcentration par évaporation dans la retenue. Cette reconcentration dépend de sa forme: surface, volume et profondeur qui conditionnent la fréquence des déversements, des volumes évaporés. Elle dépend aussi des volumes retirés par les utilisateurs.

2. RESULTATS OBTENUS SUR UN EXEMPLE CONCRET .

Nous allons montrer, sur un exemple concret, comment dimensionner un barrage et de son périmètre d'irrigation en fonction de divers critères ou de risque de défaillance. Nous traiterons le cas d'une petite rivière intermittente située dans la partie semi-aride du NORDESTE Brésilien et caractérisée par un écoulement moyen interannuel de 1.000.000 de m³.

Parmi les outils de dimensionnement⁽³⁾ qui sont à notre disposition, nous choisirons le modèle de simulation POMAC (POtencial e Manejo de ACudes, ou, en français potentiel et gestion de petits réservoirs). Ce modèle, conçu pour simuler de manière déterministe le fonctionnement du système complexe composé par un périmètre d'irrigation, son réservoir et son bassin versant d'alimentation, nous permettra, en fait, de faire varier à notre guise les paramètres de ce système dont nous avons parlé ci-dessus. Nous montrerons donc les diverses solutions possibles dans le cas d'une rivière d'un module donné. Les normes régionales de dimensionnement seront ensuite obtenues en étudiant de la même façon le cas de rivières de modules différents.

2.1 Caractéristiques de l'exemple choisi

2.1.1 Ressources en eau disponibles

- a) Surface du bassin d'alimentation: 11,8 Km².
- b) Précipitation moyenne annuelle: 670 mm/an
Pluviomètre de référence: Aracati-açu (Etat du Ceara).
- c) Zone climatique : Sertão, station climatologique de Aracati-açu:
Evaporation annuelle: 2578 mm/an
Evapotranspiration annuelle: 1805 mm/an
- d) Classe hydrologique du bassin versant d'alimentation:

Nous avons choisi un bassin de classe 3,5 dans le système de classification hydrologique proposé par les équipes SUDENE/ORSTOM, plus exactement un bassin du type de l'Açude MOQUEM (MOQUEM est un des Bassins Versants Représentatifs étudiés par la SUDENE, dont le régime hydrologique est bien connu et a été modélisé).

(3) Nous disposons par exemple du modèle SIPAC (SIMulacao de Pequeno ACude ou, en Français, simulation de petit réservoir) qui permet, à l'aide d'un calcul itératif, le dimensionnement rapide des surfaces à planter, en fonction du taux de remplissage du réservoir, du type de culture, des autres utilisateurs et de la date calendaire.

Ces hypothèses permettent le calcul des caractéristiques hydrologiques suivantes:

Volume écoulé moyen annuel:	1.000 x 1000 m ³ /an
Volume écoulé triennal humide:	1.189 x 1000 m ³ /an
Volume écoulé médian:	892 x 1000 m ³ /an
Volume écoulé triennal sec:	396 x 1000 m ³ /an
Volume écoulé quinquennal sec:	150 x 1000 m ³ /an
Volume écoulé décennal sec:	16 x 1000 m ³ /an
Vol.écoulé accumulé mini en 3 ans secs consec.:	300 x 1000 m ³
Vol.écoulé accumulé mini en 5 ans secs consec.:	870 x 1000 m ³
Volume de la crue décennale:	1.660 x 1000 m ³ /jour
Débit de pointe de la crue décennale:	130 m ³ /s

e) distribution saisonnière de ces caractéristiques:

Moyennes	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
- Pluie (mm)	61	102	182	172	91	21	11	2	1	1	12	12
- EVP* (mm)	254	220	199	176	164	167	173	204	233	257	257	274
- ETP (mm)	178	154	139	123	115	117	121	143	163	180	180	192
- ECOUL. x1000m ³	36	103	285	394	159	17	0	0	0	0,1	6	0,3

*Bac d'évaporation de classe A

2.1.2 Caractéristiques de l'açude et du périmètre.

a) Caractéristiques du barrage:

⇒ Pour l'étude présentée plus loin, nous avons admis la relation suivante entre la profondeur H et le volume V du barrage: $V = 1500 H^2$

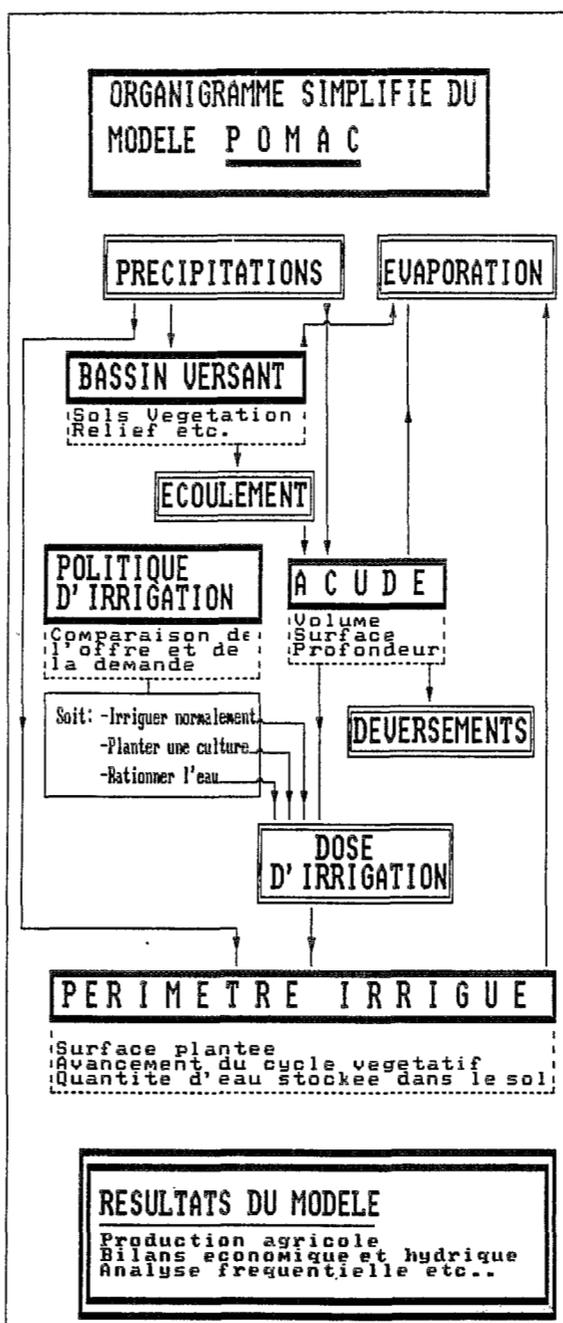
⇒ Evaporation de l'açude = 0,83 x EVP .

⇒ On suppose, dans un premier temps, qu'il n'y a pas de consommation d'eau humaine ou animale.

⇒ On s'interdit l'utilisation d'un volume mort équivalent aux derniers 15% du volume de l'açude.

b) Caractéristiques agronomiques du périmètre d'irrigation

- Evapotranspiration: 0,70 x EVP
- Efficience de l'irrigation: 0,50
- Type de culture de saison sèche, totalement irriguée: tomate
- Durée du cycle végétatif: 120 jours
- Valeurs de KC(ETM/ETP): 0,4 a 1,0
- Rendement maximum: 29 tonnes/hectare
- Type de culture pluviale de saison des pluies avec irrigation de complément:maïs et haricot



VARIATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE
DE L'ACUDE EN FONCTION DE SON VOLUME
Pour un périmètre de 10 ha

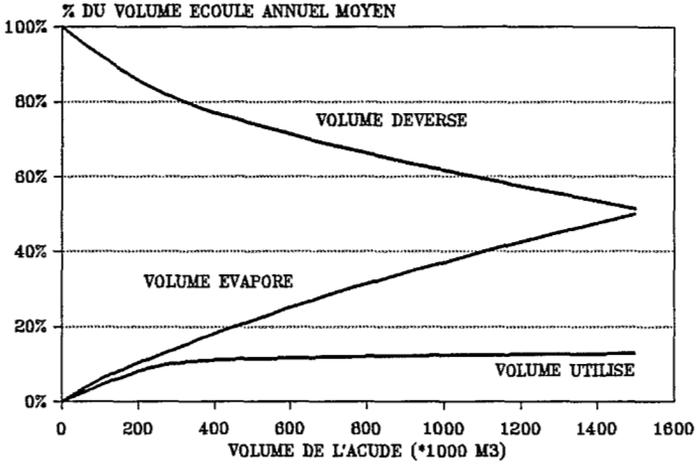


FIG.2

VOLUME DEVERSE
EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE
(POUR DIVERSES PERIODES DE RETOUR)

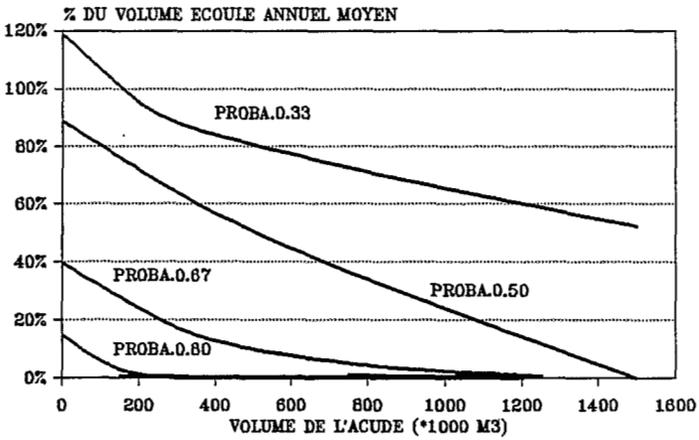


FIG.3

c) Paramètres économiques:

- Açude:

- Relation entre le volume de terre de la digue et le volume d'eau : $V_t = 5,02 * V_x^{0,629}$
- Prix du barrage : Prix = $2,18 * V_t^x$ (en US\$).

- Périmètre:

- Coût à l'hectare du périmètre de 2000 US\$.
- Prix de la tomate: 120 US\$ la tonne.

2.2. Analyse du fonctionnement du système .

Pour ne pas rendre cette présentation trop complexe, nous étudierons le fonctionnement du système en supposant, sauf indication contraire, que la surface installée du périmètre d'irrigation est de 10ha. Cette valeur (ou surface de référence) de 10ha est, nous le verrons, proche de la surface du dimensionnement optimal que nous recommanderons finalement.

2.2.1.Utilisation des ressources en eau .

2.2.1.1. Bilan hydrique du réservoir.

La figure 2 montre l'évolution des principaux termes du bilan de la retenue en fonction de son volume maximum (V_x), pour la surface installée du périmètre irrigué de référence de 10ha. Nous y avons reporté les pourcentages volumétriques moyens annuels (par rapport au volume écoulé) de:

- l'eau DEVERSEE: c'est l'eau qui sera encore disponible en aval du système.
- l'eau UTILISEE pour l'irrigation.
- l'eau PERDUE par évaporation .

Ces courbes ont été tracées pour des volumes V_x du barrage variant entre 0 et $1.500.000 \text{ m}^3$; $1.500.000 \text{ m}^3$ correspond à un barrage d'une profondeur maximum de 12,92 m .

Nous sommes amenés à faire les commentaires suivants :

-La courbe du pourcentage d'eau utilisée atteint un palier de l'ordre de 12% , qui montre que ce périmètre de 10ha sera alimenté de manière totalement satisfaisante dès que le volume du réservoir sera supérieur à 400.000 ou 500.000 m^3 . Voici donc déjà une première approche du dimensionnement !

-Les proportions d'eau DEVERSEE, EVAPOREE ou UTILISEE varient de manière logique en fonction de la taille des réservoirs.

-Des graphiques analogues, non présentés, montrent que si l'on fait varier la taille du périmètre installé, les paliers de production seront atteints pour des tailles de réservoir d'autant plus faibles que le périmètre sera petit. Ainsi ce palier est atteint dès 100.000m³ pour 2ha, mais ne le sera que vers 1.000.000m³ pour 30ha.

-Les courbes moyennes présentées ici peuvent être trompeuses; en effet la moyenne lisse et compense toujours les variations. Ceci est surtout vrai pour les volumes déversés, dont la distribution est très irrégulière. Il faudra aussi analyser en termes fréquentiels la distribution des productions agricoles annuelles. Nous avons choisi pour cela, deux période de retour caractéristiques: la triennale sèche pour représenter les performances du système lors de la majorité des années et la fréquence quinquennale ou décennale sèche pour analyser son comportement en année de sécheresse.

2.2.1.2. Analyse fréquentielle des déversements .

Les volumes déversés correspondent à l'eau qui sera encore disponible en aval du système. En les déduisant des volumes qui entrent dans la retenue on peut donc quantifier la modification du régime hydrologique induite par le barrage et son périmètre .

Les volumes déversés présentés sur la figure 2 sont la moyenne d'une série de valeurs annuelles très hétérogène ; ainsi , une seule année excédentaire comme 1974 ou 1985 peut représenter cinq à dix fois la moyenne interannuelle ; pour cette raison il est plus logique d'étudier les volumes déversés en termes fréquentiels .

Nous présentons donc sur la figure 3 les variations des volumes déversés pour les fréquences triennales humides , médianes , triennales et quinquennales sèches. Ces variations sont toujours comparées aux dimensions du barrage, qui irrigue un périmètre de 10ha; elles sont exprimées en pourcentage du module de la rivière qui est, rappelons-le, de 1.000.000m³.

Il est intéressant de noter les variations des fréquences de non-déversement qui correspondront à une absence totale d'eau pour les riverains situés en aval. On constate, par exemple, qu'un açude de 150.000m³ déversera quatre années sur cinq, qu'un açude de 750.000m³ déversera encore deux années sur trois et qu'un açude de 1.400.000m³ ne déversera qu'une année sur deux. Ces déversements sont nettement favorisés par le fait qu'on s'interdit d'utiliser un volume mort correspondant aux 15% inférieurs du volume du barrage, ce qui fait qu'il ne s'asséchera en général pas, d'une année sur l'autre.

Le volume de l'açude à une influence relative plus importante au cours des années déficitaires. Ainsi, pour un açude de 100.000m³ le volume déversé quinquennal sec sera de 4.900m³, soit 33% du volume naturel écoulé pour cette fréquence, alors que pour le même açude, le volume déversé triennal humide (F=0,33) sera de 107.000m³, soit 90% du volume naturel. Pour cette même fréquence (F=0,33), un açude de 1.500.000m³ déversera 50% du volume naturel écoulé.

Des résultats non publiés montrent que l'influence de la taille du périmètre d'irrigation sur les déversements est plus faible que celle de l'açude. Ceci est normal, si l'on considère la forte irrégularité des régimes hydrologiques qui concentrent d'une manière non prévisible les crues, les écoulements et donc les déversements sur de courtes périodes, alors que la politique de gestion du réservoir consiste justement à conserver le plus souvent possible un volume de réserve, qui correspondra à une marge de sécurité quasi-constante, pour parer aux aléas climatiques.

2.2.2. Production et Rentabilité du périmètre irrigué.

Nous avons reporté sur les figure 4 et 5 les accroissements de revenus provoqués par le fonctionnement du périmètre. Cet accroissement est exprimé en dollars US et correspond à la différence entre le revenu de la surface irriguée et celui de la même surface cultivée sans irrigation. Les calculs sont réalisés pour différentes surfaces du périmètre et volumes de l'açude.

Nous présentons sur les figures 4 et 5 les résultats correspondants à deux situations ou fréquences caractéristiques :

- La production garantie deux années sur trois ,qui correspond à une fréquence au non-dépassement de $F=0,667$.
- La production moyenne, calculée sur la période 1912-1985 .

Nous pouvons faire les commentaires suivants :

2.2.2.1. Production garantie deux années sur trois ($F=0,667$) (fig 4)

- Toutes les courbes de production atteignent un palier à partir d'une certaine valeur du volume maximum de l'açude V_x .

ACCROISSEMENT DU REVENU NET
 EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE
 ET DE LA SUPERFICIE DU PERIMETRE

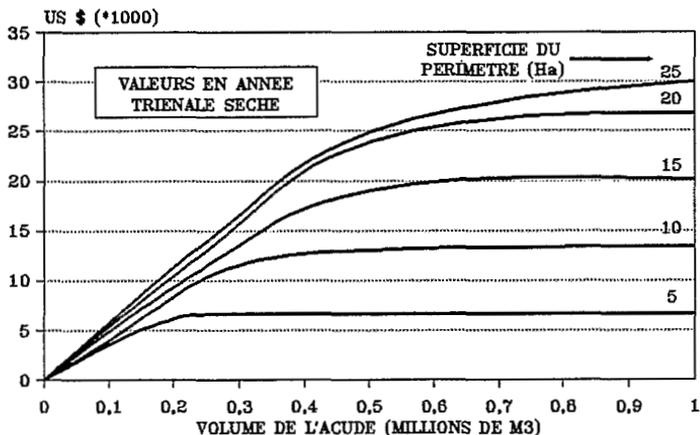


FIG.4

ACCROISSEMENT DU REVENU NET
 EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE
 ET DE LA SUPERFICIE DU PERIMETRE

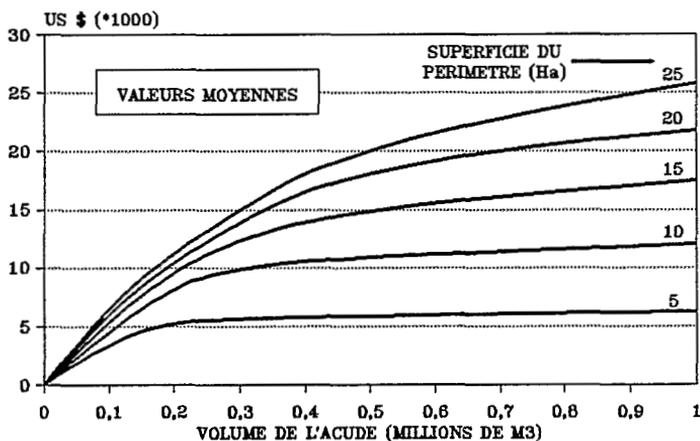


FIG.5

-Ce palier sera plus long à atteindre pour les fortes valeurs de la surface du périmètre SUP:

⇒ Ainsi, pour un périmètre de cinq hectares, on observe en dessous de $V_x = 150.000m^3$, un accroissement rapide et pratiquement linéaire de la courbe liant la production à V_x , alors que, au dessus de $V_x = 220.000m^3$, les variations de la production deviennent très faibles : on peut considérer que l'on a atteint le palier.

⇒ Pour SUP = 10ha ces deux valeurs sont pratiquement de 200.000 et de 300.000 m^3 .

⇒ Et pour 20ha de 400.000 et 600.000 m^3 .

2.2.2.2. Palier de production en fonction du périmètre installé (fig 4).

Pour les petites et moyennes valeurs de la surface du périmètre installé (SUP), les paliers de production s'accroissent proportionnellement à SUP. Mais, au-dessus d'une valeur de la surface du périmètre que nous appellerons "surface critique", les accroissements de production ne sont plus proportionnels aux accroissements de surface. Dans notre exemple, cette valeur critique est de l'ordre de 20ha.

2.2.2.3. Production garantie neuf années sur dix (F=0,90)

Des graphiques non publiés montrent que, par rapport à la production garantie deux années sur trois (F=0,667), les paliers de production et les surfaces critiques seront beaucoup plus faibles, tandis que les volumes des açudes à construire seront plus élevés.

Ceci nous confirme qu'il faudra prévoir des açudes plus grands et des périmètres plus petits pour pouvoir garantir une sécurité plus grande en cas de sécheresse.

2.2.2.4. Production moyenne (fig 5)

Sur les courbes de production moyenne, les paliers sont moins nets et plus tardifs. Ceci est principalement dû au fait que les courbes de production sont "tirées" vers le haut par quelques années très excédentaires. Cette mauvaise définition du palier, alliée au fait que l'on ne peut pas baser un dimensionnement sur quelques rares années excédentaires nous feront préférer les valeurs fréquentielles (F=0,667, F=0,90 etc) pour les calculs d'optimisation.

2.2.2.5. Taux interne de rentabilité (TIR - Fig 6)

On peut définir le taux interne de rentabilité ou TIR d'un investissement comme étant le taux d'intérêt auquel il faudrait placer le capital investi pour en retirer des bénéfices équivalents. La figure 6 nous montre que le maximum du TIR sera de l'ordre de 18 à 19% et sera atteint pour des périmètres de 20 à 25ha et des volumes d'açudes respectifs de 470.000 et 650.000m³.

Notons, sur cette même figure, que l'accroissement du TIR est très rapide au début, mais se tasse dès que l'on dépasse 10ha, surface pour laquelle le TIR a déjà atteint 14% pour un volume de 280.000m³ et devient très faible au delà de 15ha (TIR de 17% pour 370.000m³).

TAUX INTERNE DE RENTABILITE EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE ET DE LA SUPERFICIE DU PERIMETRE

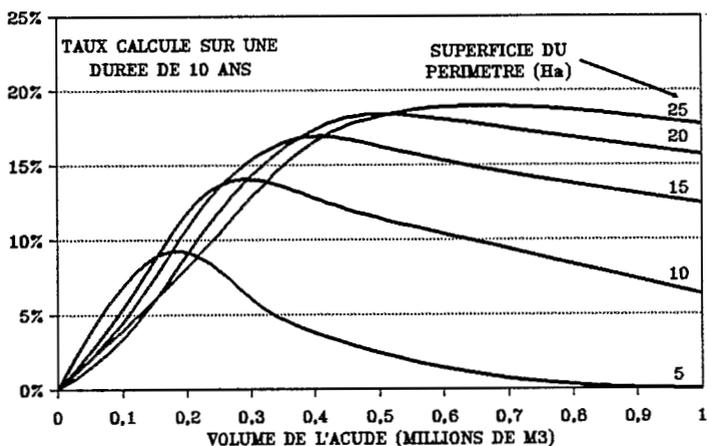


FIG.6

2.3. Dimensionnement du volume de l'açude et de la surface du périmètre .

2.3.1. Choix des critères de dimensionnement.

Le dimensionnement du système doit s'effectuer en fonction de plusieurs types de critères:

a) Des critères rendant compte de la façon dont le système utilise les ressources hydriques disponibles.

Nous avons déjà présenté au paragraphe 2.2.2.1. la proportion du module qui est utilisée, déversée ou perdue par évaporation.

Nous allons définir ici un nouveau critère, qui intègre les précédents et que nous appellerons "**rendement hydraulique**" du système. Le **rendement hydraulique** est le rapport entre l'eau effectivement utilisée pour l'irrigation et l'eau définitivement perdue par évaporation (cette évaporation contribuant également à la salinisation de la retenue).

b) Des critères représentant l'eau qui sera encore disponible, dans la rivière, en aval de la retenue. Nous pouvons reprendre pour cela les critères d'analyse fréquentielle des déversements exposés au paragraphe 2.2.2.2. Dans une optique d'aménagement régional, le contrôle des déversements est fondamental, puisqu'il permet de prévoir, à l'échelle de la région, l'impact d'un très grand nombre de petites retenues sur les régimes hydrologiques.

c) Des critères représentant la **production** et la **rentabilité économique** du système. Nous avons exposé au paragraphe 2.2.2. les courbes de variation de la production et du TIR du système. Les paramètres choisis rendent compte de manière relativement satisfaisante de cet aspect du problème.

c) D'autres critères, prenant en compte d'autres aspects tels que, par exemple, la minimisation de la **salinité** de l'açude, la maximisation des volumes minimum annuels de l'açude ou encore la minimisation de l'investissement total.

d) L'étude du fonctionnement du système pendant les **périodes sèches critique**, correspondant soit à de faibles période de retour soit à des périodes de plusieurs années sèches consécutives.

Le modèle POMAC nous permet l'analyse des variations des critères précédents pour des périodes de retour quinquennales ou décennales et pour des périodes de 3,4 ou 5 années sèches consécutives de diverses périodes de retour.

2.3.2. Prise en compte de ces critères de dimensionnement.

La prise en compte de l'ensemble de ces critères met en jeu des contraintes souvent **contradictoires** et ne semble pas avoir de solution générale objective et indiscutable.

Nous avons vu, par exemple, que si l'on voulait maximiser le rendement économique du système, il fallait installer un périmètre de 20 à 25ha et construire un açude de près de 600.000m³. Cette solution diminuera évidemment fortement les volumes disponibles en aval et aggravera les problèmes de salinisation de la retenue. Ces deux critères exigent, en effet, des açudes et donc des périmètres les plus petits possibles. Quant à la sécurité en année sèche, elle exigera, au contraire des açudes les plus grands possible mais de petits périmètres.

Nous rechercherons un moyen terme à ces positions contradictoires, en nous basant sur les hypothèses et principes suivants:

a) Surface de référence du périmètre:

Puisque, apparemment, l'optimisation simultanée du volume de l'açude et de la surface de son périmètre semble insoluble, nous considèrerons l'optimisation du volume de l'açude comme prioritaire. Pour cela, nous fixerons, arbitrairement, la surface du périmètre à 10ha. Cette valeur de 10ha n'est pas prise au hasard; elle correspond à peu près à la moitié de la su.face maxima optimale, sur le plan économique; il semble donc raisonnable de ne prendre que la moitié de la surface maximum théorique, dans une région notoirement sous-équipée en périmètres irrigués (mais qui est par contre sur-équipée en petits barrages). Nous avons par ailleurs constaté sur la figure 6 et au paragraphe 2.2.2.5. que l'on observait, au dessus de 10ha, un certain tassement de l'accroissement du TIR en fonction de la surface du périmètre.

b) Prise en compte des différents critères.

Nous avons reporté sur la figure 7 les plages de variation de 6 critères en fonction du volume de la retenue.

Nous constatons sur ce graphique qu'un volume de 300.000m^3 , est très proche du maximum trouvé selon le critère du TIR (275.000m^3 , pour un TIR maxi de 14%). Cette valeur de 300.000m^3 permet aux quatre premiers critères d'être à plus de 90% de leur valeur maximum.

Seuls les critères des volumes déversés garantis deux années sur trois et pour trois années sèches consécutives n'atteindront respectivement que 45 et 25% de leur maximum. Mais il est impossible de construire un barrage qui ne diminue pas fortement les déversements en année déficitaire!

Ce couple de valeur de 300.000m^3 pour le Volume et de 10ha pour le périmètre sera pris comme **situation de référence** dans le chapitre suivant. Ces valeurs de référence correspondent au dimensionnement que l'on pourrait recommander normalement.

Variations des différents critères en fonction du volume de l'acude.

Critères utilisés

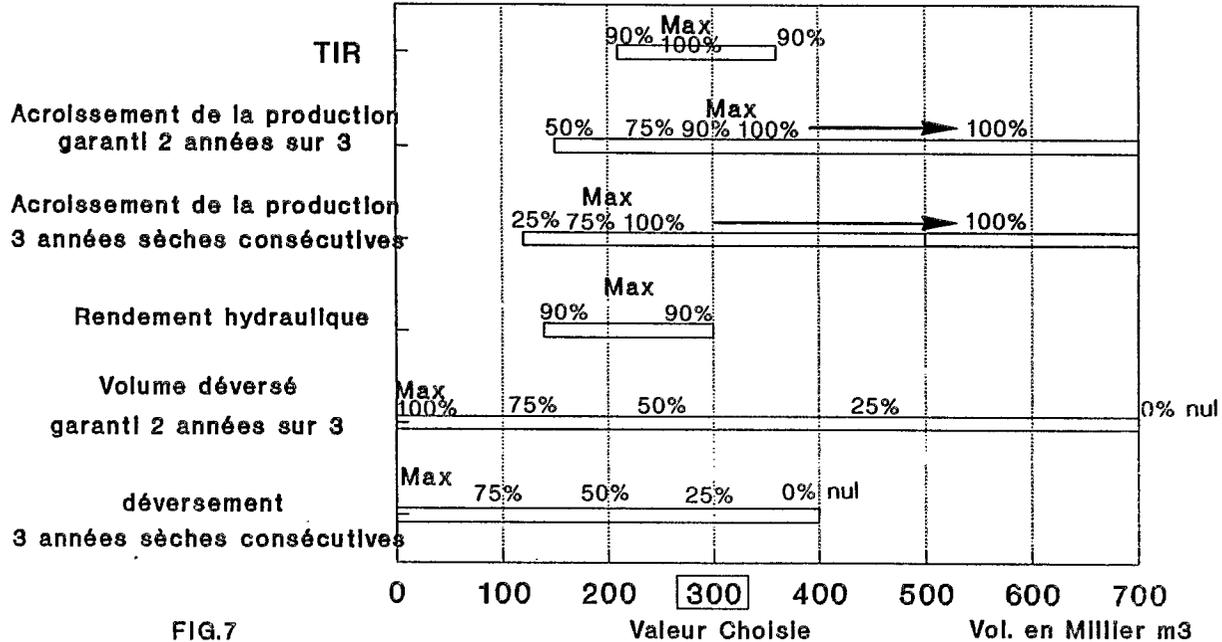


FIG.7

2.4. Prise en compte de l'approvisionnement en eau: comment augmenter la sécurité.

Le cas étudié précédemment considère une utilisation constituée d'un seul périmètre irrigué, en dehors de toute autre contrainte. Il est évident qu'une demande supplémentaire visant à satisfaire un approvisionnement en eau modifiera le dimensionnement, dans la mesure où elle exigera en général une plus grande sécurité (et ceci bien que les volumes correspondants à cette demande soient en général très faibles).

Nous pouvons donc, à titre d'exemple reconsidérer la situation de référence définie plus haut en lui adjoignant une demande d'approvisionnement de 10 m^3 par jour en saison des pluies et de 30 m^3 par jour en saison sèche.

Situation de référence:

- Volume écoulé annuel moyen $V_{ec} = 1.000.000 \text{ m}^3$
- Volume maximum de l'açude $V_x = 300.000 \text{ m}^3$
- Surface installée du périmètre irrigué: SUP = 10ha

Pour augmenter la sécurité de cet approvisionnement, nous pouvons modifier de deux façons notre situation de référence: la première consiste à diminuer le périmètre irrigué (et donc les besoins en eau) tandis que la deuxième revient à augmenter la taille de l'açude (et donc sa régularisation interannuelle).

La répercussion de chacune de ces deux méthodes sur les principaux critères du dimensionnement fait l'objet des figures doubles 8 à 11. On y a reporté, à partir de la situation de référence, la variation de chacun des paramètres pour une diminution de la surface irriguée SUP (à gauche) et une augmentation du volume V_x (à droite).

- Sur la figure 8 on observe tout d'abord une forte dégradation du TIR dans les deux cas: la sécurité coûte cher!

- La figure 9 met en évidence le peu d'influence de la diminution du périmètre sur les volumes déversés (V_{dev}), alors, qu'au contraire, une augmentation du volume V_x se traduira rapidement par une diminution et une plus grande irrégularité des débits en aval.

- La figure 10 montre le gain de sécurité exprimé par la variation de V_{mini} , qui est le plus petit volume atteint dans l'année.

- La figure 11 met en garde contre un sur-dimensionnement excessif en montrant comment croît la salinité annuelle moyenne de l'açude. Les salinités sont exprimées en valeurs relatives par rapport aux concentrations en sel affluentes entrant dans l'açude (qui ont par définition la valeur 1. On a de plus supposé, pour simplifier, qu'il n'y avait aucun de phénomène de précipitation chimique susceptible de modifier la concentration évaporatoire volumétrique).

VARIATION DU TAUX INTERNE DE RENTABILITE

EN FONCTION DE LA SUPERFICIE

EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE

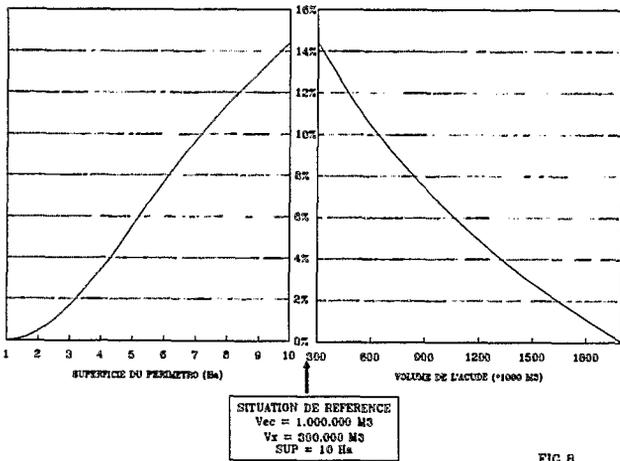


FIG.8

VARIATION DU RAPPORT V_{dev} / V_{ec}

EN FONCTION DE LA SUPERFICIE

EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE

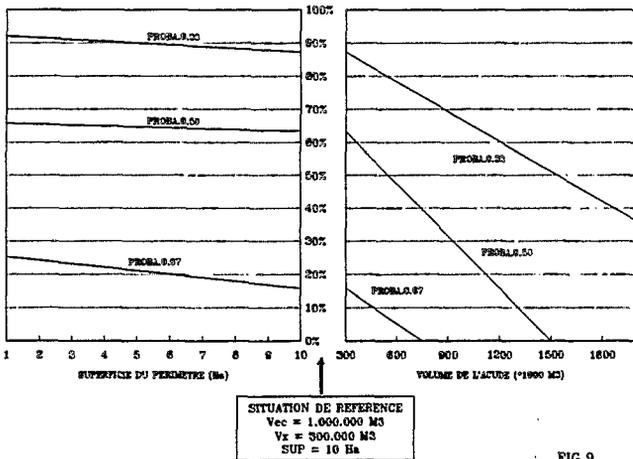


FIG.9

VARIATION DU RAPPORT V_{mini}/V_x

EN FONCTION DE LA SUPERFICIE

EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE

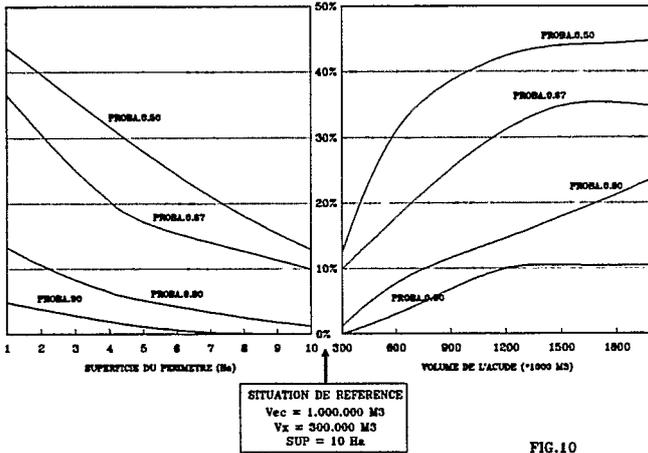


FIG.10

VARIATION DE LA SALINITE MOYENNE DE L'ACUDE

EN FONCTION DE LA SUPERFICIE

EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE

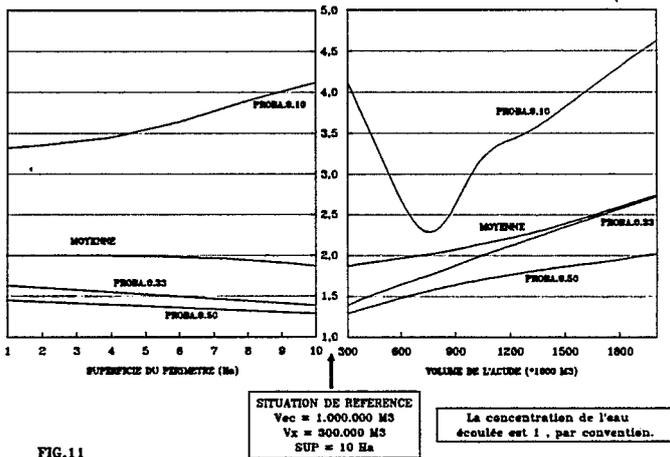


FIG.11

Cette figure 11 nous montre que la reconcentration en sels provoqué par un açude normalement géré et alimentant un périmètre d'irrigation de taille normale est de l'ordre de 50%. Quand le périmètre est petit ou que le volume de l'açude est trop grand, l'accroissement de la salinité moyenne peut atteindre 100%. Des valeurs plus fortes ne seront observées qu'à l'occasion de périodes sèches exceptionnelles ou pour des ouvrages très mal dimensionnés et peu utilisés.

2.5. Gestion du périmètre: le modèle SIPAC.

Des instruments et des programmes spécifiques permettent de gérer les périmètres installés en fonction des disponibilités hydriques disponibles chaque année.

Le calendrier agricole choisi dans l'exemple présenté comporte une culture vivrière pluviale, en irrigation de complément, suivi d'une deuxième culture de rapport intégralement irriguée. Naturellement, la surface à planter en saison sèche doit être ajustée au volume effectivement disponible dans l'açude, lequel dépend principalement des apports de la saison des pluies précédente et des volumes déjà utilisés par l'irrigation de complément. Le programme SIPAC (SÍmulacao de Pequeno Açude ou, en Français, simulation de petit réservoir) établit un abaque qui fournit la surface à planter en fonction du niveau d'eau dans le réservoir et de la culture choisie. La figure 12 présente cet abaque pour les valeurs de α de 2,70, de K de 1000, un taux d'infiltration de 34%, un volume d'approvisionnement nul et une efficience d'irrigation de 0,50.

ABAQUE DE DETERMINATION DE LA SUPERFICIE A PLANTER

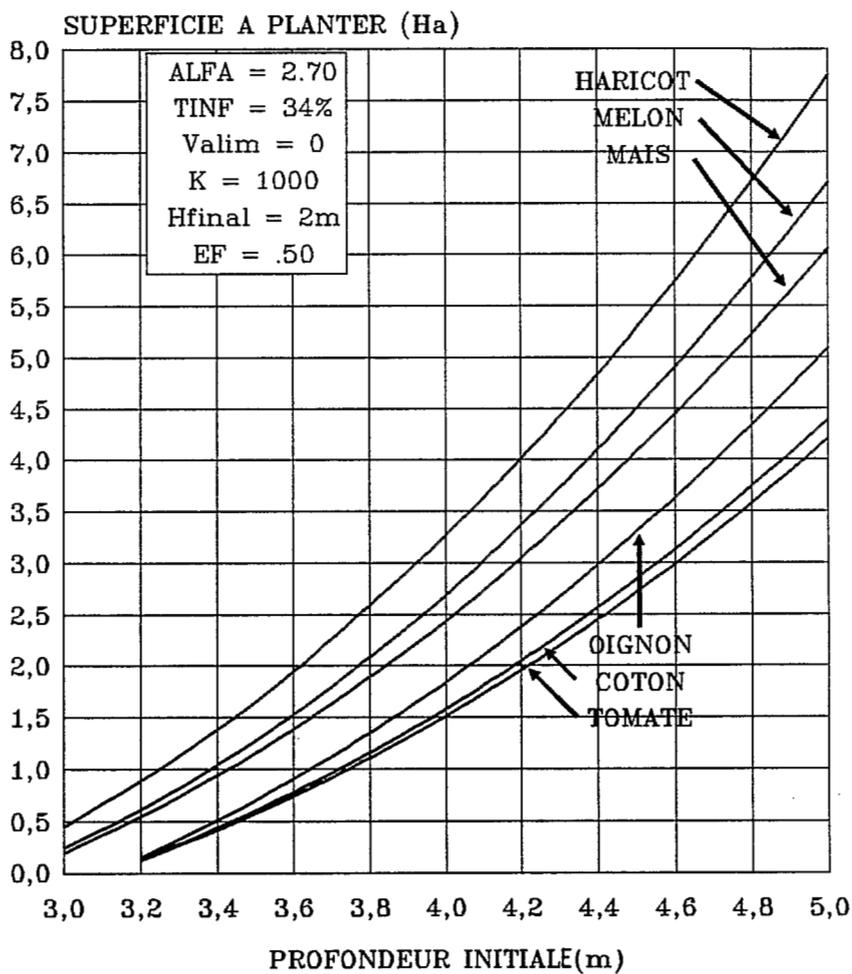


Fig.12

3. CONCLUSIONS .

Nous avons montré, sur un exemple concret, comment utiliser le modèle POMAC pour analyser et quantifier le rôle de chacun des éléments d'un système d'irrigation alimenté par une retenue collinaire. Ce rôle peut être mis en évidence de plusieurs façons: proportion des ressources en eau effectivement utilisées par le système, production du périmètre irrigué ou encore rentabilité des investissements réalisés etc.

Il n'existe pas de solution unique pour le dimensionnement des ouvrages et pour la définition de la politique d'irrigation. Les optimum varient beaucoup en fonction des critères choisis et des objectifs recherchés : maximiser l'utilisation des ressources hydriques, garantir un minimum d'eau dans le réseau hydrographique en aval, améliorer la production moyenne, garantir un minimum de production au cours des années sèches, minimiser ou rentabiliser le capital investi etc.

L'exemple présenté est relatif aux réservoirs, petits et moyens. Le cas, plus complexe, des grands réservoirs capables de régularisation interannuelle et de subvenir aux besoins de cultures pérennes est en cours de traitement. Nous savons que les normes s'appliquant à ce type de barrage seront sensiblement différentes.

L'étude de l'impact de la construction d'une ou plusieurs retenues sur les régimes hydrologiques des rivières situées en aval est également en cours. Cette question est d'importance, quand on sait que, actuellement, dans certaines parties du NORD-EST la densité d'açudes dépasse déjà un barrage par km². Nous prendrons en compte ces critères pour l'établissement de normes de dimensionnement qui feront partie d'un manuel de construction de barrages élaboré par le Ministère Brésilien de l'Irrigation en association avec la SUDENE et le "BUREAU of RECLAMATION" des USA .

**L'EAU ET SA GESTION DANS LA PLANIFICATION
DE L'IRRIGATION TRADITIONNELLE DES ANDES EQUATORIENNES**

Par

P. LE GOULVEN

T. RUF

**L'EAU ET SA GESTION
DANS LA PLANIFICATION
DE L'IRRIGATION TRADITIONNELLE
DES ANDES EQUATORIENNES**

P. Le Goulven (*), T. Ruf ()**

Confrontée à une demande ambitieuse des partenaires (élaboration du Plan National d'Irrigation), l'équipe ORSTOM s'est attachée avant tout à définir une thématique de recherche pluridisciplinaire correspondant à son savoir-faire, et une structure de travail qui aboutisse à des résultats utilisables dans un plan de réhabilitation.

La recherche d'indicateurs pertinents sur la gestion et l'utilisation de la ressource hydrique est menée à différentes échelles sur des terrains représentatifs, tout au long de la chaîne de mobilisation, de transport et d'utilisation de l'eau (de la micro-région à la parcelle).

Ces indicateurs sont ensuite étendus à l'ensemble des périmètres irrigués grâce à un inventaire détaillé.

L'utilisation d'espaces d'analyse soigneusement choisis tient compte des relations entre gestion de l'eau et milieu agro-socio-économique et facilite la mise au point de recommandations satisfaisantes pour tous les acteurs en présence, pour un plan d'action à court, moyen et long terme, en tenant compte des impacts prévisibles de toute intervention de l'Etat.

Les premiers résultats mettent en évidence les points faibles des systèmes traditionnels d'irrigation et contredisent parfois la politique de réhabilitation actuellement en vigueur.

* Hydrologue, Dépt DEC, mission ORSTOM de Quito.

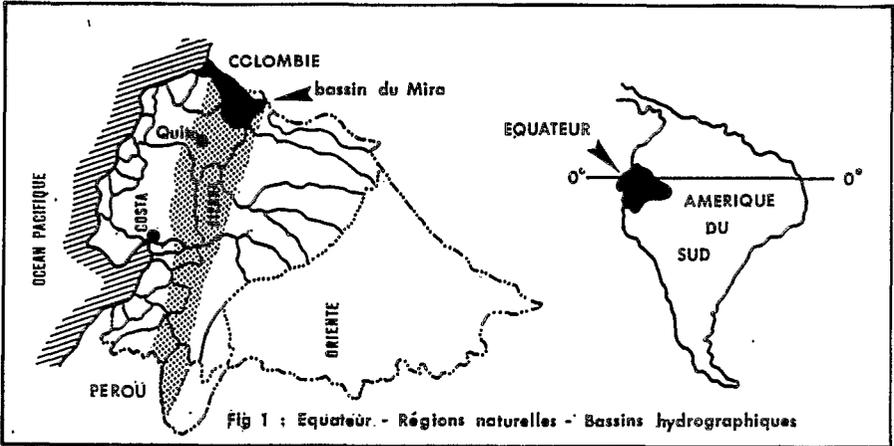
** Agro-économiste, Dépt SUD, mission ORSTOM de Quito.

1- L'IRRIGATION EN EQUATEUR

1-1-Situation et caractéristiques générales du pays.

La partie continentale de la République de l'Equateur est située au Nord-Ouest du continent sud-américain, entre la Colombie et le Pérou, et s'étend depuis l'Océan Pacifique jusqu'au bassin amazonien.

La partie insulaire est formée des îles Galápagos, qui sont distribuées de part et d'autre de la ligne équatoriale à environ 1000 kms à l'ouest.



La superficie du territoire continental est d'un peu plus de 281 000 km², répartis d'Ouest en Est en 3 grandes régions naturelles:

- La "Costa" comprend la frange littorale, dont la largeur diminue à mesure que l'on descend vers le Sud (largeur moyenne de 100 kms). Dans ses parties occidentale et nord-occidentale, s'élève une petite cordillère qui ne dépasse pas les 800 mètres d'altitude.

C'est sur cette frange qu'est situé le port de Guayaquil, première ville du pays par sa population et son dynamisme économique.

- La "Sierra" est caractérisée par l'imposante barrière montagneuse de la Cordillère des Andes dont la largeur oscille entre 100 et 140 kms. Dans sa partie nord, on distingue 2 massifs (Cordillères Occidentale et Royale) bien séparés par un couloir inter-andin d'environ 40 à 50 kms de large, et couronnés de volcans dépassant les 6000 mètres d'altitude (Cotopaxi, Chimborazo). C'est dans un de ces bassins inter-andins, à 2850 mètres d'altitude, que les espagnols établirent la capitale: Quito.

Dans le sud du pays, les cordillères perdent leur individualité et les cimes leur altitude (3500 mètres).

- L'"Oriente" est constitué par de grandes vallées alluviales souvent marécageuses, partie prenante du bassin amazonien.

Seulement le quart du pays est consacré à l'agriculture proprement dite, le reste est occupé par les forêts vierges ou les "páramos" (formation herbacée de haute montagne).

1-2 L'irrigation : une histoire ancienne

Les régions andines ont connu l'irrigation bien avant l'arrivée des espagnols (vers 1530), et certainement avant celle des Incas venus de Cuzco vers 1470. Ces derniers passèrent plus de temps à soumettre les populations locales qu'à entreprendre de grands travaux d'aménagement rural, durant le peu de temps qu'ils occupèrent le centre et le nord de l'Equateur.

Selon les chroniques de l'époque, au sein des communautés indigènes existait une justice de l'eau qui fut progressivement remplacée par la législation espagnole. Il n'y a cependant aucune preuve matérielle sur l'existence actuelle d'infrastructure d'irrigation incaïque ou pré-incaïque.

Avec la conquête, vint l'administration coloniale. Le dépouillement de ses archives relatives aux conflits sur l'eau montre qu'à la fin du XVIème siècle de nombreuses "acéquiás" (canaux d'irrigation) étaient en fonctionnement et suscitaient déjà d'âpres débats juridiques.

Certaines gravures d'époque font état d'acéquiás encore en fonctionnement (acéquia Caciques du village d'Urcuqui dont le tracé figure sur un plan de 1562).

Mais tout porte à croire que la plupart des systèmes actuels ont été construits entre le XVIIème et le XIXème siècle, lorsque les grands propriétaires terriens ont pu mobiliser la main d'œuvre indigène pour creuser et entretenir des canaux qui comprenaient parfois de véritables ouvrages d'art.

Aux XIXème et XXème siècles, l'irrigation s'étend dans la plaine côtière où se développent de grandes exploitations tournées vers l'exportation. Dans la Sierra, l'évolution économique et sociale va peu à peu changer la répartition foncière et par conséquent celle de l'eau.

D'un côté, les grandes haciendas commencent à se diviser entre héritiers, ce qui amène des conflits dans le partage de la ressource qui sont résolus par la construction de nouveaux canaux aux itinéraires parfois très voisins.

D'un autre côté, les groupements paysans, métis ou indigènes, réclament des droits d'eau qu'ils justifient par la part prépondérante qu'ils prennent dans la construction et l'entretien des réseaux.

Enfin, certains individus ou groupements achètent des droits d'eau sous forme variée, qu'ils revendent ou louent aux petits exploitants.

Au cours du XXème siècle, l'accroissement démographique de plus en plus fort entraîne une pression foncière qui débouchera sur la Réforme Agraire (1960-1970), et une pression non moins conséquente sur le partage de la ressource en eau, à l'origine de conflits très violents qui justifieront l'intervention de l'Etat.

1-3 Une intervention récente de l'Etat

Celui-ci intervient une première fois en 1936, tente de créer les premières bases juridiques pour une meilleure répartition de la ressource et commence à construire des nouveaux systèmes d'irrigation quand il les juge d'intérêt public, pour harmoniser le développement des différentes provinces.

Devant la persistance des conflits entre propriétaires de l'eau et utilisateurs, le gouvernement militaire crée en 1966 l'Institut Equatorien des Ressources Hydriques (INERHI) et nationalise l'ensemble des ressources en eau du territoire en 1972.

L'INERHI se voit attribuer un rôle d'entreprise car il étudie, construit et gère directement des infrastructures qui irriguent des superficies de 500 à 10 000 has, dont les exploitants agricoles payent une redevance qui couvre une partie des frais de gestion. Par contre, l'Institut intervient peu dans le développement agricole.

Les systèmes relevant de ce type d'intervention représentent l'irrigation publique.

D'autre part, l'INERHI est gestionnaire exclusif des ressources en eau. Il contrôle et attribue les concessions (renouvelables tous les 10 ans) suivant un ordre de priorité pré-établi (eau potable, agriculture, besoins industriels et énergétiques). Il légalise ainsi les droits d'eau anciennement acquis, et les rationalise en fonction des besoins. Dans ce cas, les usagers et leurs organisations sont responsables de la construction et du fonctionnement du système.

Les périmètres concernés (de quelques hectares à plusieurs centaines) constituent l'irrigation privée ou traditionnelle.

Enfin, l'Institut doit évaluer et gérer les ressources hydriques nationales, et élaborer le Plan National d'Irrigation comme partie intégrante du Plan National de Développement Economique et Social du pays.

Depuis lors, l'INERHI s'est surtout intéressé à sa fonction de constructeur en créant de nouveaux aménagements qui lui coûtent très cher, et dont la rentabilité reste à démontrer, car contrairement à la logique, il ne s'intéresse que très peu au développement agricole, à l'orientation des productions et à leur commercialisation. Ces nouveaux projets ne tiennent aucun compte des infrastructures déjà existantes, et l'intervention publique apparaît comme *le dernier maillon d'une chaîne historique d'aménagements superposés*.

Cette ignorance des systèmes privés vient en grande partie de la complexité même de l'irrigation traditionnelle, constituée d'un ensemble de périmètres dispersés, dont les caractéristiques échappent aux normes couramment admises.

Les prises sont presque toujours rustiques (pierres entassées sur le bord des torrents) et difficiles d'accès. Les canaux en terre aux tracés sinueux creusés à flancs de montagne disparaissent souvent dans de longs tunnels non étayés et malgré cela peuvent transporter plus de 500 l/s. Tout au long de leur parcours, ils se croisent, s'enchevêtrent et se divisent pour irriguer plusieurs périmètres parfois distants. L'eau utilisée par gravité irrigue des parcelles dont la pente peut atteindre 100%, grâce à un système ingénieux de sillons en zig-zag.

Sans références techniques et scientifiques et sans méthodologie adéquate, l'INERHI ne pouvait qu'intervenir au coup par coup, construisant çà et là soit une prise moderne, soit un réservoir.

Le bilan actuel est donc sans surprise et les données obtenues sur le bassin du Mira (cf Fig 1) peuvent être étendues à l'ensemble des Andes. L'irrigation publique touche environ 5% des superficies irriguées, 10% reçoit l'eau des 2 systèmes et le reste (85%) dépend exclusivement de l'irrigation traditionnelle.

Or plusieurs éléments nouveaux obligent l'INERHI à reconsidérer son intervention. La plupart des sites idéaux sont déjà aménagés, et tout nouveau projet coûtera de plus en plus cher.

Malheureusement, les bénéfices pétroliers ont beaucoup baissé et l'Etat doit montrer plus de rigueur dans ses choix d'investissements, face à la crise économique qui sévit et l'endettement public qu'il faut maintenant rembourser. Les organisations internationales (FAO par exemple) favorisent la réhabilitation des systèmes existants, ce qui justifie le manque d'enthousiasme des grandes banques de développement qui renâclent devant une politique de grands projets.

Dans le même moment, l'ORSTOM et le Ministère de l'Agriculture terminaient l'inventaire des ressources naturelles renouvelables au sein du projet PRONAREG. Le département hydrologique de ce programme poussait plus loin et abordait l'inventaire de l'usage de l'eau et la détermination d'alternatives en vue de satisfaire la demande agricole, en essayant de répondre aux questions suivantes: où, combien et quand, avec quoi irriguer? (F. Pourrut, 1980).

Cette première réponse au problème de la gestion des ressources hydriques en Equateur soulevait l'attention de l'INERHI qui signait en 1986 un accord avec l'ORSTOM pour essayer enfin d'élaborer un Plan National d'Irrigation, après plusieurs tentatives, toujours infructueuses par méconnaissance de l'irrigation traditionnelle.

2 - LE PROJET INERHI - ORSTOM (OBJECTIFS ET METHODOLOGIE)

2-1 Objectifs du projet. .

Considéré comme partie intégrante du Plan National de Développement, le Plan National d'Irrigation est donc une réponse partielle à une analyse sociale et macro-économique globale.

Il doit d'abord fournir l'identification et la caractérisation d'actions techniquement intéressantes, puis proposer une sélection hiérarchisée d'interventions qui permettront aux planificateurs de tenir les objectifs qui leur ont été fixés par le Gouvernement.

Comme on peut le remarquer, la seconde phase (sélection et hiérarchisation) est extrêmement sensible aux orientations du pouvoir politique. Il n'est donc pas question que l'ORSTOM participe à cette phase, trop soumise à des facteurs stratégiques et politiques, strictement internes à l'Equateur.

Par contre, la première phase ne varie pas au gré de changements gouvernementaux si elle fondée sur des critères scientifiques et techniques indiscutables et c'est sur l'élaboration d'un outil technique de décision que l'ORSTOM et l'INERHI ont décidé de collaborer, pour mettre au point une méthodologie reposant sur des bases scientifiques qui aboutisse à des recommandations pratiques.

L'identification et la caractérisation des actions intéressantes en matière d'irrigation peuvent être considérées comme l'élaboration d'une matrice de projets comportant un grand nombre d'indicateurs variés, dans laquelle le planificateur puisera pour y faire sa sélection. On voit déjà poindre le caractère pluridisciplinaire de l'étude. Pour être complète, cette matrice devra aussi présenter des alternatives de réhabilitation ou d'extension des périmètres.

La méconnaissance de l'irrigation traditionnelle et de son fonctionnement étant admise, il est donc nécessaire d'entreprendre son étude complète, d'autant plus qu'elle échappe aux normes couramment admises. Le programme de recherche est articulé autour des grands thèmes suivants:

- travaux de terrain sur des sites représentatifs, à différentes échelles emboîtées, en tenant compte la gestion technique et socio-économique de l'eau (des prises aux parcelles en passant par les systèmes de production),
- études thématiques spécifiques: hydrologiques au sens large (incluant la climatologie, l'agro-climatologie et l'hydraulique agricole), agro-socio-économiques (techniques agricoles, systèmes de production), agrologiques (caractérisation des sols et de leur potentialité),
- un inventaire exhaustif de la localisation des systèmes concernés et une description détaillée de leurs caractéristiques.

Les résultats obtenus sont d'abord analysés de manière thématique pour découvrir les indicateurs de fonctionnement pertinents et les relier aux caractéristiques descriptives contenues dans l'inventaire. Ils font ensuite l'objet d'une analyse intégrée débouchant sur une typologie de fonctionnement à laquelle correspond toute une série de recommandations.

Cette intégration est impossible sans un découpage structuré de la zone d'étude, fondé sur l'organisation et l'utilisation de l'espace, et qui servira de support aux différents types d'analyse et de recommandations.

L'ampleur du programme dépassant largement les moyens matériels et humains mis en oeuvre, le travail est réduit au couloir inter-andin. A la fin de la convention, une zone pilote sera étudiée sur la côte pour y vérifier l'adéquation de la méthodologie proposée et procéder aux ajustements nécessaires.

Etant donné sa complexité, le projet est divisé en une série d'opérations concomitantes que nous allons décrire maintenant.

2-2 Un découpage adéquat de l'espace.

Une politique de développement agricole s'appuie sur l'aménagement d'espaces caractérisés convenant aux différentes analyses (milieux physique et socio-économique), mais aussi à l'exécution des décisions. L'élaboration d'échelles emboîtées favorise l'élaboration des typologies de fonctionnement à partir des études de terrain et permet ensuite de passer à une planification d'abord régionale, puis nationale.

2-2-1 Le niveau national

Les versants extérieurs de la Cordillère, l'oriental amazonien comme l'occidental pacifique, sont bien arrosés et offrent suffisamment d'eau pour satisfaire globalement tous les types de demandes. Cependant, la variabilité de la ressource dans l'espace et dans le temps induit des déséquilibres flagrants, caractérisés par une succession de sécheresses (couloir inter-andin) et d'inondations (Costa).

La région amazonienne et la partie nord de la côte reçoivent plus de 3000 mm, bien répartis tout au long de l'année, avec une légère diminution entre décembre et février. Elles n'ont aucun besoin d'irrigation, bien au contraire.

Dans le reste de la Costa, les précipitations augmentent régulièrement du littoral jusqu'au piémont (moins de 200 mm à 3000 mm). Le régime pluviométrique comprend une saison des pluies de décembre à mai et une saison sèche bien marquée le reste de l'année, pendant laquelle l'irrigation permanente est obligatoire. Dans la partie sud, vers le Pérou, on note une nette tendance à la sécheresse (Pourrut, 1986) dont il faudra tenir compte dans un processus de planification à long terme. Dédiée principalement aux cultures d'exportation, cette région est traversée par des grands fleuves qu'il faut domestiquer et son développement est surtout dépendant de la construction d'infrastructures importantes.

Enfin, la région andine subit alternativement l'influence des masses d'air océanique et amazonien qui définissent un régime à deux saisons des pluies (de février à mai et d'octobre à novembre), plus ou moins altéré par les effets d'abri provoqués par les reliefs avoisinants. Les totaux pluviométriques ne sont guère élevés (de 600 à 1500 mm) et peuvent descendre à 300 mm dans le fond des vallées bien abritées. L'irrigation complémentaire y est indispensable pour sécuriser la récolte et intensifier la production (2 cultures dans l'année). La Sierra est un milieu très varié (à tous points de vue), et en pleine évolution agricole. Les communautés indigènes ont entrepris un mouvement de grande envergure pour "supprimer" toutes les propriétés de plus de 50 hectares en 1992 (500 ans depuis la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb).

2-2-2 Les grands bassins hydrographiques.

Le pays est découpé en 22 grands bassins hydrographiques, bien caractérisés par l'Institut hydrologique local (cf Fig 1), et qui constituent la base du premier découpage de l'espace.

Le couloir inter-andin est donc divisé en portions de bassins hydrographiques, portions qui contiennent tous les systèmes d'irrigation et se terminent par une station hydrométrique de bonne facture.

Satisfaisante pour l'hydrologue, cette unité spatiale lui permet d'établir un bilan hydrique global, dont dépendra la politique générale d'aménagement hydraulique, mais elle est encore trop vaste et trop hétérogène pour y mener une gestion précise de la ressource.

Elle est généralement constituée par un fond de vallée très peuplé où passe la plupart de grands voies de communications et entourée de versants sur lesquels s'est développée une agriculture très différenciée selon les étages climatiques.

Elle satisfait l'agro-socio-économiste.

Elle correspond aussi à un espace économique régional car elle contient toujours une grande ville (parfois 2) qui sert de pôle d'attraction dans les circuits de commercialisation. Bien qu'elle ne corresponde pas toujours à des limites administratives (provinces) elle comble aussi le planificateur qui pourra y définir une politique d'intervention à long terme.

Chaque unité spatiale est délimitée en fonction du réseau hydrométrique et à partir des cartes d'usage du sol élaborées par P. Gondard dans le cadre du PRONAREG. Actuellement, sont délimités 2 grands bassins tournés vers le Pacifique (Mira et Guayllabamba) et 2 tournés vers le bassin amazonien (Pastaza et Santiago). Ils correspondent aux 3/4 du couloir andin. Il reste seulement la partie sud (occupée par une irrigation de fond de vallée) à diviser.

Le passage de la phase régionale à l'ensemble national se fait en considérant les transferts hydriques entre grands bassins, qui dépendent beaucoup de l'obtention de financements internationaux.

2-2-3 Le bassin versant unitaire.

Chaque bassin hydrographique est divisé en bassins versants unitaires à l'intérieur desquels les paramètres explicatifs de l'aptitude au ruissellement (morphologie, caractéristiques et usage du sol) sont à peu près homogènes (Dubreuil, 1971). Ce découpage a déjà été utilisé en Equateur dans le cadre du programme PRONAREG (Cadier, Pourrut, 1979) et en Colombie (Le Goulven, 1984).

Le travail de PRONAREG est donc largement utilisé et complété par la délimitation de bassins unitaires complémentaires, pour former un maillage hydraulique complet de chaque bassin hydrographique. La limite des bassins unitaires coïncide dans la mesure du possible avec les stations hydrométriques du réseau.

Dans le bassin du Mira, 61 bassins unitaires sont constitués et leur taille moyenne est d'environ 50 km². Ils constituent un canevas hydraulique contrôlé par 11 stations hydrométriques (cf Fig 2).

Le bassin unitaire est indispensable à l'hydrologue pour calculer les ressources en eau (espace d'apport) à l'aide de modèles déterministes globaux. Malheureusement il ne convient pas à l'analyse des demandes et ne satisfait ni l'agro-socio-économiste, ni le planificateur.

En effet, les lignes de crêtes qui séparent chaque bassin unitaire ne sont plus très marquées lorsqu'on arrive en fond de vallée. Les acéquieras passent allègrement de l'un à l'autre, soit en les contournant soit en les traversant par des tunnels, *ce qui rend impossible toute analyse basée uniquement sur cette unité spatiale.*

2-2-4 la ZARI (Zone d'Analyse et Recommandations pour l'Irrigation).

Il est donc indispensable de procéder à un autre découpage des bassins hydrographiques fondé sur la délimitation de zones qui contiennent tous les processus de captation, transport et utilisation de l'eau (ZARI). En pratique, leur tracé se fait à partir des réseaux existants.

Ce sont des micro-régions séparées par des accidents topographiques suffisamment importants pour empêcher le passage des canaux traditionnels (ligne de crête très élevée, rivière encaissée). Elles ne sont traversées que par les grands systèmes (privés ou publics) qui ont bénéficié d'une aide importante pour construire des infrastructures importantes.

En pratique, leur tracé précis est effectué une fois connue la disposition de l'infrastructure existante.

Dans le bassin du Mira, elles sont 3 fois plus grandes que les bassins unitaires, et sur les 20 rencontrées, 2 n'ont pas d'irrigation significative en raison d'un climat plus favorable. Dans la plupart des cas, leurs limites empiètent sur 3 bassins versants unitaires (cf Fig 3).

Les ZARI sont caractérisées par des étages climatiques à l'intérieur desquels les systèmes de production et les structures agraires gardent une certaine homogénéité:

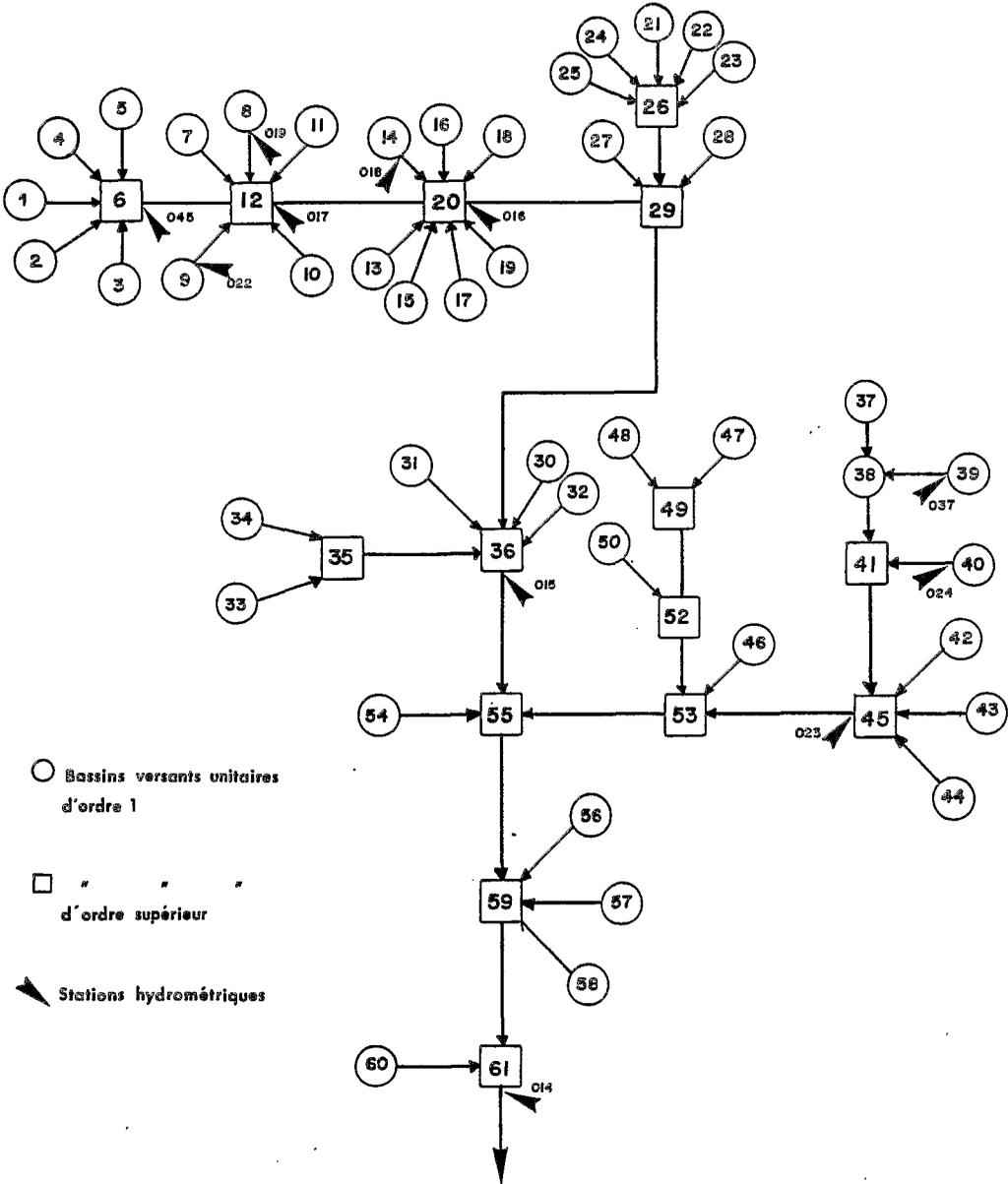
- l'étage chaud (<2200 m.) contient les grandes haciendas technifiées qui essaient de conserver leurs privilèges d'antan et produisent des cultures de rente (canne à sucre par exemple).
- l'étage tempéré (entre 2200 m et 2800 m) est très parcellisé (moins de 1 ha) et se consacre avant tout à une polyculture dominée par le maïs et le haricot.
- l'étage froid (> 2800 m) est constitué soit par de grandes exploitations de cultures extensives soit par des communautés indigènes qui essaient d'obtenir un contrôle de l'eau plus important.

A l'intérieur d'une ZARI, la disposition des canaux d'irrigation permet souvent de deviner les principales étapes d'aménagement et les grands types de problèmes qui les ont suscitées. Les usagers sont arrivés à un équilibre dans la répartition de la ressource, équilibre contammment menacé par les revendications des populations qui s'estiment lésées. C'est donc une entité idéale pour l'analyse agro-socio-économique et pour le planificateur.

2-2-5 Relation entre bassins versants unitaires et ZARI

Il est évident que la ZARI est un espace idéal pour étudier les demandes en eau puisqu'elle contient des systèmes d'irrigation complets (des prises aux parcelles) et pour estimer leurs variations en fonction des changements que ne manquera pas de provoquer toute intervention.

Fig 2 :
 Division du bassin hydrographique du Mira en bassins versants unitaires. Schéma hydraulique de fonctionnement et emplacement des stations hydrométriques du réseau.



Néanmoins, pour confronter les besoins aux ressources disponibles, il est nécessaire d'établir une relation entre les espaces correspondants. Pour passer facilement d'un maillage à l'autre, les prises d'eau sont repérées par une codification ZARI (appartenance à un système) et par une codification hydrologique qui les situent dans l'architecture du réseau hydrographique (appartenance à un bassin unitaire).

Le code hydrologique est constitué par une chaîne de caractères qui décrit tous les affluents qu'il a fallu parcourir depuis l'embouchure du grand bassin hydrographique jusqu'au point du réseau hydrographique considéré. Il se termine par la distance parcourue sur le dernier affluent (pourcentage de la longueur totale de l'affluent).

Cette codification a le mérite de bien caractériser toute prise d'eau sur le réseau hydrographique et permet de calculer facilement (par comparaison des chaînes de caractères) son impact en aval ainsi que les débits réservés en amont. Par contre, elle ne tient pas compte des captations indépendantes du réseau (sources, puits) qui sont peu nombreuses.

Pour ne pas alourdir la codification, on procède d'abord à celle des bassins unitaires sur le réseau hydrographique global, qui ne dépend que du découpage de l'espace et ne sera donc pas altérée par des modifications ultérieures. Ensuite, les codes de chaque prise sont élaborés sur le réseau hydrographique interne de chaque bassin unitaire.

Ce travail s'effectue sur la cartographie de base au 1/50 000.

2- 3 Le terrain et ses différentes échelles d'analyse.

A partir des résultats obtenus par PRONAREG et complétés par des données sociales, un travail de synthèse a été entrepris pour établir une classification hiérarchique du milieu agricole à l'aide d'analyses factorielles des correspondances.

A l'intérieur de chaque groupe, nous avons sélectionné une ZARI représentative dans laquelle on commence par décrire les systèmes d'irrigation, leurs caractéristiques agricoles et socio-économiques (carte de synthèse détaillée au 1/25 000).

On procède ensuite à un certain nombre de mesures, de suivis et d'enquêtes, tout au long de la chaîne d'utilisation de l'eau (infrastructure, systèmes d'irrigation, périmètres, exploitations agricoles, distribution de l'eau, application à la parcelle), pour étudier l'ensemble des facteurs qui interfèrent sur la demande en eau, sa variation saisonnière et son évolution probable.

- *La captation.*

Typologie descriptive des prises et des ouvrages de régulation qui leur sont associés. Etude de leur efficacité (comparaison entre débits concédés et débits dérivés) et de leur fragilité (fréquence et durée des dommages).

- *Le transport.*

Calcul des efficacités de transport (ponctuelle et linéaire) par jaugeages simultanés sur des segments choisis selon leur débit, leur longueur, le type de sol, ...
Fragilité de l'infrastructure de transport par lecture journalières d'échelles limnimétriques (fréquence, durée et causes des dommages).

- *La répartition.*

Analyse des consommations journalières de certains périmètres et de leur variation au cours de l'année.

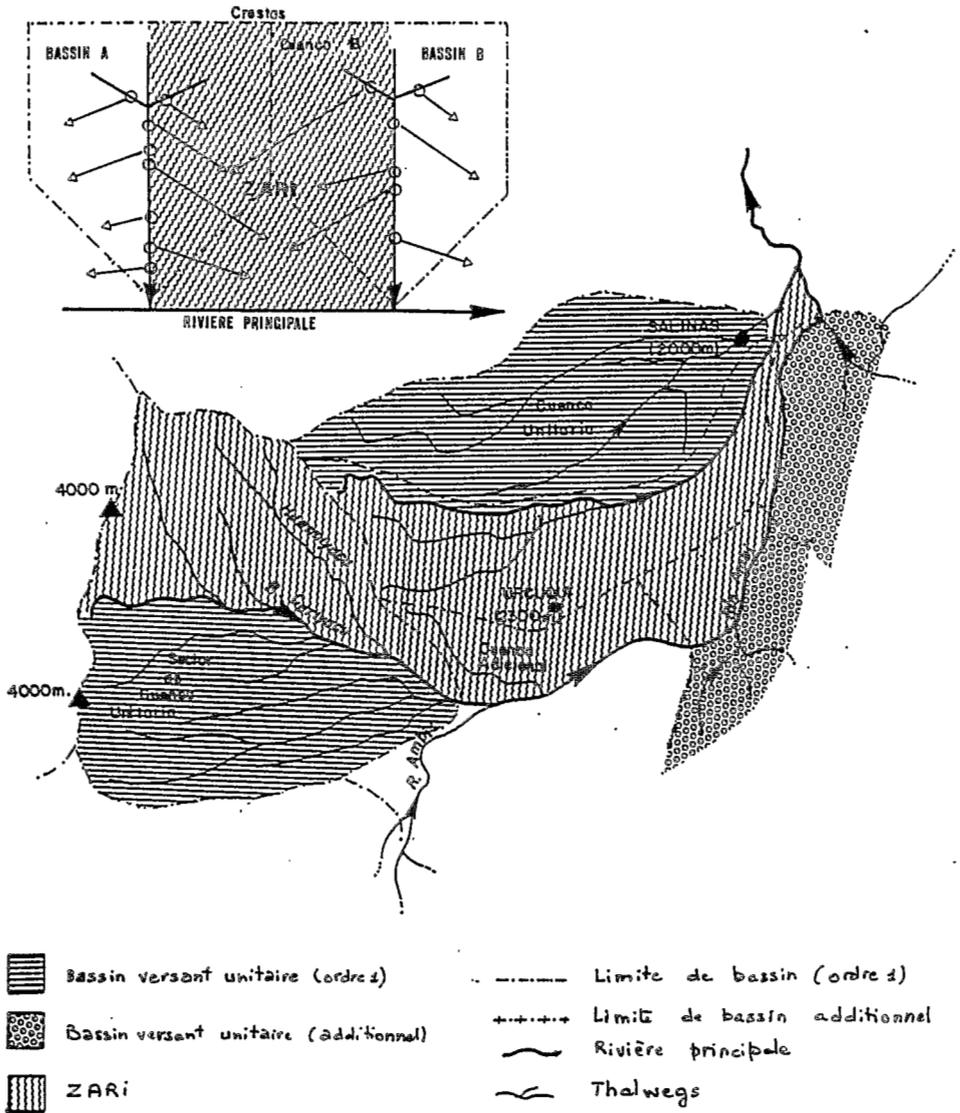
- *La distribution.*

Etudes fréquentielle des indicateurs de fonctionnement (dotations à l'intérieur du périmètre, fréquences, modules et temps d'irrigation).

Enquêtes sur le manque d'eau, ses raisons supposées et ses conséquences (prises de décision sur les cultures).

Calcul des efficacités de transport des réseaux de distribution (jaugeages simultanés) et de l'efficacité globale (comparaison entre débit en tête de réseau et volumes entrant dans les parcelles durant une journée).

Fig 3 :
Principe de délimitation d'une ZARI - Relations avec les bassins versants unitaires.
Exemple de la ZARI d'URCUQUI (Mira).



- Les systèmes de production.

Analyse de leur évolution par enquêtes lourdes sur une série d'exploitations représentant la diversité de la zone.

Schématisation de leur fonctionnement, contraintes et performances obtenues.

- Les performances agricoles.

Evaluation des productivités de certaines cultures principales (maïs, haricot) et analyse de la diversité des résultats: mesures au champ et au laboratoire des composantes du rendement (densité, poids) et rapprochement avec les itinéraires techniques, en particulier l'irrigation.

- L'application.

Mise en place d'un suivi journalier de parcelles de références, conduites par les exploitants selon leurs propres décisions.

Mesure de la pluie et des entrées - sorties superficielles d'eau.

Calcul de l'efficacité hydraulique d'application par l'analyse des techniques d'irrigation, des techniques de découpage de la parcelle et de mesures d'infiltration à la raie à l'aide de PARSHALL, selon la loi de Philipps (méthodes J. L. Sabatier et CEMAGREF).

Relevé des étapes du développement végétal, des opérations culturales, du travail, des coûts et de la production finale.

Ces observations sont complétées par un dialogue continu avec les organisations paysannes compétentes (juntas de l'eau) sur leurs problèmes (maintenance des réseaux, conflits juridiques et sociaux, luttes d'influence,...) et les relations qu'ils maintiennent avec les organismes d'état (INERHI principalement).

2-4 Localisation, Organisation et Caractérisation de l'Irrigation.

Cette opération a pour objectif de fournir une description détaillée de tous les systèmes d'irrigation selon le découpage en ZARI. Elle est menée à bien par 3 types d'actions:

- analyse de l'information existante à l'INERHI et ses agences régionales,
- photo-interprétation (analyse des grisés et de l'organisation des parcelles),
- enquêtes de terrain sur tous les périmètres.

Cet inventaire représente un travail énorme (mais néanmoins indispensable) qui devrait être allégé par l'utilisation future des images du satellite SPOT (en collaboration avec le BCEOM et le CEMAGREF).

Les informations sont regroupées au sein d'une banque de données (LOCIE) structurée sur DBASE IV et gérée par une trentaine de programmes. La banque est accompagnée de cartes au 1/50 000, ce qui correspond à l'échelle de travail la plus fine utilisée par PRONAREG-ORSTOM et compatible avec la résolution des images du satellite SPOT.

LOCIE regroupe le descriptif complet de l'irrigation à différents niveaux.

- Prises d'eau.

Situation (rivière, bassin, altitude), type de construction, caractéristiques hydrologiques (superficie, pluie moyenne et ETP moyenne de son bassin versant), existence d'une concession (débit concédé, n° de concession).

- Périmètres.

Caractéristiques générales (altitudes maxi et mini, superficies irriguées, équipées et potentiellement irrigables, pluviométrie et ETP)

Aspects sociaux (bénéficiaires, organisations, conflits).

Dotations (théorique, concédée, réelle)

Systèmes de production et types d'agriculture.

Caractéristiques du sol (type, profondeur, pente, RU, classe d'aptitude).

Modalités de distribution (réservoirs, irrigation de nuit, tour d'eau) et de d'application (taille des parcelles, technique d'irrigation, longueur des raies, fréquence et durée des irrigations).

- Systèmes.

Description des canaux reliant les diverses prises aux périmètres correspondants selon un découpage en noeuds et segments, suivant le principe des réseaux maillés urbains. Cette codification un peu lourde au départ permet de descendre le courant (conditions imposées au niveau de la demande en aval) ou de le remonter (conditions imposées au niveau de l'effluents en amont).

Type de construction des segments et des noeuds, état d'entretien des canaux, débits transités, longueurs, pentes.

- ZARI.

Regroupement et première synthèse des informations précédentes.

Entrées des données démographiques (population agricole concernée, densité de population, taux d'accroissement).

La masse de données obtenues représente un outil indispensable pour une connaissance parfaite du problème, et qui alimente les diagnostics au niveau des systèmes d'irrigation (planification à court terme), des ZARI (planification à moyen terme), ou des bassins hydrographiques (planification à long terme).

QUELQUES DONNEES SUR LE BASSIN DU MIRA

1 - Superficie du bassin :	350 000	has
2 - Superficie agricole :	139 200	has (40% de 1)
3 - Superficie équipée :	47 100	has (34% de 2, 13% de 1)
4 - Superficie irriguée :	35 200	has (75%, 25%, 10%)
5 - Superficie irriguée par traditionnel :	87%	(de 4)
6 - Superficie irriguée par public :	4%	(de 4)
7 - Superficie irriguée par les deux :	9%	(de 4)
8 - Population agricole concernée :	175 000	personnes
9 - Densité agricole :	120	habitants/km ²
10 - Taux d'accroissement :		0,8
11 - Nombre de périmètres :	247	
12 - Grandes propriétés :	46%	(de 4)
13 - Moyennes propriétés :	22%	(de 4)
14 - Petites propriétés :	32%	(de 4)
15 - Débit total dérivé :	18,6	m ³ /s
16 - Débit total concédé :	14,4	m ³ /s (77% de 15)
17 - Nombre de prises :	299	
18 - Nombre de prises avec concession :	187	(63% de 17)
19 - Nombre de prises "modernes" :	19	(6% de 17)
20 - Nombre de prises sans débit réservé en amont :	133	(44% de 17)
21 - Nombre de systèmes :	268	
22 - Nombre de systèmes complexes :	54	(20% de 21)
23 - longueur totale des canaux :	1170	kms
24 - longueur de canaux revêtus :	6	kms
25 - Ouvrages de répartition :	108	
26 - Débit fictif continu moyen :	0,4	l/s

2-5 Le point de vue de l'agro-économiste.

Les données sur l'agriculture irriguée des andes équatoriennes (systèmes de production, productivité) sont casi inexistantes car les statistiques nationales ne différencient pas les périmètres irrigués des cultures pluviales.

Face à ce manque d'information, il est apparu nécessaire de restructurer les enquêtes du Service National de Statistiques Agricoles (SEAN) en fonction des connaissances acquises par le projet INERHI-ORSTOM sur les réseaux d'irrigation.

Pour les années 1987 et 1988, les données d'enquêtes (superficie, irrigation, fertilisation, pertes, production) ont été saisies sur respectivement 3600 et 4500 parcelles du bassin du Mira. Elles décrivent les assolements de 50 à 60 segments représentatifs pour chacune des années.

En tenant compte des connaissances acquises sur les ZARI pilotes et des enquêtes de l'inventaire, il est possible de décrire l'ensemble des modèles de production:

- pôle d'activité dominant dans un étage bio-climatique donné pour chaque type d'exploitation.
- combinaison précise des activités agricoles annuelles.
- productivités.

Chaque activité s'inscrit dans le calendrier agricole pour estimer, mois par mois, les coefficients culturaux correspondants (Kc). En l'absence de références andines, on se fonde sur les normes de la FAO, sachant que la demande en eau est moindre dans la plupart des cas, car la population végétale et sa croissance sont inférieures à celles qui ont prévalu pour l'établissement des normes internationales.

Au niveau du modèle de production, une intégration de la demande en eau est réalisée par la pondération des coefficients culturaux.

La productivité fait l'objet d'une analyse de sa diversité pour chacune des cultures principales (maïs, haricot, blé, orge, pomme de terre, canne à sucre, prairies) dans le but avoué de mesurer l'impact d'un programme de réhabilitation, en prenant comme référence les productivités réalistes obtenues par les agriculteurs placés dans des conditions optimum d'irrigation.

2-6 Le point de vue de l'hydrologue.

Tous les travaux précédents contribuent à obtenir une bonne connaissance des consommations actuelles en eau et des facteurs qui influent sur la demande. Il reste maintenant à quantifier cette demande ainsi que la ressource disponible pour la satisfaire.

Les besoins en eau de l'agriculture sont extrêmement dispersés dans l'espace et très variés selon les régimes climatiques et les étages d'altitude dans lesquels ils se trouvent.

Leur calcul au pas de temps décadaire serait intéressant du point de vue agronomique, mais pour des raisons évidentes de manipulation de données, le pas de temps choisi est le mois, ce qui est parfaitement compatible avec une étude de planification.

La diversité des situations rencontrées nécessite donc une bonne connaissance spatiale des caractéristiques climatiques, qui interviennent aussi bien dans le calcul des demandes que dans celui des ressources.

- Etude climatique préliminaire.

Elle est réalisée au pas de temps mensuel sur la totalité de la Costa et de la Sierra, en collaboration avec l'Ecole Polytechnique Nationale (EPN) et l'Institut National de Météorologie et d'Hydrologie (INAMHI).

Elle concerne la pluie et l'Évapotranspiration Potentielle (Température, Humidité Relative, Insolation, Vent, Evaporation du bac) qui sont les 2 facteurs essentiels du calcul des besoins en eau, et servent de données d'entrée à la plupart des modèles de transformation pluie- débit.

Le calcul des ressources exige des séries climatiques moyennes sur un bassin, l'étude des besoins (au niveau de précision de l'inventaire) est encore plus exigeante et nécessite les mêmes séries, mais sur chaque périmètre.

L'objectif de l'étude climatique est donc de générer, en tout point de l'espace étudié, des séries chronologiques homogènes, statistiquement probables et représentatives du régime climatique local.

Le problème se complique en raison d'un réseau climatique irrégulièrement réparti et non homogénéisé, et d'un relief fortement contrasté.

Les données mensuelles de plus de 800 stations ont été collectées et homogénéisées par la méthode du vecteur régional.

L'ETP est calculée par 7 méthodes différentes qui sont comparées aux mesures des bacs d'évaporation (corrélations mensuelles et dérives altitudinales) pour estimer la formule la mieux adaptée à chaque région.

Les variations avec l'altitude sont établies par petites vallées, en tenant compte de l'interaction des masses d'air locales (Fig 4).

Les stations sont ensuite regroupées toujours par la méthode du vecteur régional selon des critères de similitude (coefficients de corrélations entre stations et vecteurs supérieurs à 0.9).

Le produit final comprend:

- une carte au 1/200 000 comprenant les isohyètes et les isoplètes, ainsi que les zones d'influence des vecteurs correspondants.
- les données mensuelles et annuelles de chaque vecteur sur une période de 20 ans.

En un point de l'espace donné, les isolignes indiquent la valeur moyenne interannuelle du paramètre étudié sur laquelle s'ajuste le vecteur correspondant pour générer une série chronologique adéquate.

Les résultats obtenus permettent également une critique du réseau, du point de vue spatial et altitudinal.

L'algorithme de calcul des vecteurs est celui développé par Y. Brunet-Moret en 1978, autour duquel ont été développés un grand nombre de programmes, rassemblés dans un logiciel adapté (CLIMAN), écrit en Fortran sur la base de menus déroulants.

- Les besoins

Ils sont d'abord établis au niveau de chaque périmètre selon les données climatiques, les caractéristiques physiques et agricoles contenues dans la banque de données LOCIE, les mesures d'efficience (distribution et application) réalisées dans les ZARI pilotes et la schématisation des modèles de production échafaudés par l'analyse agro-économique.

Toutes les données sont intégrées dans 2 logiciels du commerce (CROPWAT de la FAO et DEMOP du CIDIAT), mais des modifications sont encore nécessaires pour relier les divers fichiers entre eux et obtenir un calcul automatique.

Les besoins sont ensuite ramenés au niveau des prises grâce à la codification précise des réseaux de transport et aux calculs d'efficience de transport effectués sur l'ensemble du bassin hydrographique.

Ils peuvent être ensuite regroupés soit au niveau des ZARI, soit à celui des bassins versants unitaires.

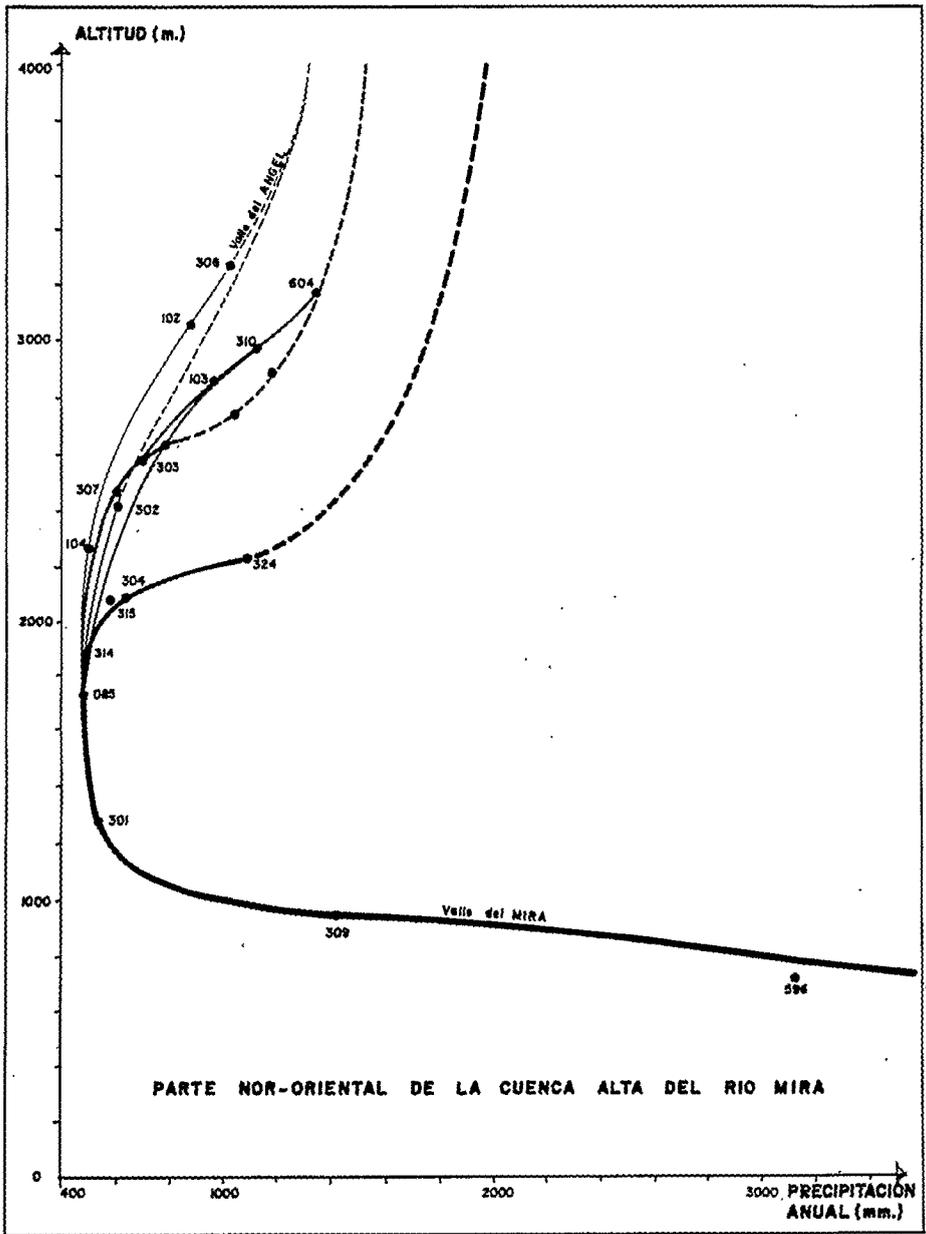
- Les ressources.

Actuellement, on utilise les résultats obtenus par l'ORSTOM (PRONAREG) sur les débits spécifiques moyens et d'étiage par bassins versants unitaires, mais si ces résultats constituaient à leur époque une référence indéniable, ils pèchent aujourd'hui par leur vétusté et leur manque de précision et rendent obligatoire l'adaptation d'un modèle de transformation pluie-débit calé sur les stations de contrôle du réseau hydrométrique.

Il fallait donc avant tout reconstituer les débits naturels de ces stations (on mesure à la station de contrôle du Mira un débit moyen de 35 m³/s qui ne tient pas compte des 19 m³/s utilisés en amont).

Tous les usages agricoles sont répertoriés par l'inventaire (LOCIE) et la variation saisonnière des débits dérivés est déterminée par les études menées sur les ZARI pilotes.

Fig 4 :
 Relations entre pluie et altitude dans les différentes vallées du bassin du Mira.



De cette manière, les écoulements naturels d'une quinzaine de bassins versants unitaires d'ordre 1 (sans apports superficiels) ont été reconstitués. Ces bassins serviront d'échantillon pour tester 2 modèles aux pas de temps mensuel (THEMEZ et CIDIAT) qui utilisent la pluie et l'ETP comme données d'entrée, et les caractéristiques physiques des bassins versants comme paramètres de calibration des fonctions de production. Ces modèles classiques à réservoir sont robustes et correspondent bien aux données que nous possédons.

Ils seront calés sur le maillage hydraulique réalisé sur chaque grand bassin hydrographique (Fig 2).

Une fois calculé les débits naturels sur chaque bassin versant unitaires, il est facile d'estimer la ressource disponible grâce à la codification hydrologique des prises.

Ce premier ajustement sera complété par une évaluation des ressources à l'intérieur de chaque bassin unitaire en fonction des grands étages climatiques.

2-7 Diagnostics et recommandations.

Un premier diagnostic entre besoins et ressources est effectué sur les 3 étages climatiques définis. Combiné avec les résultats obtenus dans les autres études, il permet d'élaborer des recommandations pratiques au niveau des systèmes d'irrigation et fournit à l'INERHI un plan d'actions à court terme.

L'analyse au niveau bassins unitaires - ZARI débouche sur une typologie des ZARI qui oriente le planificateur vers une réorganisation de l'espace (planification à moyen terme) pour utiliser au mieux la ressource hydrique selon sa répartition spatiale (regroupement des prises et des canaux, redistribution des périmètres qu'ils alimentent).

Enfin, les recommandations au niveau des grands bassins (planification à long terme) définissent les lignes générales d'une politique d'intervention (réhabilitation des réseaux existants ou leur extension, construction de nouveaux projets).

Toutes ces recommandations auront un impact sur l'intensification des cultures, l'évolution des systèmes de production, la demande en eau et sa gestion. L'idée d'évaluer les effets combinés des actions prescrites par un modèle de simulation revient à Jean Luc Sabatier (CIRAD) qui connaissait le potentiel du logiciel américain GAMS, créé par des chercheurs de l'Université du Texas et des experts de la Banque Mondiale. La méthode employée résulte donc d'une collaboration étroite avec notre partenaire du CIRAD.

Afin de simuler l'impact de l'irrigation sur l'économie agricole d'une ZARI, on construit un modèle macro-économique qui décrit les activités suivantes:

- productions consommatrices d'intrants et fournissant les produits de base.
- consommation de la population.
- transfert de travail.
- échanges, achats et ventes de produits.
- travail externe à l'agriculture.
- irrigation.
- bilans hydriques, satisfaction des besoins alimentaires, bilans d'échange de travail,...etc.
- coûts et les prix unitaires.

A partir de bornes fixées a priori (population, superficies agricoles, disponibilités en eau) et de règles plus ou moins contraignantes (équations strictes ou respect d'inégalités), le modèle recherche la combinaison d'activités qui maximise le revenu net agricole de la population, en lui assurant une nourriture convenable. Il quantifie:

- l'assolement,
- les achats,
- les ventes,
- la consommation,
- le travail,
- les besoins en eau.

Une fois calibré sur la base de coefficients techniques issus des études de terrain, le modèle est utilisé pour simuler les effets induits par les recommandations selon les trois cas de figure suivants:

- Aucune intervention sur les réseaux traditionnels (dégradation des réseaux).
- Intervention partielle seulement sur les dotations en eau et l'amélioration des infrastructures.
- Intervention globale (dotations, canaux, intensification agricole, prêts et subventions, circuits de commercialisation,.....).

Actuellement, deux modèles sont en phase de calibration: celui de la ZARI d'Urcuqui (simulation d'une crise sur l'eau et la force de travail) et celui de Ludo (simulation de l'impact d'un projet d'irrigation nouveau sur un terroir essentiellement pluvial, situé au sud des Andes équatoriennes) en collaboration avec une ONG franco-équatorienne.

3 - QUELQUES RESULTATS SUR LE FONCTIONNEMENT DES RESEAUX TRADITIONNELS.

On abordera la description des principales caractéristiques de fonctionnement selon les différentes échelles d'intervention (Fig 5).

3 -1 Niveau de l'offre

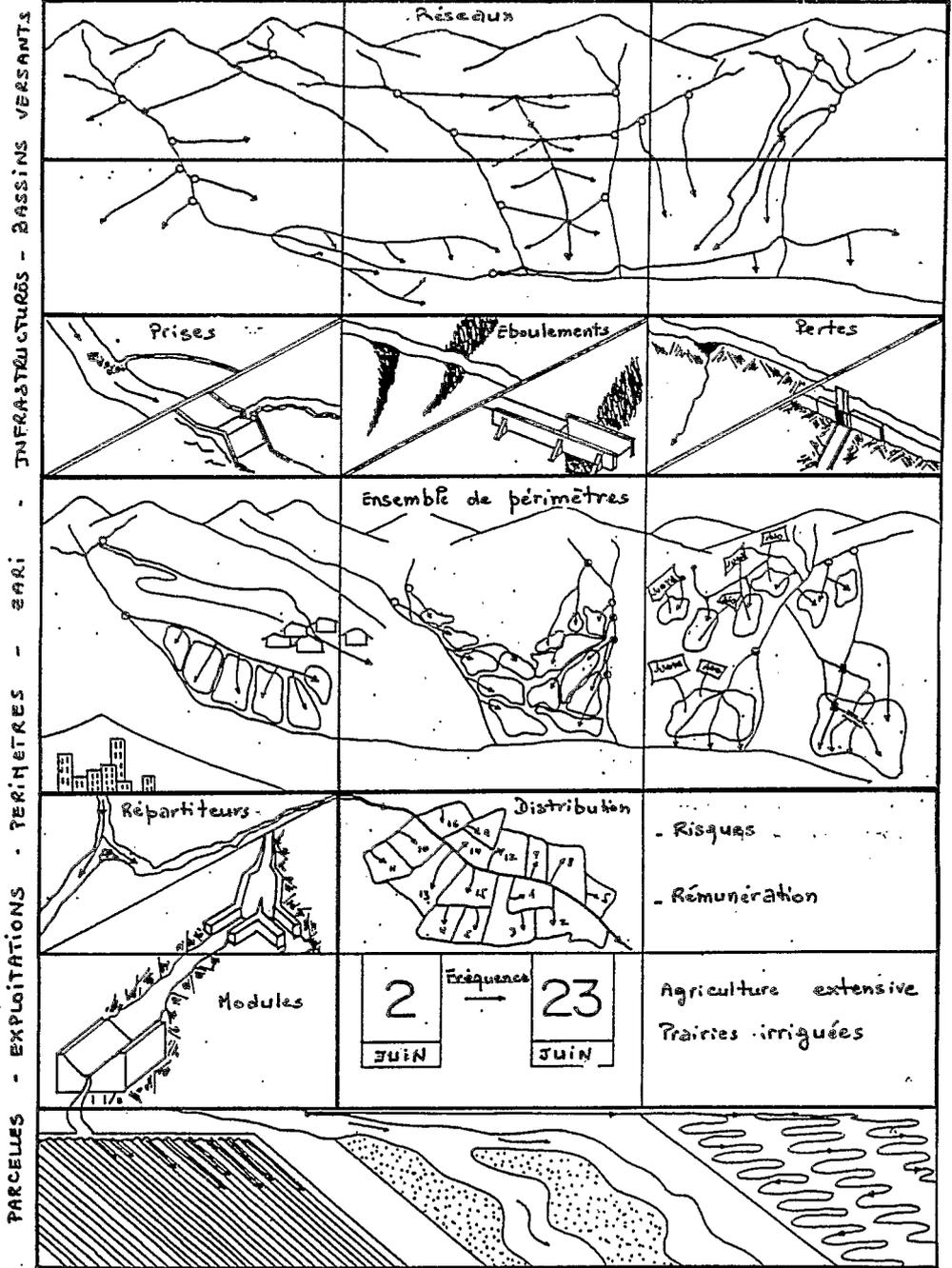
Selon les premiers bilans établis, la plupart des bassins versants unitaires ont, au niveau global, suffisamment d'eau pour répondre aux divers besoins. Cela n'est plus vrai au niveau des prises pour les raisons suivantes.

- L'altitude de certains périmètres ne permet pas de prendre l'eau sur un bassin suffisamment important.
- Les débits disponibles sont mal appréciés. Un seul jaugeage est effectué avant de fixer le débit de concession. Il n'est pas toujours réalisé au moment le plus propice et surestime souvent les débits d'étiage. Dans ce cas, il est difficile d'envisager la construction de barrages collinaires étant donné les fortes pentes. Par contre, un transfert des bassins voisins est à étudier.
- Le débit est important, mais inaccessible car les gorges sont trop encaissées. C'est un cas de figure où l'INERHI peut intervenir utilement.
- Non respect des concessions par les usagers situés en amont. Il donne lieu à des conflits juridiques sans fin qui peuvent dégénérer en "guerre des prises". C'est pour éviter ce genre de problème que beaucoup d'haciendas de fond de vallée ont installé leurs ouvrages de captation dans la partie supérieure des bassins. Un meilleur respect des règles serait obtenu s'il existait des ouvrages de régulation corrects après chaque prise, qui permettent une vérification rapide des débits détournés.

3- 2 Niveau de l'infrastructure

Dans le bassin du Mira, 95% des prises sont traditionnelles, c'est à dire un amas de pierres assemblées sur le bord de la rivière. Elles sont régulièrement emportées lors des grosses crues mais très rapidement reconstruites (1/2 journée suffit). La destruction des prises ne serait responsable que d'environ 5 jours d'arrêt de fonctionnement des réseaux sur l'année.

Fig 5 :
Schématisation de la collecte, du transport et de l'utilisation de l'eau dans une ZARI



Etant donné la vitesse des courants, les prises modernes qui barrent complètement la rivière sont imposantes; il n'est pas rare de voir plusieurs tonnes de béton pour un débit dérivé de seulement 30 à 40 l/s. Elles ne résistent toujours aux plus fortes crues, et en cas de dommage les usagers n'ont pas les moyens financiers de la reconstruire et reviennent donc à une prise traditionnelle en espérant une intervention de l'INERHI.

Par contre, les prises traditionnelles ne contrôlent pas les débits qu'elles dérivent et ont besoin d'un bon ouvrage de régulation en aval qui empêchent les surcharges d'eau dans les canaux. Malheureusement, ou cet ouvrage n'existe pas, ou il est extrêmement rudimentaire (branches d'arbre) et fonctionne mal. L'eau peut donc rentrer en excès dans les canaux de transport et provoque inévitablement des éboulements.

Comme dans beaucoup de cas les canaux se suivent en parallèle, l'eau qui dévale de la première acéquia vient détruire la seconde, et ainsi de suite. En moyenne, les éboulements provoquent plus d'1 mois d'interruption de service par an et constituent un risque non négligeable pour les cultures. De bons ouvrages de régulation (déversoir latéral bien dimensionné) permettraient d'éviter ce genre de problème.

Le transport de l'eau dans des canaux en terre est souvent l'objet des principales critiques vis à vis des réseaux traditionnels: l'efficacité y serait faible. En conséquence, la réhabilitation, lorsqu'elle est envisagée, porte sur le revêtement en béton des acéquias. Sachant que dans le seul bassin du Mira, il existe 1200 kms de canaux, on peut estimer que dans la Sierra on approchera les 10 000 kms. On voit que l'INERHI s'était attelé à un véritable travail de titan !

Heureusement, les mesures effectuées dans tout le bassin démontrent le contraire: les efficacités linéaires de transport se situent entre 95% et 110%. Ces mesures sont confirmées par l'absence de corrélation entre longueurs de transport et débits transportés.

Ce qui ne veut pas dire que les canaux en terre ne perdent pas d'eau, la végétation qui les entoure et les signale dans le paysage démontre le contraire. Seulement ils jouent le rôle de canaux de drainage et récupèrent une bonne partie des écoulements sub-superficiels en provenance des páramos. Une légère corrélation existe entre efficacité et altitude des canaux, mais elle demande à être confirmée sur d'autres bassins.

L'ancienneté des canaux en terre montre qu'ils n'ont pas besoin d'un revêtement en béton pour résister à l'usure du temps. Il faut donc abandonner ce type d'intervention et plutôt renforcer les points faibles (très ponctuels).

3-3 Equité de la répartition.

Si on se réfère à la situation du bassin du Mira, les dotations en eau font apparaître de grandes variations, allant de 0.1 à 2 l/s/ha. Bien entendu, l'analyse de cet indicateur doit se faire en fonction de l'étage bio-climatique. Alors le jugement sur l'équité de la dotation générale entre périmètres prend un sens.

	faible dotation	dotation moyenne	forte dotation
Etage froid 2700-3300m	1500 ha 0.1 l/s/ha	2200 ha 0.25 l/s/ha	2100 ha 0.4 l/s/ha
Etage tempéré 2200-2700m	5000 ha 0.2 l/s/ha	5200 ha 0.45 l/s/ha	3800 ha 0.7 l/s/ha
Etage chaud 1500-2200m	3000 ha 0.3 l/s/ha	2900 ha 0.6 l/s/ha	3100 ha 1.0 l/s/ha

Débits fictifs continus observés sur environ 200 périmètres du MIRA

En moyenne, sur chaque étage, les différences vont du simple au triple. Cette inégalité en dotation peut s'expliquer par le fait qu'un certain nombre d'usagers cherchent à surdoier (dans les concessions) leurs secteurs de manière à sécuriser l'approvisionnement en cas de forte baisse du débit disponible. Par ailleurs, une situation excédentaire en dotation permet une marge de manoeuvre confortable dans l'utilisation: on peut pratiquer des irrigations approximatives sans effort d'aménagement à la parcelle et avec un minimum de travail, c'est à dire à moindre coût.

L'inégalité en dotation ne recouvre pas exactement l'inégalité foncière, au demeurant primordiale dans les problèmes agraires du pays. Certains secteurs paysans ont réussi à s'approprier l'eau d'irrigation en quantité globalement satisfaisante, parfois au prix de luttes difficiles et longues comme à Urcuqui (Bassin du Mira).

D'une manière générale, le processus historique de constitution des réseaux d'irrigation a abouti à ces inégalités, secteurs sans eau, secteurs avec faible apport, secteurs avec dotation moyenne, et secteurs bien dotés. L'INERHI n'a pas su les modifier à travers le système des concessions publiques.

3-4 La distribution de l'eau à l'intérieur des périmètres.

Les variables du tour d'eau prennent toutes les valeurs possibles selon les sites: présence ou absence de tour d'eau organisé, modules de distribution allant de 1 litre/seconde à 50 litres/seconde, temps d'irrigation à l'hectare de 2 heures à 48 heures, fréquence de 3 jours à 30 jours, répartition par horaires fixes ou variables, etc.

Là encore, l'élément historique est fondamental. Le tour d'eau est l'héritage du choix des générations précédentes d'usagers, fondé sur les nécessités de l'époque de sa conception et sur des règles sociales en vigueur.

Or, les conditions de l'environnement socio-économique et probablement celles du climat ont évolué, de même que les systèmes de production agricole. Dans beaucoup de cas, le tour d'eau se révèle aujourd'hui inadapté.

Parfois, il a été modifié pour répondre aux besoins exprimés par un groupe de paysans capable de faire accepter les modifications par l'ensemble des usagers. C'est le cas de PIMAMPIRO où l'on a adopté un tour d'eau à fréquence très courte de 3,5 jours afin de développer des cultures maraîchères spéculatives (tour d'eau élaboré avec l'appui d'un ingénieur de l'INERHI au moment de la concession officielle).

Mais ailleurs, les inerties jouent, les différences d'intérêt paralysent toute velléité de changement, ou bien plus simplement, la complexité du problème empêche les dirigeants successifs des juntas de l'eau de poser le problème de l'adaptation.

L'absence de tour d'eau entraîne une répartition inégale de l'eau entre les usagers d'amont en aval. Si la ressource est excédentaire, le problème n'est pas majeur car l'eau parvient toujours aux derniers usagers. Dans le cas contraire, les tensions apparaissent.

Dans le cas de réseaux dits "communaux", souvent très anciens, c'est la pression sur la ressource eau qui amène les usagers à organiser un tour d'eau (fin du XIXe siècle jusqu'au milieu du XXe siècle dans la majorité des cas). C'est donc, en Equateur, un phénomène assez récent, qui correspond à la forte poussée démographique et à l'évolution de la propriété agricole.

La région la plus précoce dans l'appropriation paysanne de la terre et l'organisation des associations d'irrigants est la province du Tungurahua située à 150 kilomètres au sud de Quito. Cette région est aujourd'hui la plus dense des Andes avec environ 500 habitants au kilomètre carré agricole.

Dans le cas de réseaux dits d'"eaux achetées" (aguas compradas), les associations se sont constituées au moment de la construction des canaux. Leurs membres ont acheté des parts qui leurs confèrent par la suite un droit d'eau précis et inaliénable. La répartition de l'eau entre les paysans s'est faite sur une norme proposée pour tous: un module, un temps d'irrigation par hectare, et une fréquence (les trois choses étant liées). Le choix correspondait aux besoins des systèmes de production de l'époque. Ceux-ci ont évolué et se sont intensifiés, donc la tension sur l'eau s'est accrue, particulièrement en saison sèche.

Les fréquences longues (suffisantes pour compléter les cultures pluviales) sont un frein à l'intensification des cultures annuelles en été. Les modules trop faibles ne permettent pas d'irriguer correctement les prairies. Les aygadiers doivent faire face à des dérèglements et des conflits qu'ils tentent d'arbitrer au jour le jour.

L'augmentation des irrigants entraîne une microparcélisation forcée. Dans certaines régions (Tungurahua), le tour d'eau se fait sous contrôle d'un chronomètre à la demi-minute près. Dans de telles conditions, qu'advient-il de ces systèmes en l'an 2000 ?

Reste à examiner si la répartition de l'eau est équitable, c'est à dire proportionnelle aux superficies cultivées. On peut en douter dans les cas des systèmes d' "eaux achetées", dans la mesure où les premiers irrigants achetèrent des parts financières. Dans les réseaux communaux, il règne également une certaine inégalité, bien que les différences soient limitées (du simple au double ou au triple).

Ces différences s'expliquent bien par les objectifs initiaux des ayant-droit: s'ils voulaient simplement assurer un apport de complément à leurs cultures pluviales, ils ne prenaient que le minimum d'heures. Si au contraire ils avaient pour stratégie une mise en culture en saison sèche, ils argumentaient un besoin supérieur qu'ils justifiaient par la présence d'une famille nombreuse et de fils capables de réaliser avec leurs parents cette intensification.

Une fois enregistrés, les droits se sont transmis aux héritiers avec la terre, et leur remise en cause, si elle est théoriquement possible, mettrait en péril le fragile consensus existant.

Curieusement, le double besoin d'irrigation (complément des pluies pendant l'hiver, besoin des plantes pendant l'été) n'a jamais donné lieu à une alternance de tour d'eau adapté à chaque situation.

Enfin, il faut noter la faible efficacité des réseaux de distribution liée d'une part à longueur des canaux et d'autre part à l'utilisation de répartiteurs constitués par de simples mottes de terre ("chambas") qui ne permettent pas une bonne maîtrise de la répartition.

Les pertes en eau sont considérables quand il n'existe pas de réservoirs pour stocker l'eau la nuit.

3-5 L'application à la parcelle.

Les dispositifs d'épandage de l'eau sont généralement gravitaires. Seules quelques haciendas modernisées ont adopté la technique par aspersion.

Les dispositifs gravitaires vont du plus élémentaire au plus élaboré: déversement du module dans la parcelle sans aucun aménagement pour le disperser, ou création de sillons en zig-zag dans les champs en forte pente. Les sols très sableux ont des réserves utiles faibles (30-50 mm par mètre) et une grande porosité qui rendent l'irrigation difficile à mener. La dose apportée par les paysans est souvent bien supérieure à ce que peut stocker le sol et prélever les plantes.

Faute d'appui technique en recherche-développement, les paysans adoptent un dispositif plus ou moins complexe de raies groupées dont la longueur est fixée en fonction de l'avancement de l'eau et des contraintes parcellaires.

Les premiers résultats des observations effectuées sur une dizaine de parcelles en suivi journalier font apparaître des efficacités d'application de l'ordre de 50%.

3-6 Organisations sociales et maintenance des réseaux.

Depuis la promulgation de la loi sur l'eau en 1972, l'INERHI administre l'eau en accordant des concessions aux irrigants ou groupes d'irrigants organisés.

Si, dans la première décennie d'application, la mise en place des concessions a permis aux groupes d'usagers d'enregistrer leurs droits anciens, l'évolution récente des conflits sur l'eau et celle des organisations paysannes posent de nouveaux problèmes: il y a atomisation et multiplication des associations d'irrigants, avec accroissement des tensions entre groupements appartenant aux mêmes systèmes d'irrigation.

L'augmentation des demandes en eau sur les réseaux anciens entraîne une plus grande fréquence de non respect des tours d'eau. Or, la fonction de "police de l'eau" n'est plus vraiment assurée par personne. Dans certains cas, la maintenance n'est plus correctement et régulièrement assurée, faute de consensus entre parties prenantes et faute de participants.

A terme, les conséquences peuvent aller jusqu'à la remise en cause de l'existence du réseau avec des effets économiques et sociaux désastreux.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CADIER E., POURRUT P., 1979. - Inventario et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables. L'expérience de l'Equateur. - In: Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XVI, n° 3 et 4.
- POURRUT P., 1980. - Estimation de la demande en eau du secteur agricole et des disponibilités pour la satisfaire. Eléments de base pour la planification de l'irrigation en Equateur. - In: Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XVII, n° 2.
- LE GOULVEN P., 1986.- Elaboration du Plan National d'Irrigation; analyse de la situation et conception générale.- Quito, INERHI-ORSTOM, 04/86, 22p (Fr., Esp.).
- RUF T., LE GOULVEN P., 1987.- L'exploitation des inventaires réalisée en Equateur pour une recherche sur les fonctionnements de l'irrigation.- In: Bulletin de liaison N° 12 "Equateur" Dpt. H, Paris, ORSTOM, 06/87, pp 30-47 (Fr., Esp.).
- LE GOULVEN P., RUF T., RIVADENEIRA H., 1987.- Metodologie générale et détails des opérations du projet INERHI-ORSTOM.- Quito, INERHI-ORSTOM, 06/87, 91p + an. (Fr., Esp.).
- RUF T., RIVADENEIRA H., 1987.- Selección de Micro-cuencas representativas en la Sierra.- Quito, INERHI-ORSTOM, 30p + an. (Fr., Esp.).
- RUF T., 1987.- Usted dijo "Sistemas de Producción", yo comprendí "Sistemas de Producción". Ensayo sobre el análisis de los conceptos y de los modos.- Conf. Sem. Sistemas Agrarios en el Perú.- Lima, UNALM-ORSTOM, 10/87, 39p.
- LE GOULVEN P., 1988.- Homogeneización de los datos pluviométricos.- Conferencia al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI).- Quito, del INERHI-ORSTOM, 17/03/88, 23p.
- LE GOULVEN P., 1988.- El vector Y. B. M., resumen metodológico; programas V1, V2, V3, manual del usuario.- Quito, INERHI-ORSTOM, 10/88, 14p.
- LE GOULVEN P., ALEMAN M., OSORNO I., 1988.- Homogeneización y regionalización pluviométrica por el método del vector regional.- Com. V Congreso Ecuatoriano de Hidráulica., Quito, 23-26/11/88, pp 59-83.
- LE GOULVEN P., RUF T., RIVADENEIRA H., 1989.- El Agua y el Campesino.- Conferencia al Seminario del Centro Internacional de Cooperación para el Desarrollo Agrícola (CICDA).- Cuenca, 17/06/89, 25p.
- LE GOULVEN P., RUF T., RIVADENEIRA H., 1989.- Traditional irrigation in the Andes of Ecuador, (1) Research and Planning.- Com. Seventh Afro-Asian Regional Conference of International Commission on Irrigation and Drainage (ICID).- Tokyo, 15-25/10/89, pp. 351-361.
- LE GOULVEN P., RUF T., RIVADENEIRA H., 1989.- Traditional irrigation in the Andes of Ecuador, (2) Dysfunctions and Rehabilitation.- Com. Seventh Afro-Asian Regional Conference of International Commission on Irrigation and Drainage (ICID).- Tokyo, 15-25/10/89, pp. 362-371.
- RUF T., LE GOULVEN P., RIVADENEIRA H., 1990.- Principales problemas del diagnóstico sobre el riego tradicional andino en el Ecuador, Com. Sem. Manejo del riego andino, Cajamarca, 20-27/01/90, 15p.

Table ronde

**Modèles de simulation
pour l'exploitation et la planification
des ressources des systèmes d'eau**

Introduction

F. Moniod, pour rester en accord avec le thème des Journées, sur l'utilisation agricole de l'eau, propose de traiter de préférence dans cet atelier des seuls modèles destinés à l'étude de l'adéquation des ressources à des besoins, surtout agricoles, à l'exclusion de ceux traitant de l'hydrologie de processus ou de bassin.

Il est proposé d'articuler les débats autour des points suivants :

- 1 L'identification des conflits d'usage de l'eau par les aménagistes.
- 2 La valorisation des concepts associés, à l'aide de la Modélisation mathématique des systèmes d'eau.
- 3 Les Critères d'évaluation des scénarii de fonctionnement des systèmes.
- 4 La simulation de la Ressource.
- 5 La simulation des Besoins.
- 6 La simulation de la topologie et du fonctionnement du système.
- 7 Conclusions : Comment mieux dialoguer avec l'outil de simulation ?

1 Identification et localisation des conflits d'usage de l'eau par les aménagistes.

Des expériences tendent à illustrer, pour des systèmes d'eau et des échelles et des milieux naturels différents, l'insuffisance de la sensibilisation et de l'utilisation des concepts liés à l'économie ou à la qualité de l'eau, y compris parmi les aménagistes eux-mêmes.

Pour Y.M.. Cabidoche, l'exemple de la Guadeloupe est révélateur du peu d'attention portée trop souvent à l'économie de l'eau par les populations, et même des administrations probablement compétentes, en l'absence de tradition d'irrigation.

On y dispose du système d'irrigation le plus moderne que l'on connaisse dans la Caraïbe.

Pourtant la société fermière n'est pas en mesure de dire quelle a été la consommation journalière dans son réseau, alors même que la situation est déjà inquiétante, dans les périmètres existants, à la suite d'une course inconsidérée à l'aménagement.

Les ressources présumées disponibles actuellement sont limitées et, certains jours, il n'y a plus d'eau dans la Grande Rivière.

Tout part dans la Grande Terre, et l'on vient de construire une retenue intermédiaire dans le nord, parce que le nord voulait aussi son propre périmètre irrigué que le conseil général a financé.

Faudra-t-il interpellier les gestionnaires du réseau d'irrigation et les services compétents de l'agriculture, pour obtenir une gestion simplement empirique, et, à terme, plus scientifique ?

L'expérience de **J.L.. Sabatier** l'a conduit à s'interroger sur la pertinence effective d'une pratique recommandée pour la conservation de l'eau et des sols dans les terroirs traditionnels de la zone soudano-sahélienne.

Il a en effet effectué des centaines de kms de lutte anti-érosive : participation à l'effort énorme déployé depuis des décennies pour l'implantation de cordons pierreux à travers la brousse.

Dans ce cas, il y a bien chez les responsables, une doctrine et une sensibilisation formelle, mais il n'y a pas ou peu de justification mesurable, de l'efficacité de cette politique sur le bilan hydrique et l'érosion locale.

La question reste donc de savoir si on peut minimiser l'effort à fournir en trouvant une méthode de mesure de l'impact de ces cordons pierreux dans un espace aménagé assez grand, un bassin versant, une petite région etc..

Etant donné une toposéquence ou un Bassin Versant de caractéristiques pédologiques précises, quel va être l'impact hydrique, pour les cultures, de la présence simulée, à un pas d'espace donné, de ces cordons pierreux ?

Quel en sera le bilan économique ? Voilà une question qui mérite d'être clairement posée... et résolue.

P. Le Goulven insiste sur la nécessité d'un découpage géographique pertinent de l'ensemble du système d'eau considéré, par rapport au problème posé. Chaque unité devra être déterminée de façon qu'on puisse y faire un bilan complet des entrées et sorties. La dimension spatiale des unités et éventuellement des pas de temps de simulation varieront suivant que l'on travaille en planification générale ou pour un aménagement précis plus local et bien identifié. Alors que le découpage géographique s'appuiera volontiers sur les limites des bassins hydrographiques et donc sur les connaissances obtenues par les observations hydrométriques sur les réseaux dans le premier cas, on a été amené pour l'irrigation en Equateur à travailler (échelle du 1/50000 à 1/25000) sur des espaces, les ZARI (Zones d'Analyse et Recommandations pour l'Irrigation), considérés comme plus pertinents par l'agro-socio-économiste, mais très différents des délimitations hydrologiques : ainsi, la ZARI d'Urcuqui est en relation avec trois bassins versants unitaires, et comprend plusieurs étages climatiques.

2 Valorisation des concepts associés, par la Modélisation Mathématique et Informatique du fonctionnement des systèmes d'eau ?

Le deuxième débat, introduit par une remarque d'**A. Casenave**, est sur l'opportunité du développement de la modélisation, mathématique et informatique, du fonctionnement des systèmes d'eau.

L'état effectif des connaissances justifie-il la conception et la construction d'un outil aussi important, investissement lourd alors que les informations à traiter paraissent aussi rares, peu consistantes voire suspectes, si l'on considère certains exposés ?.

Pour **M. Vauclin**, c'est une erreur de vouloir opposer modélisation et données. Les démarches doivent être conduites simultanément et en parallèle. Il deviendrait difficilement admissible que l'on propose des modèles entre guillemets sachant

pertinemment qu'on ne pourrait jamais avoir à notre disposition des variables et des paramètres à faire rentrer.

Il croit qu'il y a confusion, consciente ou inconsciente, entre le modèle et l'outil chargé de sa mise en oeuvre. Au départ le modèle est un schéma d'analyse fondé sur l'état des connaissances ou les représentations du milieu ou du problème tel que l'on peut se le représenter. Si on veut valider quand même nos hypothèses ou schémas d'analyse sur une réalité, il est bien évident qu'il faut que cette réalité puisse proposer des données.

Pour lui, cependant, un modèle reste d'abord un schéma d'analyse et il souhaiterait que l'on déconnecte l'aspect modélisation de l'aspect informatique : on peut faire de la modélisation sans ordinateur, cela s'est déjà fait et se fera encore.

Que cela facilite les choses est évident.

J.L. Sabatier croit aussi que le problème, en analyse des systèmes, n'est pas tellement dans la qualité des données qu'on rentre, mais plutôt, lorsqu'on veut prendre des décisions, celui de la qualité des représentations des connaissances, de l'aptitude à représenter des phénomènes dont il serait autrement difficile de traiter.

Pour lui, la position qui consiste à dire au modélisateur : "vos modèles ne valent rien parce que les données qu'on y rentre sont insuffisantes", est une position extrêmement dogmatique et indéfendable qui montre qu'on ne comprend pas le paradigme scientifique que constitue l'analyse des systèmes.

M. Roche pense lui aussi qu'en matière de simulation de fonctionnement des aménagements, les choses sont suffisamment claires et simples. Il reconnaît que l'on a fait des modèles sans informatique ; mais en l'occurrence ne voit pas bien comment pratiquer sans informatique des modèles tels que celui de J.C. Pouget, à savoir des modèles d'exploitation des systèmes d'aménagements, avec tout le contenu spatial et temporel correspondant.

M. Roche rappelle le fait que les conceptions sur le sujet n'ont été rendues opérationnelles que le jour où l'on a pu utiliser plus couramment l'instrument informatique, c'est à dire au début des années 1970.

Les modèles de simulation des aménagements, tels qu'ils ont été exposés le matin, existent en fait depuis cette époque et ont déjà permis de résoudre un certain nombre de problèmes ; sans doute plutôt dans le monde économiquement développé, parce que l'on y disposait de données d'entrée de meilleure qualité, suscitée par une plus forte pression sur la demande en eau.

F. Moniod conclut en remarquant que c'est le sort habituel de tout modèle faisant appel à des données liées à l'émergence de nouveaux concepts, de ne pas disposer d'emblée des informations nécessaires pour alimenter son fonctionnement. Les modèles mathématiques de gestion de l'eau, particulièrement dans les pays en voie de développement, restent du domaine de la Recherche. Ils se situent d'ailleurs en aval des modèles mathématiques de fonctionnement hydrologique des systèmes naturels, eux-mêmes toujours objets de l'attention des chercheurs, même si l'on n'en parle pas ici.

Le rôle de ces derniers est bien, dans l'immédiat, de favoriser l'identification et l'amélioration de critères d'évaluation des scénarii, des algorithmes d'estimation de la ressource et des besoins.

On a pu constater, à travers les exposés, le travail considérable effectué dans ce sens depuis quelques années. Des difficultés subsistent et vont être relevées dans la suite des débats.

3 Critères d'évaluation des scénarii de fonctionnement

M. Roche rappelle son expérience de la conception du modèle d'aménagement des eaux du nord de la Tunisie. En matière d'objectif, pour plusieurs scénarios vraisemblables (caractérisé chacun par un schéma topologique d'un système en partie naturel, une ressource, des besoins en eau supposés), il s'agissait d'effectuer l'analyse des défaillances, basée sur l'étude du conflit entre la demande et la ressource, en quantité et qualité de l'eau (normes et fréquence tolérées de défaillance de critères). En fait une grande partie de la difficulté était d'obtenir du maître d'oeuvre des recommandations précises sur les normes de qualité et de défaillances qu'il souhaitait imposer. L'absence de règles techniques reconnues, du fait de l'inexistence de pratiques locales déjà contrôlées, constitue souvent une difficulté pour le projeteur en pays sous-équipé.

E. Cadier, confirme que son équipe a éprouvé ses plus grandes incertitudes à l'occasion du choix des priorités à donner à des critères qui qualifient des exigences contradictoires. Il a lui aussi ressenti la difficulté où il se trouvait d'anticiper sur des normes ou des choix qui n'ont pas encore été faits, faute d'expérience locale, par les administrations techniques "compétentes".

G. Girard, approuve l'étude de 7 ou 8 critères, comme l'a fait l'équipe açudes, ce qui permet à chacun de choisir et de voir les conséquences pour l'aménagement.

4 Simulation de la Ressource en eau

Pour **M. Roche**, dans le cas de la simulation du Nord Tunisien, avec vingt à vingt-cinq ans de débits sur le réseau, et des observations de salures, on pouvait établir des séries moyennes qui permettaient d'avoir une idée cohérente de la Ressource, même si c'était statistiquement moins facile que pour un grand fleuve comme le Sénégal, où l'on disposait de chroniques plus importantes.

Par contre, pour **E. Cadier**, le problème de l'évaluation de la ressource est probablement la source majeure d'imprécision dans le produit final "petit açude", qui intéresse le Nordeste Brésilien.

L'équipe a l'expérience concrète de simulation des apports à de tout petits açudes dans lesquels on ne peut pas faire d'études hydrologiques poussées, et même l'évaluation de la surface du bassin d'alimentation à partir des photos aériennes n'est

pas aisée, et doit être vérifiée. La ressource, mal connue, est de plus aléatoire : il s'agit de régimes très irréguliers en zone semi-aride. C'est bien sûr un autre cas particulier.

5 La simulation des besoins

Pour la simulation dans les açudes, d'après E. Cadier, il s'avère qu'il a été facile d'évaluer la surface irrigable et les besoins. En appliquant une formule d'évaporation qu'on connaît à 25% près, on a en fin de compte, pour des objectifs de planification, une meilleure estimation des besoins que des ressources, pour un scénario donné bien sûr.

Pour Y.M. Cabidoche, les moyens d'évaluation des besoins en eau des cultures dans le cas de la Guadeloupe restent du domaine du flou excessif malgré les apparences : en discutant avec les agronomes, on a l'impression que tout est réglé et qu'on peut arriver à une bonne approximation ; en réalité l'ETP elle-même n'est connue qu'à plus ou moins 25%, par des modèles de référence au niveau de la parcelle.

Par ailleurs l'absence de contrôle par la société fermière de sa consommation journalière dans le réseau depuis sa mise en service ne permet pas d'utiliser des corrélations de type chroniques de pluviométrie/ chroniques d'utilisation d'eau. On ne connaît pas plus la réalité des superficies effectivement irriguées ! Dans le contexte de la Guadeloupe, et de l'optimisation des résultats d'un aménagement existant, ce constat est décevant.

6 La Topologie et le fonctionnement des systèmes d'eau.

Avec un minimum de données de base en topographie et cartographie, les caractéristiques des sites, les courbes de cubature de barrage, M. Roche pense que la définition des éléments proprement physiques, et ensuite la représentation des conditions hydrauliques de transferts, de stockage, dans des biefs naturels ou non, sont des processus assez bien maîtrisés depuis longtemps.

J.C. Pouget rappelle que, même si il n'a pas détaillé, il y a bien aussi un élément appelé bief naturel dans son modèle HYDRAM, qui est censé représenter une portion de rivière, et même un élément de confluence avec bief naturel.

Il y a en outre des biefs avec retenue, biefs avec conduite, biefs avec prise d'eau, tous les éléments rencontrés dans un système d'irrigation.

De plus on peut fabriquer l'arborescence, et la modifier à volonté.

Elle est variable dans le temps et c'est toute l'originalité du modèle, de pouvoir faire varier le schéma topologique.

7 Conclusions : des progrès dans le dialogue, des réponses rapides à l'utilisateur

Il semble à J.C. Pouget que la simulation de fonctionnement en général et les nouveaux outils élaborés en particulier sont parfaits pour le dialogue.

M. Roche lui aussi ne connaît pas de technologie qui soit plus conviviale que le modèle de simulation, instrument idéal de dialogue avec le maître d'oeuvre. On peut montrer les relations entre situations de départ, consistance du projet, satisfaction des besoins. Les partenaires entrent dans le jeu.

Pour B. Pouyaud, avec les nouveaux outils, on doit pouvoir fournir aux politiques et aux décideurs autre chose que les piles de listings et leur livrer l'information sous forme consommable, sous forme de graphiques. Le but d'HYDRAM est bien de fournir diagrammes et graphiques illustrant de façon colorée deux ou trois décisions simples.

Déjà, avec les modèles de simulation tels qu'ils ont été réalisés il y a dix ou vingt ans, il y avait progrès dans l'aide à la décision. Mais par suite du type de langage informatique et de conception, et plus généralement des moyens en usage, on ne pouvait pas en changer facilement la topologie, ce qui les condamnait à une mort rapide.

L'apport d'HYDRAM sera sans doute d'être modulaire et de permettre à tout moment, si le site de barrage doit être déplacé plus près du village de l'homme politique, de pouvoir le déplacer rapidement dans le modèle sans être obligé de le bouleverser. HYDRAM promet une meilleure souplesse sur la définition des problèmes, une meilleure lisibilité des résultats, tout le monde en sera d'accord.

CLOTURE DE LA 1^{ère} JOURNEE D'HYDROLOGIE 1990

Par

P. POURRUT

CLOTURE DE LA 1^{ère} JOURNEE D'HYDROLOGIE 1990

Pierre Pourrut

Alors que le thème de demain sera plus spécialement centré sur l'aspect agronomique de la gestion de l'eau, je voudrais en quelques mots résumer la présente journée, féliciter les exposants pour la qualité de leurs communications et remercier le public pour sa participation active. La chaleur même des discussions est la preuve de l'intérêt suscité par la plupart des sujets présentés et par les deux ateliers.

Comme toujours, ce qui touche à la modélisation a été passionnément débattu. En prenant pour base ceux proposés par les intervenants, de nombreuses polémiques ont été entamées autour des grands types de modèles de simulation ou d'optimisation, au sujet des variables à prendre en compte et du degré de précision respectif de celles relatives aux ressources et à la demande en eau, etc. Il serait trop long de tout reprendre mais on peut cependant dégager un principal aspect méthodologique : quoiqu'en règle générale, mis à part certains algorithmes (Nordeste brésilien), les modèles proposés pour la gestion de l'eau à grande échelle s'appliquent à des cas particuliers et soient difficilement transférables, une bonne voie pour les travaux futurs est celle constituée par les modèles modulaires type HYDRAM.

De l'atelier sur l'eau et sa gestion dans la planification régionale en vue de l'adéquation de la ressource aux besoins, je retiens tout particulièrement les discussions qui ont mis l'accent sur les problèmes d'appréhension des espaces à étudier (ZARD), de pas de temps et d'échelles, presque toujours spécifiques. Le nombre élevé et l'aspect multidisciplinaire des critères retenus, de même que la très forte diversité des systèmes offre/demande existants, rendent malaisé le transfert des résultats.

Dans mes paroles d'introduction du thème, ce matin, je disais souhaiter aboutir, au terme de la journée, à la définition consensuelle de certains grands critères encore "flous". Je crois qu'il nous faut là faire un constat de semi échec car nous n'avons pas beaucoup avancé dans ce domaine. Seule la notion d'utilisation des produits scientifiques remis à nos partenaires en coopération a fait l'unanimité : l'emploi de ces produits, modèles et surtout plans de gestion, est l'affaire des Etats et les hydrologues doivent s'en mêler le moins possible ; pour en assurer une meilleure efficacité et un bon usage par les aménageurs il est donc souhaitable de concevoir des outils qui permettent le choix entre plusieurs options.

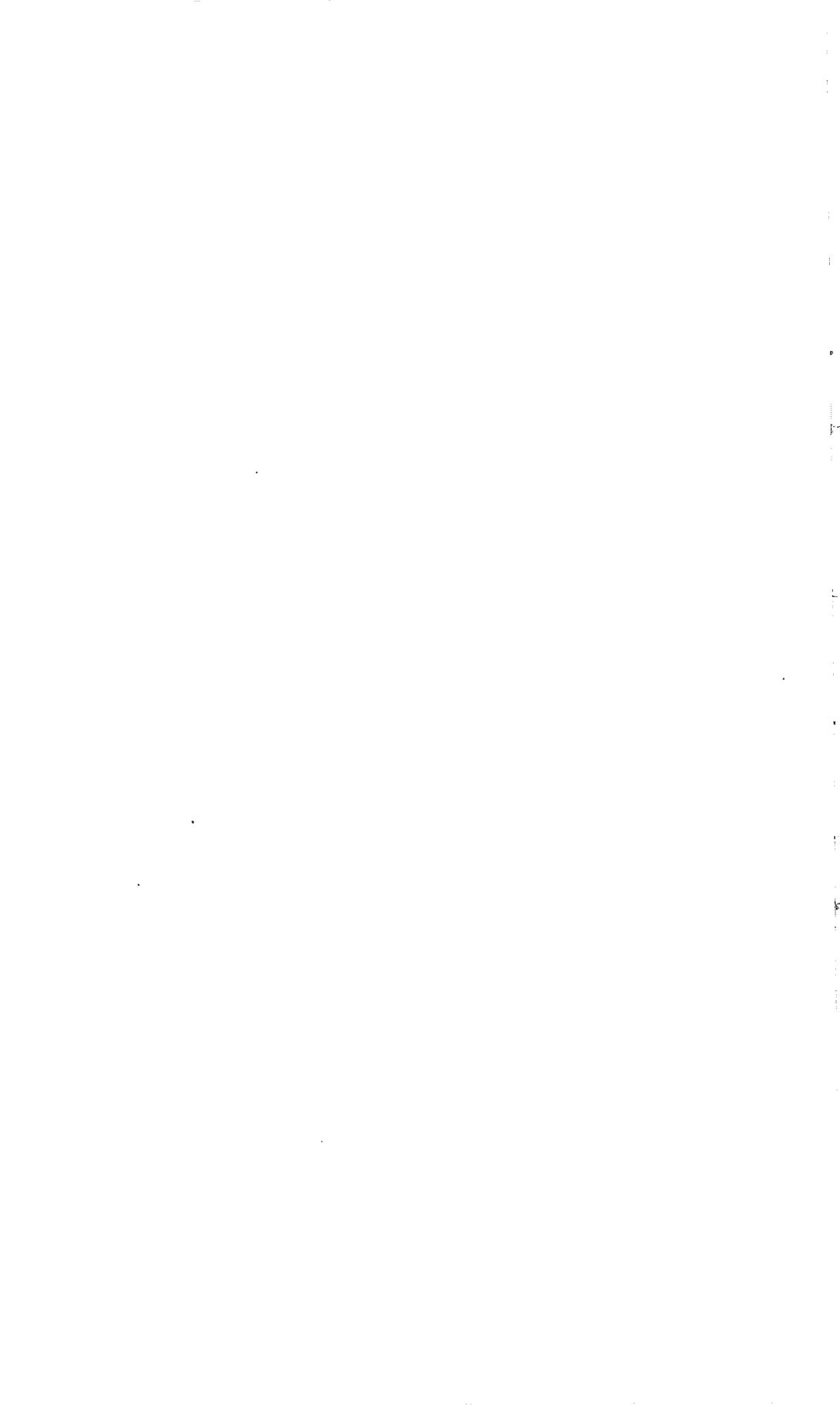
C'est la première fois que les hydrologues, les agronomes et les agro-économistes traitent en commun le thème de l'hydrologie rurale. D'ici quelques années, enrichis de nouvelles expériences, il serait sans doute intéressant d'y consacrer une autre rencontre scientifique.

13 Septembre 1990

Maîtrise de l'eau : aspects agronomiques

Coordonnateur : Francis Forest

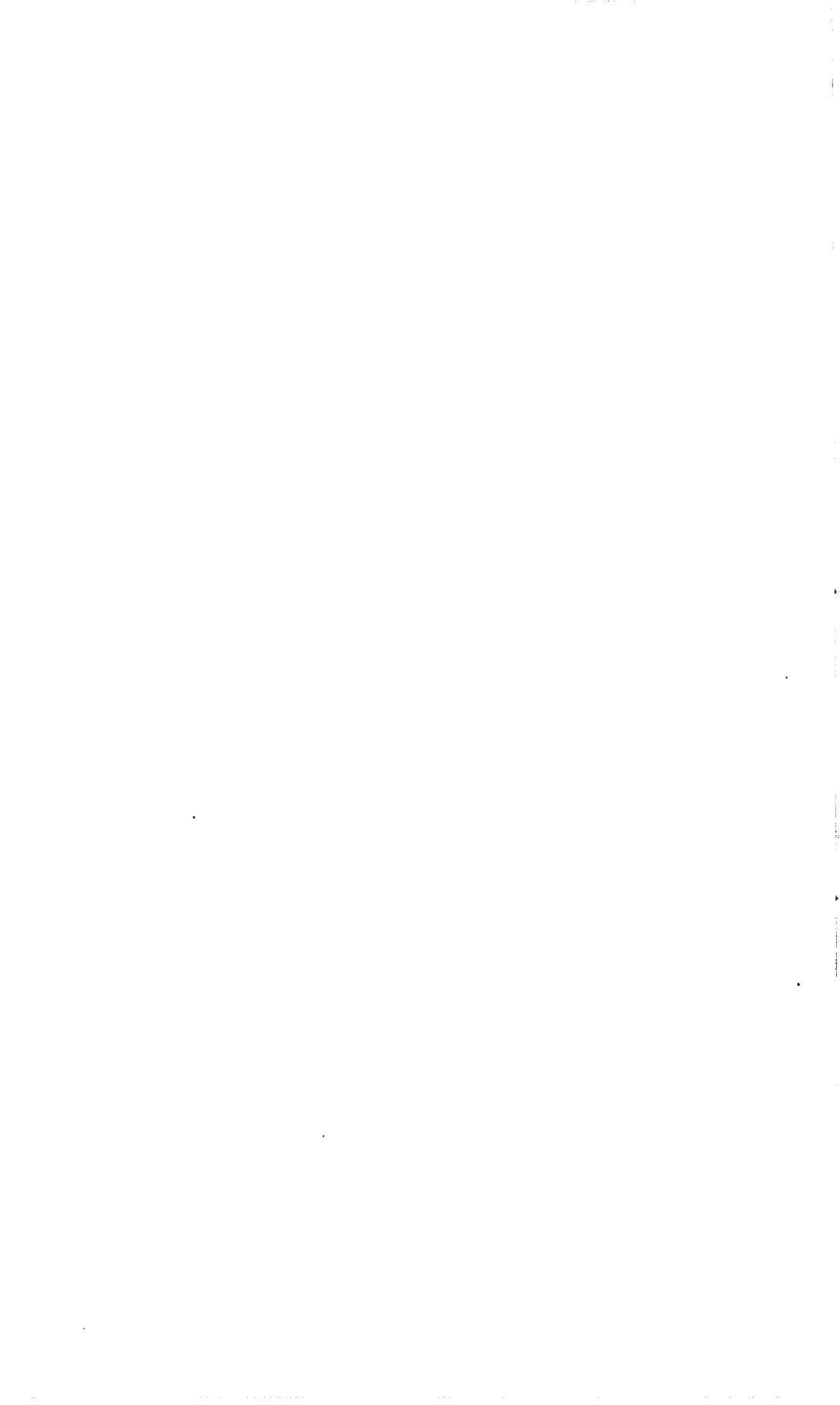
IRAT/CIRAD (Montpellier - France)



**INTRODUCTION AU THEME MAITRISE DE L'EAU :
ASPECTS AGRONOMIQUES**

Par

F. FOREST



Introduction au thème "Maîtrise de l'eau : aspects agronomiques"

Francis Forest

chers collègues,

Cette rencontre pluridisciplinaire d'aujourd'hui doit être l'occasion, à travers un bilan objectif sur les connaissances et les méthodes respectives, de fonder les éléments d'une démarche opérationnelle visant à minimiser le poids des facteurs pédo-climatiques dans l'expression le plus souvent drastique du risque agricole.

Nous n'aurons pas à revenir sur les relations désormais établies qui conditionnent, notamment à la parcelle, la fluctuation du rendement : une alimentation hydrique satisfaisante des cultures est en effet une condition préalable incontournable, à partir de laquelle il est possible d'ébaucher une politique de restauration ou de maintien de la fertilité.

Nous aurons vraisemblablement à nous mettre d'accord sur des concepts et des définitions communes, ce qui nous permettra à l'avenir de bâtir ensemble des recherches finalisées cohérentes : ainsi ce que les hydrologues nomment "déficit d'écoulement" est interprété par les agronomes comme l'expression intégrée du fonctionnement hydrique des couverts végétaux occupant un espace agraire considéré.

Parallèlement la boîte noire "Ruissellement/ Drainage", qui je le reconnais facilite l'exploitation agronomique des modèles simples de bilan hydrique courant, fait l'objet des observations et des modélisations pertinentes par les hydrologues et les pédologues.

Il sera primordial que nous donnions la plus grande importance à la prise en considération de quelques réflexions simples qui, je l'espère, recevront le consensus, l'adhésion de la présente assemblée :

- (i) Maîtriser l'eau, c'est d'abord la gérer. Le problème de la fiabilité de nos connaissances sur le fonctionnement hydrique des espaces cultivés (le champ, l'arbre, les pâturages, les parcours) ne doit pas être esquivé.
- (ii) L'échelle spatiale d'analyse pour la compréhension de ces mécanismes de redistribution des eaux superficielles, ne doit-elle pas coïncider avec le domaine spatial du fonctionnement agro-économique des exploitations agricoles ?

Le problème du changement d'échelle, du passage du bilan hydrique à la parcelle à un modèle de gestion des flux hydrauliques à l'échelle de la petite zone agricole est donc nécessaire et impliquera la conception judicieuse d'outils d'observations, de mesures et de modélisation.

Enfin, et cela nous semble impératif, si nous voulons que nos produits de recherches soient diffusables, il nous faudra définir une gamme de critères sur l'état et le fonctionnement hydrique du domaine cultivable à partir desquels nous serons en mesure de proposer des bases cohérentes pour le dimensionnement, le suivi et l'évaluation des actions de développement agricole à l'échelle de l'aménagement intégré, basé sur le recours à des techniques de gestion des ressources hydriques.

En conclusion, c'est donc à une relecture multi-échelle et pluri-disciplinaire de l'équation du bilan hydrique que nous sommes aujourd'hui conviés, sans oublier le contexte incertain de l'environnement socio-économique de notre projet.

Il s'agira de proposer des stratégies de redistribution et d'exploitation de la ressource hydrique qui soient compatibles avec des objectifs multiples, en général consommateurs en eau et susceptibles d'être concurrents :

 équilibrer le bilan vivrier (eau pour les cultures),

 maintenir l'assiette fourragère (garantir la production pérenne des couverts herbacés),

 assurer l'approvisionnement en bois de chauffe et de construction (garantir la redistribution de l'eau en profondeur pour développer des rhizosphères et l'agro-foresterie),

 pérenniser la recharge des nappes (garantir le fonctionnement des puits et des forages).

Cette problématique étant posée, je vous invite à apporter vos contributions respectives.

GESTION AGRICOLE DES PLUIES AU SAHEL

Par

J. ALBERGEL

P. PEREZ

M. WAKSMANN

Gestion agricole des pluies au Sahel

Une méthode d'estimation du ruissellement dans le bilan hydrique des cultures

Jean ALBERGEL* , Pascal PEREZ** & Michel VAKSMANN***

*Chargé de recherche de l'ORSTOM DAKAR SENEGAL

** Ingénieur CIRAD - ISRA KAOLAK SENEGAL

***Ingénieur CIRAD - IER BAMAKO MALI

Centre ORSTOM de HANN B.P. 1386
DAKAR SENEGAL

Résumé :

En zone sahélienne, les modèles de bilan hydrique sur parcelles cultivées doivent prendre en compte le ruissellement qui représente sur de nombreux sols plus de 50% de la lame précipitée. Pour calculer le ruissellement, les modèles les plus performants dans cette zone climatique utilisent des valeurs de seuils et des coefficients de ruissellement en fonction de la texture des sols. C'est le cas du modèle FRANQUIN & FOREST largement utilisé en Afrique de l'Ouest.

La simulation du bilan hydrique par ces modèles avec un pas de temps pentadaire ou décadaire est satisfaisant pour des études climatiques et des zonages. En revanche la précision de cette simulation est insuffisante lors de l'étude des phénomènes ponctuels. Les travaux menés dans le cadre du Réseau de Recherche pour la Résistance à la Sécheresse (R3S) sur les sites de KASSELLA au MALI et de THYSSE KAYMOR au SENEGAL montrent que ces imprécisions proviennent d'une mauvaise prise en compte du ruissellement.

Des essais de simulation de pluie, en milieu cultivé ont permis de mettre en évidence le rôle des caractéristiques de surface sur l'infiltrabilité de l'eau (couvert végétal, activité faunique, microrelief et type d'organisation pelliculaire sur l'horizon le plus superficiel des sols). Un protocole expérimental de simulation de pluie qui tient compte des caractéristiques des averses tropicales, permet d'exprimer le ruissellement d'un sol par une équation donnant la lame ruisselée en fonction de la hauteur précipitée, d'un indice d'humectation des sols et du produit de la pluie par cet indice.

Un ensemble d'expérimentations sur de nombreux bassins versants situés depuis la frange désertique du nord NIGER jusqu'aux limites des savannes humides de la COTE D'IVOIRE a abouti à une typologie des principaux états de surface des milieux cultivés sahéliens. Une équation moyenne de ruissellement est proposée pour les trois grands types de surfaces cultivées de cette zone climatique.

Si on introduit ces équations de ruissellement dans le modèle de bilan hydrique on aboutit à une simulation nettement plus proche de la réalité. La prise en compte de l'état de surface et de son éventuelle modification au cours du cycle cultural permet de mieux cerner le remplissage par palier de la réserve en eau du sol.

Cette communication présente la méthode et les résultats de simulation numérique du bilan hydrique obtenus sur parcelle de mil au MALI et sur parcelle d'arachide au SENEGAL .

Introduction

Parler de la gestion d'une ressource aussi aléatoire que les pluies au SAHEL semble être une gageure. C'est pourquoi les organismes de développement ont pensé depuis le début du siècle que l'agriculture sahélienne ne pouvait s'intensifier que par des grands programmes d'irrigation.

En 1990, la part de la production alimentaire des cultures pluviales est toujours prépondérante malgré le développement de l'irrigation. Dans un pays très sahélien comme le SENEGAL, la production des cultures pluviales (Mil, Sorgho) s'élevait à 818000 tonnes pour la campagne 1989/90 et celle des cultures irriguées (Riz, Maïs) à 299000 tonnes (programme AGRHYMET). Les deux grandes cultures industrielles de ce pays sont également pluviales : arachide, coton.

Au début des années 60 les chercheurs de divers instituts agronomiques se sont lancés dans des programmes visant à augmenter l'efficacité des pluies pour l'alimentation hydrique des végétaux. En s'appuyant sur un référentiel scientifique large (agroclimatologie, hydrologie, sciences du sol et agrophysiologie) et en associant différentes échelles (parcelle, bassin versant, région, grande zone climatique) ces chercheurs ouvraient un nouveau champ d'investigation que l'on pourrait désigner par "économie de l'eau de l'agriculture pluviale" (REYNIERS & FOREST, 1990).

Plusieurs thèmes se rattachent à ce domaine de recherche, évaluation des risques de sécheresse, facteurs agronomiques et génétiques d'adaptation, gestion du ruissellement... Ils ont un besoin commun de connaissance du bilan hydrique des cultures, du diagnostic de l'agronome en zone de déficit pluviométrique.

De nombreux modèles de simulation numérique du bilan hydrique des cultures ont été mis au point. MARCHAND (1988) les classent en 4 catégories :

- *Déterministe - conceptuel
- *Déterministe - fonctionnel
- *Stochastique - conceptuel
- *Stochastique - fonctionnel

Les modèles les plus utilisés par les agronomes de la zone sahélienne sont ceux du type déterministe fonctionnel parmi lesquels il faut citer celui de FRANQUIN & FOREST (1977) diffusé dans de nombreux centres agronomiques de la région. Ces modèles ont l'avantage de fonctionner à partir de données agro-climatologiques facilement mesurables et pour lesquelles il existe un réseau permanent d'observation dans tous les pays de la région.

La simulation du bilan hydrique par ces modèles avec un pas de temps pentadaire ou décadaire est satisfaisant pour des études climatiques et des zonages. En revanche la précision de cette simulation est insuffisante lors de l'étude des phénomènes ponctuels. Les travaux menés dans le cadre du Réseau de Recherche pour la résistance à la sécheresse (R3S) sur les sites de KASSELA au MALI (culture de mil) et de THYSSE KAYMOR au SENEGAL (culture d'arachide) montrent que ces imprécisions proviennent d'une mauvaise prise en compte du ruissellement.

Une méthode d'estimation du ruissellement, tout en conservant la "fonctionnalité du modèle" a été mise au point et le logiciel de traitement des données et de simulation au pas de temps journalier a été complété (VAKSMANN, 1990).

Nous présentons cette méthode et les résultats obtenus sur deux sites : le premier au MALI où se déroule le programme Sol-Eau -Plante, le second au SENEGAL sur le dispositif expérimental du programme DRS Economie de l'eau au Sine Saloum. Ces deux programmes de recherches sont des projets pilotes du réseau R3S.

1. Matériels et méthodes

1.1 Simulation du bilan hydrique d'une culture

La simulation du bilan hydrique suivant FRANQUIN & FOREST (1977) est une démarche simplificatrice dont le but est de permettre d'aborder le plus aisément possible le devenir de l'eau au champ. La réalisation de ce modèle consiste à identifier les mécanismes importants et à les décrire par l'intermédiaire d'une équation ou d'un équivalent physique. Un logiciel de calcul et de représentation graphique est disponible pour sa mise en oeuvre : BIPODE (VAKSMANN, à paraître).

L'évolution du stock d'eau disponible dans le sol, pour une culture peut être décrite par l'intermédiaire d'une équation de bilan entre deux dates. Entre deux dates la variation du stockage de l'eau dans le sol (DS) est égale aux quantités d'eau apportées (pluies pour les cultures pluviales) auxquelles sont soustraites les pertes d'eau par drainage, ruissellement et évapotranspiration.

$$DS = P - Dr - ETR - Ru$$

DS : variation de stock en eau du sol en mm
P : pluie en mm
Dr : pertes par drainage profond en mm
Ru : ruissellement en mm
ETR : évapotranspiration réelle de la culture

Connaissant les caractéristiques du sol et de la plante, cette équation permet de calculer par récurrence l'évolution de la réserve en eau du sol au jour J+1 $R(J+1)$ par :

$$R_{J+1} = R_J + P_{J+1} - Dr_{J+1} - ETR_{J+1} - Ru_{J+1}$$

où R_{J+1} , P_{J+1} , Dr_{J+1} , ETR_{J+1} , Ru_{J+1} sont respectivement les pluies, le drainage, l'évapotranspiration et le ruissellement du jour J+1.

La réalisation de la simulation consiste à répéter cette opération chaque jour et à tracer l'évolution des stocks.

Dans l'équation du bilan hydrique :

- la pluie est mesurée,

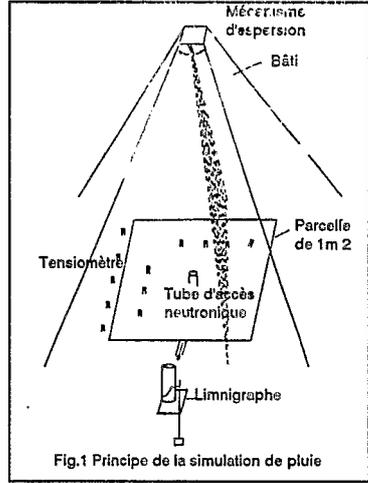
- le drainage est considéré comme équivalent à l'excès d'eau lorsque la réserve est pleine (débordement du réservoir). Cette hypothèse sous entend un drainage rapide des pluies excédentaires.

- l'évapotranspiration réelle (ETR) est calculée à partir de la demande évaporative (ETP), du coefficient cultural (Kc) et du niveau de remplissage de la réserve utile. Quand le sol s'assèche, le taux d'évapotranspiration diminue et les pertes en eau sont, en générales inférieures à l'ETM. De nombreuses formules ont été définies pour quantifier l'ETR en fonction de l'assèchement du sol. Le modèle FRANQUIN & FOREST utilise la formule polynomiale d'EAGLEMAN (1971) qui tient compte à la fois du remplissage de la réserve utile et de l'intensité de la demande évaporative.

- le ruissellement est souvent négligé dans ces modèles. Le modèle FRANQUIN & FOREST permet d'estimer le ruissellement en fixant un seuil minimum de pluie au dessus duquel apparaît le ruissellement qui est alors égal à un pourcentage fixe de la pluie. Cette formulation n'est pas satisfaisante au SAHEL. La comparaison des stocks d'eau simulés et ceux mesurés montre que le ruissellement ne peut être un taux constant de la pluie. Pour mettre au point une méthode de ruissellement qui rende mieux compte de la réalité nous avons utilisé les techniques de simulation de pluie mise au point pour l'étude de la genèse des crues au SAHEL (ALBERGEL, 1987).

1.2 La simulation de pluie

Le simulateur de pluie utilisé dans les expérimentations poursuivies sur le site de THYSSE KAYMOR dérive de l'appareil mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1978) dont les fonctions ont été automatisées. Il permet de réaliser une averse dont on programme les intensités par plage de temps variable sur une parcelle de 1 m² (fig 1). Cette averse a les caractéristiques de pluies types dont on connaît les récurrences. Les intensités, durées, fréquences et l'énergie cinétique des gouttes de pluies lors de leur impact avec le sol sont celles des pluies de récurrence annuelle et décennale de la région étudiée (CASENAVE, 1982). Un moteur, "hybride pas à pas", piloté par un microprocesseur permet de faire osciller un gicleur calibré qui est alimenté avec une pression constante. L'intensité de pluie reçue par la parcelle est fonction de l'angle d'oscillation du gicleur. Le ruissellement est mesuré sur un limnigraphe de précision et la progression du front d'infiltration peut être suivi avec une sonde à neutrons et une batterie de tensiomètres.

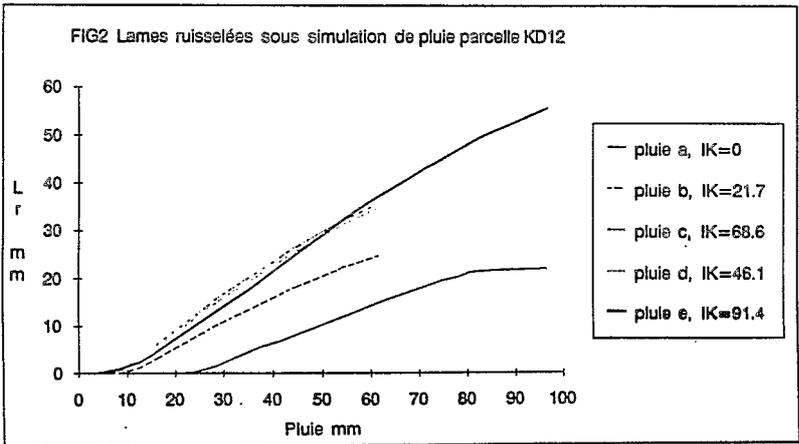


Une série de cinq pluies simulées séparées par des temps de ressuyage plus ou moins longs permet d'établir l'équation de ruissellement de la parcelle considérée. Cette équation exprime la lame ruisselée en fonction de la pluie et d'un indice dérivant des hauteurs successives de pluie et des temps de ressuyage. Cette indice est de la forme :

$$IK(n) = (IK(n-1) + P(n-1)).\exp(-0,5,t),$$

Où IK_n est l'indice au début de la pluie n (P_n) et t le temps (en jours) séparant deux averses consécutives.

La figure 2 représente les lames ruisselées résultant d'un protocole de pluies comprenant deux averses de récurrence décennale et trois averses de récurrence bisannuelle sur une parcelle de bas de pente sableux dans un ancien champ d'arachides.



La détermination de la relation $Lr(P,IK)$ se fait en deux étapes pour chaque parcelle. Pour chaque pluie, on calcule les paramètres de la relation $Lr = a.P + b$ sur la partie linéaire de la courbe de ruissellement correspondant à un régime permanent de ruissellement. On établit ensuite par régression linéaire les droites $a(IK)$ et $b(IK)$. Le résultat final est une fonction de la forme:

$$Lr = a.P + b.P.IK + c.IK + d$$

Pour la parcelle prise en exemple sur la figure 2 l'équation est :

$$Lr = 0,4.P + 0,00353.P.IK + 0,0219.IK - 5,63$$

Un tel protocole de pluie simulée a été réalisée sur 247 parcelles situées sur un transect nord sud depuis les franges prédésertiques du nord Niger jusqu'aux savannes humides du nord de la COTE D'IVOIRE (CASENAVE & VALENTIN, 1987). Une description codifiée de chacune de ces parcelles a permis de comparer statistiquement les paramètres hydrodynamiques et les paramètres de sols et d'états de surface (ALBERGEL et al 1985).

Pour le milieu sahélien les parcelles en milieu cultivé se regroupent en trois grands types, fonction de la nature des croûtes de surface. Le critère retenue dans la classification CASENAVE & VALENTIN (1989) est l'abondance de la porosité vésiculaire dans la croûte. Lors des pluies, l'organisation de surface des sols réduit non seulement l'infiltration mais aussi la sortie de l'air qui, emprisonné dans la croûte, forme alors des bulles. Celles ci conservent leur forme au cours des dessiccations, d'où l'abondance des petites cavités sphériques ("des vésicules"). Les trois types de surface en milieu cultivé sont les suivants :

- Type C1 : porosité vésiculaire absente ou très faible 5%
- Type C2 : porosité vésiculaire peu abondante 5 à 30%
- Type C3 : porosité vésiculaire forte > 30%

Chacun de ces types possède des variantes tenant compte du couvert végétal, du taux d'éléments grossiers, de la texture et du micro-relief. On peut ce pendant adopter les équations moyennes de ruissellement suivantes;

- Type C1 : Lr (mm) = $0.2 P + 0.03 IK + 0.004 P.IK - 3$
- Type C2 : Lr (mm) = $0.35 P + 0.04 IK + 0.004 P.IK - 3$
- Type C3 : Lr (mm) = $0.9 P + 0.05 IK + 0.002 P.IK - 10$

Pour calculer la lame ruisselée de chaque pluie sur un site donné il suffit donc de reconnaître le type de surface, la valeur de la lame précipitée et celle du coefficient IK précédant cette pluie.

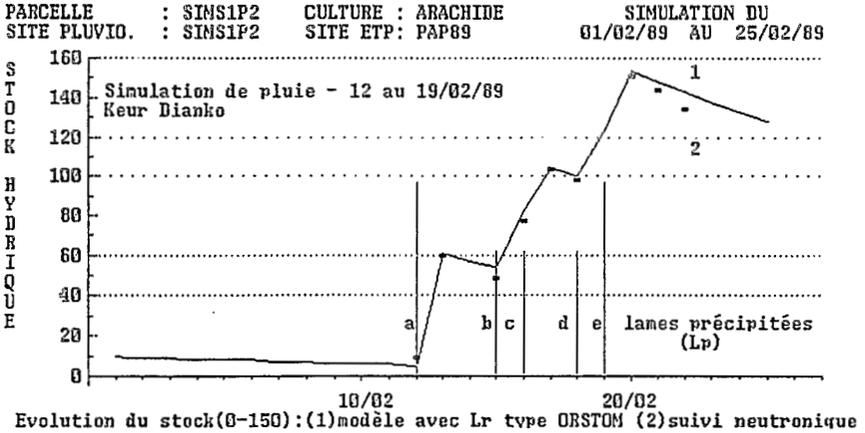
2. Résultats

2.1 Validation de la fonction de ruissellement

Afin de valider la fonction de ruissellement dans le modèle BIPODE, les résultats de la simulation de pluie réalisée sur le bassin versant de KEUR DIANKO à THYSSE KAYMOR, en février 1989 ont été repris. Les variations des lames infiltrées mesurées in situ par prélèvements gravimétriques et suivi neutronique ont été comparées à celles calculées par le modèle avec la fonction de ruissellement obtenue à partir des lames précipitées (Lp) et ruisselées (Lr) mesurées sur la parcelle.

Pour la parcelle KD12 déjà citée en exemple, l'évolution des stocks hydriques à la cote 150 cm est représentée sur la figure n°3. On remarquera la bonne adéquation du modèle malgré une période de simulation assez faible. Une légère modification de l'algorithme de base a été nécessaire afin de tenir compte de la forte évaporation sol nu de la parcelle dans un environnement à ETP élevé.

Figure 3



Pour évaluer le gain de précision obtenu par cette fonction de ruissellement, les résultats ont été également comparés à une simulation classique où le ruissellement est calculé par un coefficient constant à partir d'un seuil de pluie (sol sableux).

Afin de pouvoir généraliser et rendre fonctionnelle la méthode, il était intéressant de voir comment fonctionnait le modèle en prenant l'équation de ruissellement donné par le catalogue des états de surface pour le type de parcelle considérée (CASNAVE & VALENTIN, 1989).

Le tableau n°1 résume les différentes caractéristiques du bilan hydrique pour trois types de simulations testés:

- *Lame ruisselée type ORSTOM, établie localement $Lr = 0.4P + 0.0035PIK + 0.022IK - 5.63$
- *Lame ruisselée type ORSTOM, C2 du catalogue $Lr = 0.35P + 0.004PIK + 0.04IK - 3.0$
- *Lame ruisselée type Seuil à coefficient constant $S = 20 \text{ mm}$ $Kr = 30\%$

Tableau 1 : Simulations BIPODE sur KD12

Type	Pluie mm	Drainage mm	Ruissellement mm	Stock final mm
ORSTOM local	378	0	194	128
ORSTOM C2	378	16	177	129
Seuil	378	109	84	129

Les mesures d'humidité du sol lors de l'expérience confirment l'absence de drainage profond, la modification du modèle proposée améliore nettement la discrimination entre ruissellement et drainage.

On remarque également que l'utilisation de l'équation de ruissellement établie sur la parcelle et celle du catalogue donnent des résultats peu différents.

Les termes du bilan sur des périodes plus longues, le cycle cultural par exemple, doivent être affectés plus ou moins gravement par une sous estimation des pertes de surface, selon les conditions pluviométriques de la saison. Les deux exemples qui suivent illustrent cet état de fait.

2.2 Application de la méthode au cycle cultural

Le programme Eau - Sol - Plante de l'IER - BAMAKO, poursuit des études concernant les reports d'eau sur une toposéquence depuis 1987, sur le site de KASSELA. Un suivi régulier des stocks hydriques est effectué par méthode neutronique. Aucune mesure directe du ruissellement n'est réalisée, on compare simplement les stocks mesurés et modélisés par le logiciel BIPODE.

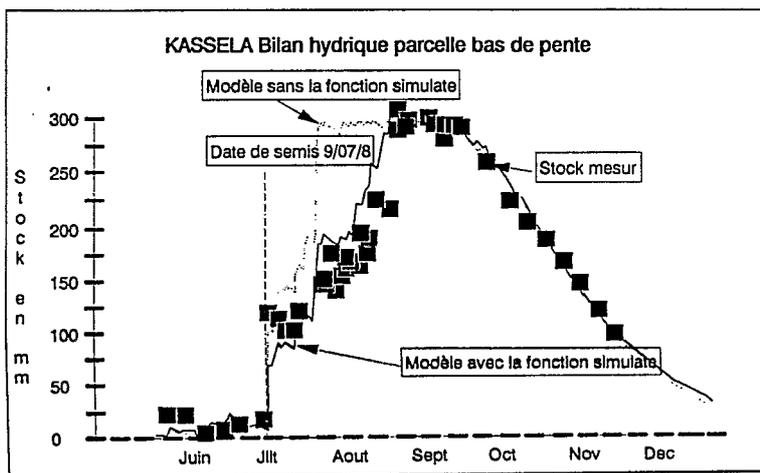
En 1988, l'hivernage s'installe réellement le 09/07 avec une pluie de 98.5 mm ; le cumul des précipitations atteint 400 mm à la fin du mois. Les sols ferrugineux de bas de toposéquence, de texture sableuse, possèdent une bonne réserve utile (150 mm sur 1 mètre) retenue sous de faibles succions, dans ces conditions le profil doit s'humecter rapidement. Or les mesures neutroniques montrent que le remplissage s'effectue par paliers, la cote 200 cm étant franchie fin septembre. Les pertes de surface ont eu une influence considérable sur la recharge hydrique.

La figure n°4 représente l'évolution du stock hydrique d'une parcelle de mil SOUNA, semée le 10/07. La profondeur de calcul correspond à la cote maximum de descente du front d'humectation (250 cm), afin de pouvoir négliger le terme de drainage. On constate que le modèle classique envisage un remplissage très rapide de la réserve du sol, infirmé par les mesures de terrain. Les pertes, fictives, en profondeur s'élevaient à 150 mm.

L'observation des états de surface de la parcelle d'étude (ROUSSEAU, 1988) permet de classer celle-ci dans le type C1 du catalogue ORSTOM. L'équation de ruissellement correspondante est introduite dans le modèle, sur tout le cycle cultural. L'adéquation aux données expérimentales est nettement améliorée. Les pertes par ruissellement sont évaluées à 156 mm. Quelques décalages subsistent toutefois, difficilement interprétables actuellement.

Cet exemple met en évidence l'importance d'une prise en compte du ruissellement, dans la zone sahélienne, pour établir un bilan hydrique réaliste. Une interrogation demeure concernant la généralisation de l'approche proposée; le second exemple étudié confirme ces premiers résultats et permet d'envisager un affinement du modèle.

Figure 4



2.3 Amélioration de la fonction de ruissellement sur parcelle cultivée

Le programme Economie de l'eau - DRS de l'ISRA - KAOLACK étudié, depuis 1984, l'impact du ruissellement sur l'érosion et sur le bilan hydrique des cultures à différentes échelles RUELLE (1989) démontre qu'une partie conséquente des flux de surface d'une toposéquence naît au sein même des parcelles cultivées, tout au long du cycle cultural. Le rôle déterminant des états de surface dans les phénomènes de blocages des flux verticaux est mis en évidence par ALBERGEL et al (1989).

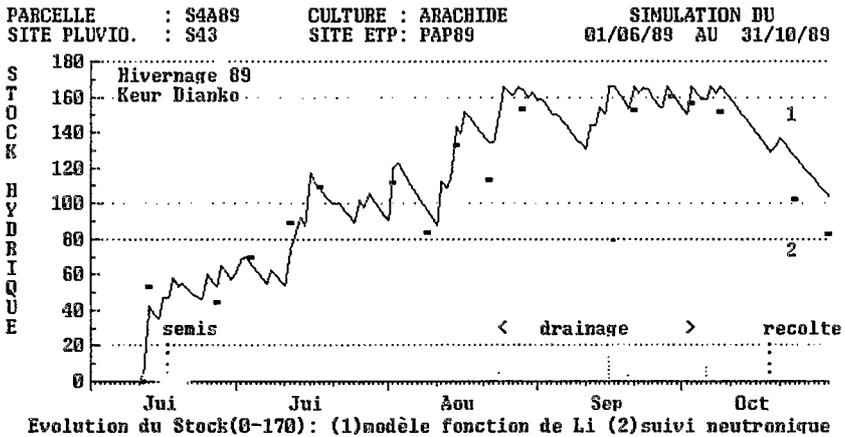
Le site de KEUR DIANKO, au sud du bassin arachidier sénégalais, a enregistré une pluviométrie moyenne de 750 mm en 1989. Sur trois parcelles formant un micro-bassin versant de 2.4 ha, le ruissellement est enregistré, à l'échelle du m², en divers points représentatifs des états de surface rencontrés. Une série de simulations de pluie permet d'associer chaque zone à une fonction de ruissellement C1 ou C2.

L'exemple proposé concerne le site S43, représentatif d'une zone Intermédiaire C1/C2, à sol ferrugineux de texture sableuse à sablo-argileuse en profondeur. La réserve utile avoisine 10 mm/10 cm, la conductivité hydraulique en profondeur a été appréciée par drainage interne à la côte 170 cm (PEREZ, 1990). En 1989, on enregistre 772 mm de pluie et 82 mm de ruissellement, lors d'un hivernage particulièrement favorable. L'arachide est semée le 16/06 et récoltée le 18/10.

La figure n°5 illustre l'évolution du stock hydrique à la côte 170 cm. Cette simulation permet de vérifier le calage du modèle:

- * Quatre années de suivi neutronique permettent de connaître la RU: 170 mm
- * Le drainage à la côte d'enracinement maximum (170 mm) est estimé de deux manières, par différences de stocks mesurés et par application de la loi de DARCY: $D = 15$ à 20 mm
- * La lame infiltrée $Li = Lp - Lr$ est introduite comme pluviométrie, sans fonction de ruissellement

Figure 5



Le calage est correct sur la majeure partie du cycle, compte tenu de la précision de la méthode neutronique et des limites inhérentes à l'utilisation des coefficients culturaux. Le tableau n°2 regroupe les principales caractéristiques de la simulation, le drainage est surestimé (34 mm) en fin de cycle.

Dans un second temps la pluviométrie réelle est réintroduite dans le modèle accompagnée d'une fonction de ruissellement de type C1. Les variables de sortie sur le cycle restent acceptables, mais le début de la phase de remplissage sous-estime les pertes de surface (tab. n°2). L'utilisation d'une autre équation n'améliore pas la simulation.

Il est aisé d'imaginer que l'évolution du ruissellement sous couvert végétal en croissance et soumis aux interventions culturales ne puisse s'exprimer de manière univoque. Dans un souci d'affinement de la méthode proposée, sans perdre de vue l'aspect fonctionnel, une approche séquentielle a été tentée. Trois périodes sont retenues:

- Du 12/06 au 14/06 : sol pulvérulent et piétiné, bonne infiltrabilité, équation C1
- Du 15/06 au 10/07 : surface obturée et faible développement végétatif, équation C2
- Du 11/07 au 31/10 : développement végétatif suffisant, équation C1

La figure n°6 visualise la simulation réalisée selon la séquence décrite, le tracé d'ensemble est correct. Le drainage est sous-estimé par rapport à la première simulation mais l'évolution de la lame ruisselée est mieux respectée (tab. n°2).

Figure 6

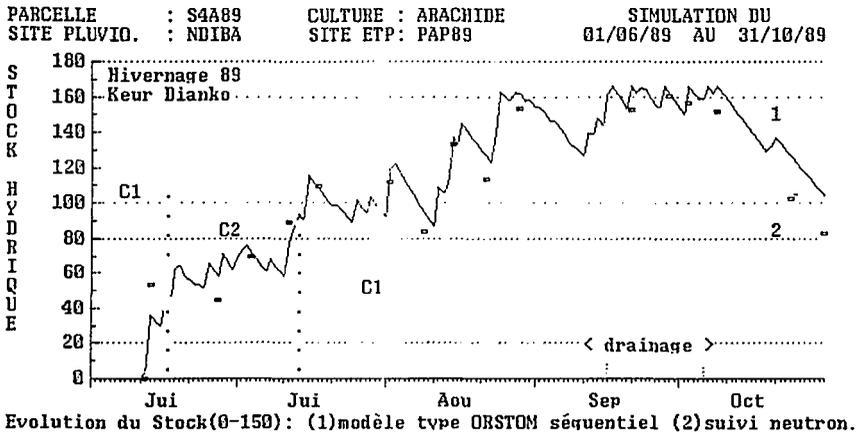


Tableau n°2: simulations du bilan hydrique sur le site S43

Type	Lp mm	Lr _{juin} mm	Lr _{juil} mm	Lr _{total} mm	Drainage mm	ETR mm	Stock final mm
Lr _{mesuré}	770	50	18	84	32	553	101
Lr _{univoque}	770	25	13	73	36	560	101
Lr _{séquentiel}	770	48	16	99	17	552	102

L'erreur engendrée par le modèle univoque est faible, dans les conditions de l'hivernage 1989, mais elle affecte le terme ETR essentiel pour l'agronome. Cet écart est d'autant moins décelable sans un suivi régulier de terrain, qu'il a lieu lors de la phase de remplissage.

Cet exemple constitue une première approche, certes vérifiée sur d'autres sites, mais qui demande une réflexion plus poussée concernant la définition des périodes, l'établissement d'un référentiel spécifique sous couvert végétal, les limites de fonctionnalité d'une telle approche.

3. Discussion - Conclusion

3.1 Représentativité du modèle

Dans son étude stochastique d'un modèle déterministe-fonctionnel, proche de BIPCODE, MARCHAND (1988) démontre la faible variabilité des données de sortie (ETR, Dr) lorsque les valeurs moyennes des variables d'entrée sont correctement évaluées (RU, Kc, Cj). Néanmoins, la sensibilité du modèle dépend fortement du spectre pluviométrique utilisé; d'autre part, une faible variabilité globale sur le cycle cache parfois de fortes variations sur des périodes plus courtes (analyse décennale). L'auteur déplore l'association abusive des termes de drainage et de ruissellement, source d'incertitude supplémentaire.

Si la détermination d'une valeur représentative (... à l'échelle d'étude) de la RU a fait l'objet de nombreux travaux, il apparaît que toute modification du spectre de pluie va influencer directement sur la sensibilité des coefficients culturaux et sur la précision du modèle. Cela d'autant plus que les pertes de surface seront négligées: l'algorithme est alors faussé puisque l'eau excédentaire est affectée au calcul de L'ETR avant de disparaître par drainage.

Deux possibilités s'offrent à nous afin d'améliorer le modèle:

- * Simuler les pertes de surface, option choisie pour le logiciel BIPODE (VAKSMANN, 1990)
- * Simuler les pertes par drainage, option choisie pour le logiciel PROBE (CHOPART, SIBAND, 1988)

Chaque voie n'est pas exclusive, il faut pourtant remarquer que la modélisation des flux profonds se heurte à deux problèmes. Le premier réside dans la détermination de la loi $K(\theta)$ qui demande une expérimentation lourde dont les résultats ont une incertitude non négligeable, fonction du type de sol (POSS, SARAGONI, 1986). Le second, est lié à la forte variabilité spatiale de $K(\theta)$, paramètre de flux (VAUCLIN, 1983).

Dans le souci d'améliorer le modèle original, l'équipe CHOPART, SIBAND qui travaille en COTE D'IVOIRE (milieu humide) s'est attachée à une caractérisation plus fine du drainage profond, tandis que les équipes sahélo-sahariennes se sont dirigées vers les problèmes de ruissellement. Cette remarque rejoint les résultats de CASENAVE (1985) qui montre que le ruissellement est d'autant plus conditionné par la saturation du profil de sol que la région est humide et qu'il est exclusivement lié à la nature des états de surface dans le sahel prédesertique.

Enfin, l'établissement des équations $L_r = f(P, I_k)$, selon le protocole actuel, se base sur un spectre de pluies et d'intensités représentatif de la zone étudiée.

3.2 Fonctionnalité de la méthode

Le catalogue des états de surface (CASENAVE, VALENTIN, 1989) est un outil précieux qui permet de caler le modèle dans sa phase initiale, en respectant les clés de détermination proposées. Par contre, dès la mise en culture et le démarrage végétatif une nette discontinuité apparaît dans les phénomènes observés (BOIFFIN et al, 1988). On peut citer:

- * La diminution du rôle des pellicules de surface au profit du couvert végétal
- * La contribution plus importante du stock hydrique au blocage des flux verticaux, au fur et à mesure de son remplissage.

Ce constat nous a conduit à proposer une étude expérimentale du type de celle du catalogue des états de surface mais plus spécifique au milieu cultivé. Elle devrait comprendre une série de simulations de pluies sur des états de surface différents pour les grands types de cultures pluviales du sahel (mil, sorgho, arachide, coton) et aux différents stades du calendrier cultural. L'état de surface étant nettement lié au climat et au type de culture, le nombre de cas ne devrait pas être trop grand. Cette étude devrait aboutir à trois équations de ruissellement en fonction de l'état de croissance de la végétations pour les principales cultures du SAHEL.

Ce référentiel de "ruissellement" pourrait alors s'intégrer au modèle BIPODE, améliorer les résultats de simulation tout en conservant la fonctionnalité du modèle.

Une autre amélioration du modèle consisterait à introduire deux autres indices récurrents pour rendre compte d'une part de l'augmentation de la LAI (Leaf area index) et d'autre part du rôle croissant des phénomènes de saturation du profil en fin de saison des pluies pour les régions les plus humides du sahel.

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL J. (1987) Génèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m2 au km2 Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution *Thèse de Dr de l'université P.&M. CURIE PARIS 6 & Etudes & thèses de l'ORSTOM, Ed. de l'ORSTOM 341 p*

ALBERGEL J., RIBSTEIN P., VALENTIN C. (1985) Quels facteurs explicatifs de l'infiltration? Analyse sur 48 parcelles au burkina Faso *Journée hydrologique de Montpellier, Col & sém. ORSTOM pp 26-48*

ALBERGEL J., BERNARD A., RUELLE P., TOUMA J. (1989) Hydrodynamique des sols - Bassins versants expérimentaux de THYSSE KAYMOR. *Rapport de campagne de mesures fev.-avr.1988 ORSTOM DAKAR 29 p*

ASSELINE, J., VALENTIN C., (1978) Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, ser. hydro. Vol XV n° 4 pp 321-349*

BOIFFIN, J. PAPY, F. EMBERCK M. (1988) Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion *Agronomie, 8(8)*, pp 663-673

CASNAVE A. (1982) Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes d'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, ser. Hydrol Vol XIX, 4, pp. 207-227*

CASNAVE A. (1985) Programme d'analyse du ruissellement, de l'infiltration et de l'érosion à l'aide des techniques de simulation de pluie *Journée hydrologique de Montpellier, Col & sém. ORSTOM pp 10-17*

CASNAVE A., VALENTIN C. (1989) Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration *Ed. de l'ORSTOM Didactiques 229 p*

CHOPPARD J.L., SIBAND P. (1988) PROBE : Programme de bilan de l'eau *Mémoires et travaux de l'IRAT n° 17 58*

EAGLEMAN J.R. (1971) An experimentally derived model for actual evapotranspiration *Agric. Meteorol. , 8, 385-394 & Water Resources Research, , 21, 183-198*

FRANQUIN P., FOREST F. (1977) Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle du bilan hydrique. *L'agronomie tropicale*, 32, pp 7-11

MARCHAND D. (1988) Modélisation fonctionnelle du bilan hydrique sur sol cultivé : approche déterministe ou stochastique ? Thèse de Dr de l'Université Joseph Fourier Grenoble I 246p

PEREZ P., SARR P.S. (1990) Programme gestion des ressources naturelles, Rapport d'activité "Economie de l'eau - DRS" Année 1989 multigr KAOLAK

POSS R. SARAGON, (1986) Choix d'une méthode d'approche du bilan hydrique en plein champ. 11^{ème} journées GFHN ANGERS Com n° 18 ORSTOM, IRAT

ROUSSEAU V. (1988) Suivi hydrique à l'échelle d'une toposéquence et ajustement d'un modèle de simulation du bilan hydrique. *Diplôme d'agronomie tropicale ENSAM/CNEARC* 40 p + annexes

RUELLE P., SENE M., PEREZ P. (1989) Etude expérimentale et modélisation du bilan hydrique d'un bassin versant en zone soudano-sahélienne. in "Influence à l'échelle régionale des couverts pédologiques et végétaux sur les bilans hydriques et minéraux des sols" ATP-PIREN 86-89 rapport final IMG/UM 101 pp 31-55

VAKSMANN (1990) Le modèle BIPODE Logiciel IRAT BAMAKO

VAUCLIN M. (1983) Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. *Coll. Soc. Hydrotechnique Fr.*, INRA, Gr. travail "Dispersion en milieux poreux", Avignon, 24-25 juin 1982, les coll. de l'INRA n°15, INRA PARIS pp 9-49

REYNIERS F.N., FOREST F. (1990) La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. *Sciences et changements planétaire, SECHERESSE*, n° 1 Vol 1 pp 36-42

**VALORISATION AGRICOLE DES EAUX DE RUISSELLEMENT
ET LUTTE CONTRE L'EROSION SUR CHAMPS CULTIVES EN MIL
EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE - BURKINA-FASO
PROVINCE DU YATENGA - REGION DE BIDI**

Par

J.M. LAMACHERE

G. SERPANTIE

**VALORISATION AGRICOLE DES EAUX DE RUISSELLEMENT
ET LUTTE CONTRE L'EROSION SUR CHAMPS CULTIVES EN MIL
EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE
BURKINA FASO - PROVINCE DU YATENGA - REGION DE BIDI**

**LAMACHERE J.M., ORSTOM
SERPANTIE G., ORSTOM
Institut Français de Recherche pour le
Développement en Coopération - O R S T O M -
O1 B.P. 182 - Ouagadougou - Burkina Faso**

RESUME

Dans la province du Yatenga, au nord du Burkina Faso, les champs cultivés sont souvent surmontés de surfaces peu perméables. Le ruissellement des eaux de pluie sur ces impluviums constitue à la fois une ressource en eaux superficielles pour les cultures et une menace pour les sols sableux fins très vulnérables à l'érosion hydrique. En l'absence de ces apports, une partie non négligeable de la pluie est perdue par ruissellement, ce qui peut accroître l'incidence d'un déficit pluviométrique sur les rendements.

Les nouvelles pratiques comme le stockage prolongé et l'irrigation de complément, l'épandage de crues torrentielles, de même que l'intensification de l'entretien de l'état de surface sont des solutions encore inadaptées à l'état des systèmes de production paysans. Encadrement technique et agriculteurs s'intéressent par contre à l'aménagement des conditions du ruissellement : labours avant semis, systèmes de diguettes isohypses, systèmes à impluviums.

Afin d'analyser les effets d'obstacles filtrants cloisonnés sur champs labourés et non labourés, cultivés en Mil et surmontés d'impluviums, trois parcelles expérimentales ont été installées près du village de Bidi au nord du Yatenga. Les observations des pluies, des ruissellements, des transports solides, de l'humidité des sols et des productions agricoles se sont poursuivies sur ces parcelles pendant six ans (1985-1990).

L'analyse de l'élaboration des rendements met en évidence l'impact généralement bénéfique des cordons pierreux et des labours appliqués à un système de culture dit "des champs de brousse" (sol ferrugineux sableux fin, faible fertilisation, deux sarclages en buttes). En année "pluviométriquement médiocre" (1987), on a constaté un accroissement du rendement en grain sec sur la parcelle aménagée par rapport au témoin de l'ordre de 20 % en haut de parcelle, de 40 % en bas de parcelle. Cet accroissement est attribué à une forte amélioration de l'alimentation hydrique sur les aires d'inondation. Pour une année à pluviométrie bien répartie (1986), les labours ont permis d'accroître de 55 % la production de matière sèche et de doubler la production en grain. Il faut prendre en compte ici l'impact du labour sur l'enherbement, la minéralisation et l'enracinement, donc l'alimentation minérale principalement.

L'analyse hydrologique met en relief l'effet prépondérant de l'état de surface des sols sur les volumes infiltrés et les volumes ruisselés. Sous impluvium, l'effet des cordons pierreux est surtout significatif à l'occasion d'averses importantes mais peu intenses, sur sol encore rugueux. Ils accroissent en moyenne de 15 % les volumes infiltrés, provoquent un écrêtage important en abaissant de 40 % le débit de pointe et en augmentant le temps de base des crues. Pour une hauteur de pluie donnée, l'impact de l'aménagement sur le ruissellement dépend étroitement de l'état de la rugosité du sol, de l'humidité des horizons de surface ainsi que de l'intensité de l'averse. Le cloisonnement de l'aire d'inondation et la suppression de l'impluvium régularisent l'écoulement et accroissent

l'impact de l'aménagement sur l'infiltration. Les cordons pierreux cloisonnés apparaissent très efficaces pour lutter contre l'érosion. Ils divisent par 2 les quantités de terre exportées hors des parcelles cultivées.

L'impluvium améliore considérablement le bilan hydrique en augmentant à proximité de celui-ci la valeur de la lame infiltrée lors des averses peu abondantes. L'aménagement réduit l'érosion qu'il provoquerait lors de ruissellements intenses, mais sans accroître exagérément l'infiltration puisque son efficacité baisse à ces occasions.

Les labours améliorent généralement les conditions de l'installation du peuplement : enherbement, disponibilités minérales, profondeur d'humectation, aération. Cette efficacité doit être mise en balance avec un certain nombre de risques : érosion par charriage en cas de tornades, appauvrissement rapide du sol, dégradation de la structure en cas de labours répétés. Les conditions du labour prennent ici toutes leur importance.

INTRODUCTION

Au nord du 13^{ème} parallèle, dans la province du Yatenga (figure n° 1), les années 1982, 1983 et 1984 sont les plus sèches parmi les observations effectuées depuis 1920. A Ouahigouya, les moyennes pluviométriques interannuelles, calculées sur des périodes de 5 années consécutives, sont supérieures à 700 millimètres jusqu'en 1966. La moyenne pluviométrique interannuelle est égale à 568 millimètres sur la période 1972-1976, égale à 424 millimètres sur la période 1982-1986.

Sans préjuger de l'évolution future des précipitations, on observe donc que les paysans subissent, depuis une vingtaine d'années, une longue période sèche sans équivalent dans la chronique des précipitations enregistrées. Pour faire face à cette sécheresse, les paysans et les organisations qui continuent à miser sur l'agriculture pluviale, essentiellement sur la culture du Mil, *Pennisetum typhoides*, ont fait appel, dans certaines régions, à des variétés plus nordiques à cycle court. Dans d'autres régions, comme le centre et le nord du Yatenga, les paysans préfèrent conserver des variétés souples, qui ont fait leurs preuves, et modifier la gestion habituelle de l'eau par un aménagement des conditions du ruissellement, plus compatible avec leurs moyens, leurs systèmes de culture extensifs et l'organisation générale des systèmes de production soudano-sahéliens que d'autres solutions à caractère intensif (irrigations d'appoint, multiplication des sarclages, billonnage cloisonné...).

Par un essai interdisciplinaire, réalisé de 1985 à 1988 dans la région de Bidi, au nord du Yatenga, nous avons voulu préciser comment les trois pratiques, travail du sol avant semis, utilisation des eaux de ruissellement issues d'un impluvium et création d'obstacles isohypses filtrants modifiaient le milieu cultivé et la dynamique de l'eau et quelles étaient les conséquences de telles pratiques sur la conduite d'un champ de Mil et l'élaboration des rendements.

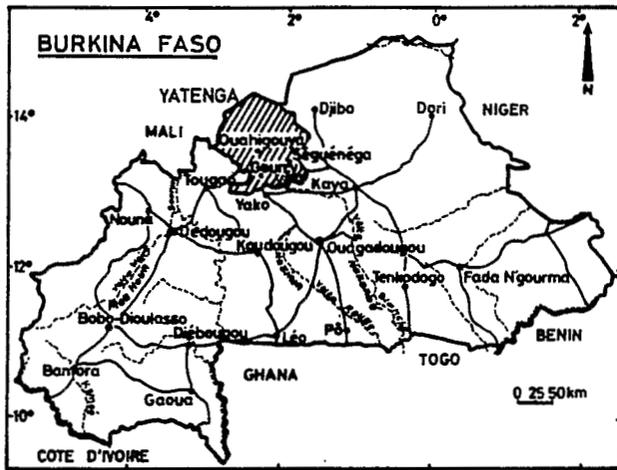


Figure 1. Carte du Burkina Faso.

1. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental des parcelles agronomiques de BIDI est installé sur le versant nord-est d'une petite butte. Trois parcelles contiguës, orientées dans le sens de la plus grande pente (2,5 %), longues de 150 mètres, larges de 20 à 32 mètres, ont été implantées de telle sorte qu'elles recouvrent dans leur tiers supérieur un impluvium inculte où la cuirasse ferrugineuse est proche de la surface du sol. Les deux tiers inférieurs des parcelles couvrent un sol constitué de sables éoliens dont l'épaisseur croît de 0,25 mètre près de l'impluvium à 2,2 mètres en une quarantaine de mètres. Le sol filtrant, profond, est exploité par une monoculture de Mil dont l'itinéraire technique suit le modèle de gestion paysanne "des champs de brousse" avec un semis direct en poquets et semences locales, des

resemis éventuels, un premier sarclage tardif au début du mois d'août avec légère fertilisation minérale (10 unités de N, P, et K) et un deuxième sarclage avant la floraison.

La parcelle la plus à gauche, quand on regarde vers l'amont du versant, est utilisée comme parcelle témoin. Elle est cultivée de manière traditionnelle. La parcelle médiane a subi un aménagement en cordons pierreux isohypses constitués d'une double rangée de blocs de cuirasse ferrugineuse (40 kg par mètre linéaire), espacés d'environ 20 mètres. Aucun cordon pierreux n'a été posé sur l'impluvium. La troisième parcelle, située à droite quand on regarde vers l'amont du versant, est identique à la parcelle médiane mais elle est labourée selon les courbes de niveau avec une charrue bovine attelée vers la fin du mois de juin.

Chaque parcelle est limitée par des tôles galvanisées, fichées en terre sur une profondeur de 20 centimètres et dépassant de la surface du sol d'une vingtaine de centimètres. Les limites des parcelles ont été implantées avec beaucoup de soin, de telle sorte qu'elles suivent rigoureusement les lignes de plus grande pente, évitant ainsi le cheminement préférentiel des eaux le long des bordures artificielles. En aval de chaque parcelle, une surface bétonnée, limitée par un muret haut d'une trentaine de centimètres, collecte les eaux de ruissellement jusqu'au dispositif de mesure des niveaux d'eau et des débits. Ce dispositif comprend de l'amont vers l'aval : un limnigraphe avec échelles limnimétriques, un canal jaugeur de section rectangulaire pour la mesure des forts débits (20 à 200 l/s), une fosse à sédiments équipée d'échelles limnimétriques et d'un limnigraphe, un déversoir triangulaire à mince paroi pour la mesure des faibles débits (0 à 30 l/s). Après l'étalonnage des canaux jaugeurs et des déversoirs, le double dispositif d'enregistrement des niveaux d'eau permet d'obtenir une précision de l'ordre de 20 % dans l'estimation des débits aux exutoires des parcelles. Pour les faibles débits, c'est la précision de la mesure des hauteurs d'eau qui détermine l'incertitude sur les débits. Pour les forts débits, c'est l'imprécision dans l'étalonnage du canal qui se révèle déterminante.

Le dispositif pluviométrique comprend 4 pluviomètres et un pluviographe, répartis à raison de 2 pluviomètres en amont et 2 pluviomètres en aval des parcelles. Le pluviographe a été installé successivement en amont puis en aval, près de la parcelle labourée.

Pour les mesures d'humidité du sol, 20 tubes de sonde à neutrons ont été implantés sur les parcelles (conf. fig. n° 2), de manière à suivre l'évolution des profils hydriques de l'amont vers l'aval, à différentes distances des cordons pierreux.

Pour les mesures de peuplement végétal, les parcelles ont été subdivisées en trois zones : seules la bande médiane large de 40 mètres appelée "haut de parcelle" et la bande inférieure large de 40 mètres appelée "bas de parcelle" sont prises en compte dans ce document (sols semblables). Sur chaque bande, la croissance et le développement du Mil sont suivis sur des stations échantillonnées de façon à représenter correctement les variations longitudinales du couvert végétal. A la récolte, les composantes du rendement sont mesurées sur des stations de 12 mètres carrés, répétées 4 à 12 fois sur chaque zone selon l'hétérogénéité du peuplement.

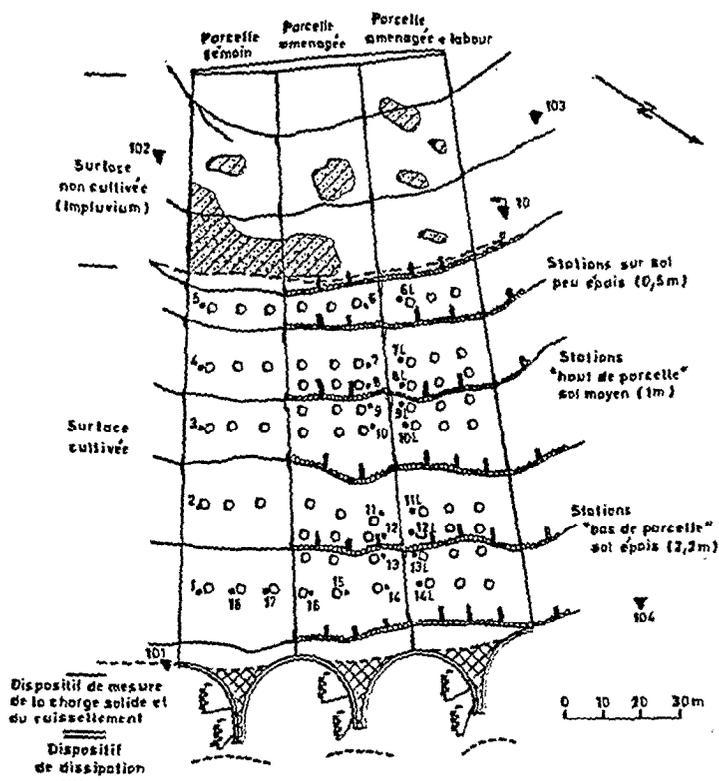
2. LES OBSERVATIONS PLUVIOMETRIQUES

La comparaison des hauteurs pluviométriques observées en amont et en aval des parcelles permet de conclure à des différences faibles, inférieures à 5 %, non systématiquement excédentaires d'un côté ou d'un autre des parcelles.

Tableau n° 1 : Pluviométrie décadaire sur les parcelles de BIDI, période 85-88. Totaux 85 : 320 mm ; 86 : 425 mm ; 87 : 410 mm ; 88 : 463 mm. ETP Pezman : environ 50 mm par décade.

année	juin			juillet			août			septembre		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1985	4.6	6.0	17.6	37.5	51.7	20.7	30.5	80.3	44.6	10.2	6.4	9.7
1986	3.3	33.8	18.2	42.1	74.9	40.3	38.0	15.0	64.5	43.8	19.4	31.2
1987	5.9	24.6	38.9	19.5	9.4	90.2	4.9	34.6	38.4	24.9	75.4	43.0
1988	0.1	22.4	6.2	24.3	36.4	44.9	86.6	125.2	84.5	16.6	11.6	4.2

FIGURE n°2 : PLAN D'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE SAMNIWEOGO.



- 3a Point de suivi du Profil hydrique et phénologie
- Station de récolte
- ▨ Microbuttes sableuses
- Tôles (0,2m et 0,4m)
- Muret (0,2m)
- ▩ Exutoire en béton

- (Pente générale 2,5%)
- Cordons pierreux (0,25m)
 - Courbe de niveau (0,5m)
 - 102 ▽ Pluviomètre
 - 103 ▽ Pluviographe
 - 104 ▽ Limnigraphe et échelles limnimétriques

La comparaison entre les hauteurs pluviométriques observées au pluviomètre dont la surface réceptrice est placée 1 mètre au-dessus du sol et les hauteurs pluviométriques observées au pluviomètre dont la surface réceptrice est placée au niveau du sol montre, dans certaines conditions d'exposition au vent, que le pluviomètre au sol, protégé des rejaillissements par un dispositif adéquat, reçoit des quantités d'eau de pluie systématiquement supérieures à celles reçues par le pluviomètre placé 1 mètre au-dessus du sol. Les écarts sont suffisamment importants pour qu'il en soit tenu compte dans les calculs du bilan hydrique sur les parcelles.

L'analyse de la répartition temporelle des précipitations montre des situations très contrastées. Les années 1985 et 1988 présentent deux périodes sèches de plus de 10 jours. La première période sèche se situe pendant la phase de croissance du Mil pour l'année 1985, au début du cycle végétatif pour l'année 1988. La seconde période sèche, très longue et très intense, se situe dans les deux cas pendant la phase fructifère, entre le 30 août et le 1er octobre. Cette seconde phase sèche a eu des conséquences néfastes sur la maturation des grains, d'autant plus néfastes que les périodes antérieures avaient été en 85 favorables au développement du Mil. En 88 par contre, le mil avait subi une période d'excès d'eau au mois d'août très dommageable à la croissance et au tallage.

L'année 1986 présente une bonne répartition des chutes de pluie pendant tout le cycle végétatif du Mil avec deux petites périodes sèches courtes et peu intenses.

L'année 1987 se caractérise par une longue période sèche au début du cycle végétatif, un déficit pluviométrique pendant la phase de croissance et par une pluviosité satisfaisante à la fin du cycle végétatif.

3. LE RUISSELLEMENT SUR LES PARCELLES AGRONOMIQUES

Le ruissellement annuel

L'analyse des ruissellements sur les parcelles agronomiques de Samniweogo met en évidence un fonctionnement extrêmement complexe des parcelles. A l'échelle annuelle, les résultats sont présentés sur le tableau n° 2.

Tableau n° 2 : Pluies et ruissellements annuels sur les parcelles agronomiques de Samniweogo

année	1986			1987			1988		
période	01/06 au 15/10								
hauteurs d'eau en millimètres	Pu	LE	LR	Pu	LE	LR	Pu	LE	LR
parcelle témoin	530	96	127	483	93	53	512	7	94
parcelle aménagée	528	106	124	484	107	42	510	11	51
parcelle amén. et labour.	-	-	-	486	100	17	509	15	67

Pu : pluie au sol

LE : lame d'eau entrée sur les parcelles par les impluviums, estimée à partir d'équations de ruissellement empiriques

LR : lame ruisselée mesurée aux exutoires

Sous impluvium (années 1986 et 1987), les deux parcelles cultivées de manière traditionnelle réagissent sans grande différence. En l'absence d'impluvium et avec un cloisonnement des aires de rétention (année 1988), le ruissellement observé sur la parcelle aménagée est presque deux fois plus faible que le ruissellement observé sur la parcelle témoin. L'impluvium et/ou les cloisons jouent donc un rôle très important dans le fonctionnement hydrique de la parcelle aménagée.

Les deux parcelles aménagées (avec ou sans labour) ont un fonctionnement hydrique identique en 1988 mais nettement différent pour l'année 1987, année pour laquelle le ruissellement annuel est 2,5 fois plus faible sur la parcelle labourée. Cette différence s'explique par l'occurrence de fortes pluies en juillet 1987 après les labours.

Les relations entre la pluie et le ruissellement

Afin de mieux analyser le comportement des parcelles au cours de la saison des pluies en fonction du calendrier cultural, nous avons calculé pour chaque averse un indice pluviométrique (ΣPa) égal à la somme des pluies antérieures tombées depuis le précédent sarclage. Les correspondances entre lames ruisselées et pluies au sol sont reportées, crue par crue, sur la figure n° 3 pour la parcelle aménagée.

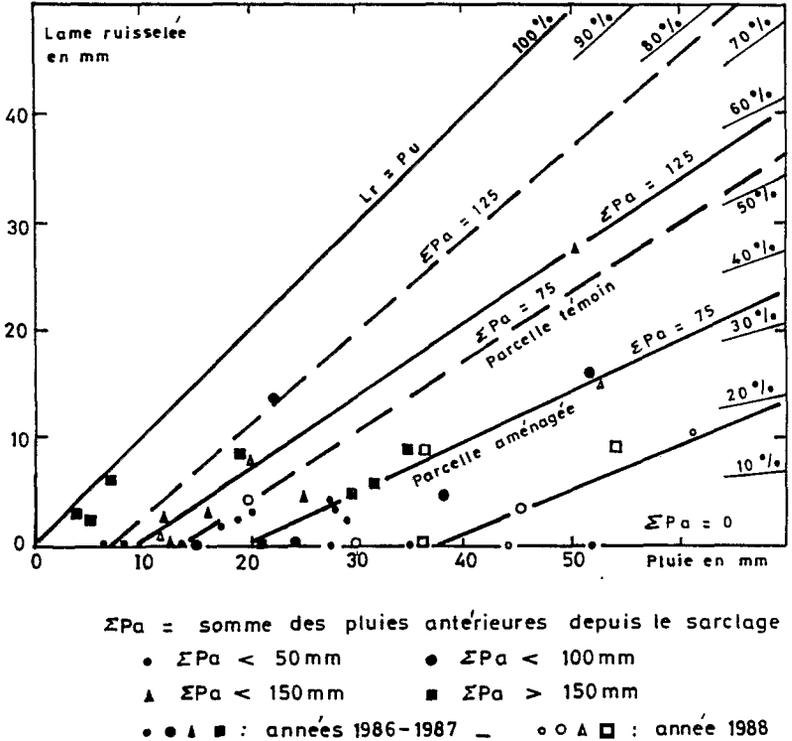


Figure n° 3 : Lames ruisselées sur la parcelle aménagée en fonction de la pluie au sol.

Le figuré choisi pour représenter chaque classe des pluies antérieures permet de mettre en évidence une évolution de l'aptitude au ruissellement des sols sableux fins sarclés dans le sens d'un accroissement rapide avec la quantité de pluie tombée sur le sol depuis le dernier sarclage. Afin de préciser cette évolution nous avons réalisé des expériences de simulation de pluie sur le même type de sol, à proximité des parcelles agronomiques de Samniweogo, aux différents stades de son évolution après sarclage. Les résultats de cette expérimentation sont présentés au tableau n° 3 où ils sont confrontés aux renseignements collectés sur les parcelles.

Les trois paramètres retenus pour représenter l'évolution d'un sol sarclé en fonction de la pluie antérieure sont :

- . l'intensité de pluie limite du ruissellement, I_1 , exprimée en mm/h,
 - . la capacité de stockage superficiel du sol, Lr_0 , exprimée en mm.
 - . le différentiel de ruissellement, $a = \frac{d Lr}{d P} = R / (I - I_1)$
- avec R intensité du ruissellement, I intensité de la pluie,

La lame ruisselée peut alors être formulée par l'expression suivante en fonction de la pluie P et de sa durée (t - t₀) :

$$\text{Si } I > I_1 \quad L_r = a P - a I_1 (t - t_0) - L_{r_0}$$

Tableau n° 3 : Evolution de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin sarclé.

Somme pluies ant. en mm	simulation de pluie 1988			parcelle témoin 1986-1987			parcelle aménagée 1986-1987			parcelle aménagée 1988		
Pa	a	I ₁	L _{r0}	a	I ₁	L _{r0}	a	I ₁	L _{r0}	a	I ₁	L _{r0}
0	0.54	37	16	0.67	40	25	0.40	40	35	0.40	40	37
75	0.64	18	13	0.80	20	15	0.48	20	20	0.48	20	37
125	0.70	10	8	0.92	10	7	0.68	10	10	0.54	10	25
200	0.84	6	4	-	-	-	0.90	-	2	-	-	-

Ainsi, pour une hauteur pluviométrique de 40 millimètres tombée en 1 heure la lame ruisselée varie t-elle de 1,1 mm pour Pa égale à 75 mm, à 13 mm pour Pa égale à 125 mm et 22,6 mm pour Pa égale à 200 mm. La progression de la capacité des sols sarclés au ruissellement est donc extrêmement rapide. Au delà d'une somme de pluies antérieures tombées depuis le dernier sarclage égale à 100 millimètres, l'effet du sarclage sur l'infiltration des eaux de pluie s'atténue de manière considérable.

Le rôle de l'impluvium apparaît également très nettement sur le tableau n° 3. L'impluvium renforce de manière très importante la capacité des parcelles au ruissellement dès que la somme des pluies antérieures dépasse 100 millimètres.

L'effet des cordons pierreux

Pour illustrer l'effet des cordons pierreux sur le ruissellement, nous avons dessiné sur la figure n° 4 les hydrogramme des crues observées le 13 juillet 1986 aux exutoires de la parcelle témoin et de la parcelle aménagée sans labours. L'averse du 13 juillet 1986 est tombée sur un sol non sarclé ayant déjà reçu un total pluviométrique de 115 mm depuis le début de la saison des pluies.

L'intensité pluviométrique maximale sur une durée de 15 minutes était de 82 mm/h. Dans ces conditions, on observe un ruissellement nettement plus faible sur la parcelle aménagée : un débit maximum de 36 % plus faible, un volume ruisselé de 13 % plus faible et une quantité de matériaux exportés inférieure de 28 % à la quantité de matériaux exportés hors de la parcelle témoin.

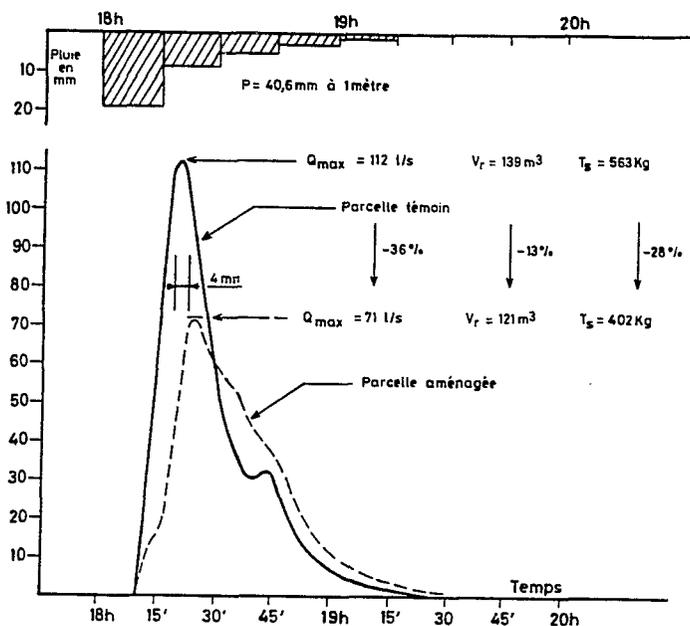


Figure n° 4 : Crues du 13 juillet 1986 sur les parcelles agronomiques de Samniweogo

Les coefficients de ruissellement des parcelles cultivées (rapport du volume ruisselé à l'exutoire sur la somme de l'eau précipitée et du ruissellement entrant) ont été calculés sur l'ensemble des événements sur trois années de mesure (150 événements dont 45 ont donné lieu à un ruissellement de plus de 1 mm). L'analyse des données par analyse de la covariance 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 ($P_a > 100\text{mm}$) et humide (indice de Kohler > 10) annule ou rend négatif l'effet de l'aménagement, en particulier si la pluie est intense. Un sol rugueux et sec, sous une pluie peu violente, optimise au contraire l'aptitude de l'aménagement à infiltrer un surplus d'eau (figures 5 et 6 : les pluies sont classées "standard" si elles suivent la tendance de la relation entre intensité et hauteur, au dessus elles sont considérées comme intenses, au dessous comme douces). Le gain global est donc faible puisque l'aménagement est incapable de réduire significativement les ruissellements lors des événements à forte intensité de ruissellement. C'est cette interaction qui explique principalement la variation interannuelle des gains d'infiltration.

En 1988, les impluviums ont été supprimés et l'aire d'inondation, en amont des cordons, systématiquement cloisonnée. On observe alors que l'effet de l'aménagement sur le coefficient de ruissellement est plus important et moins dépendant de l'état de surface et de l'intensité.

Les observations de PLANCHON (1990) par marquage des ruissellements à la fluoresceine permettent d'interpréter ces résultats.

Il observe que le ruissellement (engendré par l'imperméabilité de l'état de surface ou par l'excès d'eau par rapport à la vitesse limite d'infiltration) est tout d'abord piégé par les creux du microrelief.

Lorsque celui-ci est lisse, le volume retenu est faible :

- sur une parcelle sans cordons, le ruissellement est assez rapidement collecté et canalisé en un unique exutoire, en particulier s'il existe un microrelief résiduel linéaire, comme c'est souvent le cas. Son évacuation est rapide.

- sur une parcelle munie de cordons pierreux, le ruissellement est temporairement stocké en amont des cordons. Suite au colmatage progressif, on observe dès la deuxième année d'installation que la vidange d'effectue

Figure 5 Comparaison des ruissellements parcelle témoin/parcelle aménagée . Pluies standards.

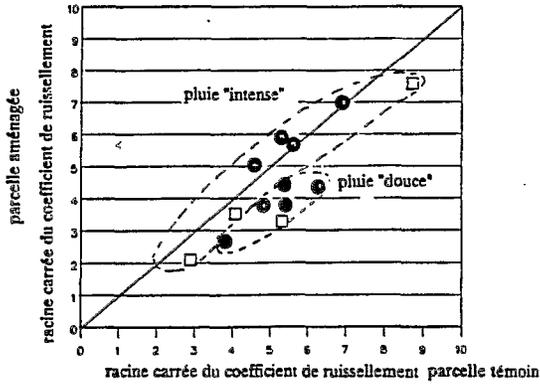
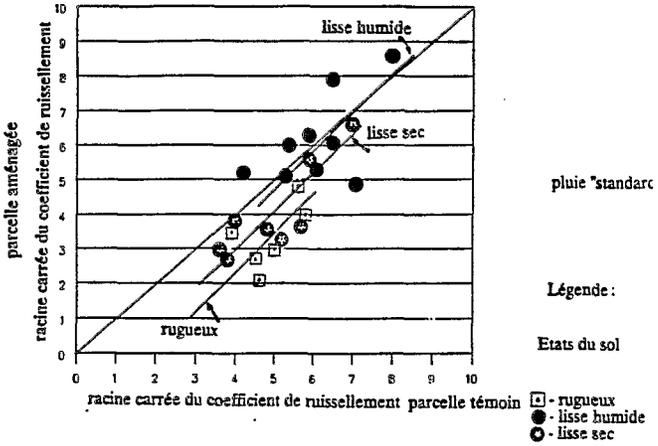


Figure 6 Comparaison des ruissellements parcelles témoin/parcelles aménagées. Autres pluies.

essentiellement en un point unique (sur une parcelle de 30m de large), ce qui crée en aval du cordon un chenal de drainage. Ce chenal s'érode et capte les ruissellements des surfaces suivantes. Si la durée d'infiltration est effectivement accrue sur la zone d'inondation (cela dépend de la durée de la vidange), la surface d'infiltration est globalement réduite sur la parcelle. Ceci explique le faible impact de l'aménagement en sol lisse. Si le ruissellement est massif (sol lisse et humide, pluie intense, impluvium), le débit de vidange augmente. Le gain d'infiltration aux cordons change peu. Il est alors faible au regard de la diminution des surfaces mouillées. Ceci explique les effets nuls voire négatifs de l'aménagement sur le ruissellement global.

-sur une parcelle aménagée avec des cordons cloisonnés, l'aire inondée est divisée en quatre. Il y a alors quatre points de vidange principaux au lieu d'un seul. On observe une rapide redistribution latérale du ruissellement en aval de ces points car la compétence de chacun n'est pas suffisante pour creuser un chenal de collecte, d'une part (si le débit est divisé par 4, l'énergie de chaque filet d'eau est divisée par 16). D'autre part un tel aménagement écrétant le ruissellement protège un peu la rugosité globale, qui est donc plus apte que celle de la parcelle témoin à décomposer un ruissellement concentré. Il conduit à une plus grande surface de réinfiltration après la phase intense de la pluie. Ceci explique l'efficacité supérieure d'un aménagement cloisonné et sa plus faible dépendance vis à vis des conditions d'humidité, de pluie et de ruissellement entrant.

Lorsque le sol, quoique légèrement encroûté par quelques pluies reste suffisamment rugueux, le ruissellement débordant des creux du microrelief et concentré par le cordon est parfaitement redistribué en aval par le relief qui joue comme un peigne. La surface de réinfiltration après la phase intense de l'averse est importante et couvre même l'aval des cordons. L'impact de l'aménagement est alors important et régulier, même si un ruissellement supplémentaire important parvient de l'impluvium.

4. LES TRANSPORTS SOLIDES SUR LES PARCELLES EXPERIMENTALES

Les matériaux solides transportés par les eaux de ruissellement en aval des parcelles agronomiques de Samniweogo se présentent en aval sous trois formes différentes : en suspension dans les eaux déversées sur le déversoir triangulaire, en dépôts fins dans la fosse à sédiments située en amont du déversoir, en dépôts plus grossiers sur l'aire de collecte des eaux située en amont du canal jaugeur.

Les résultats des mesures de transports solides sont consignés sur le tableau n° 4.

Sur la parcelle témoin, le tonnage moyen annuel exporté est de 2,2 tonnes par hectare avec ou sans impluvium.

Sur la parcelle aménagée, le tonnage annuel moyen exporté est de 1,4 tonne de matériaux solides par hectare avec l'impluvium, de 0,7 tonne par hectare sans impluvium.

Sur la parcelle aménagée labourée, le tonnage annuel exporté était de 0,4 tonne par hectare en 1987 avec l'impluvium. En 1988, sans impluvium, il était de 1,3 tonne par hectare.

Tableau n° 4 : Transports solides mesurés sur les parcelles agronomiques de Samniweogo.

année	1986		1987		1988		dépôts aire
	déversés V	dépôts fosses	déversés V	dépôts fosses	déversés V	dépôts fosses	
parcelle témoin	1120	98	400	38	418	78	243
parcelle aménagée	791	61	120	18	152	24	55
parcelle labourée	-	-	82	26	291	26	114
surface cultivée	3100 m ²		3100 m ²		3100 m ²		
surface impluvium	1250		1250		150		

La variation des tonnages annuels en matériaux solides exportés hors des parcelles agronomiques de

Samniweogo sont donc extrêmement fortes d'une année à l'autre, en relation directe avec celles des volumes ruisselés.

La figure n° 7 donne une bonne idée des concentrations respectives observées sur les trois parcelles agronomiques pour les matériaux solides transportés en suspension. Pour la crue du 15 août 1988, les concentrations moyennes sont égales à 1,75 g/l sur la parcelle témoin, à 0,98 g/l sur la parcelle aménagée, à 1,15 g/l sur la parcelle labourée.

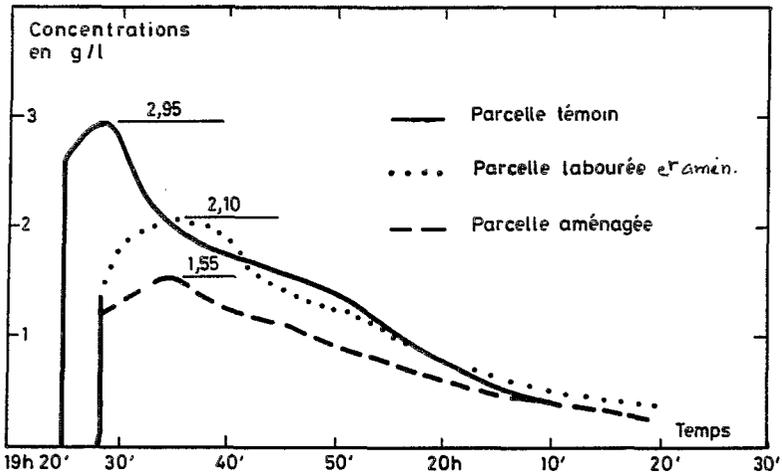


Figure n° 7: Turbidigrammes des crues du 15 août 1988 sur les parcelles agronomiques de Bidi - Samniweogo

5. LES OBSERVATIONS HYDROPÉDOLOGIQUES ET AGRONOMIQUES

Les bilans hydriques sur les parcelles

Les mesures hydrologiques de surface et les mesures de stock hydrique des sols (8 mesures à l'humidimètre à neutron par parcelle) apparaissent suffisamment précises pour permettre l'établissement des bilans hydriques sur les parcelles agronomiques de Samniweogo. Ces bilans doivent quantifier les pertes en eau subies par le volume de sol exploité par l'enracinement afin d'établir un diagnostic de la satisfaction des besoins en eau de cultures.

L'utilisation de l'équation du bilan hydrique, de la forme : $Re + Ps + Rs + VS + ED = 0$, permet de calculer les pertes par évaporation et drainage (ED) lorsque les autres termes du bilan sont connus, c'est à dire : le ruissellement entrant (Re), la pluviométrie au sol (Ps), le ruissellement sortant (Rs) et la variation du stock hydrique des sols (VS). La précision sur l'estimation des ruissellements est de l'ordre de 20 %. Les pluies au sol sont connues avec une précision de l'ordre de 10 % et l'erreur commise sur l'évaluation du stock hydrique est estimée à 10 millimètres quelque soit l'importance du stock qui varie entre 50 et 150 millimètres.

L'estimation des pertes par évapotranspiration sera d'autant plus précise que la période considérée sera longue, sèche, et exempte de flux verticaux profonds. L'incertitude sur une décade est de l'ordre de 2 mm par jour en période humide, de 1 mm par jour en période sèche. La cohérence entre les mesures hydrologiques superficielles et les mesures hydro-pédologiques a été contrôlée en comparant les stocks hydriques des différentes parcelles avant et après une pluie forte. Les différences observées entre l'augmentation du stock hydrique et la lame infiltrée rentrent dans le domaine d'incertitude sans biais systématique. La figure n° 8 présente les résultats

Figure 8: Stocks calculés par le modèle de bilan hydrique comparés aux mesures (moyenne de huit profils hydriques par parcelle).

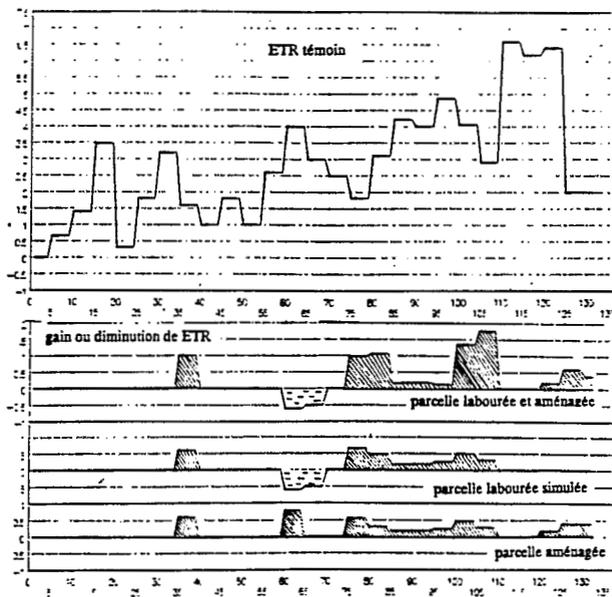
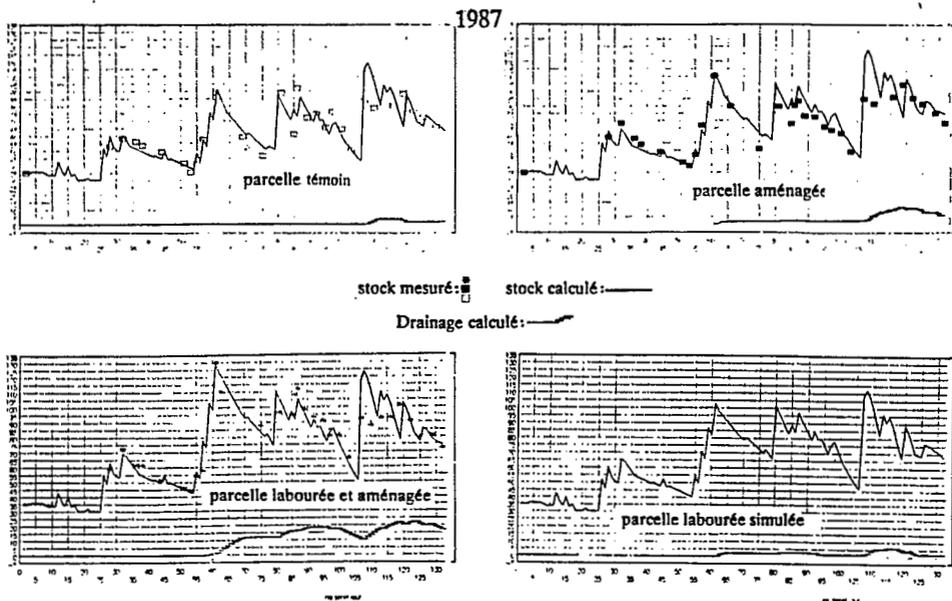


Figure 9: Comparaison des ETR des 3 parcelles réelles et d'une parcelle simulée sur modèle de bilan hydrique.

des calculs pour l'année 1987.

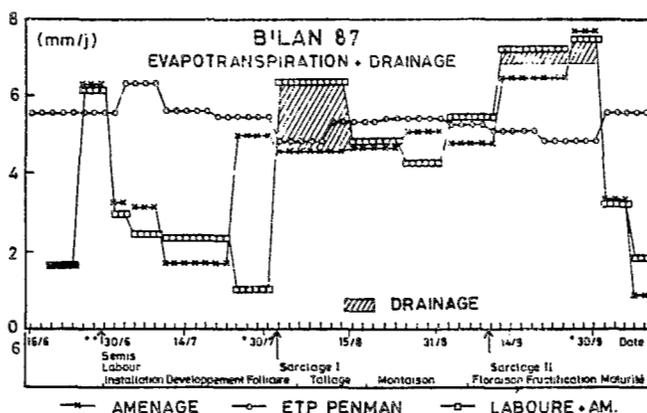


Figure n° 8 : Evapotranspiration et drainage de l'année 1987 sur les parcelles aménagées.

Les observations agronomiques

Le tableau n° 5 résume les observations effectuées sur le développement et la croissance du Mil.

Tableau n° 5 : Etat du Mil après les semis

paramètres mesurés	hauteurs en cm			stade foliaire (équivalent feuille)		
	1985	1986	1987	1985	1986	1987
années	1985	1986	1987	1985	1986	1987
nombre de jours après les semis	44j	34j	45j	44j	34j	45j
parcelle témoin	27,6	31,5	37	10,2	9,8	9,3
parcelle aménagée	32,4	35,8	40	10,6	10,1	9,8
parcelle labourée	-	48,1	74	-	11,1	10,8

Début de cycle :

Les années 1985 et 1987 se caractérisent par des périodes sèches en début de cycle, moins longues en 1987, en pleine phase de croissance et de développement du Mil, alors que la pluviométrie est bien distribuée sur toute l'année 1986. Il en résulte des retards de croissance importants en 1985, moins importants en 1987. Sur la parcelle aménagée, la croissance du Mil est légèrement plus rapide que sur la parcelle témoin (écart de 8 à 18 %) et le développement foliaire y est plus avancé (écart de 3 à 5 %). Dans tous les cas, la parcelle labourée présente une avance de croissance très forte (30 à 80 %) et une avance de développement foliaire (10 %) sur la parcelle non labourée. L'état d'enracinement, mesuré à la floraison, confirme la qualité de l'enracinement dans la parcelle labourée et l'influence, dans la parcelle aménagée, des conditions d'humectation sur la mise en place des racines.

Fin de cycle :

Parcelle témoin et aménagée :

La figure n° 9 présente les productions en matière sèche et en grain par mètre carré de champ cultivé. Les relations entre la production de matière sèche et la production en grain sont bonnes, à l'exception du haut de la parcelle aménagée pour l'année 1985, année pour laquelle le Mil a subi un échaudage radical en fin de cycle. Le haut des parcelles (bénéficiant de l'impluvium) apparaît systématiquement favorisé tant pour la production de matière sèche que pour la production en grains. L'aménagement en cordons pierreux, si l'on excepte les années 1985 et 88, permet d'augmenter de 10 à 20 % la production de matière sèche et de 30 à 60 % la production en grains en haut des parcelles, de 30 à 60 % la production de matière sèche et de 30 à 90 % la production en grains en bas des parcelles. En 86, la production de grain a été fortement contrariée par des attaques massives de foreurs de tige, ce qui explique le mauvais rapport grain/matière sèche. En 88 par contre, on observe une réduction significative des rendements dans la parcelle aménagée (-20%). Cette année se caractérise par un excès d'eau lors de la période tallage/montaison. La durée de cet engorgement a été accrue dans la parcelle aménagée, dont l'aménagement cloisonné a été particulièrement efficace en l'absence d'impluvium. En 89, l'essai a été ravagé, comme les champs de toute la région, par un vol de sauterelles.

Parcelle labourée :

En 86, année normale à pluviométrie bien répartie, les labours ont permis d'accroître de 55 % la production de matière sèche et de doubler la production en grains (10 qx/ha). En année plus contrastée (1987), la croissance a été bien moindre. Mais l'accroissement de la production en grain reste importante (60 à 70 %) en haut de parcelle, plus faible en bas de parcelle (40 %). Compte tenu de la faible capacité de rétention spécifique des sols l'excès d'infiltration début aout a provoqué un drainage profond pendant le pic de minéralisation ce qui a pu se révéler néfaste à la reprise de croissance après la sécheresse de début de cycle.

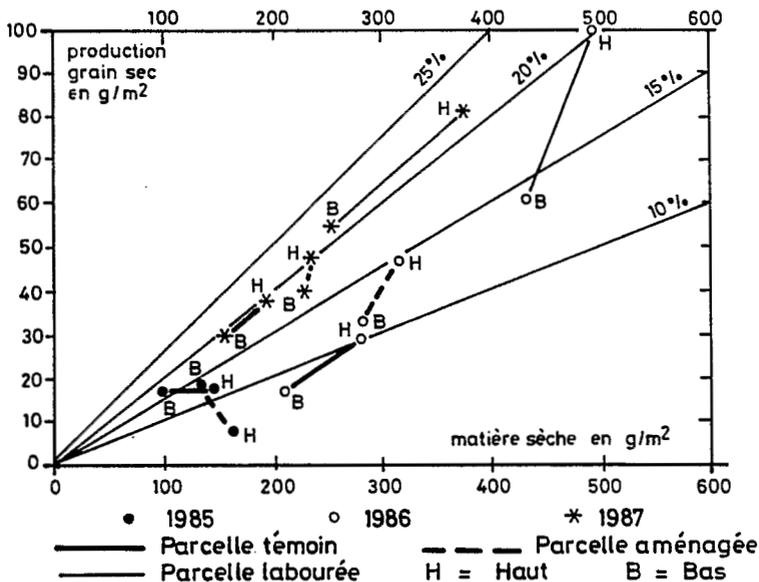


Figure n° 9 : Relation entre matière sèche et grain sec par m²

La confrontation des résultats bruts avec l'analyse des composantes élémentaires du rendement et les bilans hydriques mesurés puis simulés (GUILLET *et al*, 90) permet d'expliquer ces résultats.

Lorsqu'un effet positif apparaît sur la croissance du mil ou le rendement en grain, on le relie soit à la mise en réserve profonde d'un surplus d'eau qui sera repris lors d'un déficit hydrique, soit à de meilleures conditions d'humectation du profil à des époques sensibles sur le plan de l'alimentation minérale (phases d'enracinement initial et tallage où les besoins minéraux sont importants).

Le premier cas est arrivé en 85 et 87 où les gains d'infiltration (grâce à des conditions de rugosité et d'averse favorables) ont chaque fois permis l'approfondissement du profil hydrique par "effet piston" et complété en profondeur des profils déjà humectés en surface. Cette eau a donc été entièrement convertie en transpiration, sauf dans la parcelle labourée où l'excès d'infiltration a provoqué un drainage sous la zone racinaire (20mm).

En 86 par contre, il n'y a pas eu de telle mise en réserve supplémentaire (pluies violentes sur sols lisses) mais il n'y a pas eu non plus de véritable déficit hydrique. Les profils n'ont été mieux humectés que pendant la première moitié du cycle d'où un meilleur enracinement et une meilleure alimentation minérale conduisant à une croissance accrue.

On voit que l'impact sur le rendement des cultures peut être très varié. Si on excepte les cas où l'aménagement accroît l'excès d'eau (88), le rendement potentiel est toujours accru, mais en proportion très variable. Pour que le rendement final soit bien marqué, il faut encore d'autres conditions, qui ont fait défaut en 85 ainsi qu'en 89 : le gain initial a été compromis à la fructification par une sécheresse grave (85), et par une sévère attaque de ravageurs (86 : borers ; 89 : sautériaux).

CONDITIONS de réduction du ruissellement lors de l'averse :

-le ruissellement doit être d'intensité moyenne (en cas d'existence d'un impluvium amont, il faudrait donc qu'il soit lui aussi aménagé),

-les aires de rétention doivent être cloisonnées,

-l'état de surface lors de l'averse doit être encore rugueux (rôle de la stabilité de la structure, rôle de sarclages précoces réalisés en buttes et en quinconce). Il doit aussi être poreux (réinfiltration des ruissellements) ce qui doit avantager les sols à surface sableuse. Les sols plus argileux peuvent compenser leur faible perméabilité par une meilleure structure et une forte porosité tubulaire (rôle de la faune et de la matière organique) et par une bien meilleure conservation de la rugosité que les sols sableux. Il faudrait cependant d'autres mesures en sol plus argileux pour confirmer ces prévisions.

-la capacité en eau du sol doit être suffisante pour accueillir le surplus d'eau. Signalons ici que l'aménagement perdant de l'efficacité lors des pluies intenses et des sols humides, exerce ainsi une sélection des ruissellements à infiltrer. Il maintient une possibilité d'évacuation en cas d'excès d'eau.

CONDITIONS d'accroissement du rendement potentiel :

-qu'il y ait des périodes de déficit d'humectation des sols, ce qui est fréquent dans la période sèche actuelle.

-si le surplus d'eau pénètre dans un profil très sec, le gain reste en surface puis est vite perdu par évaporation. Sur un profil moyennement humecté, il améliore l'état hydrique et la profondeur d'humectation, donc les réserves en eau profondes (le surplus sera entièrement transformé en transpiration) et les conditions d'enracinement et de nutrition minérale. Sur un profil très humide, le gain est réduit mais peut provoquer un drainage important (cas de l'association labour + aménagement) ou un engorgement (en particulier sur l'aire de rétention). Mais cette dernière situation est devenue rare.

-les conditions de fertilité chimique et la fertilisation complémentaire, les conditions d'enherbement et phytosanitaire, les stades auxquels interviennent ces meilleures conditions, décident en dernier lieu de la valorisation de l'amélioration des conditions hydriques en terme de rendement final. Même dans le cadre d'un système de culture extensif de "champs de brousse paysan", l'accroissement de rendement de un à deux quintaux/ha sans coût supplémentaire d'intrant (en 86 et en 87) n'est pas à dédaigner : il permet d'atteindre en conditions pluviométriques *a priori* déficitaires le rendement-objectif de 4 qx/ha, c'est à dire les besoins en céréales d'un actif (capable de cultiver 1 ha) et d'un non actif.

-le labour seul amène des résultats meilleurs les premières années parce que son impact concerne aussi la limitation de l'enherbement et l'amélioration spectaculaire des conditions au démarrage (aération, eau, minéralisation, enracinement initial). Sur le plan hydrique, il correspond à un sarclage précoce supplémentaire.

Mais le danger qu'il comporte est de soumettre le sol (non stabilisé par un peuplement végétal) à un risque d'érosion par charriage en cas de ruissellement intense et de couche labourée engorgée. D'autre part les performances qu'il permet d'atteindre sont excessives au regard des possibilités paysannes d'entretien de la structure et de la fertilité du sol. L'aménagement d'un champ labouré, s'il protège relativement de l'érosion, augmente fortement le drainage et les pertes minérales qui lui sont associées. L'application systématique du labour comporte donc des risques certains en cas de ruissellements entrants et d'absence de fumure organique.

CONCLUSION

La travail du sol, labour ou sarclage, d'un sol sableux fin à sabloargileux permet une infiltration totale des pluies et des ruissellements entrant dans les parcelles cultivées sur une tranche pluviométrique d'environ 20 millimètres. Au delà, la transformation de l'état de surface des sols par aplanissement du microrelief et formation de pellicules superficielles favorise le ruissellement dont l'importance croît avec l'intensité de la pluie et l'état d'humectation des sols ; le maximum est atteint pour une tranche pluviométrique d'environ 100mm.

Un aménagement en cordons pierreux isohyposes cloisonnés, à l'occasion de fortes averses, modifie les paramètres de la crue par écrêtage et déphasage. Il réduit ainsi la puissance érosive des crues (transport et incision) et accroît de façon variable la lame infiltrée. Compte tenu des fréquents déficits en début et en fin de saison des pluies, l'aménagement peut donc améliorer les conditions d'installation du peuplement, de l'enracinement et de la fructification. Il conditionne véritablement l'écoulement en le régularisant dans l'espace et dans le temps. Les conditions d'efficacité agronomique que nous avons déduit du fonctionnement observé d'un modèle particulier d'aménagement, choisi uniquement pour sa stabilité, sont en fait indépendantes du type d'aménagement. Celui-ci peut donc être de nature variable (cordons en terre, en fascines, en touffes graminéennes, en andains, en pierres etc). Les conditions sont :

- qu'ils soient suffisamment nombreux et hauts pour stocker les ruissellements de pluies fortes sur une pente donnée,

- qu'ils soient isohyposes et cloisonnés tous les 10m ou moins,

- que chaque bassin de rétention ait au moins un exutoire protégé pour sa vidange.

Seules les conditions de pente, de sol et de géométrie sont encore mal connues: Un tel essai pourrait être réalisé sur un autre type de milieu mais nous attendons beaucoup d'une tentative de modélisation des écoulements de surface qui permettrait des simulations.

L'impluvium agit tout au long du cycle végétatif du Mil en augmentant la valeur des lames infiltrées lorsque les sols sont suffisamment absorbants. Son rôle est surtout sensible dans les zones hautes des parcelles pour les faibles pluies ; il améliore les conditions de croissance si la capacité de rétention des sols est suffisante.

Plus que le travail du sol par labour, l'aménagement en cordons pierreux isohyposes cloisonnés apparaît bien approprié à une conduite extensive des cultures en améliorant sans excès l'alimentation hydrique des sols. Les labours et le billonnage paraissent plus adaptés à des champs qui ne bénéficient pas des effets d'un impluvium amont.

L'amélioration de l'alimentation hydrique des cultures pose à plus ou moins long terme le problème du renouvellement de la fertilité des sols, l'accroissement de la production végétale non restituée allant de pair avec un appauvrissement plus rapide des sols ; elle ne constitue donc qu'un des maillons de la chaîne d'adaptation d'un système de culture à une situation nouvelle de déficit pluviométrique et de saturation de l'espace cultivable.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.) - 1987. Génèse et prédétermination des crues au Burkina Faso - Thèse de doctorat de l'université - Paris VI.
- CASENAVE (A.) - 1982. Le mini-simulateur de pluie : condition d'utilisation et principes de l'interprétation - cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 4, pages 207 à 227.
- CHEVALLIER (P.), LAPETITE (J.M.) - 1986. Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Hydro. Conti., Vol. 1, n° 2, pages 111 à 119.
- MARTINELLI (B.), SERPANTIE (G.) - 1987. Deux points de vue sur la confrontation des paysans aux aménageurs. in Les Cahiers de la Recherche-Développement n° 1 -15, pages 29 à 52.
- MILLEVILLE (P.) - 1980. Etude d'un système de production agro-pastoral de Haute-Volta. Le système de culture. ORSTOM/Ouagadougou, 66 pages.
- PLANCHON (O.) - 1990. Rapport de mission à BIDI. 10p mult.+ ann.
- POSS (R.) - 1984. La précision du comptage neutronique avec l'humidimètre SOLO 25. Définition des protocoles de mesure. Bulletin VGFHN n° 16, pages 109 à 122.
- SIBAND (P.) - 1981. Croissance et production du Mil. Essai d'analyse du fonctionnement du Mil en zone sahélienne. Thèse de doctorat, académie de Montpellier, 302 pages.

**CARTOGRAPHIE ET SUIVI DES ETATS DE SURFACE INDUITS
PAR LES SYSTEMES DE CULTURE**

Par

C. VALENTIN

CARTOGRAPHIE ET SUIVI DES ETATS DE SURFACE INDUITS PAR LES SYSTEMES DE CULTURE

Christian Valentin

ORSTOM, 70 route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex, France

RESUME

Les pertes en eau par ruissellement retiennent une attention croissante de la part des agronomes. Pour une très grande part, ce sont les états de surface (croûtes superficielles, microrelief, ...) qui déterminent l'infiltration tant dans les régions tropicales que tempérées. La cartographie des états de surface fournit un document précieux pour la localisation des parcelles cultivées dans leur contexte hydrologique. Le suivi de la dynamique des états de surface au cours des cycles culturaux, et, au-delà, pendant la jachère apporte à l'agronome des éléments de diagnostic des systèmes de culture.

INTRODUCTION

Plusieurs voies amènent l'agronome à l'étude de la surface du sol : les difficultés à établir un bilan hydrique par méconnaissance du ruissellement, les pertes à la levée du fait de croûtes superficielles très dures, l'apparition d'une rigole, voire d'une ravine. Dans ce dernier cas, remontant aux causes, il en vient à étudier les facteurs de production du ruissellement (croûtes superficielles) et de sa concentration (microrelief).

Jusqu'ici, la genèse du ruissellement a surtout reçu l'attention des hydrologues et des pédologues. Travaillant en zone tropicale sèche, ils ont établi que les caractéristiques de la surface du sol l'emportaient, quant à leur influence sur l'infiltration, sur les propriétés du sol lui-même (entre autres, COLLINET et VALENTIN, 1979 ; VALENTIN, 1981 ; STROSSNIDER et HOOGMOED, 1984 ; ALBERGEL *et al.*, 1986). Des études de plus en plus nombreuses font apparaître qu'il en est largement de même pour les sols cultivés, quelle que soit la zone climatique considérée : tempérée (BOIFFIN, 1984), tropicale sèche (SERPANTIE *et al.*, à paraître), et tropicale humide (PLEUVRET, 1988 ; VALENTIN *et al.*, 1990).

Considérant qu'au-delà des croûtes superficielles et du micro-relief, c'est l'ensemble des caractères de la surface du sol au sens large qui interviennent sur l'infiltration, CASENAVE et VALENTIN (1989) ont proposé de considérer deux niveaux d'observation :

- La *surface élémentaire* qui désigne, à un instant donné, un ensemble homogène, constitué par :
 - * le couvert végétal,
 - * la surface du sol,
 - * les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.
- L'état de surface qui peut correspondre à une seule surface élémentaire, à la juxtaposition de plusieurs, ou à un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire à un ensemble, au sein duquel jouent des interactions.

L'objectif de cet article est de présenter quelques repères quant à la caractérisation des états de surface et de leur suivi en milieu cultivé.

CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

Quelle surface cartographier ?

Dès lors que l'on porte une attention particulière à une parcelle cultivée, ou à un groupe de parcelles, il convient de considérer la portion de versant concernée. Se trouve-t-elle à l'aval d'un vaste *impluvium* producteur de ruissellement, à l'amont d'un système de ravines ? En d'autres termes, les champs doivent être situés dans leur contexte hydrologique. Dès lors, ce ne sont pas seulement les terres cultivées qui doivent être cartographiées mais l'ensemble de l'ensellement de versant (*impluvium* d'une ravine, par exemple), voire du bassin versant.

Carte topographique

Dans la plupart des cas, il est nécessaire de dresser une carte topographique détaillée de la zone d'étude. A défaut d'un niveau de géomètre et d'une mire, le prospecteur aura recours aux moyens qu'utilisent, à l'occasion, les paysans pour déterminer l'emplacement des cordons isohypses ou enherbés (BERTON, 1988 ; C.I.L.S., 1989) : niveau à eau gradué, ou fil à plomb suspendu à un bâti en "A".

Particulièrement dans les zones arides, les limites de l'ensellement, ou du bassin versant, peuvent être délicates à cerner. Cette opération se trouve nettement facilitée lorsqu'elle est entreprise au cours de la saison des pluies ou juste après : les organisations de surface, les traces de ruissellement orientent la prospection. Il est prudent, néanmoins, de déborder assez largement des limites supposées : d'une part, les dépouillements peuvent révéler des erreurs d'appréciation, d'autre part les limites de l'unité hydrologique varient d'une année à l'autre du fait d'une modification du microrelief : changement d'orientation des billons, ouverture d'un sentier, capture d'une rigole par un ensellement adjacent,...

Sur ce document de base, non seulement les lignes de niveau seront tracées, mais aussi les zones de concentration ou d'étalement du ruissellement. A cet égard, un modèle numérique de terrain (M.N.T.) peut s'avérer très précieux (voir, par exemple, DEPRAETERE, 1990). La représentation sous forme de bloc diagramme permet une visualisation facile du relief et donc une première zonation de la surface étudiée en unités topographiques et hydrologiques.

Méthode cartographique

Pour des échelles très grandes, de l'ordre de 1/1.000^{ème}, la méthode de prospection systématique demeure la plus fiable. Elle consiste à décrire les états des surfaces en des points formant les noeuds d'une grille à maille carrée. A titre d'exemple, un ensellement carré fictif d'un hectare comprendra 100 points d'observations distants de 10 m. Dans la mesure du possible, la prospection devrait s'opérer le long d'axes disposés sensiblement selon la plus grande pente.

A chaque point, correspondent deux niveaux d'observations : celui du champ de vision du prospecteur, celui de la surface du sol *sensu stricto* sur laquelle il se trouve. Pratiquement, un canevas de description peut être fourni pour :

- Le carré de 10 m de côté au centre duquel le prospecteur se situe. Il décrit les éléments des états de surface qui correspondent à cette échelle de perception.
- Le m² ou les quelques m² situés à proximité du centre du carré, surface plus propice aux descriptions fines de la surface du sol.

Observations à l'échelle de 100 m²

Le couvert végétal et l'utilisation du sol

Plusieurs strates peuvent être différenciées parmi les arbres, arbustes, plantes cultivées ou adventices. Pour chacune, le pourcentage de surface projetée au sol peut être estimé visuellement. Un prospecteur entraîné peut espérer une précision de l'ordre de 5%. Un observateur peu averti aura tendance à surévaluer le couvert végétal. Pour remédier à cette surestimation, il pourra s'aider de tables d'évaluation (par exemple, CASENAVE et VALENTIN, 1989) ou appréciera le complément à 100, c'est-à-dire la surface non couverte par la strate considérée. Il peut être utile également d'estimer le pourcentage de surface occupée à la base par la somme des tiges et des troncs. Sans prétendre à un relevé botanique exhaustif, le nom des principales espèces peut faciliter la caractérisation d'un état de surface particulier.

Dans les parcelles cultivées, des données plus agronomiques doivent aussi retenir l'attention :

- le ou les espèces cultivées,
- le type d'association,
- la distance entre les plants, la densité, le type de distribution,
- le stade phénologique,
- l'état des plantes (symptômes de stress hydrique, d'attaques parasitaires, par les criquets, de toxicité ou de carence, ...),
- le ou les dates de semis et des opérations culturales,
- l'histoire de la parcelle (durée de jachère, date de défrichement, ...).

Ces données peuvent, bien entendu, être relevées parcelle par parcelle et non pour chaque point d'observation. Toutefois, la complexité du parcellaire et de son histoire est telle qu'il y a lieu parfois de procéder à une enquête à cette échelle très fine.

Une importance particulière sera apportée aux ligneux laissés dans les champs : localisation précise, taille, surface d'ombrage, espèce, utilisation, ...

Il importe de veiller à établir des relations (ou à noter l'absence de relations apparentes), même visuelles, entre ces différentes composantes : diminution de la taille et de la densité des plantes cultivées dans la zone d'ombre d'un arbre, ou dans la zone supposée de son enracinement, ... Ces observations,

même imparfaites seront à confronter à l'expérience et au "tour de plaine" de l'agronome.

Le couvert au niveau du sol

C'est sur la surface même du sol que le couvert s'avère le plus efficace en terme de protection contre l'énergie cinétique des pluies. Plusieurs caractères méritent donc d'être notés :

- la nature du couvert : plantes rampantes, mousse, graines, résidus, cendres, souche, litière, éléments grossiers, affleurements de roche,
- le pourcentage de couvert pour chaque composante,
- l'épaisseur (dans le cas d'un paillage par exemple),
- le degré de fragmentation ou d'humification pour les résidus organiques (paille, ...),
- la taille et la distribution des éléments grossiers,
- les relations avec les autres composantes d'état de surface : l'existence de micro-barrages (voir par exemple MITCHELL et HUMPHREYS, 1987) ou de micro-piedestaux associés aux débris végétaux à la surface du sol, etc.

Microrelief

Décrits à cette échelle, les principaux éléments du microrelief peuvent être reportés sur la carte topographique : rupture de pente, petites dépressions, rigoles et ravines (profondeur, largeur, forme du profil en travers, distribution...), termitières (hauteur, surface basale, pourcentage de couvert, distribution). Sur les parcelles cultivées, ou les jachères, le micro-relief induit par les opérations culturales (billons, planches, traces de roues, ...), ou antiérosives (cordons pierreux, levée de terre, ...) doit être décrit avec attention : hauteur, largeur, distance entre les éléments, distribution par rapport à la pente, angle avec la courbe de niveau, degré de résistance au ruissellement, points de rupture, ... Les sentiers doivent également faire l'objet de description détaillée : largeur (le cas échéant, profondeur), orientation par rapport à la surface du sol, collecte des eaux ruisselée entre les billons, alimentation d'une ravine, ...

Observations sur quelques m²

A proximité immédiate du centre de son carré d'observation et sur une surface d'un à quelques mètres carrés, le prospecteur doit effectuer des descriptions plus détaillées de la surface du sol. C'est à cette échelle, en effet, que l'on apprécie le plus facilement :

- L'activité faunique : placages de récolte de termites, turricules (rejets) de vers de terre, fourmillières.
- La porosité superficielle : fentes (largeur, profondeur, réseau), les vésicules (c'est-à-dire les pores sphériques, fermés ; diamètre, abondance, localisation, densité). Ces vésicules revêtent une importance considérable : leur densité dans les premiers micro-horizons cultivés fournit un excellent indicateur d'infiltrabilité (ALBERGEL *et al.*, 1986).
- Les caractères de l'horizon superficiel : couleur, taches, texture, teneur en éléments grossiers (taille, pourcentage, nature), structure, porosité, consistance, etc.
- Les indices de rejaillissement ("splash") : salissures des tiges et des feuilles, les figures en piédestal (hauteur, nature).
- Les indices de ruissellement : dépôts, épandages, micro-barrages, micro-"délaisées de crues".

- Les indices d'érosion en nappe : racines affleurantes (taille, densité), micro-marches (hauteur, largeur, ...).
- Le type de croûte superficielle. Il peut être utile, au moins en Afrique de l'Ouest, de se référer à la typologie proposée par CASENAVE et VALENTIN, 1989. Celle-ci repose sur la granulométrie du micro-horizon superficiel, sur le nombre de micro-horizons et sur la structure superficielle. Ainsi, cinq types de croûtes superficielles présentent un micro-horizon superficiel sableux :

- * Si ce micro-horizon est unique, fragile : *croûte de dessiccation*. Cette croûte peut-être relativement épaisse. Elle n'offre que peu de résistance à la levée des semences et à l'infiltration de l'eau. Elle correspond à une légère prise en masse du matériau sableux superficiel. Elle se développe généralement sous un couvert végétal.
- * Si ce micro-horizon sableux recouvre une pellicule plasmique (constituée d'éléments fins) : *croûte structurale à 2 microhorizons*. L'adjectif "structural" indique que la réorganisation a lieu sur place, par modification de la structure, sans transport des particules.
- * Si la différenciation granulométrique est plus marquée et qu'au-dessus de la pellicule plasmique, il est possible de différencier deux micro-horizons sableux (l'un grossier en surface, l'autre plus fin dessous) : *croûte structurale à 3 microhorizons*. Une forte porosité vésiculaire se développe généralement dans ce type de croûte, dans les micro-horizons de sable fin et plasmique.
- * Si le nombre de microhorizons excède 3, sans qu'apparaissent des pellicules plasmiques : *croûte de dépôts éoliens*. Ce type de croûte, généralement assez friable, s'oppose peu à l'infiltration.
- * Si le nombre de microhorizons excède 3 et si l'on observe une alternance de microhorizons sableux et plasmiques : *croûte de ruissellement*. Ces croûtes se forment sous une lame d'eau en mouvement. Aussi sont-elles fréquentes dans les zones entre les billons où elles peuvent atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur. Une porosité vésiculaire s'y développe assez souvent.

Un seul type de croûte présente des éléments grossiers en surface :

- * Ceux-ci sont enchâssés dans une croûte qui évoque la croûte structurale à 3 micro-horizons : *croûte grossière*. Bien que caractéristique des regs désertiques, cette croûte peut être décrite en milieu sahélien, voire soudanien.

Pour trois types de croûtes, c'est un micro-horizon plasmique qui affleure :

- Si la croûte est constituée d'agrégats fondus, argileux ou limoneux mais présente encore une certaine rugosité (structure fragmentaire altérée) : *croûte structurale à 1 micro-horizon*. C'est le type de croûte qui se forme dès le début d'une pluie sur un sol travaillé, argileux ou limoneux.
- Si la croûte est constituée d'une pellicule plasmique affleurante et lisse (structure continue) : *croûte d'érosion*. Ce type de croûte résulte généralement de l'évolution des croûtes structurales à 1 micro-horizon par perte de leur rugosité ou à 2 ou 3 micro-horizons par érosion hydrique ou éolienne des micro-horizons sus-jacents (VALENTIN, 1985)
- Si, sous la pellicule plasmique affleurante apparaissent des micro-horizons plus grossiers : *croûte de décantation*. Ce type de croûte présente fréquemment une structure prismatique ou squameuse, voir squameuse rebroussée (la pellicule plasmique a tendance alors à s'enrouler sous

forme de copeaux). La distribution granulométrique verticale au sein de cette croûte est l'inverse de la croûte structurale à 3 micro-horizons. Elle se forme sous une lame d'eau chargée en sédiments et immobile, dans les cuvettes ou les micro-dépressions.

Le pourcentage en surface de chaque type de croûte doit être évalué. Il est utile de préciser la localisation des différents types de croûte en fonction du micro-relief induit par les opérations culturales. Par exemple : croûte structurale à un microhorizon au sommet des billons, croûte d'érosion sur les versants des billons et croûtes de ruissellement en interbillons.

Fiche de relevé

Sur le terrain, une fiche de relevé s'avère un outil précieux de normalisation des observations. La fiche proposée (fig. 1) doit être adaptée aux conditions de milieu et aux objectifs de l'étude. Pour nombre de paramètres, une échelle semi-quantitative, par exemple de 1 à 5 peut être utilisée, à condition toutefois que ce système de notation repose sur des critères objectifs.

Surface élémentaire

Pour chaque point d'observation, il est utile d'opérer, dès le terrain, à une première synthèse des observations. A cet effet, pour les échelles les plus fines, il convient de définir le type de "surface élémentaire". Celle-ci désigne, à un instant donné, un ensemble homogène, tant du point de vue de son état de surface que de son fonctionnement hydrologique. Pour les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest, CASENAVE et VALENTIN (1989) en ont défini 11 grands types (fig. 2). A chacun, correspondent des paramètres hydrodynamiques établis sur de nombreuses parcelles soumises à la simulation de pluie. En sus des grands critères servant à la typologie de base (travail du sol, porosité vésiculaire, activité faunique, et type de croûte), des critères secondaires permettent d'établir des variantes. Ainsi, pour les sols cultivés de la zone, trois grands types ont été définis en fonction de la densité de porosité vésiculaire. Cinq variantes viennent compléter cette typologie succincte (Tableau 1).

Le document cartographique

A partir des relevés précédents, plusieurs cartes thématiques peuvent être dressées : carte de la texture superficielle, carte du parcellaire, carte de l'intensité des processus érosifs, ... Pour de nombreux paramètres, l'échelle de variation n'est pas compatible pour autant avec celle du document cartographique. Il convient, par conséquent, de procéder à des regroupements, à des associations. En outre, il est souvent plus utile de disposer d'une carte synthétique des états de surface que de plusieurs documents thématiques.

Deux problèmes se posent au cartographe : la définition du contenu des unités, le dessin de leurs limites.

- Pour résoudre le premier, l'une des voies consiste à opérer un traitement statistique multivarié, chaque point d'observation étant considéré comme un individu. Les regroupements s'effectuent alors sur la base des nuages de points obtenus. Bien entendu, cette approche doit se trouver pondérée par les observations non prises en compte statistiquement et par les objectifs de l'étude. Dans un souci de synthèse, la légende de chaque unité peut être résumée par le pourcentage des types de surfaces élémentaires et par leur distribution au sein de l'unité (aléatoire, en bandes alternées, en

mosaïque, ...). A l'heure actuelle, seuls ces pourcentages sont pris en compte dans la modélisation hydrologique (ALBERGEL, 1987), qui, au demeurant, reste à perfectionner.

- Pour le tracé des limites, la densité des observations au sol, dans le cas d'une prospection à très grande échelle, est telle qu'il peut être aisément effectué à la main. A quoi bon utiliser des techniques plus sophistiquées, qui au reste, et il convient de le rappeler, correspondent à des données discontinues dans l'espace (comme des teneurs en minerai dans un sondage), alors que les états de surface sont directement accessibles ?

LE SUIVI DES ETATS DE SURFACE

Une carte d'état de surface est bien sûr datée. Si les caractéristiques d'un *impluvium* constitué de regs peut ne guère évoluer, il en est bien sûr tout autrement des parcelles cultivées. Leurs états de surfaces se modifient très rapidement sous l'effet des itinéraires techniques et de la croissance des plantes cultivées. De même qu'il est indispensable de dresser une carte générale des états de surface de l'ensellement de bassin ou du bassin versant contenant les parcelles cultivées, il est tout aussi nécessaire d'en étudier l'évolution au sein de ces parcelles.

Le choix de placettes

La prospection systématique étant une opération assez longue, il n'est guère possible de l'envisager fréquemment. Or, les processus de réorganisations superficielles sont rapides, particulièrement en zone tropicale. Dès lors, il convient d'opérer par échantillonnage. Pour ce faire, des placettes d'un à quelques m² doivent être sélectionnées. Le nombre de placettes dépend :

- Du nombre de situations à tester : "type de milieu" x "type de traitement". Par exemple deux itinéraires techniques pourront être suivis sur deux surfaces où la cartographie précédente laisse présager des dynamiques différentes d'encroûtement superficiel.
- Du nombre de répétitions pour chaque situation. Trois répétitions constitue un minimum.

Au vrai, dans le compromis à définir, il est préférable de privilégier la fréquence des descriptions sur le nombre de situations testées. En effet, ce sont les déterminismes des mécanismes évolutif qu'il importe, en premier lieu, de déceler .

La fréquence des descriptions

L'état initial, dont dépend largement l'évolution ultérieure, doit être caractérisé le plus précisément possible . Dans le cas d'un lit de semence, il est nécessaire, par exemple, de prendre en compte la granulométrie des agrégats ou des mottes (BOIFFIN, 1984 ; VALENTIN et RUIZ FIGUEROA, 1987), ainsi que le pourcentage de surface occupé par le matériau non agrégé, déjà réduit à l'état de poudre par les opérations culturales.

Ensuite, la fréquence des descriptions se trouve subordonnée aux principaux facteurs qui interviennent sur l'évolution des états de surface :

- Les premières pluies : elles entraînent généralement des réorganisations superficielles très marquées. Une description après chaque événement

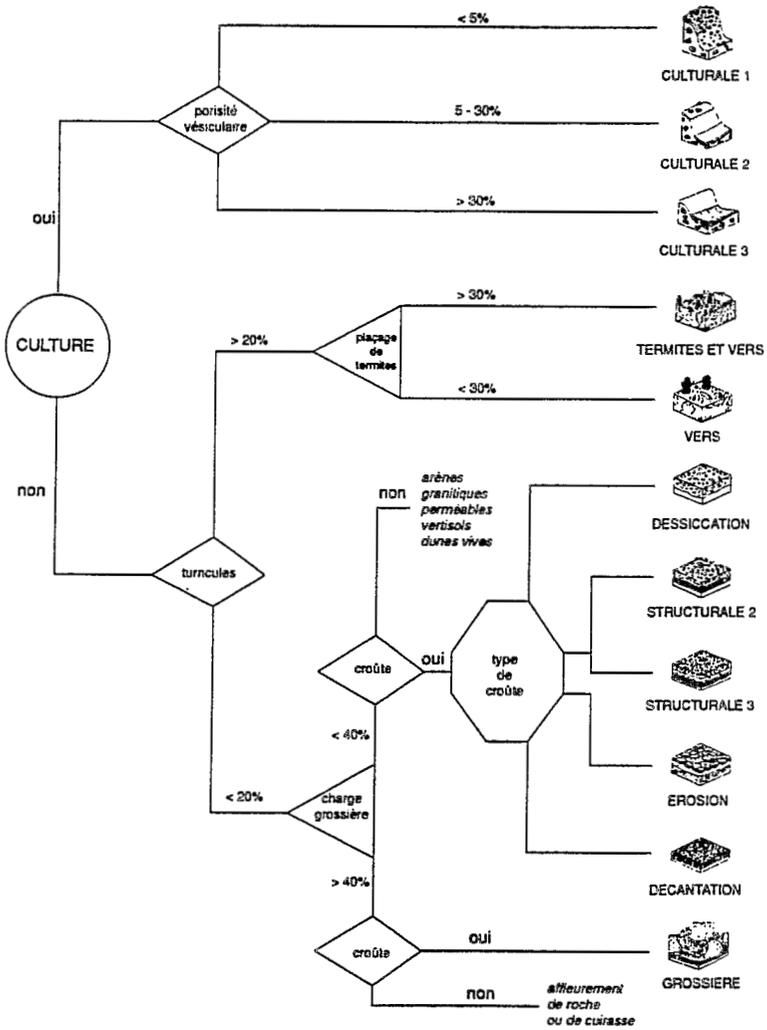


Figure 2. Clef de détermination des principales surfaces élémentaires de la zone sahélienne (d'après CASENAVE et VALENTIN, 1989).

FICHE DE RELEVÉ D'ÉTATS DE SURFACE

Lieu :	Date :
Coordonnées du point :	Nom du prospecteur :

Observations sur 100 m²

<i>Couvert végétal et utilisation du sol</i>			
Méthode :	Estimation visuelle	O	Mesure
			O
classes de hauteur	couvert basal (%)	Couvert aérien (%)	remarques : espèce dominante, adventice ou cultivée, association, densité, type de distribution, stade phénologique, symptômes de carences, de toxicité, état phytosanitaire, histoire de la parcelle, ...
> ... m
... m - ... m
... m - ... m
... m - ... m
... m - ... m
<... m

<i>Couvert au niveau du sol</i>			
Méthode :	Estimation visuelle	O	Mesure
			O
type	couvert (%)	épaisseur (cm)	remarques : type de distribution, traits associés (micro-barrages, micro-piédestaux, ...)
litère
résidus
cendres
souches
.....

<i>Mesorelief</i>			
Méthode :	Estimation visuelle	O	Mesure
			O
Type	hauteur ou profondeur	surface basale ou largeur	remarques : distribution, direction par rapport à la pente, ...
rigole
ravine
termitière
billons
planches
cordons pierreux
sentiers
.....

Observations sur 1 ou quelques m2

<i>Couvert végétal</i>			
Méthode :	Estimation visuelle	O	Mesure : au point quadrat O, le long d'un axe O
classes de hauteur	couvert basal (%)	Couvert aérien (%)	remarques : espèce dominante, adventice ou cultivée, association, densité, type de distribution, ...
> ... cm
... cm - ... cm
... cm - ... cm
< ... cm

<i>Couvert au niveau du sol</i>			
Méthode :	Estimation visuelle	O	Mesure : au point quadrat O, le long d'un axe O
type	couvert (%)	épaisseur (cm)	remarques : type de distribution, traits associés,...
litière
résidus
cendres
.....

<i>Microrelief</i>			
Méthode :	Estimation visuelle	O	Mesure : au point quadrat O
type@	hauteur ou profondeur	surface basale ou largeur	remarques : distribution, direction par rapport à la pente, porosité associée à l'activité faunique, ...
.....
.....
.....
.....

@ : termitière, placages de récolte de termites, turricules de vers de terre, fourmilères, billons, planches,

<i>Surface du sol</i>			
fentes	largeur :	profondeur :	distribution :
vésicules	densité :	diamètre :	distribution :
couleur	.....	.....	.....
taches	.....	.....	.....
texture	.....	.....	.....
pierrosité	% de couvert :	nature : .....	.....
affleurement	% de couvert :	nature : .....	.....
structure	.....	.....	.....
consistance	.....	.....	.....
type de croûte	% de couvert :	épaisseur :	continuité :
.....
.....
.....
racines	densité :	taille : .....	.....
pedestal	densité :	hauteur : .....	.....

* par exemple : croûte de dessiccation, structurale (à 1, 2 ou 3 microhorizons), de ruissellement, d'érosion, grossière ou de décantation)

Type de surface unitaire# :

par exemple : C1, C2, C3, TV, V, DES, ST2, ST3, ERO, DEC ou G ; voir la clef de détermination, fig. 2)

Figure 1. Fiche de relevé des états de surface (d'après VALENTIN, à paraître).

TABLE 1 : PRINCIPAUX PARAMETRES HYDROLOGIQUES DES TYPES DE SURFACES UNITAIRES CULTIVEES EN ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES D'AFRIQUE DE L'OUEST
(d'après *CASENAVE et VALENTIN, 1989*).

Type	Principaux caractères	Principaux paramètres hydrologiques					
		Ki %	Ki0 %	Ki20 %	Il (mm/h)	Pis (mm)	Pih (mm)
C1	Porosité vésiculaire < 5%						
	Pas de croûte ou croûte structurale rugueuse (ST1)	60-75	80-90	75-85	15-25	25-30	5-15
	Variantes :						
	Couvert végétal > 50%	80-95	90-100	85-95	25-35	30-40	20-30
	Éléments grossiers > 40%	40-50	55-65	45-55	7-15	5-15	1-5
C2	Porosité vésiculaire 5-30 %						
	Croûtes structurales (ST2, ST3), croûte d'érosion > croûte de ruissellement (RUI)	40-60	60-80	50-70	1-7	8-15	2-4
	Variantes :						
	Surface très rugueuse	60-75	80-90	75-90	10-20	15-25	5-10
	Argile > 40 %	15-25	25-40	20-30	1-5	8-12	2-4
C3	Porosité vésiculaire > 30%						
	Prédominance des croûtes de ruissellement	15-25	25-40	20-30	0-3	8-15	2-4
	Variantes :						
	Surface très rugueuse	40-60	60-80	50-70	5-10	20-30	5-10

Ki : Coefficient d'infiltration

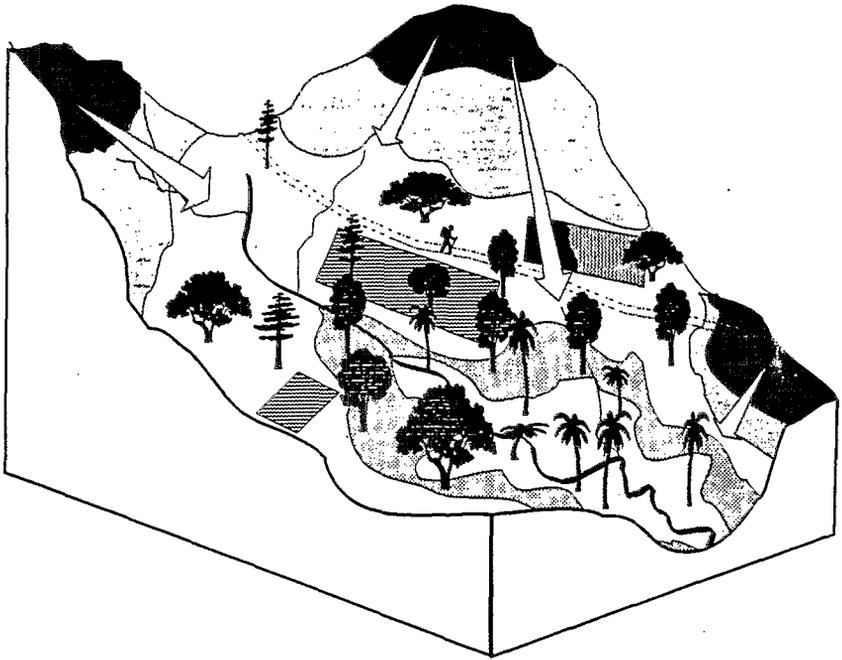
Ki0 : Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm sur un sol sec

Ki20 : Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm sur un sol très humide

Il : Intensité limite de ruissellement

Pis : Pluie d'imbibition, sol sec

Pih : Pluie d'imbibition, sol humide



→ Concentration du ruissellement

UNITES CARTOGRAPHIQUES:
 Pourcentages des types de surfaces élémentaires ;
 type de distribution

	80% s. grossière, 20% s. érosion ; aléatoire		70% s. décantation, 20% s. vers, 10% s. structurale 2 ; aléatoire
	70% s. érosion, 30% s. grossière ; aléatoire		100% s. culturale 1
	60% s. structurale 3, 30% s. érosion, 10% s. grossière ; aléatoire		70% s. culturale 2, 20% s. culturale 2, 10% s. culturale 3 ; zonation
	50% s. vers, 20% s. termites and vers, 10% s. structurale 2, 10% s. structurale 3, 10% s. décantation ; aléatoire		80% s. culturale 3, 20% s. culturale 2 ; zonation

Figure 3. Exemple de carte d'état de surface d'un petit bassin versant contenant des parcelles cultivées (d'après VALENTIN, à paraître).

pluvieux devrait être effectuée jusqu'au ralentissement de la vitesse d'évolution, consécutif à l'humectation du sol et à l'établissement du couvert.

- Les opérations culturales : une description doit être réalisée après chaque sarclage. Celui-ci détruit partiellement ou totalement les croûtes superficielles, modifie le microrelief et bien entendu le couvert, au moins adventice.
- Les stades de développement des plantes cultivées et adventices : au cours de l'établissement du couvert et même au-delà, il convient de porter une attention particulière envers l'activité faunique qui peut perforer les croûtes préalablement formées. Par ailleurs, les descriptions ne doivent pas cesser lors de la récolte : des pluies peuvent survenir sur un sol moins couvert et provoquer de nouvelles réorganisations (sur champs de riz en savane humide, par exemple, VALENTIN *et al.*, 1990). De plus, des descriptions d'état de surface doivent être prévues en saison sèche (évolution des résidus, rôle des termites,...).
- La jachère : le suivi des états de surface après l'abandon des parcelles permet de déterminer les principales phases de reconstitution du milieu (disparition du micro-relief induit par les opérations culturales, reconstitution de la végétation - disparition des adventices, développement des ligneux, réactivation de la faune du sol (MITJA *et al.*, 1990).

Les modalités de caractérisation des placettes

La fiche de relevé, proposée pour la prospection cartographique à l'échelle de 1 ou de quelques m² (fig. 1), peut servir de canevas. Toutefois, un suivi exige généralement des données plus précises que celles obtenues par simples estimations visuelles. A cet égard, les techniques de mesures pour la caractérisation des états de surface s'inspirent de celles utilisées par les phytoécologistes :

- Le point quadrat : un cadre métallique muni d'aiguilles verticales est placé sur la placette. Chaque aiguille distante de 5 cm ou de 10 cm (400 ou 100 points par m²) permet de déterminer un point d'échantillonnage pour lequel on note :
 - * la cote de la surface du sol, relevée par rapport à un plan du bâti métallique, ce qui permet une évaluation du micro-relief (celui-ci peut être également caractérisé par un système de lames verticales coulissantes),
 - * les hauteurs des première et dernière interceptions par un élément du couvert (feuille, tige) ; la sommation de cet intervalle sur l'ensemble de la surface fournit une évaluation du biovolume,
 - * le type de surface touchée par l'aiguille : agrégat (diamètre), élément grossier (diamètre), fente, constructions fauniques, résidus, cendres, type de croûte, ...
- Le transect : de mise en oeuvre encore plus simple, cette méthode consiste à relever, tous les 5 ou 10 cm, ces types de surface le long d'un mètre (ou plus) matérialisé au sol par un "mètre" de couturière. Sa précision se trouve accrue lorsque deux transects sont réalisés selon les diagonales (ou les médiatrices) de la placette. Cette méthode convient particulièrement aux surfaces planes et dépourvues de couvert.

La dynamique des croûtes superficielles

Comme pour la prospection cartographique, il peut être utile, lors du suivi des états de surface, d'avoir recours à une typologie des phases évolutives.

Pour les sols limoneux des régions tempérées, BOIFFIN (1984) en distingue 5 :

- F0 : stade initial correspondant à la structure fragmentaire d'un lit de semence, par exemple,
- F1 : structure fragmentaire altérée, en d'autres termes "croûtes structurale à un microhorizon",
- F1-F2 : stade transitoire au cours duquel apparaissent les premières croûtes de ruissellement ou de décantation,
- F2 : croûtes de ruissellement ou de décantation,
- F3 : reprise des croûtes précédentes par l'activité faunique (ou le gel).

En outre, BOIFFIN (1984) propose un indicateur de dégradation de la structure, le calibre minimum D_{min} qui est le plus petit diamètre des agrégats, ou mottes, non encore incorporés dans la croûtes structurale. La détermination de ce diamètre permet, à partir de la courbe de distribution cumulée des diamètres à l'état initial, d'évaluer rapidement le pourcentage de surface encroûtée.

Ces phases d'évolution et D_{min} ont été reliées, dans les régions limoneuses tempérées, à des paramètres d'infiltrabilité. Sous les climats tropicaux, cette méthode semble très intéressante pour les sols dont la structure n'évolue qu'assez lentement sous les pluies (sols argileux stables, par exemple). Elle ne peut être néanmoins appliquée qu'assez rarement du fait :

- de l'abondance des sols à horizon superficiel sableux pour lesquels la déstructuration intervient souvent au cours de la première pluie,
- de la fréquence des pluies violentes tombant sur sol sec, ce qui accélère d'autant les processus de désagrégation par éclatement (LE BISSONNAIS, 1988).

Ces différences de facteurs entraînent des processus d'encroûtement à la fois plus rapides et plus poussés en zones tropicales qu'en zones tempérées (BRÉSSON et VALENTIN, 1990).

Du fait que la typologie des croûtes superficielles, proposée pour les zones arides, est non seulement morphologique mais aussi génétique, chaque type de croûte correspond à un stade évolutif. La séquence en est :

- Etat initial (structure fragmentaire)
- Croûtes structurales (à 1 microhorizon pour les textures fines ; à 2 et 3 microhorizons pour les textures grossières)
- Croûtes de ruissellement (ou de décantation dans les dépressions). Ces deux premières phases qui peuvent durer tout un hiver en zone tempérée sont fréquemment atteintes après une seule pluie sous les Tropiques.
- Croûte d'érosion.
- Croûte grossière. Le décapage de l'horizon superficiel peut survenir en une seule saison de culture, dans le cas de défriche sur sols squelettique en zone soudano-sahélienne (SERPANTIE *et al.*, à paraître).

DISCUSSION ET CONCLUSION

A ce jour, la typologie des surfaces unitaires cultivées, même frustrée, s'est avérée pertinente pour évaluer les pertes en eau par ruissellement et améliorer les modèles de bilan hydrique, non seulement dans sa zone de définition

(VACKSMAN, 1988), mais aussi dans les zones nettement plus arrosées comme la région de savane humide au sud du Togo (PLEUVRET, 1988) et en Côte d'Ivoire (VALENTIN *et al.*, 1990). Il demeure que cette typologie n'a rien de figé et que les nombreuses mesures en cours tant au Mali, qu'au Burkina Faso et au Sénégal devraient permettre de l'affiner.

Cette approche favorise les convergences disciplinaires et le dépassement des échelles de prédilection :

- L'hydrologue ne considère plus les seuls ruissellement et érosion mesurés à l'exutoire du bassin versant, mais aussi à l'échelle des versants et des parcelles cultivées.
- L'agronome, de plus en plus conscient de l'importance du ruissellement ("runoff farming" et récolte de l'eau dans les zones arides, problèmes de pollutions venant de l'amont, ou générées en aval, dans les régions tempérées), tend à situer davantage ses parcelles dans le paysage, et donc dans leur contexte hydrologique.

La caractérisation des états de surface et le suivi de leur évolution appartient à l'arsenal de l'agronome au même titre que le "tour de plaine" ou le "profil cultural". Au reste, il en est indissociable, en sorte que la description des placette d'état de surface devrait s'accompagner, au moins pendant les phases les plus critiques de l'enracinement, de la caractérisation d'un profil cultural.

C'est à l'agronome lui-même d'acquérir ces techniques simples. Quel praticien serait mieux à même de poser un diagnostic (en passant de la description à la prescription), voire un pronostic (de la description à la prédiction) ? Assurément pas le spécialiste des états de surface à qui échappe le foisonnement des contraintes et des objectifs du paysan.

REFERENCES

- Albergel (J.), 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au Km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse doct., 336 p., multigr.
- Albergel (J.), Ribstein (P.) Valentin (C.), 1986. L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et séminaires, 25-48.
- Berton (S.), 1988. La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et microbarrages en Afrique de l'Ouest. GRET, MINECOOP, ACCT, Paris, Dossier N°12, 474 p.
- Boiffin (J.), 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 320 p. + annexes.
- Bresson (L.M.), Valentin (C.), 1990. Comparative micromorphological study of soil crusting in temperate and arid environments. 14th Intern. Congress Soil Science, Kyoto, VII, 238-243.
- C.I.L.S., 1989. Le Sahel en lutte contre la désertification : leçons d'expérience. Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel. Ouvrage collectif dirigé et rédigé par R.M. Rochette. G.T.Z. Weikersheim, 592 p.
- Casenave (A.), Valentin (C.) 1989 Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Collection "Didactiques". 230 p.
- Collinet (J.), Valentin (C.), 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 17(4), 283-328.
- Depraetere (C.), 1990. Etude géomorphométrique du bassin-versant de Booro-Borotou à partir d'un modèle numérique de terrain. In : Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. ORSTOM, Paris, Collection Etudes et Thèses, 59-67.
- Le Bissonais (Y.), 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des

- particules de terres sous l'action des pluies. Thèse, Université d'Orléans, 195 p.
- Mitchell (P.B.), and Humphreys (G.S.), 1987. Litter dams and microterraces formed on hillslopes subject to rainwash in the Sydney Basin, Australia. *Geoderma*, 39 : 331-357, 2 tabl., 11 fig., 48 ref.
- Mitja (D.), Lepage (M.), Valentin (C.), 1990. Mode de gestion des sols et évolution du milieu. In : *Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide*. ORSTOM, Paris, Collection Etudes et Thèses, 247-257.
- Pleuvret (C.), 1988. Infiltration et réorganisations superficielles sous pluies simulées. Cas des sols ferrallitiques du Sud Togo. D.E.A. de Pédologie, Paris, 79 p.
- Serpantie (G.), Tezenas Du Montcel (L.), Valentin (C.), 1988. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral subsaharien sous aridification : conséquences pour les systèmes de production. ORSTOM, Ouagadougou, multigr., 29 p.
- Strossjneider (L.), Hoogmoed (W.B.), 1984. Crust formation on sandy soils in the Sahel. II Tillage and its effect on the water balance. *Soil and Tillage Research*, 4 : 321-337. 1
- Vacksman (C.), 1988. Bipode. Logiciel de calcul des termes du bilan hydrique. IRAY/CIRAD, Montpellier.
- Valentin (C.), 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-Niger). *Dynamique et conséquences sur l'économie en eau* Thèse, Paris: VII, Etudes et Thèses, ORSTOM, 1985, 259 p.
- Valentia (C.), 1985. Effects of grazing and trampling on soil deterioration around recently drilled water holes in the Sahelian Zone. in : "Soil Erosion and Conservation" Soil Conservation Society of America (edit.) : 51-65.
- Valentin (C.), à paraître. Assessing the space and time variations of the surface features and the cultivation profile. IBSRAM Techn. Notes. Training workshop on Site selection, characterization and establishment of experiments for Asialan management of acide soils network. Thailand.
- Valentin (C.), Chevallier (P.), Fritsch (E.), Janeau (J.L.), 1990. Le fonctionnement hydrodynamique aux échelles ponctuelles. In : *Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide*. ORSTOM, Paris, Collection Etudes et Thèses, 59-67.147-163.
- Valentin (C.), Ruiz Figueroa (J.F.), 1987. Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation, in : *Micromorphologie des sols*, AISS/AFES, Paris, 401-408, 5 tabl., 4 fig., 14 réf.

INTRODUCTION A LA DISCUSSION

Par

F. FOREST

Introduction à la discussion

F. Forest

Le travail fait au Sénégal, par J. Albergel, P. Perez, et M. Vaksman, est exemplaire dans la mesure où il fait bien comprendre certains mécanismes agronomiques : liaison entre les cinétiques hydrauliques et des mécanismes de dégradation de la fertilité.

Nous agronomes, devons trouver des techniques en vue d'augmenter la résistance à l'érosion.

L'exposé de P.Perez plus concret, plus technique, nous a montré que de nouveaux modèles pouvaient être pertinents, si les calages et les hypothèses de travail étaient analysés et validés sur le terrain à des échelles multiples.

Un pas en avant a été proposé à travers l'utilisation d'un logiciel.

Il y a bien possibilité de recharge en eau du sol en début de cycle, et donc d'une meilleure prise en compte du risque climatique ; en définitive la stratégie du paysan, on le voit sur le terrain, n'est pas de mettre en place des cultures à très haute densité, mais d'accomplir une performance qui tienne compte de la faible infiltration de l'eau et donc de la vulnérabilité du système sol/plante à la sécheresse épisodique.

Inversement toute politique d'intensification ne prenant pas en compte la nécessité d'augmenter fortement l'infiltration, aura des effets pervers. On connaît les problèmes d'intensification mal raisonnée, en zone climatique identique, où la plante, recevant une fertilisation minérale musclée, a des performances de croissance plus importante et atteint très rapidement un taux de couverture et une hauteur élevée ; elle se retrouve, au moment de la reproduction, soumise à des stress dûs à une colonisation racinaire insuffisante. Nous avons là la clef de cette situation : c'est que nous ne prenons pas assez en compte les pertes de rendement en début de cycle qui conditionnent ce développement racinaire et donc cette résistance de la plante à la sécheresse épisodique. Cela nous rapproche de la réalité paysannale.

Nous constatons en effet l'impuissance des paysans à pouvoir faire rentrer de l'eau dans le sol en début de cycle.

Nous nous retrouvons devant des problèmes socio-économiques : est-ce que la lutte contre le ruissellement n'est pas un luxe pour certains ? ou ne doit-elle pas faire l'objet d'une politique raisonnée ?

Nous avons là un sujet intéressant à débattre. Est-ce à travers une perception à des niveaux d'échelle nouveaux ? Dépassons les notions de parcelle, de bassin versant. Ne serait-ce pas à l'échelle pertinente de la petite région et d'objectifs socio-économiques dont nous pourrions convaincre les décideurs, les bailleurs de fond, les acteurs, les paysans eux-mêmes en développant des référentiels ?

Le constat que nous pouvons faire aujourd'hui est que si nous gérons bien le ruissellement, on aura de fortes chances d'augmenter la productivité et la stabilité du rendement. Encore faut-il que ce soit prévu

Enfin, sur le plan scientifique, une meilleure appréciation de la valeur de l'ETR (Evapo-Transpiration-Réelle) nous permet d'avoir une amélioration des estimations des potentiels de production en biomasse totale, et en biomasse alimentaire.

Par ailleurs, il devient certain que les flux de drainage doivent être considérés comme ayant des capacités de contrainte importantes lors des politiques d'intensification. Il est certain que les excès de drainage diminuent les effets positifs de telles politiques : ce sont des voies pour les pertes en éléments, des contributions à l'acidification.

A travers ces modélisations, nous commençons à nous orienter vers une meilleure caractérisation en milieu paysan de l'alimentation hydrique optimale des cultures.

Voilà donc en résumé quelques idées dont nous aurons à débattre :

Qu'est-ce que doivent faire les agronomes à l'échelle de la parcelle et du champ pour développer un référentiel "Etats de surface/Ruissellement" ?

Quelle type de modélisation et de démarche pluri-disciplinaire faut-il développer, pour que les approches hydrauliques, hydrologiques, agro-climatiques, puissent déboucher sur des capacités d'expertise ayant des retombées concrètes au niveau de l'élaboration des projets ?

Les exposés de J.M. Lamachère et G. Serpantié nous font penser à relancer des études pédo-biologiques sur les conditions des écoulements, par exemple sur le rôle présumé fondamental de dispersion des filets fluides, assuré par les diguettes. En pratique ce rôle devrait s'observer à l'aval autant qu'à l'amont de celles-ci. Beaucoup d'ONG, au bout de trois ans, se rendent compte en Afrique des effets pervers d'aménagements réalisés avec leur bonne volonté.

Par ailleurs, en milieu rural, une des questions à laquelle les développeurs attendent une réponse de nous, agronomes, est celle-ci : qu'est-ce qui fait qu'on peut sécuriser un cycle ?

En ce domaine évitons de considérer la lutte contre le ruissellement comme une panacée. Le problème de la sécurisation de l'alimentation en début de cycle n'est pas résolu. Les agriculteurs, avec les semis tardifs, ont trouvé une solution qui me paraît être assez viable dans la mesure où elle minimise les risques climatiques.

G. Serpentié et ses collègues ont montré que les aménagements pourraient être améliorés, être l'objet d'une étude systématique avec des implications aux niveaux physique, chimique et biologique, d'études sur les dynamiques racinaires et l'assimilation des éléments minéraux.

Avec les techniques proposées par C. Valentin, nous disposons d'un outil permettant de reconnaître des techniques de gestion du sol orientées vers une meilleure sécurisation hydrique. Nous espérons donc que nos collègues pourront consacrer une partie de leur temps et travaux de formation de DEA sur le terrain dans ce domaine là, et qu'ils feront le maximum pour que ce soit intégré dans la formation scientifique des spécialistes. A terme nous avons pour ambition de développer ce type de référentiel hydro-écologique, contribuant à améliorer la quantification des caractéristiques et potentialités d'un milieu.

Je crois que tous les éléments de la problématique sont sur la table et je pense qu'ils doivent être raisonnés en terme de paysage, de transferts, de mécanismes. Tant mieux si les modélisateurs ont des idées et si l'informatique a fait des progrès, car il y a du travail sur la table !

Le débat est ouvert.

Discussion

B. Pouyaud voudrait resituer, sinon relativiser, la portée et la pertinence de certaines des remarques et des exposés précédents par rapport à deux exigences, à son avis insuffisamment prises en compte :

(i) la critique locale multi-échelle des résultats observés.

(ii) le recours préalable à la bibliographie "naturelle", c'est à dire aux enseignements contenus dans l'auto-organisation du milieu naturel ou dans le fonctionnement d'aménagements de certains terroirs traditionnels pas forcément sub-sahariens.

Sur le premier point, par exemple, B. Pouyaud apprécie comme tous l'enthousiasme juvénile contenu dans un exposé découvrant le fonctionnement d'un certain nombre de banquettes. Mais il pense que l'on peut relativiser l'intérêt de ce qui a été dit, tant sur l'influence aval des banquettes, que sur leur influence amont. Ces effets sont de natures différentes et pas forcément de même sens : ce qui paraît être un objectif de recherche intéressant, c'est donc d'être capable de développer un modèle du ruissellement et de l'érosion pour l'ensemble du système.

B. Pouyaud regrette aussi que la pente des parcelles soit ignorée dans les exposés de l'expérience Bidi et de celle du Sénégal, alors qu'elle est différente dans les deux cas.

B. Pouyaud voudrait aussi rappeler les incompréhensions anciennes, aujourd'hui dépassées, qu'il y avait entre hydrologues et agro-climatologues, lorsque ces derniers demandaient aux hydrologues de leur fournir à l'échelle de la parcelle ou du champ, des coefficients de ruissellement.

B. Pouyaud constate que les hydrologues "des fleuves et rivières" ont fait le plus long du chemin pour aller au devant des hydrologues "de la parcelle". Il se félicite des progrès accomplis et de voir comment des résultats stationnels, "ponctuels", obtenus au mini-simulateur de pluies pouvaient désormais être utilisés pour caler les modèles hydro-agronomiques de P. Pérez.

B. Pouyaud pense néanmoins qu'il peut désormais être admis par tous que les résultats du mini-simulateur de pluie (1 m²) ne peuvent intégrer les effets des hétérogénéités locales d'échelle décamétrique. Déjà alors, une bonne représentation conceptuelle, un modèle, devrait être associée aux résultats expérimentaux de simulation : le simulateur de pluie est plus souvent installé sur les bosses que dans les creux, alors qu'il s'agit de représenter le fonctionnement du système complet.

Concernant les enseignements à tirer du milieu, ou d'aménagements traditionnels en dehors des expériences de l'Afrique de l'ouest, B. Pouyaud rappelle d'abord les pratiques millénaires des paysans tunisiens, algériens, marocains, dont

l'expression sans doute peu scientifique se traduit néanmoins par des recommandations précises sur l'intervalle des lignes de terrasses. Des enseignements sont aussi à tirer de la gestion déjà ancienne des terroirs des piémonts équatoriens.

De même la brousse tigrée africaine lui semble-t-elle une réponse naturelle de l'environnement, à examiner pour la lutte contre l'érosion.

En conclusion, pour B. Pouyaud, le rapprochement entre le sud et le nord du Sahara serait probablement aussi producteur de synthèse scientifique que le rapprochement entre le nordeste brésilien et l'ouest africain.

G. Vachaud reconnaît que le travail de C. Valentin et A. Casenave est extrêmement intéressant par son applicabilité. Mais il a peine à croire que l'on pourra continuer à avancer beaucoup dans la compréhension et la modélisation des mécanismes de ruissellement tant qu'on ne prendra pas en compte les mécanismes de l'infiltration. Il se dit frappé par le fait que les paramètres qui sont utilisés sont peut-être faciles à mesurer mais ne sont sûrement pas pertinents en ce qui concerne l'infiltration dans le sol. Il pense donc à une réflexion prioritaire à mener pour mieux comprendre et mieux quantifier les paramètres qui conduisent à infiltrer l'eau dans le sol, avant de passer au ruissellement. Ce n'est probablement pas le paramètre "pluies cumulées" par exemple, qui est une de ces grandeurs facilement utilisables.

O. Planchon veut préciser pourquoi il ne s'intéresse pas en priorité à la ligne de plus grande pente comme facteur du ruissellement. En effet les sarclages sont à peu près isohypses et font donc des barrières au ruissellement direct le long de la pente globale. Après une bonne pluie il y a constitution de réservoirs continus quasi-isohypses dont la vidange brutale et localisée est très néfaste. C'est donc la constitution et l'extension latérale de ces chenaux qu'il faut éviter.

Il regrette que l'effet aval des diguettes n'ait pas fait l'objet de plus de littérature, même si on a beaucoup travaillé dessus. Par contre trop de conclusions péremptoires sont exprimées en termes de pourcentages sur l'effet de telle diguette par rapport à telle autre. Il pense qu'il faut raisonner en terme de phénomènes.

O. Planchon veut aussi dire à G. Vachaud, qu'il pense lui aussi, qu'à cette échelle là, la prise en compte de l'infiltration est absolument fondamentale.

Au sujet de l'infiltration, **J. Rodier** rappelle que, dans beaucoup de zones tropicales, avec l'intensité reconnue des pluies, avec leurs sols et avec l'existence de croûtes dans certaines zones, les pluies infiltrent le mm ou les 3 mm supérieurs et ensuite ruissellent. C'est le cas rencontré dans les études de crues en zone sahélienne avec des sols beaucoup plus couverts de croûtes que prévu.

Le modèle qui consiste à envisager que les crues éventuelles sont liées au dépassement de la capacité d'infiltration d'une couche de sol, peut exister comme à Boroo-Borotou.

J. M. Lamachère ne croit pas que les relations définies à Bidi soient généralisables. En effet, le cas est particulier avec un sol sableux, (profond et filtrant), mais avec en profondeur des niveaux plus chargés en argile.

Comme beaucoup de sols de la zone sahélienne, ils sont cultivés en billon. La quantité de pluie tombée restructure le sol en surface. Plus il a plu, sur un intervalle de temps quelconque, plus la surface du sol est transformée.

Il lui semble que les relations fondamentales dans une simulation de pluie sont des relations d'intensité c'est à dire de vitesse, relations entre la vitesse de ruissellement et la vitesse d'infiltration et non pas relations entre lame ruisselée et hauteur de pluie.

Perez veut répondre aux questions qui ont été posées concernant (i) la validation spatiale et (ii) les capacités opérationnelles de son modèle.

(i) La qualité de la représentation spatiale est assurée par une reconnaissance préliminaire hydro-pédologique de ce petit bassin de 1,5 ha. La structuration s'appuie principalement sur les états de surface. Le rôle exact d'un chenal devra être précisé, par une simulation tenant compte des termes apports, infiltration, ruissellement. Six points "représentatifs" de ce bassin sont retenus pour des mesures intensives.

Un seul sur six diagrammes a été présenté ; l'interprétation n'en est pas affaiblie, malgré quelques petites différences liées à la texture du sol de chaque profil.

Une thèse a montré par des études géostatistiques sur ce genre de modèle, que les mesures de flux sont très variables au voisinage des crêtes cloisonnées des billons. On en tient compte par des fonctions d'étalement.

On voit donc qu'on a des calages ponctuels, mais que l'on a toujours tenu compte des caractéristiques naturelles du bassin versant.

(ii) L'ambition du modèle est évidemment d'être facilement opérationnel. Ceci a conduit à tenir compte du ruissellement et non de l'infiltration.

M. Vauclin souhaite revenir sur les stratégies de recherche, dont l'un des aspects est le choix d'un modèle, dit par exemple "d'infiltration" ou de "ruissellement". Le débat n'est pas sans rapport avec celui d'hier sur les problèmes de modélisation.

L'important, à partir de l'identification de l'objet naturel étudié et en fonction des objectifs visés, est que l'ensemble des autres choix méthodologiques soient tout à fait cohérents.

Comme il y a six ans, M. Vauclin pense toujours que, du point de vue de la physique, une pluie qui tombe à la surface d'un sol va avoir préférentiellement tendance à s'infiltrer: c'est la mécanique des fluides élémentaires ; c'est quand

elle ne peut plus suffisamment s'infiltrer, qu'elle va commencer à ruisseler. A partir de cette reconnaissance physique il est possible d'utiliser une schématisation type équation Richards qui reste une schématisation, qui peut paraître déjà compliquée. Pour que ça soit cohérent au niveau de l'entrée dans l'équation de Richards, nous retiendrons des flux c'est à dire des intensités de pluie.

Si par contre nous sommes amenés à choisir un modèle de type capacitif, ce que l'on a pu voir sur les relations entre lame ruisselée et intensité de pluie peut être largement suffisant puisque c'est la notion de capacité qui est utilisé.

Par contre il y aura problème pour la validation : on est capables de mesures de concentration, d'eau, de substances chimiques. Nous sommes intéressés à celle des flux in situ. Donc comment pouvoir valider un modèle mettant en jeu des flux à partir de mesures qui sont des concentrations? C'est l'un des problèmes qu'à la communauté au niveau de la validation de quel que type de modèles que ce soit. On n'a pas accès in situ à une mesure de flux de drainage, sauf pour certains cas particuliers de dispositifs.

Y.M. Cabidoche est surpris d'avoir entendu parler de cartographie de surface pour les agronomes, mais pas de caractérisation hydrodynamique du profil "cultural". On a bien évoqué des couches qui ont été travaillées, milieux poreux modifiés singulièrement au moins au départ par rapport à ce qui est en place. C'est un milieu qui a une limite inférieure qui elle-même a des propriétés différentes. Aussi bien en milieu tempéré que tropical, des phénomènes essentiels au point de vue hydrodynamique se passent dans la couche travaillée et à sa limite.

A. Casenave précise que C. Valentin, de formation agronomique, en tient compte dans ses descriptions.

Un intervenant souhaite que l'on revienne sur les objectifs de l'aménagement du versant cultivé. En écoutant les conclusions de Lamachère et Serpentié, accorder une préférence aux diguettes cloisonnées, il se demande si il faut entendre par là qu'il y a un classement absolu des techniques, les bonnes, les moins bonnes...

Au Sénégal on ne souhaite pas classer les techniques d'aménagement, dire que telle technique est plus appropriée. Dans le cas de certains terroirs le manque de pierres caractérise les zones basses de cultures alors que les hauts de toposéquences en sont pourvues : faut-il absolument aménager en banquettes les zones basses ?

Ne peut-on parler de combinaisons pertinentes de techniques, plutôt que de classement?

F. Forest répond qu'effectivement on doit se garder de hiérarchiser et récompenser une technique plutôt qu'une autre.

L'objectif proposé est : infiltrer, faire des racines, garder les éléments fertilisants. Les techniques pertinentes (au sens agro-socio-économique) à utiliser dépendent du milieu (s.l.).

Par exemple au Sénégal, en saison sèche où les gens ont un peu de temps, et il y a place pour un travail de grattage du sol. On prend en compte le facteur temps et la capacité de main d'oeuvre qu'il faut utiliser sur l'année entière.

G. Serpantié souhaite rappeler des données en rapport avec la fertilité, au Yatenga.

Au plan hydrodynamique, les champs sont sur des sols sableux, avec des apports de ruissellement de l'amont très importants, qui risquent d'être catastrophiques.

Les paysans, dans un système de production extensif permettant un rendement de 4q/ha, n'ont pas les moyens de mettre des matières organiques dans le sol, donc de passer à une intensification classique de type labour. On est donc amené en fait à recommander des pratiques qui visent le seul bilan hydrique.

Cela n'empêche que le labour a un effet pratiquement aussi intéressant que les diguettes même si parfois il peut causer des dommages importants en entraînant des charriages dans les conditions locales.

Le labour, même s'il est efficace ailleurs avec une intensification classique, pose des problèmes dans cette région.

P. Mérot pense que c'est l'ensemble du doublet infiltration - ruissellement qui doit être pris en compte à l'échelle de la parcelle.

A l'échelle d'un Bassin Versant, il y a aussi une clarification à faire dans la terminologie sur le terme ruissellement. On a vu dans un exposé les hydrogrammes dits de "ruissellement" déterminés avec la droite semi-logarithmique. Les anglophones ont par rapport au ruissellement un choix de termes à proposer qui permettent de définir plusieurs types de ruissellements, suivant leurs origines. Les scientifiques ont intérêt à clarifier ce qu'ils entendent par ruissellement. Il est conseillé de ne plus appeler ruissellement le gonflement d'un hydrogramme et d'essayer de distinguer ce qui est ruissellement hortonien des autres types de ruissellement.

B. Pouyaud constate de nouveau que les hydrologues (des rivières) parlent maintenant de parcelles, d'état de surface.... et y effectuent des mesures, dont on peut espérer qu'elles ont un sens opérationnel pour leurs objectifs scientifiques propres.

Il subsiste des difficultés, pour leur dialogue avec les hydrologues des parcelles. Mais faut-il espérer autre chose qu'une bonne compréhension des problèmes des uns par les autres?

Force est de constater que les divergences de langage, de stratégie scientifique, s'expliquent par des objectifs divers, concernant des objets de tailles trop différentes.

J.M. Lamachère s'interroge sur le résultat d'une expérience pour prévoir le comportement d'une parcelle décomposée en surfaces élémentaires, à partir de la sommation de données élémentaires de simulation de pluies extraites du catalogue de Casenave et Valentin. On s'est aperçu qu'à l'aval de la parcelle expérimentale il y avait plus de production d'eau qu'en réalité la parcelle ne pouvait en produire dans le modèle. Donc un autre phénomène est apparu avec la modification de l'échelle.

P. Chevallier souhaite contribuer à la synthèse en demandant que l'on oublie un peu les modèles.

On parle beaucoup de modèles, que ce soit à l'échelle ponctuelle, du BV, du bassin, de la parcelle. Mais finalement tous ces modèles vont privilégier un type de fonctionnement qui va être pré-déterminé à l'avance, et aucun de ces modèles n'intègre l'ensemble des fonctionnements de ce que l'on appelle, à Boro-Borootou, les chemins de l'eau, selon la traduction de l'anglais.

La préoccupation de P. Mérot est claire : avant d'essayer d'expliquer, de tirer des conclusions, de construire un modèle, il faut s'intéresser à ce que fait l'eau. Alors que l'on parle de ruissellement, est-ce vraiment de l'eau qui a coulé à la surface du sol? Alors que l'on a une source, est-ce que c'est bien un écoulement de nappe ? ou plutôt un drainage à travers un système de macroporosité, macroporosité faunique ou interstitielle dans une couche d'altération .

Toutes ces choses s'avèrent très compliquées et existent aussi bien en zone sahélienne où l'écoulement de surface est pourtant privilégié par les croûtes, mais aussi dans des zones extrêmement cultivées comme au Brésil. Il y existe des bassins cultivés à 100%, avec des pratiques anti-érosives si bien qu'on y a une infiltration considérable, mais aussi des débits de crues considérables.

Pour P. Chevallier, observer et expliquer tout cela est beaucoup moins simple que les seuls problèmes d'infiltration ou de ruissellement, ou qu'un type de modélisation.

F. Forest reconnaît aussi, pour les agronomes concernés par l'alimentation hydrique dans les périmètres irrigués, la nécessité de prendre du recul et de mettre en place des dispositifs d'observation.

Ainsi, au Tchad, il est illusoire de vouloir proposer à la SONASUT un bilan hydrique et un modèle d'irrigation d'un périmètre sucrier, à l'échelle de 6000 ha, proches des écoulements et des crues du fleuve Chari, sans contrôler sérieusement l'évolution de la nappe. On dispose du savoir-faire du BRGM qui dispose de modélisation ou de méthodes de suivi piézométrique, mais c'est bien

peu. Il faut donc observer le flux hydraulique susceptible de conditionner le fonctionnement de systèmes végétaux, dans les cinq premiers mètres du sol.

Il faut remettre tout à plat et reconsidérer les flux de drainage, les écoulements, les inféro-flux. On doit relancer l'idée de toute une agro-hydraulique des périmètres intensifiés, où le mm d'eau coûte cher parcequ'il est pompé ; où le kilo, le gain de productivité d'une unité représente le "cash-flow".

Dans le domaine de la gestion, on est au pied du mur, et il y a à faire tout un travail méthodologique transdisciplinaire.

Ne nous cachons pas qu'il y aura de plus en plus une demande du secteur productif, privatisé ou non, en milieu tropical, qui sera demandeur d'une recherche qui rapporte. Nous avons donc à réfléchir sur des méthodes de diagnostic et plus tard sur des modélisations à la fois pertinentes et pragmatiques.

Table ronde



**Le rôle d'un réseau de recherches
dans la lutte contre la sécheresse
en Afrique de l'ouest :
cas du R3S**

Introduction

F. Forest introduit la table ronde en rappelant qu'une gestion de l'espace, et plus précisément une irrigation mal conduite en zone aride, ont mené à leur perte de grandes civilisations.

La réflexion sur les activités agricoles en zone aride est donc un enjeu important pour la Recherche, française en particulier : problématiques de l'irrigation, de la culture de décrue, de la culture en condition aride.

Il faut se poser la question de savoir si des systèmes agraires - de cultures conduites sous une forte luminosité et une faible couverture, et donc une forte proportion de flux évaporatif et une faible transpiration - sont bien des systèmes qui garantissent le futur.

Les études dans ces milieux des mécanismes de l'infiltration, des réseaux d'irrigation, de la salinisation des sols, amèneront peut-être à conclure sur l'effet pervers d'une activité de production complémentaire en dehors de l'aspect socio-économique positif à court terme.

Après cette introduction, **F. Forest** propose que les collègues du CIRAD et de l'ORSTOM, en charge de la coordination du Réseau R3S et du Projet fédérateur "Bassins versants" puissent présenter ces dispositifs et leur rôle, qu'ignorent certains des participants.

Au cours de la discussion qui suivra, il sera proposé une réflexion sur les recherches communes susceptibles d'être développées dans les matières agronomique, hydraulique, hydrologique.

**Le rôle du R3S
(Réseau de Recherches sur la Résistance à la sécheresse)
dans la Programmation des Recherches : Jacques Claude**

J. Claude, à travers l'exemple de R3S et du sous-réseau "Bassins versants" de R3S, se propose de présenter la façon dont on peut concevoir le montage d'un programme dans le cadre d'un réseau de recherches, et l'intérêt de mener ces opérations sous forme de ce qu'on appelle les projets fédérateurs.

Pour un bref historique,

J. Claude précise qu'il a participé à la création et s'est occupé de R3S au début, en 1985, jusqu'en 1989. C'est M. Rieu qui assure maintenant la coordination de la partie du sous-réseau "bassins versants".

R3S est un réseau associatif de Recherche dont l'origine remonte à un colloque, en gestation deux ans durant, qui s'est tenu à Dakar avec des agronomes, sur le défi de la sécheresse. Il est important de constater que c'est une initiative partie des chercheurs. Confrontés à un même problème, dans la même région (la zone sahélienne), ceux-ci souhaitaient échanger le maximum d'informations et de réflexions pour mieux résoudre un problème commun. C'est donc à l'origine un réseau associatif, et non institutionnel.

Il bénéficie cependant des parrainages du CILSS (Comité Inter-africain de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) et de la CORAF (Conférence des Responsables de la Recherche Agronomique Africains). Ce soutien institutionnel permet de mieux appuyer les propositions de projets, par exemple auprès de la CEE -qui a financé l'émergence du réseau puis les principaux projets fédérateurs- et auprès du Ministère de la Coopération de la République Française, via la CORAF.

Le R3S est un réseau thématique, et son intitulé affiche son thème général, "la Recherche sur la Résistance à la Sécheresse". Il s'agit de savoir s'adapter, vivre avec la sécheresse, co-exister avec des conditions climatiques sur lesquelles on ne peut agir, c'est à dire d'essayer de maintenir ou améliorer les productions agricoles, simplement en utilisant au mieux l'eau disponible.

Utiliser au mieux l'eau, cela veut dire mener des recherches sur les processus à tous les niveaux qui permettent d'utiliser l'eau pour la production agricole, évapo-transpiration y compris. Donc il s'agira de recherches sur des stratégies, sur des technologies d'adaptation mais replacées dans un contexte, un environnement aussi bien socio-économique qu'écologique.

Le sujet est très vaste : il s'agit de l'ensemble de la recherche agronomique en zone sèche! R3S n'avait pas les moyens de cette ambition. Il a été amené à préciser, à resserrer les champs de recherches en définissant trois niveaux pertinents auxquels pouvaient s'appliquer les investigations.

1er niveau : La parcelle, c'est à dire le champ du paysan, dans la situation expérimentale.

2ème niveau : Le bassin versant, pris comme élément du paysage, où l'eau circule, se redistribue, et est utilisée. Cela peut être un bassin versant, mais aussi un élément de bassin versant, voire simplement une toposequence sur un versant.

3ème niveau : C'est le niveau du système de production, qui prend en compte cet environnement socio-économique et écologique, et la possibilité de transferts de ces techniques sur lesquelles on veut travailler en milieu-paysan. On sait que toute technologie non assimilable par le milieu sur lequel elle est appliquée, est systématiquement vouée à l'échec.

Dans le cas de l'utilisation de l'eau, la méthode de R3S sur la conduite des recherches consiste à considérer l'ensemble de ce qu'on appelle les facteurs et les acteurs de la production agricole.

A l'échelle du bassin, on privilégie l'étude des paysages, des relations sols/plantes etc..

Il s'agit de comprendre l'ETR productive, celle qui passe par la plante ; de diagnostiquer les freins, les problèmes de blocage à l'utilisation optimale de l'eau par la plante. Cela amène à mesurer, simuler et identifier où se situent les "Gaps", sur lesquels il faut faire porter les recherches et études pour améliorer, réduire les écarts entre les rendements espérés (établis par les modèles) et les rendements observés. Par exemple, si l'on n'arrive pas à faire 2 à 3t/ha alors que les conditions de climat, de sol, de disponibilité en eau le permettent, on s'attache à réduire ce "gap" par la mise en oeuvre d'un certain nombre de méthodes et techniques, de tout le "paquet" technologique.

Le rôle du réseau est de permettre de confronter les expériences, les résultats, et de voir quelles sont les technologies appropriables, adaptables etc...ce qui est un des effets bénéfiques du réseau en dehors du montage du projet tout court.

Pour rassurer B. Pouyaud qui déplorait le faible niveau d'échange entre le nord et le sud du Sahara, un exemple est cité : dans le cadre d'un projet au Cameroun rattaché au R3S il y a échange de technologie ; un maçon tunisien spécialiste de la construction de citernes de ruissellement s'est rendu au Nord-Cameroun, pour voir comment on pouvait adapter cette technique d'utilisation de l'eau dans le contexte du Nord-Cameroun qui est très voisin pour les conditions climatiques et de ruissellement, mais différent pour les pratiques agricoles, de production et autres. Donc c'est à travers un réseau que des échanges, y compris de technologies, peuvent se produire.

Définition de la thématique Bassin versant à R3S

Les programmes à soutenir au niveau du bassin versant, ont été identifiés à partir d'un questionnement conjoint d'hydrologues et d'agronomes dans une optique de recherche-développement bénéficiant à l'amont de résultats de recherche extrêmement pointus. Un premier atelier de programmation "R3S/Bassins versants" s'est tenu à Ouagadougou pour identifier des thèmes et y regrouper des propositions de projets élaborés par les différentes équipes qu'on avait contactées.

Le thème dit "bas-fond", ou encore "Fonctionnement hydrologique d'aménagement agricole de bas-fond" était le premier. Il était basé sur un constat datant de 1983, ou peut-être un peu avant, sur le fait qu'avec la sécheresse, les cultures avaient tendance à se déplacer là où il y avait de l'eau disponible c'est à dire les bas-fonds. Ce premier constat montrait la mise en exploitation des bas-fonds, zones traditionnelles de pâturages de début de saison des pluies par des cultures de sorgho et de mil avec des outils mal adaptés. Le problème de l'aménagement des bas fonds semblait très important et a donné lieu au montage d'un Projet dénommé par la suite fédérateur. De nombreux exposés entendus hier et ce matin, sont des résultats des différents éléments de ce projet fédérateur, c'est à dire la Casamance, Bidi etc...

Le deuxième thème qui nous semblait important aussi était le suivi bioclimatique des écosystèmes pastoraux avec l'intérêt d'un diagnostic en temps réel sur l'état d'évolution des écosystèmes. Ce sujet a été important pour ceux qui font de la télédétection, à AGRHYMET, à l'EMVT etc. Ce thème n'est pas devenu un projet fédérateur R3S bassin versant, mais des liaisons régulières se sont établies avec des chercheurs avec qui il est toujours intéressant d'échanger des résultats.

Le troisième thème, "Ruissellement et Infiltration", est l'étude des mécanismes ; il s'agit de comprendre pour mieux aménager un versant. Ce domaine a été abordé ce matin et l'on peut citer les diguettes, cordons pierreux, et épandage de crue. C'est le deuxième projet fédérateur dans ce sous-réseau.

Le quatrième thème est lié à la variation de la pluie. Il faut connaître la répartition de la ressource et donc étudier la variation spatiale très fine de la pluviométrie. En fait ce volet est celui du projet EPSAT avec diverses composantes. Ce n'est pas un projet fédérateur de R3S, et il n'est pas contrôlé uniquement par R3S, mais il est évident que les liens, avec EPSAT et HAPEX, avec la télédétection de l'ETR des plantes, sont importants.

R3S et le montage de projets

Les premières propositions ont été faites à l'occasion du lancement de l'appel d'offre du programme STD (Sciences et Techniques pour le Développement) de la CEE.

Or, la démarche associative de conception des projets, qui est celle de R3S, favorise les synergies entre plusieurs organismes, ce qui est tout à fait dans la stratégie de la CEE. Les projets présentés ont donc rencontré un certain succès puisque à l'heure actuelle, sur l'ensemble des projets proposés par R3S au financement STD/CEE, il y a six (6) projets fédérateurs financés, pour un total de 2 millions et demi d'ECUS. Il y en a un septième (7ème) depuis juin.

Un montage de projet, dans ce contexte, où il faut bien expliquer ce qu'on veut faire, qu'on le fait en coopération etc.. peut se traduire par des interventions pluridisciplinaires et multi-organismes, en pratique assez compliquées à gérer, sinon à concevoir.

Par exemple le Projet Bas fonds, suivant le contrat passé avec le STD/DGXII/CEE, intègre les acteurs suivants :

- le CIEH, Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques
- l'université de Wageningen en Hollande,
- l'université de Gembloux en Belgique
- l'INERA du Burkina Faso, l'IER de Bamako, l'ISRA Sénégal,
- CIRAD, ORSTOM,

Cet exemple porte à l'optimisme sur la possibilité de frotter les disciplines les unes aux autres et de les faire évoluer. Cela dure depuis cinq ans. Il est frappant de voir les positions et théories dominantes de certaines disciplines évoluer, et l'hydrologie n'est pas la dernière à l'avoir fait.

Mais il ne faut pas nier les difficultés. Beaucoup de monde, une quarantaine de personnes, sur un tel projet, à 100% ou un peu moins de 100% de leur temps, qui ont tous leur avis à donner y compris sur les problèmes de gestion : le partage des ECUS par les organismes.

Il y a surtout des problèmes de coopération scientifique sur les méthodes de travail, sur les approches thématiques et autres. Il y a toujours des affrontements. A Ouagadougou, la coopération du type "que faire ensemble ? : vos résultats/nos interprétations",...nécessite une mise au point préalable.

Les associations avec les partenaires des organismes de recherche agronomique des pays d'accueil des programmes sont parfois difficiles à gérer. Ces partenaires ont leurs difficultés propres mais également des approches différentes: entre l'IER, Institut d'économie rurale, ou l'INERA plus calquée sur une structure type filiale de production, il y a des disparités. Donc en dehors des contraintes matérielles et financières, les principales difficultés dans ce style de

coopération tiennent à des différences de conception, de méthodologie, de stratégie de développement.

Premiers bilans et perspectives

C'est maintenant le terme d'une étape du réseau R3S, qui s'est beaucoup développé, et a soutenu des opérations dont la programmation arrive à la fin d'une première phase : programmes "Bas-fond", sur les techniques anti-érosives, la conservation des sols etc., qui pratiquement sont tous en voie de s'achever courant 91, fin 91, début 92 au plus tard pour les dernières tranches du programme bas fond.

Il faut dès maintenant faire les premiers bilans de toutes ces actions, penser à la suite, aux progrès à réaliser encore pour la mise en oeuvre de techniques pour l'adaptation et la résistance à la sécheresse, à la poursuite de Recherches pertinentes à identifier.

Ces réflexions d'étape sont imposées par le calendrier, puisque c'est en mars/avril 1991 qu'aura lieu le lancement du 3ème Programme cadre de Recherche européen, dans lequel figurera un programme Sciences et Technologie du vivant pour les pays en voie de développement. L'expérience nous rappelle que l'identification des programmes, en février 1987, a été suivie de propositions de recherches fin 88, et enfin d'un démarrage sur le terrain mi 89. Pour se préparer à une réponse à des appels de proposition de recherche pour mars/avril 91, il faut déjà commencer à faire la programmation de ces appels d'offres pratiquement dès maintenant ; il faut démarrer à peu près avec six mois d'avance.

En conclusion,

J. Claude espère que son exposé, même peu scientifique, apportera aussi sa contribution aux débats de la matinée concernant les problèmes posés par la prise en compte des objectifs de chacune des disciplines, à l'occasion d'un même Projet.

Le rôle du R3S dans les études sur le Bilan hydrique : F.N. Reyniers

F.N. Reyniers, animateur de R3S pour le sous-réseau "parcelle", se propose de revenir sur des aspects plus techniques, d'essayer de faire le lien entre ce qui a été dit au cours de ces journées, et un certain nombre de documents, de réflexions et de synthèses, préparés à l'occasion d'un atelier à Bamako sur la parcelle, pour préparer de nouveaux projets.

Les concepts à R3S

L'ETR (Evapo-Transpiration Réelle) est bien le mot fétiche du réseau au niveau de la parcelle, mot fétiche car fédérateur de tous les agronomes et scientifiques qui veulent essayer d'améliorer les cultures, et leur résistance à la sécheresse au sens large.

A ce sujet on s'est aperçu que les notions de résistance à la sécheresse définies par les écologistes avaient peu de pertinence pour l'agronome. Les écologistes s'intéressent essentiellement à la pérennité d'une espèce d'une année à l'autre, alors que les agronomes s'intéressent beaucoup plus à la productivité, à la quantité de matière produite. On retrouve ici un débat sur la pertinence des concepts, variable d'une discipline et d'un objectif à l'autre.

Pour les agronomes par exemple, au niveau de la parcelle comme à plus grande échelle, ce qui fait pousser les plantes, c'est surtout l'eau consommée. Pour un milieu sec et une céréale donnée, compte tenu d'une certaine déficience en eau, on aura intérêt à se représenter la productivité comme une fonction du taux effectif d'alimentation hydrique exprimé en ETR/ETP pendant la phase critique, celle de la formation du grain,

Les acquis à R3S

F.N. Reyniers a été frappé par les progrès accomplis dans la quantification des phénomènes. C'est un point très positif et qui concerne aussi bien les échelles "parcelle" que "bassin versant". F.N. Reyniers rappelle que la gestion, la maîtrise des productions, passent par la quantification pour les comparaisons et les transferts ultérieurs de résultats.

Au niveau bassin versant il s'agit de la quantification des trois flux, dont on suit la variation : la transpiration plus l'évaporation au sol (l'ETR), le drainage et le ruissellement. Les chiffres d'Albergel et de Pérez sont frappants de précision.

Au niveau de la parcelle, au Mali, comme au Togo un résultat expérimental est que la productivité du maïs augmente pratiquement de façon exponentielle avec l'augmentation d'ETR. Et en passant de 300 à 400mm on passe de 500kg/ha à 3,5t/ha de production. Cela signifie que chaque mm d'eau produit 20kg/ha de matière en moyenne.

Ce chiffre est à rapprocher de celui cité par G.Serpantié, pour le Yatenga, où l'on vise les 400kg/ha en conditions extensives.

Les difficultés et les prochaines recherches à R3S

Pour F.N. Reyniers trois domaines paraissent mériter des réflexions complémentaires, et constituent des thèmes possibles de prochaines recherches : il y a l'approche hydrologique bas-fond, les relations fertilité-bilan hydrique, l'extrapolation des résultats de recherches aux projets de développement.

Les difficultés de l'approche hydrologique bas-fond, sont traduites par le fait, assez frappant, qu'on n'a pas vraiment parlé des bas-fonds pendant ces deux jours. Pourquoi?

Il y a bien un projet bas-fonds intitulé "Fonctionnement hydrologique des bas-fonds en vue de l'amélioration agricole".

F.N. Reyniers se demande par contre si il existe encore beaucoup d'hydrologues de bas-fonds, comme en témoigne l'absence de la plupart des intéressés aujourd'hui. Parmi ceux qui se sont occupés du projet en Afrique, certains ont conclu que finalement ce n'est pas un problème hydrologique mais un problème socio-économique.... Dans le cadre de l'ATP PIREN à Madagascar, les chercheurs qui ont travaillé pendant 4 ou 5 ans sur les bas-fonds ont conclu que ce n'est pas un problème d'eau, mais de nutrition minérale....

Inversement à l'IRAT les chercheurs qui s'occupent du riz par exemple veulent repartir à zéro et recommencer une approche bas-fond. Ils pensent que pour sélectionner le riz il faut connaître la fluctuation de la nappe, le fonctionnement hydrologique d'un bas-fond.

Il y a là une contradiction qui est soumise à l'assemblée. Qu'est-ce que l'approche hydrologique peut apporter de manière concrète à l'amélioration agricole des bas fonds?

Les relations bilan hydrique - fertilité constituent un thème qui est ressorti pratiquement dans toutes les conclusions des chercheurs qui travaillent sur les projets bassins versants. Cette interaction est importante mais assez mal connue. Pour l'IRAT, un exemple-type d'interaction est l'effet des flux hydriques, en particulier du drainage sur l'acidification. C'est important dans le cadre du futur, car ce problème d'acidification, quasi-ignoré en Afrique, est présent dans

d'autres continents tropicaux, où il se produit en particulier dans le cadre d'une intensification des productions. C'est donc un problème potentiel mais sous-estimé par les agronomes puisque il suffit, la recette est connue, de remettre de la matière organique et de la chaux si on en a les moyens. Est-ce toujours le cas ?

Si non, en culture continue dans les sols tropicaux, on a une lixiviation des éléments minéraux en particulier le calcium, donc une acidification. Celle-ci, dans beaucoup de sols, se traduit par une augmentation de l'activité de l'aluminium, qui elle même provoque un dysfonctionnement racinaire au niveau de l'absorption hydrique, et donc une baisse de l'alimentation.

Il s'ensuit une chute de productivité, une réduction de la surface foliaire et de l'eau utilisée à pluviométrie égale, donc une augmentation du drainage, d'où nouvelle lixiviation et nouvelle acidification . C'est un système pervers et négatif.

La transposition des résultats constitue le troisième et dernier grand point sur lequel R3S devra faire porter les efforts des équipes. Caractériser les situations, les bassins versants, avec trop de paramètres conduit à interdire aux sociétés de développement et aux paysans l'usage des produits de la recherche.

Donc il reste le souci de trouver, à partir de la caractérisation de quelques paramètres simples, comment dimensionner les aménagements dans un projet de développement etc...

Il y a là une justification à la modélisation. On peut critiquer évidemment la modélisation en tant qu'outil scientifique parce-qu'elle a trop tendance, comme certains l'ont dit ce matin, à simplifier, à ne plus regarder les phénomènes, mais elle peut servir par contre pour le Développement et l'extrapolation.

Les programmes de financements et le R3S

Deux grandes directions sont intéressées à la Recherche en Afrique à Bruxelles (CEE): la DGXII, que tout le monde connaît car c'est elle qui a financée le STD, et la DGXVIII dont J. Claude n'a pas parlé.

Cette dernière Direction Générale s'occupe des aspects Développement de la Recherche au plan des équipements et des infrastructures de recherches : car vouloir favoriser des thèmes de développement , c'est donner priorité à certaines infrastructures de recherches.

Il y a donc une demande de cette Direction Générale pour qu'on lui soumette des projets qui concernent des bases , des terrains-pilotes pour développer des recherches. L'installation d'infrastructures sur un bassin versant peut être envisagée comme pouvant faire l'objet d'un projet de financement.

Introduction à la discussion

F. Forest

Avant que les discussions sur les présentations précédentes ne soient engagées, **F. Forest** note que F.N. Reyniers, à partir de son expérience en matière de coordination du réseau, a proposé des orientations et des réflexions complémentaires.

L'amélioration du fonctionnement hydrique des espaces agraires passe effectivement par une bonne prise en compte de l'interaction entre alimentation hydrique et fertilité. Si l'ambition est de gérer l'eau, il faut rappeler aussi aux collègues agronomes que la fertilité est une création de tous les jours. Il y a donc toute une dynamique sur l'évolution des systèmes et de leur environnement, au centre desquels est l'agriculteur ; la fertilité ne se crée pas toute seule et elle est la résultante d'une activité au niveau des exploitations agricoles ; il y a là une dimension socio-culturelle, parmi bien d'autres. Les chercheurs devront s'en préoccuper, sachant que cette gestion de l'eau et cette création de fertilité peuvent conduire à des résultats significatifs en matière de stabilité et de productivité propre.

F.N. Reyniers a parlé de lacunes dans le volet hydrologie du programme bas-fonds, et il faut approfondir ce problème. Est-ce dû à un manque de moyens conceptuels ou techniques par rapport à l'écologie complexe du milieu bas-fond ? ou à une évolution de la demande politique ? Depuis trois ou quatre années, avec une légère amélioration des récoltes, la problématique bas-fonds semble avoir peu intéressé les responsables du développement africain.

L'évolution de la réflexion agronomique, incluant des aménagements avec des impacts sur le développement, nous fait ressentir le manque de compétence en agro-foresterie. En effet on a pu lier bilan hydrique, fertilité, "circuit court" de l'eau, dans le cadre de l'approche intensifiante. Aujourd'hui, on a bien mis en évidence l'intérêt de la notion de "circuits longs", qui conduit à envisager des modèles tridimensionnels, des effets d'échelle très différents. C'est une grande lacune, pour une recherche appliquée au développement, et l'agro-foresterie devrait constituer prochainement dans les actions du réseau un thème fédérateur pour la gestion des surfaces agraires.

On peut parler aussi, au sujet des transferts de biomasse en fonction des activités, de lacune concernant les relations avec l'activité zoo-technique, (pâturages, surpâturages), avec la mécanisation, avec le maintien des couloirs végétaux à l'échelle de ces espaces. Les lacunes doivent être traitées. Il faut

envisager une recherche thématique sur les interactions entre ces systèmes technologiques et la maîtrise de l'eau. Nous devons y attacher plus d'importance. F.N. Reyniers a donné des éléments de réflexions à travers notamment le rôle joué par la rhizosphère arborée pour le recyclage des éléments en vue de lutter contre la dégradation.

Après ces préliminaires, F. Forest propose une discussion sur le bilan de cette journée et souhaite qu'à partir d'un certain consensus, des recommandations plus pragmatiques et opérationnelles puissent être formulées et permettre, dans le contexte présenté par J. Claude et J.N. Reyniers, d'envisager une programmation à laquelle il faut s'attacher dès à présent.

Discussion

J. Alberge, coordinateur hydrologique du programme Bas-Fonds à R3S, tient à rappeler que la plupart des programmes sur ce thème n'ont que 2 ans, alors que la majorité des présentations à ces Journées est appuyée sur des opérations de terrain datant de 82/83.

Des rapports et publications montrent que le volet bas-fonds du R3S progresse et il ne faut pas faire de procès d'intention aux absents.

Un des projets les plus intéressants est celui du Mali où l'on teste l'efficacité d'un barrage souterrain sur la sécurisation des cultures dans un bas fonds.

Celui de Casamance se propose d'identifier une stratégie, comportant l'utilisation de l'eau de ruissellement et la gestion d'un barrage anti-sel, pour réhabiliter la riziculture.

B. Pouyad rappelle que la participation des hydrologues au programme était une main tendue aux agronomes, qui nous persuadaient que le développement de l'agriculture en Afrique se ferait mieux que dans les bas-fonds.

Mais il n'est pas certain que la problématique "bas-fonds" ait été posée assez clairement par R3S. On ne peut pas le reprocher au coordinateur de l'aspect hydrologique des bas-fonds.

F.N. Reyniers pense en effet que, sur le plan scientifique, la problématique est tout à fait différente de celle de l'hydrologie dynamique de versant dont on a beaucoup parlé ces derniers jours : avec ses flux d'infiltration/ruissellement etc....

Au niveau du bas-fonds la problématique est différente et valorise les variations de stock,... car ce qui intéresse les riziculteurs, **est de savoir** comment cette nappe se positionne par rapport à la surface, s'ils doivent sélectionner des variétés qui aiment avoir les racines dans l'eau ou pas etc...

Ce n'est pas la même échelle de temps, pas exactement les mêmes phénomènes, pas les mêmes moyens de mesure qu'à l'amont des toposéquences.

F. Forest veut donner quelques informations.

Des travaux sont faits au CEMAGREF sur des techniques de diagnostic d'états de fonctionnements de Bas-fonds à travers l'utilisation de la télédétection et des opérations-tests au Burkina Faso.

Avec Bruno Lidon, une méthodologie spécifique se met en place car il y a des problèmes de choix de site.

Si l'on privilégie le poids du système de culture paysannale, c'est du diagnostic système.

Est-ce une approche purement morfo-pédologique?

Fait-on de l'enquête, du sondage, de l'extrapolation ?

Il y a donc un problème au départ qui dépasse la simple appréhension hydrologique.

De plus les chercheurs sont très sollicités par les utilisateurs de ces bas-fonds que sont les paysans, les chercheurs qui travaillent sur le riz, les producteurs de riz. Ce n'est pas facile de dégager une démarche scientifique disciplinaire sur un bas-fonds. Voilà le fond de l'affaire.

Certains exemples illustrent un manque de maturité du programme. C'est le cas au Mali, où on sélectionne du riz de nappe ; puis l'on apprend que c'est du riz pluvial assisté. Personne n'est encore d'accord.

Bas-fond, faux bas-fond, plaine inondable? On a déjà travaillé à l'ORSTOM sur cette typologie, mais il y a peut-être une réflexion à conduire avec les moyens de la télédétection à l'échelle de la petite région.

En conclusion, le projet a été lancé à partir d'acquis ou d'opportunités : au Mali on s'est greffé sur le riz parcequ'il y avait un volet riz ; au Sénégal, le problème de la Casamance. On est parti tous azimuts. On a effectué une première reconnaissance du champs. Le moment est venu d'arriver à une synthèse, une démarche plus structurée pour l'avenir.

J. Claude croit que dans ce type de recherche tourné vers l'aval, qu'est la recherche pour le développement, il y a un fort pilotage par la demande à l'aval, par les utilisateurs, les vulgarisateurs, les développeurs etc., on ne peut pas dire "on va faire le bilan hydrologique, étudier les circulations etc.. et on vous répondra après"...

Il faut quand même tenir compte très largement des opportunités et de la possibilité de réaliser un certain nombre de choses.

Bien sûr, P. Dubreuil avait raison de rappeler que l'on n'avait pas les moyens d'une stratégie de programme scientifique bas-fonds, c'est à dire les moyens de financer de l'expérimentation de terrain à long terme, quatre à cinq ans, sur 25 ou 30 bassins versants.

Mais il y avait une opportunité de poser mieux ces problèmes scientifiques et de commencer à étudier des situations particulières.

Pour le Mali, il y avait le test de gestion d'un aménagement de contrôle d'inferoflux.

Sur la Casamance le problème posé d'évacuation des sels, de fonctionnement de barrages anti-sel, est complètement différent de ce qui se fait au Mali. Il s'agit d'un très grand bas-fond avec plaine inondable avec un bassin versant de 3000 km² à l'amont et un petit de 11 Km², avec barrage submersible à noyau étanche. Il y avait donc un type d'aménagement, dont on a rarement l'occasion d'étudier le fonctionnement et la répercussion.

A court terme il faut pouvoir donner une recette pour refaire du riz là où on ne peut plus en faire depuis 10 ans : "ouvrir les vannes au bon moment, quand on a 5cm de différence entre la marée et l'amont du barrage".

A plus long terme, 5 ou 6 ans, on peut espérer assurer l'interprétation des données de flux, sels, concentration, ou de ruissellement de surface, nappe, remontée de nappe etc...

Dans ce type de programme, il faut donc dès le départ s'assurer de la possibilité d'atteindre ces deux types d'objectifs, l'un de développement, l'autre scientifique.

F. Forest rappelle une conclusion humoristique et acide de décideur qui disait "il faut enlever les paysans si on veut travailler sérieusement, si on veut bien modéliser".

On est en plein dans cette dialectique : on travaille avec des agriculteurs, des hommes et des femmes, qui font du riz et c'est très compliqué.

Par contre on peut considérer que c'est un projet prioritaire, avec une nécessité d'être prêts à 4 ou 5 ans. Cette année encore, les bilans vivriers sont catastrophiques dans les pays de l'Afrique de l'Ouest. Dans le Sahel, on va reparler de décrues, de bas fonds.

Tout confirme l'intérêt stratégique de cette recherche, même si il faut constater que les moyens ne sont pas en proportion avec nos ambitions. Il faut éviter les forces centrifuges, les ghettos disciplinaires etc... Il y a, sur le fond, certaines initiatives à prendre pour faire de cette problématique scientifique des bas-fonds une opération-locomotive à partir des analyses des réflexions de cette après-midi.

B. Pouyaud voudrait profiter de cet exemple du programme bas-fonds pour proposer une évaluation des apports positifs d'un Réseau comme R3S, à travers ses quatre objectifs :

Le premier, d'être le lieu de drainage privilégié de financement provenant de la CEE, où il y avait une opportunité.

Le deuxième, de faciliter à travers des séminaires, les rencontres entre les chercheurs.

Le troisième, de faire une véritable programmation scientifique dans ses domaines de compétence.

Le quatrième, de favoriser la vulgarisation des résultats à travers des thèses et des synthèses.

Si les deux premières ambitions ont été assurées, et si la quatrième est en bonne voie, B. Pouyaud pense que la programmation à R3S est plutôt restée une superposition de coordinations scientifiques pré-existantes à l'intérieur des instituts français, européens et autres.

Un tableau de ventilation des financements a été présenté. Pour B. Pouyaud, l'évaluation intéressante à faire est de savoir dans le financement d'un programme, organisme par organisme, institut par institut, pays par pays, qu'elle est la part qui vient du financement drainé vers R3S, essentiellement de la CEE d'ailleurs, et puis la part qui vient des organismes eux-mêmes. Ceci expliquerait probablement les distances prises par rapport au programme d'un organisme à

un autre. Est-ce qu'on est effectivement programmé par R3S, ou bien est-ce qu'on a notre propre programmation, et quelque chose en plus qui s'appelle R3S?

P. Dubreuil veut faire deux remarques, l'une d'ordre politique et historique, l'autre d'ordre scientifique.

Historiquement, R3S a été une initiative prise par des scientifiques français en collaboration avec des scientifiques africains et relativement pilotée par les scientifiques français. Mais depuis mars 1989, la CORAF (Conférence des Responsables de la Recherche Agronomique Africains) est une institution "africaine" à laquelle est associé un certain nombre d'institutions françaises. Le R3S est un réseau de la CORAF, c'est à dire africain : les responsables y définissent leurs priorités, leur problématique, et recherchent les financements et les associations.

La situation politique est donc totalement différente aujourd'hui de ce qu'elle était au départ. Aujourd'hui le R3S est un réseau africain, auquel peuvent ou ne peuvent pas, veulent ou ne veulent pas coopérer, suivant le cas, des institutions françaises comme le CIRAD ou l'ORSTOM suivant leur propre programmation.

Deuxièmement, sur le plan scientifique, il est intéressant semble-t-il pour la recherche hydrologique de s'intéresser au problème du fonctionnement hydrologique des bas-fonds puisque pour gérer, pour améliorer la production agronomique d'un bas fonds, les agronomes ont besoin d'une certaine maîtrise de l'eau. Maîtrise de quelle eau? De l'eau qui se trouve dans le bas fonds et qui provient en partie des versants.

Il est intéressant scientifiquement que la recherche hydrologique se penche sur le fonctionnement global d'un bassin versant et de son bas-fond, alors que jusqu'à maintenant elle s'était concentrée sur le fonctionnement du bassin versant sans regarder le bas fond, parce que l'objectif était la détermination de crue principalement.

Un bas-fond est à priori une zone de fonctionnement avec des variations des stocks d'eau de surface par inondation mais aussi de la nappe. C'est aussi une zone de production d'eau dans la théorie des aires contributives. Il peut s'y produire de l'écoulement qui est considéré comme un ruissellement un peu plus en aval. La prise en compte spécifique des bas-fonds, par rapport à l'ensemble du bassin versant, permettrait à la communauté hydrologique de l'ORSTOM de faire un aggiornamento de ses concepts et méthodes et de rejoindre par là les approches anglo-saxonnes. L'équipe Sénégal est dans cette voie. Des contributions significatives devraient être obtenues dans quelques années sur ce point. A ce moment là, et si les liaisons sont maintenues, il y aura une contribution hydrologique très nette à la maîtrise de l'eau pour la gestion agronomique des bas-fonds.

CLOTURE

Par

F. MONIOD

Clôture

par **Frédéric Moniod**

Voici venue l'heure de clôture officielle de ces Sixièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, consacrées à "l'usage agricole de l'eau".

Merci d'être venus si nombreux, le chiffre de cent cinquante a été cité, pour débattre d'un sujet parfois à la limite de l'Hydrologie scientifique classique, mais toujours très proche des préoccupations de la Recherche pour le Développement, qui constitue la mission originale de notre organisme. Je salue particulièrement la présence de nombreux collègues étrangers venus de Tunisie, d'Algérie, des Etats de l'Afrique sahélienne, où la **bonne gestion agricole d'une eau rare et chère est vitale**. Cette présence témoigne de la pertinence du choix du thème des journées, mais justifie aussi l'orientation thématique des travaux de certains hydrologues.

La composition multi-disciplinaire d'une assistance dont l'expérience géographique et agro-socio-économique est aussi diverse, ne pouvait qu'assurer la richesse de débats parfois passionnés, voire surréalistes pour certains. Pour beaucoup d'entre nous, hydrologues des fleuves et rivières, où le mot bassin versant représente l'espace "fétiche", la découverte du concept spatial conquérant de ZARI, ces Zones d'Analyse et Recommandations pour l'Irrigation où jauge l'un des nôtres, constituera l'un des moments forts de ces Journées. Un autre moment décoiffant fut celui où l'on nous invita à oublier la sacro-sainte modélisation des systèmes hydrologiques, pour un peu plus d'observations naturalistes.

Grâce à vos interventions, à la disponibilité et à l'enthousiasme de nos animateurs, **Francis Forest** et **Pierre Pourrut**, ces Journées Hydrologiques 1990, Sixièmes du nom, auront été un plaisir et un succès.

Pensons maintenant à préparer les Journées Hydrologiques de 1991.

Je salue donc votre présence aujourd'hui et je dis "à l'année prochaine", à ceux qui ne pourront pas participer ce soir au "Dîner des hydrologues".

**LISTE DES AUTEURS DE COMMUNICATIONS AUX SIXIEMES JOURNEES
HYDROLOGIQUES DE L'ORSTOM A MONTPELLIER**

Albergel J.	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Brunet D.	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Cabidoche Y.M.	INRA (Pointe - à-Pitre - Antilles- Guyanne)
Cadier E.	ORSTOM (Quito - Equateur)
Cavalcanti de Albuquerque C.H.	Sudène/SISAGRO (Récife - Brésil)
Doherty F.R.	Sudène/SISAGRO (Récife - Brésil)
Dubée G.	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Forest F.	IRAT/CIRAD (Montpellier - France)
Guillet F.	IRAT/CIRAD (Montpellier - France)
Lamachère J.M.	ORSTOM (Ouagadougou - Burkina)
Laraque A.	ORSTOM (Montpellier - France)
Le Goulven P.	ORSTOM (Quito - Equateur)
Molle F.	Coopération française (Récife - Brésil)
Montgaillard M.	ORSTOM (Récife - Brésil)
Montoroi J.P.	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Morell M.	ORSTOM (Pointe-à-Pitre - Antilles)
Ozier-Lafontaine H. Antilles)	Université (Antilles-Guyanne - Pointe-à-Pitre -
Perez P.	IRAT/CIRAD (Dakar - Sénégal)
Pouget J.C.	ORSTOM (Pointe-à-Pitre - Antilles)
Pourrut P.	ORSTOM (Montpellier - France)
Ruf T.	ORSTOM (Montpellier - France)
Sabatier J.L.	IRAT/CIRAD (Montpellier- France)
Seguis L.	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Serpantié G.	ORSTOM (Montpellier - France)
Vaksmann M.	IRAT/CIRAD (Dakar - Sénégal)
Valentin C.	ORSTOM (Quito - Equateur)
Zante P.	ORSTOM (Dakar - Sénégal)

LISTE DES PARTICIPANTS

Agbossou	S/C ENGREF (Montpellier)
Albergel Jean	ORSTOM/Dakar (Sénégal)
Amokrane Farid	INRF/Ténès (Algérie)
Andrieux Patrick	INRA/Sciences du sol (Montpellier)
Arnaud Yves	ORSTOM (Montpellier)
Aubert Georges	ORSTOM (Bondy)
Aw Ibrahim	CNEARC Stagiaire (Montpellier)
Bado Boubie Vincent	INERA (Burkina Faso)
Baril Pierre	EPFL/IATE (Lausanne - Suisse)
Belgacem Belgacem	CRDA (Tataouine - Tunisie)
Blanck Jean Pierre	CEREG-URA 95 (Strasbourg)
Blavet Didier	ORSTOM (Lomé - Togo)
Bocquillon Claude	USTL (Montpellier)
Boli Zachée	IRA (Cameroun)
Bouajemline Djamel	Université d'Oran (Algérie)
Bourouga Lakhdar	INRF/Médéa (Algérie)
Brunel Jean Pierre	ORSTOM (Montpellier)
Cabidoche Yves Marie	INRA (Guadeloupe - Antilles)
Cadier Eric	ORSTOM (Quito - Equateur)
Callède Jacques	ORSTOM (Montpellier)
Calvez Roger	ORSTOM (Pointe-à-Pitre - Antilles)
Camus Henri	ORSTOM (Tunis)
Carré Paul	ORSTOM (Montpellier)
Casenave Alain	ORSTOM (Lomé - Togo)
Chaperon Pierre	ORSTOM/DEC (Paris)
Chevallier Pierre	ORSTOM (Brésil)
Claude Jacques	ORSTOM/CEE (Paris)
Cochard Gilles	AFVP Linas 91310 F.
Coquet Yves	ORSTOM (Bondy)
Crespy Anne	ORSTOM (Montpellier)
Debuiche Jean Pierre	ORSTOM (Montpellier)
Delacourt Alain	ENGREF (Montpellier)
Delclaux François	ORSTOM (Montpellier)
Depraetere Christian	ORSTOM (Montpellier)
Desconnets Jean Christophe	U. Paris VI/ORSTOM
Djatta Malainy	ISRA (Sénégal)
Diziain Roland	ORSTOM (Bondy)
Djegui Narcisse	ORSTOM (Montpellier)
Dosseur Hubert	EDF/Hydroconsult I. (Montpellier)
Dubreuil Pierre	ORSTOM/CIRAD (Paris)
Estèves Michel	ORSTOM (Montpellier)
Favrot Jean Claude	INRA/Sciences du Sol (Montpellier)
Forest Francis	IRAT/CIRAD (Montpellier)
Fritsch Jean Marie	ORSTOM (Montpellier)

Galle Sylvie	ORSTOM (Montpellier)
Gathelier Robert	ORSTOM (Niamey - Niger)
Gautier Michel	ORSTOM (Montpellier)
Geffard Sophie	ORSTOM (Montpellier)
Gilot Luc	ORSTOM (Quito - Equateur)
Gioda Alain	ORSTOM (Montpellier)
Girard Georges	ORSTOM/ENSMP CIG (Fontainebleau)
Gonzalez B. José Luis	ORSTOM (Montpellier)
Goundoul N'Golona	ORSTOM (Montpellier)
Grira Mohamed	CRDA S/C ORSTOM (Tunisie)
Grunberger Olivier	ORSTOM (Mexique)
Guillet François	IRAT/CIRAD (Montpellier)
Guiscafré Jacques	ORSTOM (Montpellier)
Guyot Jean Louis	ORSTOM (La Paz - Bolivie)
Hisard Philippe	ORSTOM (Montpellier)
Hoepffner Michel	ORSTOM (Montpellier)
Ibiza Daniel	ORSTOM (Montpellier)
Imbernon J.	CIRAD (Montpellier)
Jaccon Gilbert	ORSTOM (Montpellier)
Jeanny Brigitte	ORSTOM (Montpellier)
Joignerez Agnès	ORSTOM (Bamako - Mali)
Klein Jean Claude	ORSTOM (Montpellier)
Kribaa Mohamed	ITGC (Algérie)
Lachaud Jean Claude	Consultant (Montpellier)
Lafforgue Alain	ORSTOM (Papeete)
Lagacherie Philippe	ENSAM (Montpellier)
Lamachère Jean Marie	ORSTOM (Ouagadougou - Burkina Faso)
Lamagat Jean Pierre	ORSTOM (Montpellier)
Laraque Alain	ORSTOM (Montpellier)
Lavabre Jacques	CEMAGREF (Aix-en-Provence)
Le Goulven Patrick	ORSTOM (Quito - Equateur)
Le Troquer Yann	ORSTOM (Montpellier)
Legros Jean Paul	INRA (Montpellier)
Lerique Jacques	ORSTOM (Montpellier)
Lidon B.	IRAT/CIRAD (Montpellier)
Loyer Jean Yves	ORSTOM (Montpellier)
Lubes Monique	ORSTOM (Montpellier)
L'Hôte Yann	ORSTOM (Montpellier)
Mahé Gil	ORSTOM (Montpellier)
Mailhol Jean Claude	CEMAGREF (Montpellier)
Masson Jean Marie	LHM/USTL (Montpellier)
Massoni Colette	ORSTOM/Docu. (Montpellier)
Mermoud André	EPFL/IATE (Lausanne)
Mérot Philippe	INRA/Sciences du Sol (Rennes)
Mietton Michel	ULP, Géographie (Strasbourg)
Mitja Danielle	ORSTOM (Bondy)

Mobèche Jean Pierre	ORSTOM (Fort de France)
Molle François	Coopération F. (Récife - Brésil)
Moniod Frédéric	ORSTOM (Montpellier)
Montgaillard Marc	S/C ORSTOM (Récife - Brésil)
Montoroi Jean Pierre	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Morell Marc	ORSTOM (Montpellier)
Morsli Boutkil	INRF (Mascara -Algérie)
Mudry Jacques	Faculté d'Avignon
Musy André	EPFL/IATE (Lausanne)
Ndayizigiye François	ISARD (Rwanda)
Ngarambé Vincent	PADC (Burundi)
Nouvelot Jean François	ORSTOM (Montpellier)
Nyamulinda Vincent	ISAR (Rwanda)
Nzila Jean de Dieu	ORSTOM (Montpellier)
Oí Monique	ORSTOM (Montpellier)
Olivry Jean Claude	ORSTOM (Bamako - Montpellier)
Pariante Patrick	S/C IRAT GREF (Montpellier)
Pédro Georges	INRA (Versailles)
Pépin Yannick	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Perez Pascal	IRAT/CIRAD (Dakar - Sénégal)
Pieyns Serge	ORSTOM (Montpellier)
Planchon Olivier	ORSTOM (Montpellier)
Pontanier Roger	ORSTOM (Tunis - Tunisie)
Poss Roland	ORSTOM (Cadarache)
Pouget Jean Charles	ORSTOM (Pointe à Pitre)
Pourrut Pierre	ORSTOM (Quito - Equateur)
Pouyaud Bernard	ORSTOM (Montpellier)
Puech Christian	CEMAGREF (Montpellier)
Rabbia Eugénio	ORSTOM (Montpellier)
Raous Patrick	ORSTOM (Montpellier)
Reyniers François Noël	IRAT/CIRAD (Montpellier)
Riquier Jean	Retraité
Robison Laurent	CNRE/MRSTD (Antananarivo - Madagascar)
Roche Marcel	CNFSH (Paris)
Rodier Jean	ORSTOM (Bretignolles)
Sabatier J.L.	IRAT/CIRAD (Montpellier)
Saos Jean Luc	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Sayol Raphaël	ORSTOM (Tunisie)
Séguis Luc	ORSTOM (Dakar - Sénégal)
Séné Modou	ISRA (Dakar - Sénégal)
Serpantié Georges	ORSTOM (Montpellier)
Servat Eric	ORSTOM/Abidjan
Seyler Patrick	ORSTOM/Cameroun
Sicard Maryse	ORSTOM (Montpellier)
Sircoulon Jacques	ORSTOM/TOA (Paris)
Sname Mohamed Habib	INA (Tunis)

Some Leopold
Taoko Adama
Tchemi Tchapkro
Thauvin Valérie
Thébé Bernard
Tihay Jean Pierre
Travi Yves
Trayssac Jacques
Vachaud Georges
Vaksmann Michel
Vauclin Michel
Vlaar J.
Zahar Yadh
Zumstein Jean François

INERA (Burkina Faso)
CRPA Nord (Burkina Faso)
INS (Togo)
ORSTOM (Montpellier)
ORSTOM (Montpellier)
Université de Pau
Laboratoire d'Hydrogéologie Avignon
Université Montpellier
IMG/Groupe Hydrologie (Grenoble)
IRAT/CIRAD (Dakar - Sénégal)
IMG/Groupe Hydrologie (Grenoble)
U. Agronomique Wageningen/GR
U. Tunis Géo (Tunisie)
Agence Rhin Meuse

ORSTOM Éditeur
Dépôt légal : août 1992
Impression



OERSCI

BP 3
34061 SIGELY du FESC Cedex
Tel. 67 84 86 20

ORSTOM Éditions
213 rue La Fayette
75480 Paris Cedex 10
Diffusion
72, route d'Aulnay
F-93143 BONDY Cedex
ISSN : 0767-2896
ISBN : 2-7099-1105-1

Photographie de couverture :
Modèle en balcons pierreux d'un paysage
agraire traditionnel (massif de l'Atakora, Bénin).
Cliché G. Serpantié