

**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'écrtage 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) et 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 (BOULAIN 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.

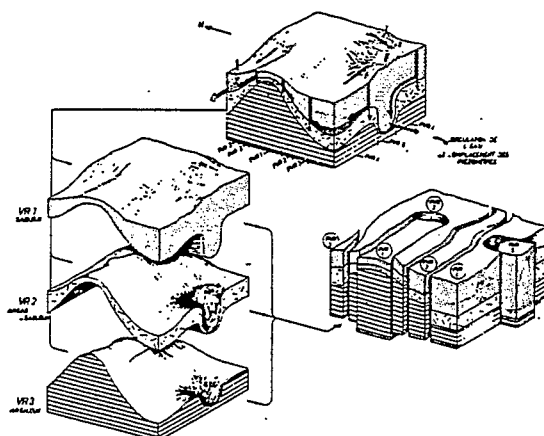


Figure 1 : Analyse de la couverture pédologique. (M.C.GIRARD, L.DUFAURE, 1986)

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.

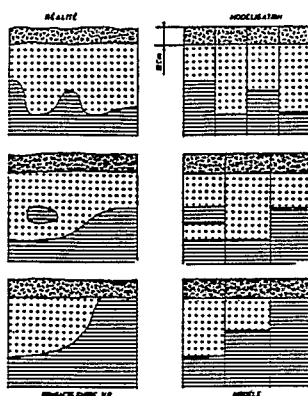


Figure 2 : Modélisation des contacts entre Volumes de Référence.

Modelization of contacts between reference volumes

(M.-C. GIRARD,

Figure 3

Organisation hydraulique d'un SEVERE (dynamique)

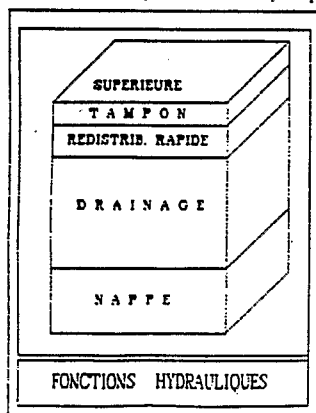
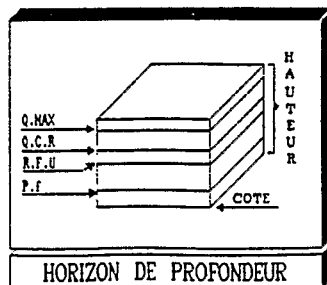


Figure 4

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. (8.23)

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. (183)

- 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.

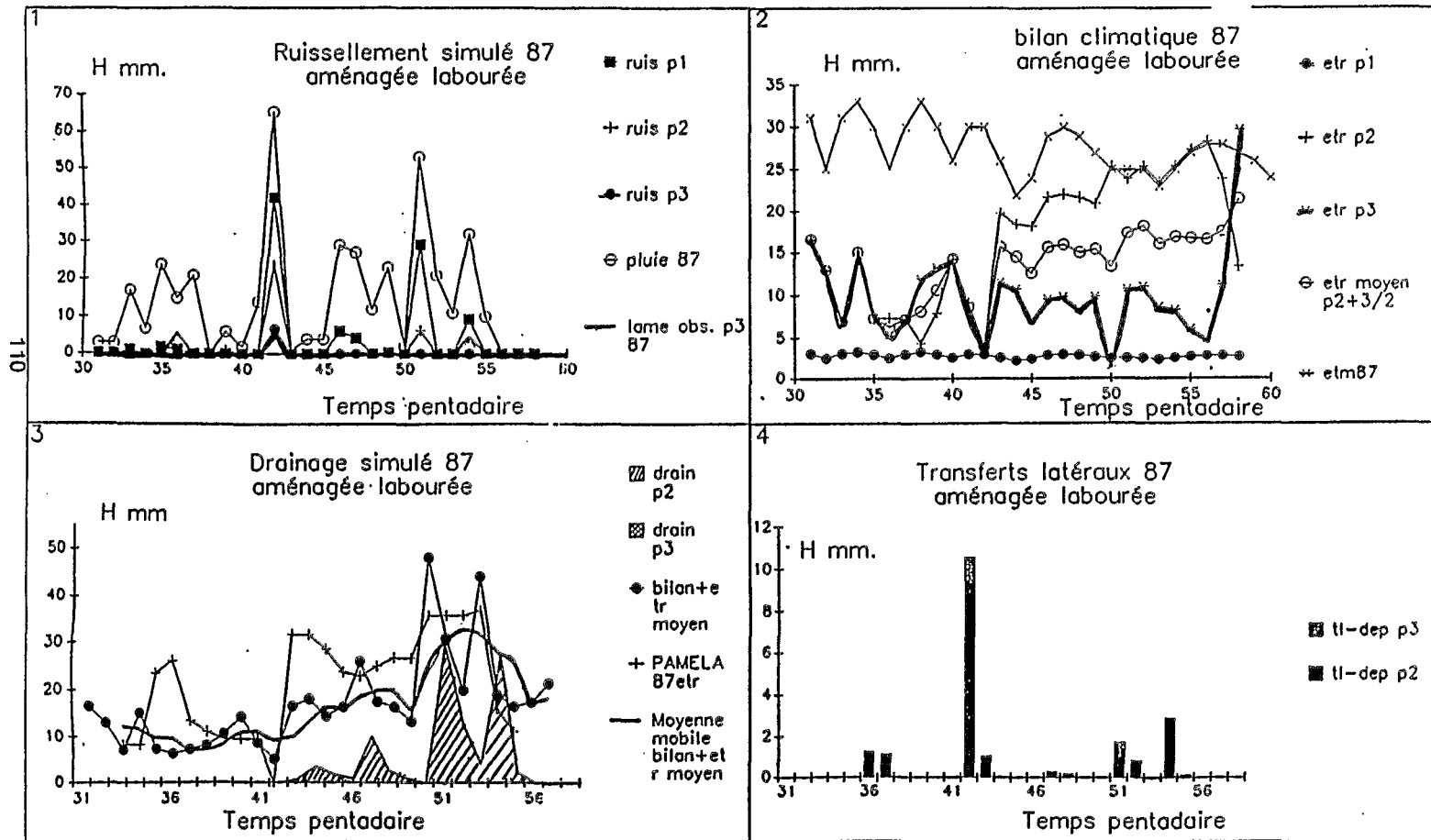
Les parcelles avaient été modélisées en quatre SVR en raison du cloisonnement suggéré par l'expérimentation: impluvium de haut de pente, sous parcelles de traitement, exutoire. La simulation avait porté sur deux années d'observation, 1986 et 1987 soient une année assez pluvieuse et une année sèche.

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 événementiel 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

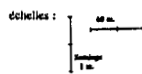
Dans un premier temps, l'ensemble des variables pédologiques a été retenu pour l'analyse de la couverture pédologique et l'individualisation de l'ensemble des limites potentielles. L'interprétation suivante en découle ; elle s'interprète au travers de la coupe ci-jointe. (fig 7)

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.

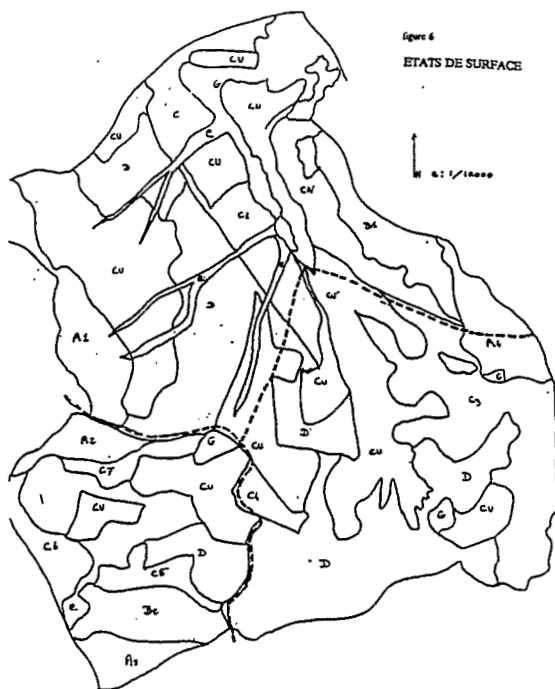
La profondeur exploitable du sol est partout assez réduite et partout la profondeur des horizons limitants avoisine deux mètres.

↑
↓

8



. GUILLET -87-



ETATS DE SURFACE

9.7.1.1999

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 mètre 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 quartzeuse 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.

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 données 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 9ème 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

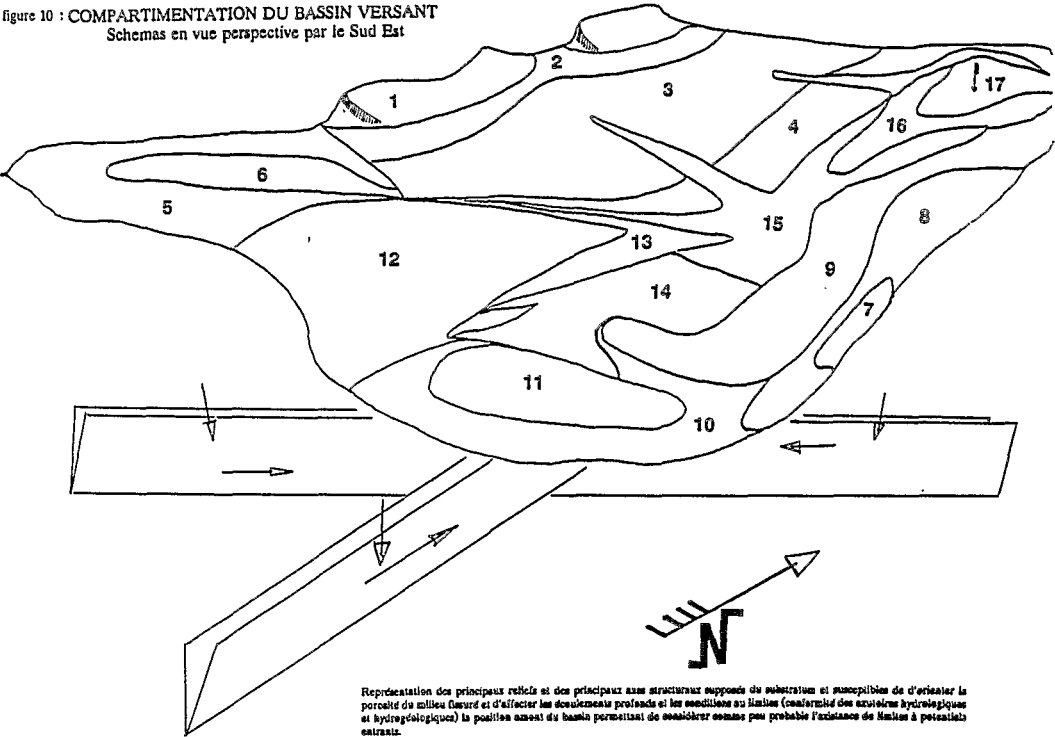
VHYPER	Text.	Biot.	Conc.	Pt.Flét	Cap.Ret.	D.A.	K.H.	Prof.Ht	Prof.Bs.	ép.
1	4as	2	1	50 - 90	175-200	1.55-1.65	C	0 -120	20 -150	20-40
2	1s	4	1	20 - 30	100-140	1.40-1.55	C	0 - 90	30 -170	30-90
3	Sarg	3	1	130-170	240-...	1.65-1.72	B	0 - 20	10 - 70	10-50
4	Sarg	1	2	90 -130	200-240	1.72-1.95	B	40 -160	140-240	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

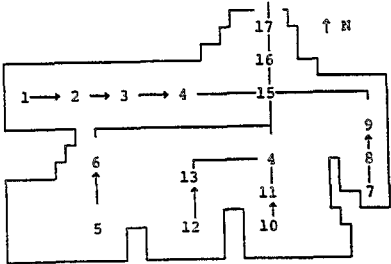
Profils	Cote surface	Redistribution Rapide	Drainage	Nappe	Front d'humectation	Profond. Racinaire	Aire Hect.	Surface R V C P
1	0	10	400	1400	400	0	10	
2	200	210	230	1410	230	0	10	
3	210	220	480 (430)	1430	480	1	55	
4	230	240	425 (450)	1450	425	0	16	
5	200	210	360	1410	360	1	37	
6	210	230	350	1450	350	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
 Schémas en vue perspective par le Sud Est



Représentation des principaux reliefs et des principaux axes structuraux supports du substratum et susceptibles de d'orienter la porosité du milieu naturel et d'affecter les écoulements profonds et les conditions au flanc (conformité des axes hydrologiques et hydrogéologiques) la position amont du bassin permettant de considérer comme peu probable l'existence de flancs à potentiels entrants.

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:

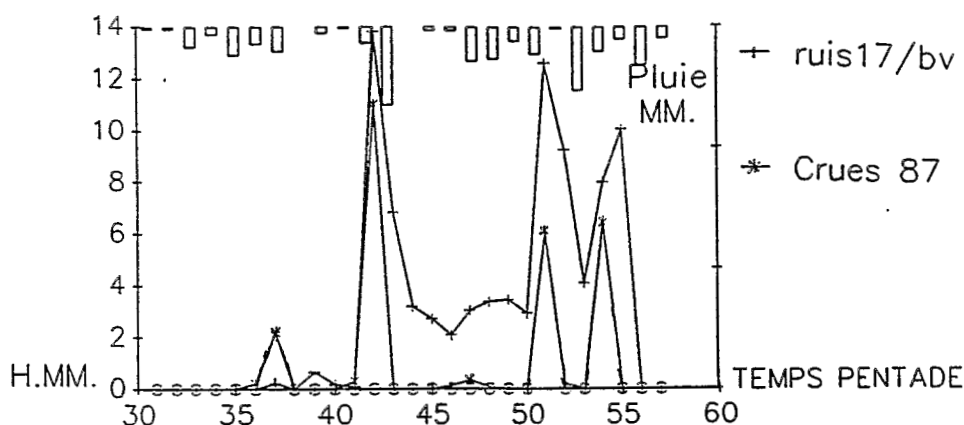
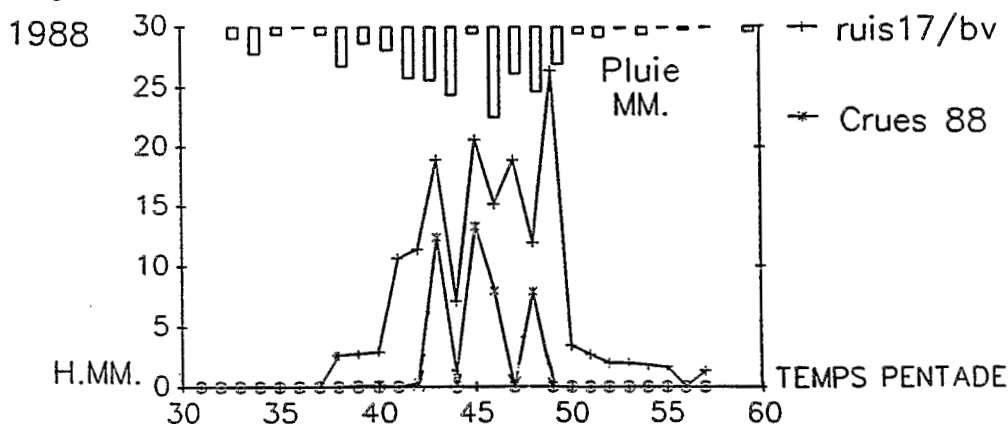


figure 13:



Légendes des graphiques des simulations

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

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 connexité, 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).

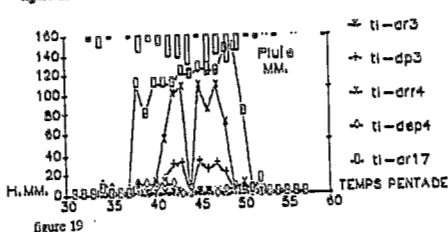
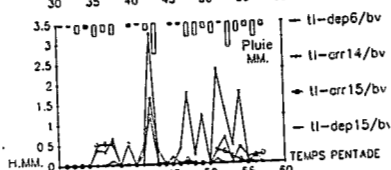
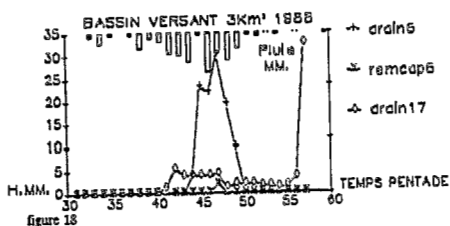
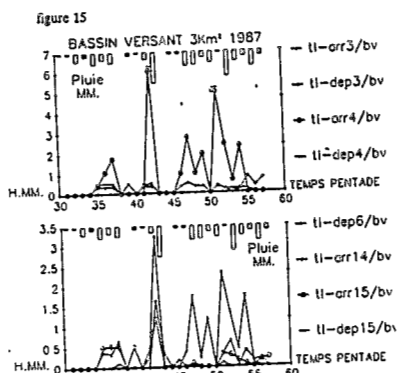
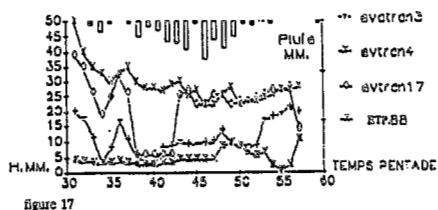
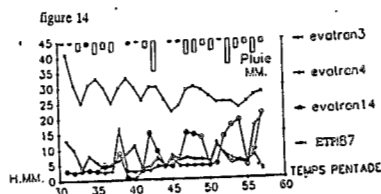
1) L'hivernage 87 (Jours : 12, 14, 15, 16)

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"

figure 20 : PROFILS D'HUMIDITE PENTE SABLEUSE p3

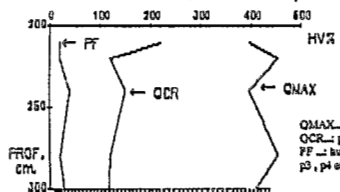


figure 20 : PROFILS D'HUMIDITE PENTE SABLEUSE p3

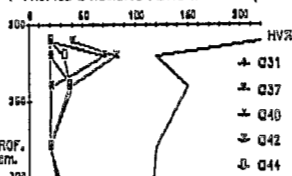


figure 21 : PROFILS D'HUMIDITE PENTE SABLEUSE p4

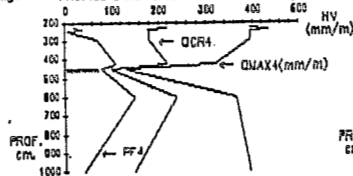


figure 21 : PROFILS D'HUMIDITE PENTE SABLEUSE p4

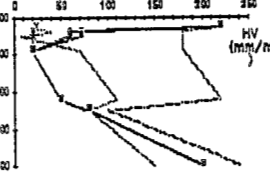


figure 21 : PROFILS D'HUMIDITE PENTE SABLEUSE p4

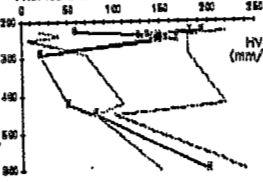


figure 22 : PROFILS D'HUMIDITE BAS FOND p17

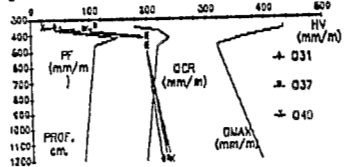


figure 22 : PROFILS D'HUMIDITE BAS FOND p17

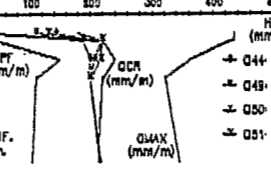
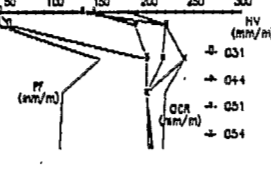


figure 22 : PROFILS D'HUMIDITE BAS FOND p17



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

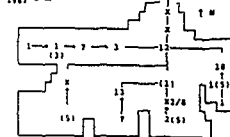
Interprétation spatiale par période de l'organisation de (SEVERE) dans le bassin versant

Figure 23

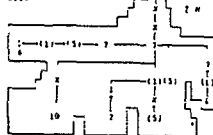
1987 P1



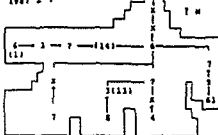
1987 P2



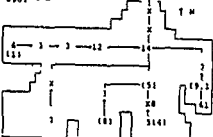
1987 P3



1987 P4



1987 P5



1987 P6

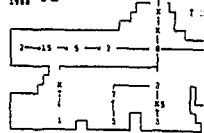


Figure 24

1988 P1



1988 P2



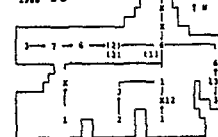
1988 P3



1988 P4



1988 P5



1988 P6



Les chiffres idéaux pour chaque SEVERE à chaque période (P1...P6) sont au cou de 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

Sélection 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 importants et de 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/CIEH .
- BOULAIN 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 Scs 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 - SAMNIWEOGO; 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 "ağudes" 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 "ağudes" ; 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 SOGREAH.

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.