

PARTIE II

Ruissellement - Pluviométrie Bilan hydrique

4

Caractérisation fractale de la succession des jours pluvieux au Burkina Faso

F. FRIGGIT⁽¹⁾, P. HUBERT⁽²⁾, J.-P. CARBONNEL⁽³⁾

⁽¹⁾ *École Inter-États d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) 03 BP 7023 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

⁽²⁾ *CIG École des Mines de Paris, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France*

⁽³⁾ *CNRS, URA 1367, Laboratoire de Géologie Appliquée, Université P. et M. Curie, 4, place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05, France*

En zone soudano-sahélienne, les aménagistes sont confrontés à l'extrême variabilité des précipitations, thème qui a fait l'objet de nombreuses études. La théorie mathématique des fractals, appliquée avec succès à des objets matériels ou abstraits, permet une approche nouvelle de ce phénomène.

Par exemple, Lovejoy et Shertzer (1989) ont montré que la distribution des gouttes de pluies tombées sur une surface de papier pendant un temps donné est fractale.

En zone soudano-sahélienne, Hubert et Carbonnel (1988) ont établi le caractère fractal de la variabilité spatiale et de l'anisotropie des champs de précipitations.

La présente étude limite son approche à la projection dans le temps du caractère pluvieux de l'état météorologique d'une station.

L'application, à l'occurrence de pluie au Burkina Faso, d'une méthode classique de calcul de dimension fractale a mis en évidence ce caractère particulier du phénomène, et permis l'étude de l'influence de différents facteurs sur la valeur calculée de cette dimension.

Méthodologie

Les données utilisées sont celles des 9 stations synoptiques du Burkina Faso, mises à disposition par le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) de Ouagadougou. Les séries d'observation peuvent varier d'une trentaine à une soixantaine d'années, et s'étendent toutes jusqu'en 1980.

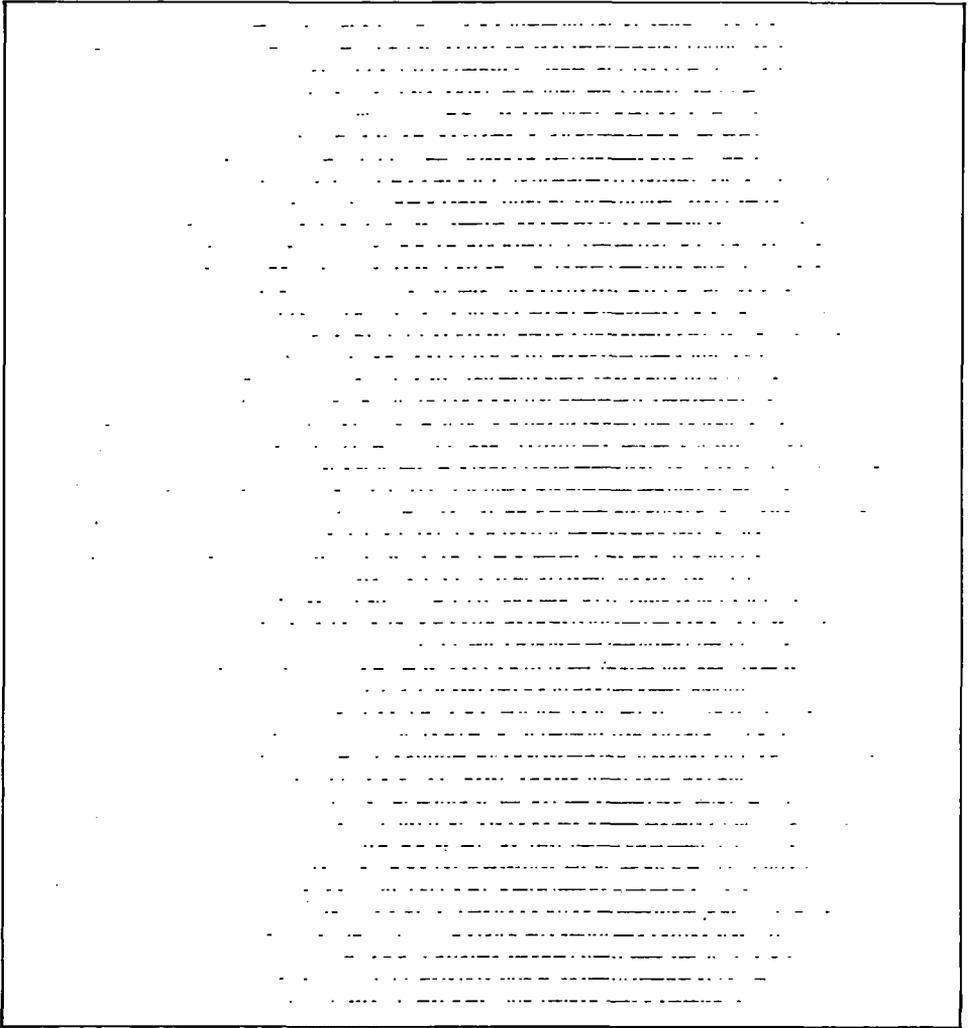


Figure 1. 45 années d'observations pluviométriques journalières à Dédougou (Burkina Faso). Chaque ligne correspond à une année d'observations. La première ligne, en trait plein, permet d'apprécier la longueur totale de l'année du 1^{er} janvier au 31 décembre. Sur les lignes suivantes représentant les années 1922 à 1966, seules les journées pluvieuses ont été soulignées par un tracé.

L'étude de l'occurrence de pluie nécessite de définir au préalable la notion de jour pluvieux. En une station pluviométrique donnée, sera considéré comme pluvieux un jour où la hauteur de pluie relevée est supérieure à une valeur prédéterminée, appelée seuil. Les mesures sont effectuées quotidiennement à heure fixe.

Cette définition permet de sélectionner, pour chaque station et avec un seuil donné, un ensemble de jours pluvieux. Cet ensemble constitue l'objet de l'étude.

La figure 1 donne une représentation graphique de cet ensemble pour la station de Dédougou entre 1922 et 1966. Elle ressemble au résultat obtenu après plusieurs itérations dans le processus générateur d'une poussière de Cantor à partir d'un segment, objet fractal devenu classique depuis les travaux de Mandelbrodt (1975, 1977).

Cette ressemblance conduit à adopter une démarche de caractérisation par détermination d'une dimension fractale, à l'aide de la méthode de comptage par boîtes (Lovejoy, Shertzer et Tsonis, 1987).

Cette méthode consiste à effectuer une partition de la période P d'observation à l'aide de segments, ou boîtes, de longueurs identiques L. Une boîte est considérée comme pluvieuse si elle contient au moins un jour pluvieux.

On compte le nombre N(L) de boîtes pluvieuses, dont l'union constitue un recouvrement minimal de l'objet étudié. Si l'objet est fractal, N est une fonction puissance de L, ce qui se traduit par :

$$\text{Log}(N(L)) = -D \text{Log}(L) + K$$

où D est la dimension fractale de l'objet et K une constante.

Dans le cas présent, N(L) est déterminé pour différentes valeurs de L, et on établit ainsi un diagramme Log-Log représentant N en fonction de L.

Par régression linéaire de Log(N(L)) sur log(L), on calcule D comme l'opposé de la pente calculée. Le domaine de la régression est déterminé a posteriori par restrictions successives à l'aide d'un test de validité. L'incertitude sur D est la demi-longueur de l'intervalle de confiance à 99 % sur sa valeur.

On a sélectionné des valeurs de P, le nombre total de jours de la période, possédant de nombreux diviseurs L, et correspondant à un nombre entier d'années, soit 23, 41 et 55 ans.

Caractérisation

Les graphes ainsi obtenus pour les stations synoptiques du Burkina Faso, à différentes valeurs de seuil, comprennent tous deux groupes de points alignés. La figure 2 en donne un exemple.

Un premier alignement est trivial : pour les grandes valeurs de L, de plusieurs centaines de jours, toutes les boîtes sont pluvieuses. Les points sont donc alignés sur une droite de pente -1.

L'autre alignement est plus intéressant. Il concerne les points obtenus pour des valeurs de L variant entre quelques jours et quelques mois. C'est la partie sur laquelle on a déterminé la dimension, et qu'on appellera dans la suite domaine fractal.

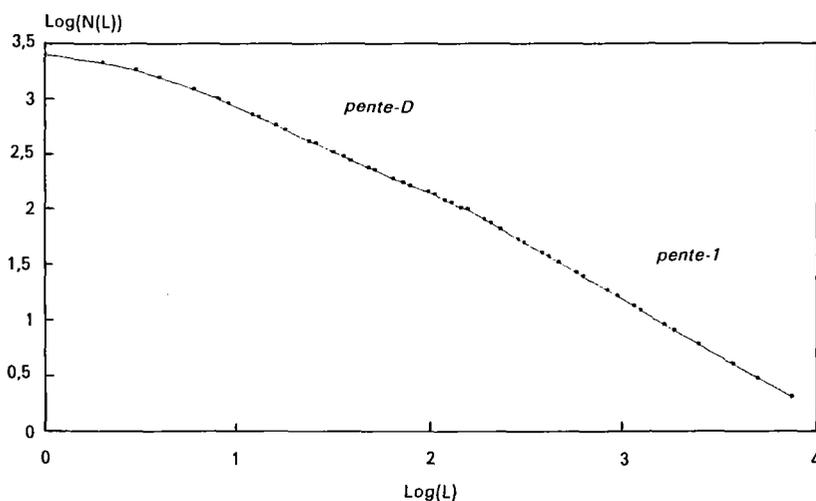


Figure 2. Station de Dédougou, seuil 0,1 mm. Variations de N en fonction de L période 1924/1964.

Pour toutes les stations, et pour des valeurs de seuil allant jusqu'à 30 mm, le coefficient de corrélation est toujours resté supérieur à 0,99, et même 0,999 pour des valeurs de seuil inférieures à 5 mm.

Pour un seuil de 0,1 mm, le domaine fractal s'étend entre une borne inférieure variant entre 6 et 12 jours, et une borne supérieure variant entre 120 et 140 jours. Les valeurs de ces bornes croissent avec celles du seuil.

Influence de la période

Pour Dédougou, on a étudié les valeurs des dimensions obtenues pour des périodes commençant à des années différentes, et de longueurs P différentes.

Les valeurs diffèrent au point que l'intersection de tous les intervalles de confiance sur D est vide. Toutefois, on ne peut pas faire de lien direct entre l'inclusion d'une année ou d'un groupe d'années dans une période, et la valeur plus ou moins élevée de D.

Il semble donc qu'on ne puisse pas établir de relation directe entre la valeur de D et le caractère plus ou moins humide ou sec d'une période.

On remarque que, conformément à la logique, la précision sur D augmente avec la longueur de la période traitée. Dans tous les cas, l'incertitude n'excède pas 2 %.

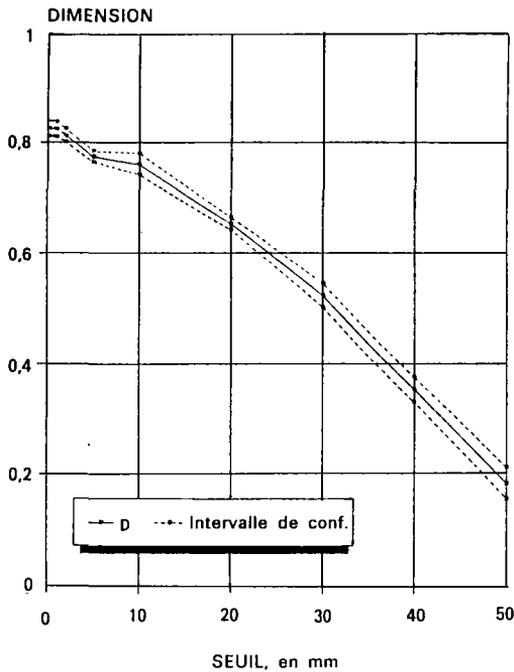


Figure 3. Station de Po. Variations de D en fonction du seuil. Période 1953/1975.

Influence du seuil

On a appliqué la méthode aux 9 stations synoptiques du Burkina Faso, pour différentes valeurs de seuil : 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 et 50 mm.

On a toujours pu calculer une dimension sur un domaine fractal, comme défini plus haut.

Pour toutes les stations, D décroît avec le seuil, comme le montre la figure 3 dans le cas de la station de Po, entre 1953 et 1975.

De plus, les bornes du domaine fractal croissent avec le seuil.

Influence de la station

On a comparé, à seuil fixé, les valeurs de D calculées sur les différentes stations. Cette opération a été menée pour chacune des valeurs de seuil données précédemment, sur les périodes 1953/1975 et également 1925/1979 pour les stations dont la longueur de la série d'observations le permettait.

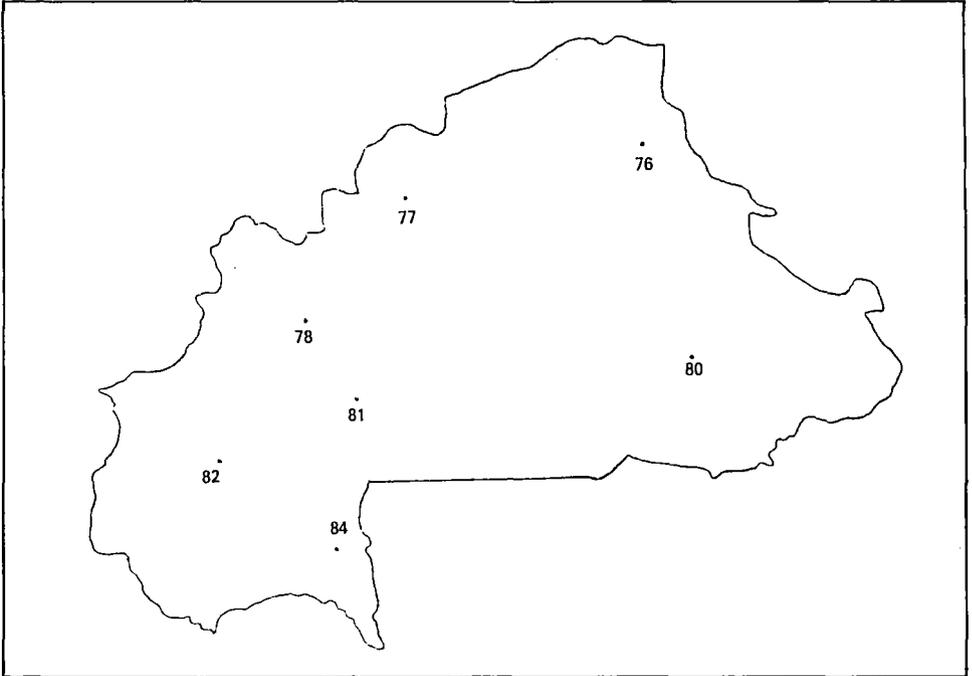


Figure 4. Carte des valeurs de D, en %, au Burkina Faso, calculée sur la période 1925/1979 pour un seuil de pluviométrie journalière de 0,1 mm.

Il ressort que la dimension fractale est liée à la position géographique des stations. Grossièrement, du Nord au Sud, la dimension croît, pour chacun des seuils. Ce résultat est particulièrement net pour la période longue entre 1925 et 1979, comme le montre la figure 4.

Simulation d'erreur dans les données

Afin de déterminer l'influence d'une erreur de relevé ou de saisie des données pluviométriques, on a créé puis comblé artificiellement des trous dans la série complète de Dédougou.

Pour cela, on a remplacé la valeur mesurée en un certain jour par la valeur mesurée le même jour d'une année de référence de la série. Cette année de référence est l'année dont le nombre de jours de pluie correspond à la moyenne interannuelle sur la période étudiée.

On a ainsi troué puis comblé des jours, mois et années.

Caractérisation fractale des pluies au Burkina Faso

Les variations de D dues aux trous comblés restent négligeables devant l'incertitude, bien qu'elles croissent avec la valeur du seuil. Elles sont bien sûr plus faibles que si on ne comble pas le trou, c'est-à-dire si on annule les valeurs correspondant aux jours troués.

Toutefois, les variations sont plus faibles lorsqu'on troue puis comble un mois très pluvieux (août). En effet, dans ce cas, toute boîte de longueur supérieure à 10 jours est pluvieuse.

Ce dernier résultat induit que les jours pluvieux isolés ont une influence plus forte sur la valeur de D que les jours de milieu de saison des pluies.

Conclusion

On a mis en évidence le caractère fractal de la succession des jours pluvieux au Burkina Faso. De plus, ce caractère a été établi pour différentes valeurs de seuil de précipitation journalière.

La méthodologie pratique de caractérisation mise au point est applicable à d'autres stations du Burkina Faso et d'autres pays. Elle est d'ailleurs utilisée actuellement pour les stations synoptiques des pays sahéliens francophones.

Pourtant, l'interprétation de ces résultats reste à développer, en particulier pour ses implications en météorologie et physique de l'atmosphère.

5

Le programme Hapex-Sahel

M. HOEPFFNER⁽¹⁾, J.P. GOUTORBE⁽²⁾, P. SELLERS⁽³⁾, A. TINGA⁽⁴⁾

⁽¹⁾ ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France

⁽²⁾ CNRM, 42, Avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse, France

⁽³⁾ NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20 États-Unis

⁽⁴⁾ Université de Niamey, BP 10662, Niamey, Niger

Les interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère déterminent pour une part très importante les échanges d'énergie et d'eau qui constituent l'alimentation du système climatique. A l'heure actuelle, il est reconnu que les modèles mathématiques décrivant la circulation générale de l'atmosphère sont des outils essentiels pour étudier ces interactions. Les modèles les plus récents incluent une prise en compte du sol continental et de la végétation, permettant des échanges de vapeur d'eau, et d'autres constituants, avec l'atmosphère. Une description de ces échanges qui soit précise et détaillée ouvrira de nouvelles perspectives pour l'étude de nombreux problèmes climatiques, en particulier de ceux liés à d'éventuelles modifications de la couverture végétale du globe.

Un élément essentiel d'une telle stratégie globale passe donc par une amélioration et un test détaillé de la description des échanges à l'interface sol-atmosphère. Une validation directe à l'échelle globale est pratiquement impossible, par suite de la non-disponibilité de données globales, autres que celles issues de la télédétection spatiale, cette dernière technique ne donnant pas accès direct aux quantités et paramètres nécessaires.

Une étape intermédiaire s'avère donc nécessaire, qui consiste à réaliser des études expérimentales sur le terrain pour collecter l'ensemble des données nécessaires. De telles études expérimentales doivent prendre en compte les inhomogénéités naturelles des surfaces, et être organisées avec des emprises spatiales et des durées compatibles avec la taille de maille des modèles climatiques (c'est-à-dire environ 100 km) et le cycle saisonnier. Le Comité Scientifique Mixte du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (*World Climate Research*

Programme, WCRP) a recommandé d'organiser de telles études expérimentales, et a forgé pour elles l'appellation HAPEX (*Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment*). De tels programmes incluent nécessairement d'importantes opérations de télédétection aéroportée et spatiale puisque, d'une part, la télédétection peut alors bénéficier de l'ensemble des données collectées comme « vérité-sol », et que, d'autre part, la télédétection est l'outil privilégié pour l'interpolation à l'intérieur de la zone d'étude et pour l'extrapolation des résultats à d'autres zones géographiques et climatiques.

De tels programmes doivent aussi prendre en compte les phénomènes liés à la végétation, en particulier au Sahel où le développement de la végétation et le bilan en eau disponible sont très étroitement couplés. HAPEX-SAHEL inclura donc de nombreuses études des processus liés à la végétation, et est ainsi une contribution au Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP, ou *Global Change*).

Le concept expérimental a fait l'objet d'une première validation à l'occasion du programme HAPEX-MOBILHY (Modélisation du Bylan Hydrique), organisé en 1986 pour les conditions climatiques tempérées du sud-ouest de la France. Ce premier programme a fourni de nombreux enseignements, utiles en particulier pour l'organisation de futures opérations HAPEX. Il a aussi permis de rassembler une banque de données très complète pour l'étude des interactions sol-atmosphère en zones forestière et agricole aux latitudes tempérées, et a conduit à de notables améliorations des schémas paramétriques utilisés pour la description de ces interactions.

L'intérêt se porte donc maintenant vers les régions arides et semi-arides, très importantes pour l'étude du climat global, telles que la bande sahélienne.

HAPEX-Sahel, objectifs scientifiques

Le premier objectif de HAPEX-Sahel est de collecter une banque de données très complète, incluant des mesures des flux à l'interface sol-atmosphère (flux de quantité de mouvement, de rayonnement, de chaleur sensible et latente, de gaz carbonique), de même que l'ensemble des paramètres nécessaires pour représenter ces flux de façon paramétrique (paramètres de surface et du sol superficiel et plus profond, forçage atmosphérique). La particularité et la difficulté de cette étude sont liées aux échelles spatiales à prendre en considération, en liaison avec l'étendue de la gamme des échelles temporelles, allant de l'heure à la saison. De tels objectifs ne peuvent être atteints qu'en associant de nombreuses techniques expérimentales complémentaires.

Le deuxième objectif est l'obtention d'un jeu de données sur les écoulements de surface en zone aride. En effet les modèles de circulation générale prennent en compte les écoulements superficiels de façons très différentes, et les formulations utilisées restent à valider.

Le troisième objectif concerne l'interprétation des données issues de la télédétection spatiale, qui sont les indicateurs de l'évolution des phénomènes, et qui, correctement calibrées, pourront ensuite permettre de construire les jeux de données globaux nécessaires. Un autre objectif, plus technique, est l'étude des

corrections atmosphériques, particulièrement importantes et délicates dans ces régions.

La mesure des flux de vapeur d'eau et de gaz carbonique est un objectif central D'HAPEX-Sahel. Bien que les processus liés à la végétation doivent aussi faire l'objet d'études à plus longues échelles de temps, la combinaison d'une grande extension spatiale et d'une relativement courte échelle de temps fait D'HAPEX-Sahel un cadre intéressant pour nombre d'études d'intégration spatiale des processus biologiques.

La non-linéarité de la plupart des phénomènes à l'interface sol-atmosphère rend théoriquement impossible, en présence d'inhomogénéités, l'utilisation à grande échelle des lois établies à l'échelle locale. Le passage de l'échelle locale à plus grande échelle est donc une difficulté majeure, bien connue en modélisation climatique et en télédétection. L'étude de cette « intégration d'échelles », déjà abordée dans HAPEX-MOBILHY, reste un objectif important d'HAPEX-Sahel.

Schéma expérimental

Le site

La zone retenue est comprise entre les méridiens 2° E et 3° E et les parallèles 13° N et 14° N. Niamey, capitale de la République du Niger, est située sur la bordure occidentale de ce carré. Le climat, la pédologie et les infrastructures de cette zone ont fait l'objet de nombreuses études et documentations antérieures. Cette région particulière a été sélectionnée car elle permet d'atteindre les objectifs scientifiques du programme tout en présentant d'importants avantages :

- elle est typique d'une grande bande de latitude du Sahel, qui est par ailleurs une zone importante pour le climat global. Cette région est menacée par la désertification, à la fois par des causes naturelles et humaines;
- le climat y est caractérisé par une saison des pluies bien marquée, le « stress » hydrique faisant rapidement son apparition à la fin de la saison des pluies. Des conditions de stress intense y sont fréquentes, pour lesquelles la formulation de l'évapotranspiration présente des difficultés particulières;
- un fort gradient nord-sud des précipitations y induit une variation intéressante des conditions hydriques;
- elle est très bien adaptée pour la télédétection, le relief étant particulièrement peu marqué et la végétation relativement simple, avec seulement quatre types de couverture : mil, jachère, savanne, et brousse dégradée;
- le bilan hydrique et le développement de la végétation y sont très fortement couplés, même à courte échelle de temps (deux semaines);
- le forçage atmosphérique y est relativement simple, par suite de la bonne stationnarité du régime météorologique. Les régions côtières et montagneuses en sont éloignées et, au contraire de ce qui peut être rencontré en Europe, peu de phénomènes complexes de moyenne échelle s'y développent, à l'exception des lignes de grains;
- son régime hydrologique complexe, avec forte infiltration, écoulement de surface et importantes concentrations d'eaux, stagnantes dans certaines

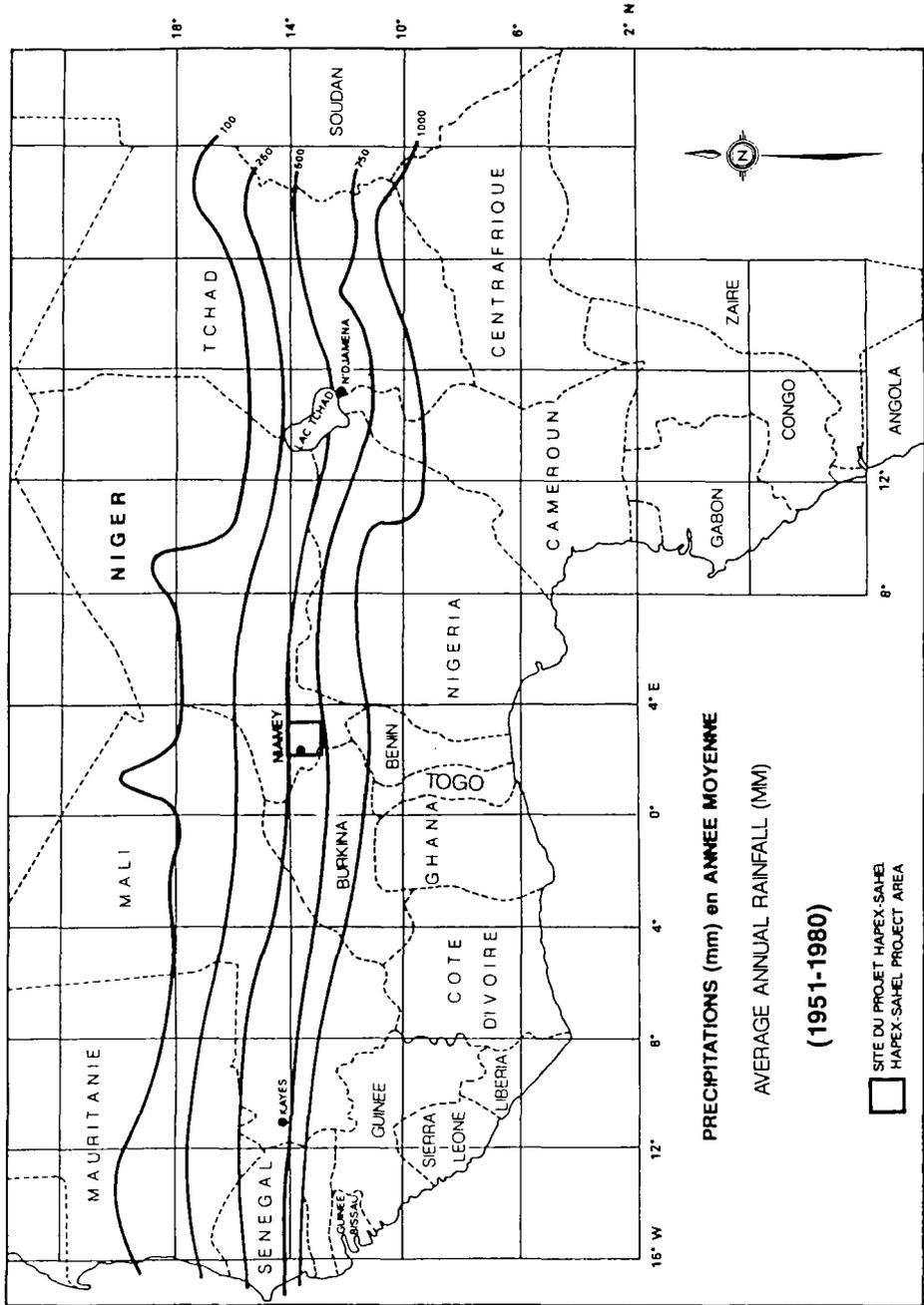


Figure 1.

parties, est caractéristique de l'ensemble du Sahel. La partition des précipitations entre évapotranspiration et drainage profond est un problème clé pour l'ensemble des régions sahéliennes.

Les caractéristiques décrites ci-dessus sont communes pour la plupart à l'ensemble de la zone sahélienne. Les arguments plus spécifiques ayant conduit au choix de cette zone particulière sont :

- l'existence d'organismes de recherche nigériens et internationaux à Niamey;
- la poursuite d'études telles que le projet EPSAT, pour lequel 60 pluviomètres à mémoire statique sont actuellement en fonctionnement, fournissant une partie de l'équipement nécessaire pour HAPEX-Sahel, et permettant la constitution d'une intéressante banque de données sur les précipitations;
- la réalisation d'études antérieures dans cette même zone, l'une par l'Institut d'Hydrologie du Royaume-Uni (*Institute of Hydrology*), l'autre conjointement par l'Institut National de Recherches Agronomiques, l'Institut de Recherche en Agronomie Tropicale et l'Université de Copenhague (Danemark);
- la disponibilité d'infrastructures et de moyens de transport.

Les équipements

Les moyens de mesure de base seront constitués par le réseau pluviométrique EPSAT complété par le radar hydrologique de l'aéroport de Niamey, par la station de radiosondage de Niamey et par l'ensemble des stations météorologiques de la zone. La couche de surface atmosphérique sera documentée grâce à un ensemble de stations météorologiques automatiques. Trois sites particuliers seront tout spécialement instrumentés pour les études des processus liés à la végétation, à l'évapotranspiration et à l'humidité des sols, ainsi que pour fournir les données de « vérité-sol » pour les études de télédétection.

Un premier site sera situé sur la rive ouest du fleuve Niger, près de Sadoré, et un autre vers le milieu de la zone, ce qui permettra de prendre en compte les différences de structures géologiques et hydrogéologiques entre les deux rives du fleuve. Le troisième site sera situé au nord, à proximité de Ouallam. Chaque site comprendra en outre, pour chacun des deux ou trois types dominants de végétation, des mesures du bilan énergétique de surface, de l'humidité des sols, des paramètres de la végétation, de la température de brillance et de la réflectivité bidirectionnelle. La plupart des mesures de flux turbulents seront effectuées par la techniques des corrélations, et les flux de gaz carbonique seront mesurés en quelques-uns des sites. Chacun de ces sites principaux sera géré de telle sorte qu'il conduise à l'estimation des flux à l'échelle de quelques kilomètres. Chaque site comprendra aussi un bassin versant instrumenté.

Le site central disposera d'une observation continue depuis le sous-sol jusqu'à l'atmosphère. Le dispositif expérimental incluera en plus des équipements mentionnés plus haut, un radiosondage pour le suivi des propriétés de la couche limite et le calcul des corrections atmosphériques et, si possible, un profileur de vent.

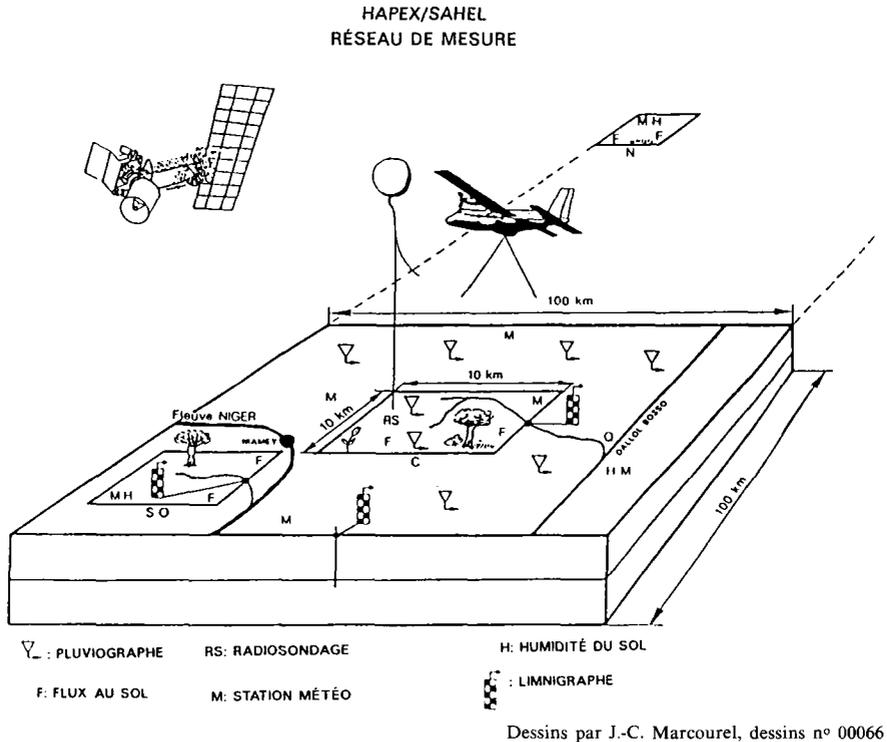


Figure 2.

La télédétection

On prévoit la participation de l'avion C-130 de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*, Etats-Unis), son équipement de télédétection incluant un radiomètre multispectral opérant dans l'infra-rouge thermique (appareil dit « TIMS »), et un radiomètre hyper-fréquence. L'avion devra cartographier le gradient nord-sud des conditions de surface. La combinaison des informations temporelles aux trois sites, qui donnent aussi accès à ce gradient, et des données de l'avion de télédétection fournira la base expérimentale pour l'intégration d'échelles des flux. Des éléments complémentaires proviendront de la télédétection spatiale. Il est en effet prévu de cartographier l'albédo et la température de surface à partir des satellites géostationnaire METEOSAT et défilant de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, Etats-Unis). Les données du capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) des satellites de la NOAA seront utilisées pour cartographier l'indice de végétation. Des informations plus précises sur la couverture végétale et les conditions de surface seront obtenues à partir des satellites SPOT et LANDSAT (instrument dit « Thematic Mapper »). La

Programme Hapex-Sahel

méthode d'intégration d'échelles sera ensuite testée par comparaison avec des mesures aéroportées directes des flux turbulents, provenant de l'un ou de l'autre des deux avions français équipés pour ces mesures, soit le Foker-27 de l'INSU-IGN (Institut National des Sciences de l'Univers, Institut Géographique National), soit le Merlin de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN).

La modélisation

Le programme HAPEX-Sahel incluera aussi de nombreuses activités de modélisation numérique.

- modélisation au sein de la végétation;
- modélisation unidimensionnelle verticale du complexe sol-végétation-atmosphère;
- modélisation atmosphérique de processus importants tels ceux associés aux contrastes d'humidité des sols dus à l'inhomogénéité spatiale des précipitations.

Cette partie du programme bénéficiera largement de l'expérience acquise durant HAPEX-MOBILHY.

Calendrier

Une proposition de plan expérimental détaillé sera disponible en mars 1990, et discutée lors de la réunion du groupe de coordination HAPEX-Sahel prévue pour les 19 et 20 juin 1990.

Une base de données historiques concernant la climatologie, l'hydrologie et la végétation sera élaborée courant 1990. Des scènes SPOT et LANDSAT seront acquises et traitées au cours de cette même année.

En 1991, les équipements et le dispositif des trois sites expérimentaux seront testés au cours de l'expérience « EFEDA » organisée en Espagne (région de Cuenca, La Mancha), sous l'égide du programme EPOCH de la Commission des Communautés européennes.

L'expérience proprement dite aura lieu en 1992, avec une période intensive d'observations programmée pour le début de la période d'assèchement, soit en septembre et octobre.

Organisation

Le programme est l'œuvre de scientifiques africains, européens et américains. Le Comité de Pilotage est dirigé par M. Hoepffner (ORSTOM) est composé de J.-P. Goutorbe (DMN/CNRM), P. Sellers (Université du Maryland) et A. Tinga (Université de Niamey). Des coordinateurs sont responsables pour chacune des parties du programme, avec à chaque fois un correspondant nigérien.

6

La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation

O. PLANCHON

ORSTOM Montpellier, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France

Caractérisation du ruissellement et de l'infiltration : état de l'art

Au milieu des années 70, apparaissent simultanément à l'ORSTOM un concept et une technique : les états de surface et la caractérisation de leur fonctionnement hydrique par simulation de pluie sur un mètre carré. Aujourd'hui, la perspicacité de cette association n'est plus à démontrer. Au Sahel, les réorganisations pelliculaires, qui sont une clé dominante pour la détermination des états de surface, conditionnent directement la capacité d'infiltration des sols qu'elles recouvrent, indépendamment de la nature de ceux-ci. En zone soudano-guinéenne, les réorganisations pelliculaires sont en relation avec les sols, mais aussi avec l'activité faunique, la végétation, et d'autres éléments qui sont également pris en compte dans la description des états de surface. Si bien qu'il est encore possible dans cette zone climatique, de prédéterminer les résultats d'une simulation de pluie par la seule description des états de surface, et ceci avec une précision de 10 ou 20 %.

L'échelle du mètre carré est donc, encore une fois, hydrologiquement bien connue. On sait en caractériser le ruissellement, l'infiltration, leurs variabilités spatiales et saisonnières, et prédéterminer l'ensemble de ces caractéristiques avec une marge raisonnable.

Il reste que, à l'évidence, cette échelle unitaire, imposée par un instrument de mesure, n'est d'aucune utilité opérationnelle. Maintenant que les travaux portant sur cette échelle ont abouti à des résultats probants, on doit la considérer comme une échelle de mesure et non comme une échelle d'étude.

Les échelles d'études pour lesquelles l'échelle unitaire doit être un outil sont celles de la parcelle, du versant et du bassin versant.

D'une façon logique pour une technique relativement jeune, la maîtrise de l'outil est en avance sur son utilisation, particulièrement en hydrologie. Ainsi, la seule utilisation des résultats de simulation de pluie tentée à ce jour dans cette discipline est le « Modèle Simulateur », qui consiste en une simple moyenne pondérée des résultats locaux, étendus à l'ensemble d'un bassin versant. Malgré sa simplicité et le peu de crédit que l'on peut accorder aux concepts qui régissent la méthode, ce « Modèle » permet de prédéterminer des crues de projet sur des bassins versants peu perméables et dont la perméabilité locale décroît vers l'aval. C'est le cas d'un certain nombre de bassins versants sahéliens, sur lesquels le haut des versants est imperméabilisé par des réorganisations pelliculaires, tandis que le bas est occupé par des formations verticales peu perméables.

Forte de sa maîtrise de l'échelle unitaire, l'UR 2B de l'ORSTOM⁽¹⁾ développe des recherches météorologiques et numériques dans le but de mieux intégrer la dynamique des mètres carrés consécutifs, qu'elle connaît, dans celle des parcelles, des versants ou des petits bassins versant, qu'elle cherche à connaître.

Cet article comprendra deux volets. Le premier est météorologique. Il a pour objet d'observer les flux de ruissellement sous averse naturelle pour étudier les règles qui en régissent la propagation et l'infiltration. Le second est numérique, il vise la prise en compte des phénomènes observés dans la modélisation des versants.

Mesure des flux de ruissellement sur un versant

Objectif et installations

Un mini-piège permet la mesure, après chaque averse, de la quantité d'eau qui a franchi un segment de versant matérialisé par une rigole perpendiculaire à la pente. Il s'agit donc d'une mesure de flux ruisselé. Plusieurs mini-pièges disposés le long de la pente permettent de mettre en relation le flux ruisselé et la position du mini-piège, caractérisée par une longueur de pente. S'il n'y a pas réinfiltration du ruissellement durant son parcours, comme le suppose le « Modèle Simulateur », le flux ruisselé doit être une fonction strictement croissante de la longueur de pente.

Le schéma général d'installation d'un mini-piège est présenté sur la figure 1. La longueur de la rigole interceptant le ruissellement est de 30 cm. Cette valeur est choisie volontairement faible pour minimiser les coûts d'installation et de maintenance, et permettre ainsi la multiplication des points de mesure. Elle

(1) Unité de Recherche appartenant au Département Eaux Continentales, et dont le thème concerne les « Processus de transformation, fonctionnement et transferts aux interfaces sol-plante-atmosphère ».

Ruissellement le long d'un versant

correspond à peu près à l'écartement moyen séparant deux touffes d'herbe dans les zones de savane à herbacées cespiteuses⁽²⁾; dans ce cas, la rigole collecte le ruissellement qui passe entre les deux touffes.

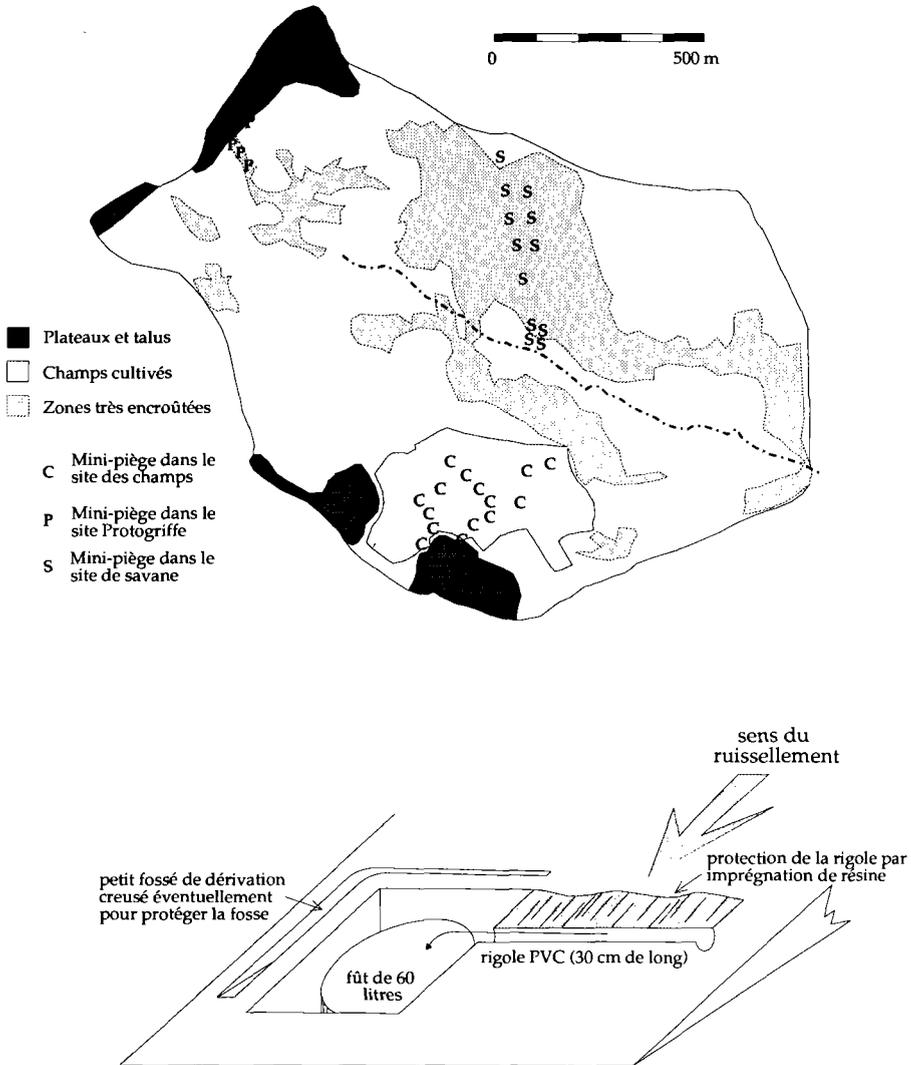


Figure 1. Installation . **1a** : schéma de localisation des mini-pièges. **1b** : schéma d'installation d'un mini-piège.

(2) Herbacée cespiteuse : herbacée ayant une structure en touffes bien individualisées, par opposition à unicaule : à une seule tige.

L'eau est recueillie dans un bidon de 60 litres disposé au fond d'une petite fosse aveugle. Le bidon doit être lesté de façon à ne pas flotter, ni détruire l'installation, si la fosse se remplit plus vite que le bidon.

Méthodes de mesure et d'interprétation des résultats

Après une averse, trois cas sont pris en compte : le bidon peut être vide, contenir de l'eau sans avoir débordé, ou avoir débordé. Le volume d'eau ayant traversé la rigole pendant l'averse est donc mesuré selon deux classes : 0,0 à 60 litres, et supérieur à 60 litres.

Si l'on considère l'ensemble des averses d'une période, on peut calculer le nombre de fois que chacun de ces trois états a été observé pour chaque mini-piège. Ce nombre est exprimé en pourcentage du nombre total d'averses observées. Chaque mini-piège est ainsi caractérisé par trois nombres, dont la somme est égale à 100 %, et qui peuvent donc être représentés sur un diagramme ternaire (figure 2).

La figure 2 illustre cette représentation. Etant un peu particulière, il est utile de s'y attarder avant de présenter nos résultats. Imaginons pour cela un versant homogène, et plan, et cherchons quelle serait la position sur le diagramme de trois mini-pièges H, M et B, disposés respectivement en haut, à mi-pente et en bas de ce versant.

Si les conditions initiales sont identiques en tout point, le ruissellement apparaît simultanément sur l'ensemble du versant lorsqu'un seuil est franchi (pluie limite de ruissellement, intensité maximale d'infiltration,...). Il en résulte que le nombre d'averses n'ayant pas provoqué de ruissellement est le même pour tous les mini-pièges. Les trois mini-pièges de notre exemple sont donc situés sur un axe défini par une valeur unique de la variable « Vide », caractéristique du versant.

Sur l'axe « débordé » du diagramme, la position d'un mini-piège exprime la probabilité que le volume ruisselé au cours d'une averse excède 60 litres et fasse déborder le bidon. Si l'on suppose que le ruissellement se propage sans se réinfiltrer, et que l'infiltration est indépendante de la hauteur de la lame d'eau à la surface du sol, la position d'un mini-piège sur l'axe « débordé » du diagramme est une fonction strictement croissante de la longueur de pente⁽³⁾.

La figure 2 illustre la position des mini-pièges H, M et B selon ce schéma théorique : « Vide » constant et « Débordé » croissant.

Choix des sites

Le choix des sites a répondu à un double objectif :

- tester l'aptitude de cette méthode de mesure à mettre en évidence le cumul du ruissellement le long de la pente. Il fallait pour cela choisir un site témoin pour lequel on pouvait raisonnablement supposer un fonctionnement de ce type;

(3) Fonction strictement croissante, mais pas proportionnelle, car elle dépend de la loi de répartition des caractéristiques des averses et des caractéristiques de l'infiltration sur le versant.

Ruissellement le long d'un versant

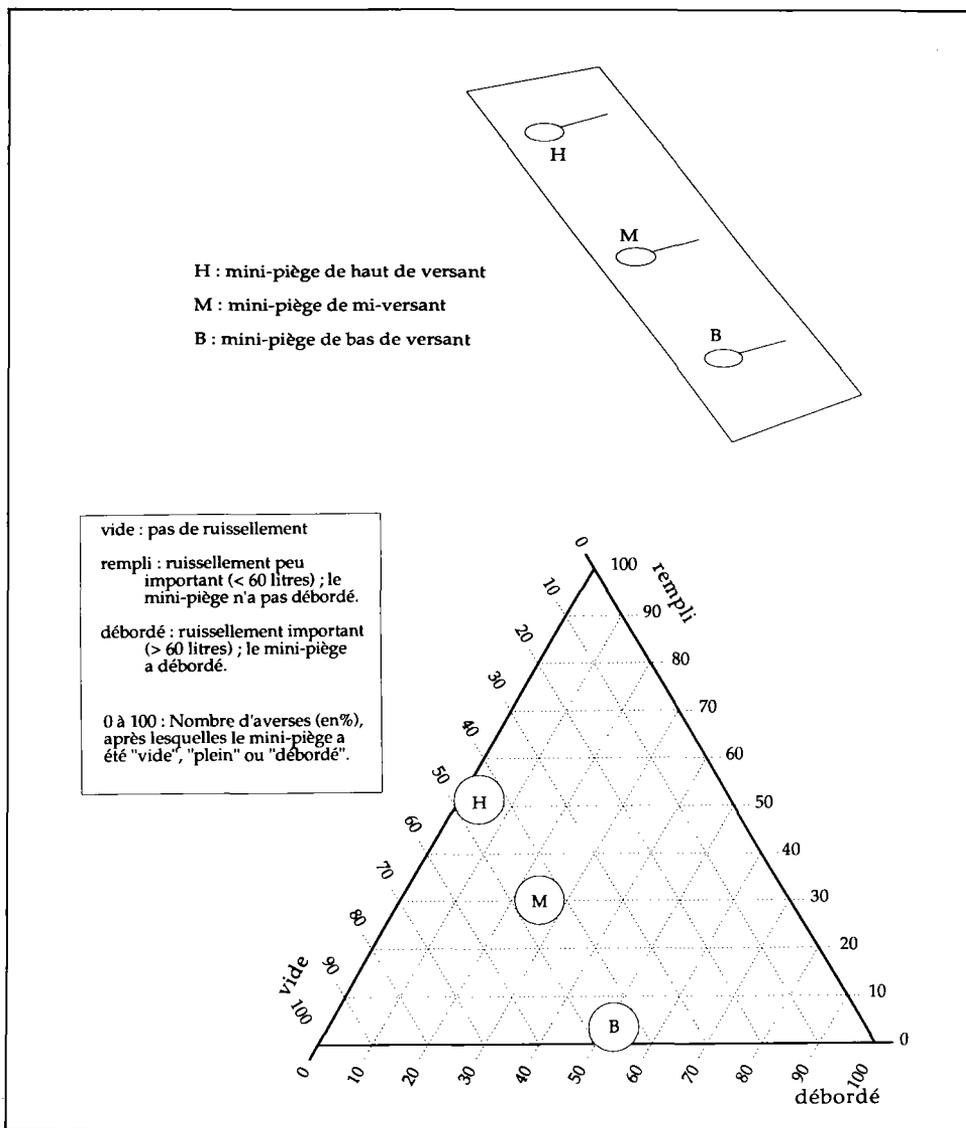


Figure 2. Schéma explicatif de la méthode d'interprétation des résultats. **2a** : un exemple de localisation pour trois mini-pièges. **2b** : présentation des résultats sur un diagramme ternaire : cas de l'exemple théorique ci-dessus.

- mettre en évidence, par comparaison au témoin, le comportement des zones de savane présentant un micro-relief marqué, et une plus ou moins grande hétérogénéité dans la répartition des sols et des états de surface unitaires.

Pour répondre à ces objectifs, trois sites ont été équipés : le site des champs, le site protogriffe et le site de savane.

Le site des champs

Le site a été choisi comme témoin. Il est situé à l'amont de la rupture de pente de mi-versant et sa couverture pédologique est relativement homogène. Il ne présente pas de formes de ruissellement concentré. Seule la surface unitaire de type ERO⁽⁴⁾ est représentée, et il n'y a pas de micro-relief. Ce site est équipé de 14 mini-pièges.

Le site protogriffe

Le site protogriffe est situé sur le versant de tête de vallée et a été équipé de 4 mini-pièges. La séquence observée débute au talus du plateau cuirassé qui domine le bassin, et suit un « couloir » de savane claire d'une dizaine de mètres de largeur, limité de part et d'autre par une végétation plus boisée.

Sur le talus, les sols sont ferrallitiques, et la végétation boisée; les herbacées sont hautes et ont un port tombant. Une simulation de pluie effectuée sur un autre de ces talus (Chevallier, 1988) indique une infiltrabilité importante malgré les fortes pentes. Deux mini-pièges y sont installés.

Dans le « couloir » de savane claire, la seule surface unitaire représentée est ERO, c'est-à-dire la même que pour le site des champs. La végétation y est en revanche naturelle; les herbacées sont *Hyparrhenia smithiana* et quelques autres espèces de structure voisine : cespiteuse à port dressé et feuilles étroites. Le long de ce couloir, l'organisation des touffes d'herbe détermine un micro-relief de 3 à 5 cm d'amplitude, orienté dans le sens de la pente sous la contrainte du ruissellement. Une simulation de pluie effectuée en fin d'hivernage (Planchon, 1989) indique que le coefficient de ruissellement stabilisé Rx est de 100 % en fin d'averse pour la partie aval de la séquence. Le « couloir » est équipé de deux mini-pièges.

Le site de savane

Le site de savane est situé dans un milieu à végétation ouverte et à réorganisations pelliculaires superficielles permanentes; il est équipé de 12 mini-pièges. Les herbacées y sont du même type que dans la partie aval du site protogriffe, mais les ligneux peuvent appartenir à des faciès végétaux différents, allant de la savane arbustive claire à la savane arborée basse. Le micro-relief lié aux herbacées est marqué; les surfaces unitaires sont de type ST2 ou ST3 caractérisées respectivement par la dominance des croûtes à deux ou trois micro-horizons (Casenave et Valentin, 1988), et présentent localement quelques croûtes de type ERO.

En résumé, nous retiendrons pour ces trois sites les caractères suivants :

- le site des champs : lisse, uniforme pour la surface et les sols;
- le site protogriffe : rugueux, imperméabilisation croissante des sols vers l'aval;

(4) Surface de type érosion, définie comme présentant moins de 20 % de turricules de vers, moins de 40 % de charge grossière, et recouverte d'une croûte d'érosion (croûte à un seul micro-horizon, plasmique; elle correspond à l'érosion de croûtes structurales à 2 ou 3 micro-horizons) (Casenave et Valentin, 1988).

Ruissellement le long d'un versant

— le site de savane : rugueux, appartenant à une même unité cartographique pour la surface et les sols mais présentant une certaine hétérogénéité dans la structure de la végétation ligneuse et le type de surface unitaire.

Les trois sites et les mini-pièges dont ils sont équipés sont localisés sur la carte de la figure 1.

Résultats

Les résultats sont représentés sur les diagrammes de la figure 3. Les ronds blancs représentent les mini-pièges les plus hauts sur la pente dans chacun des sites, les ronds noirs représentent les plus bas, et quatre niveaux de gris intermédiaires permettent de comparer la longueur de pente qui caractérise chacun des mini-pièges. De plus, les mini-pièges situés rigoureusement sur la même ligne de pente sont reliés par un trait plein.

Le site des champs

La figure 3a illustre les résultats obtenus pour le site des champs. On constate que le schéma théorique présenté sur la figure 2 est respecté : le long d'une même ligne de pente (le long des traits pleins), les mini-pièges débordent d'autant plus souvent qu'ils sont plus bas dans la pente et, à longueur de pente égale (pour les points de même couleur), le nombre de fois que le mini-piège a débordé reste à peu près constant.

Le site protogriffe

La figure 3b illustre les résultats obtenus sur le site protogriffe. On constate que le diagramme présente encore une organisation selon la longueur de la pente, mais que cette organisation diffère de celle que nous avons présenté dans le schéma théorique :

- les mini-pièges sont d'autant moins souvent vides qu'ils sont situés vers le bas de la séquence, ce qui s'interprète en considérant l'imperméabilisation croissante des sols décrite plus haut;
- ils débordent d'autant plus fréquemment qu'ils sont situés vers le bas de la séquence. Ceci est conforme au schéma théorique, mais peut également être interprété comme l'expression de l'imperméabilisation croissante des sols vers l'aval. Face à cette alternative, une modélisation de la propagation de l'onde de ruissellement sur un versant dont l'infiltrabilité n'est pas uniforme serait nécessaire.

Le site de savane

Sur le site de savane, en revanche, le schéma théorique n'est plus respecté (figure 3c) :

- en haut du versant (points blancs), les mini-pièges sont souvent vides (près de 9 fois sur 10) pour les 10 % restant, l'un d'entre eux déborde toujours et l'autre pratiquement jamais;

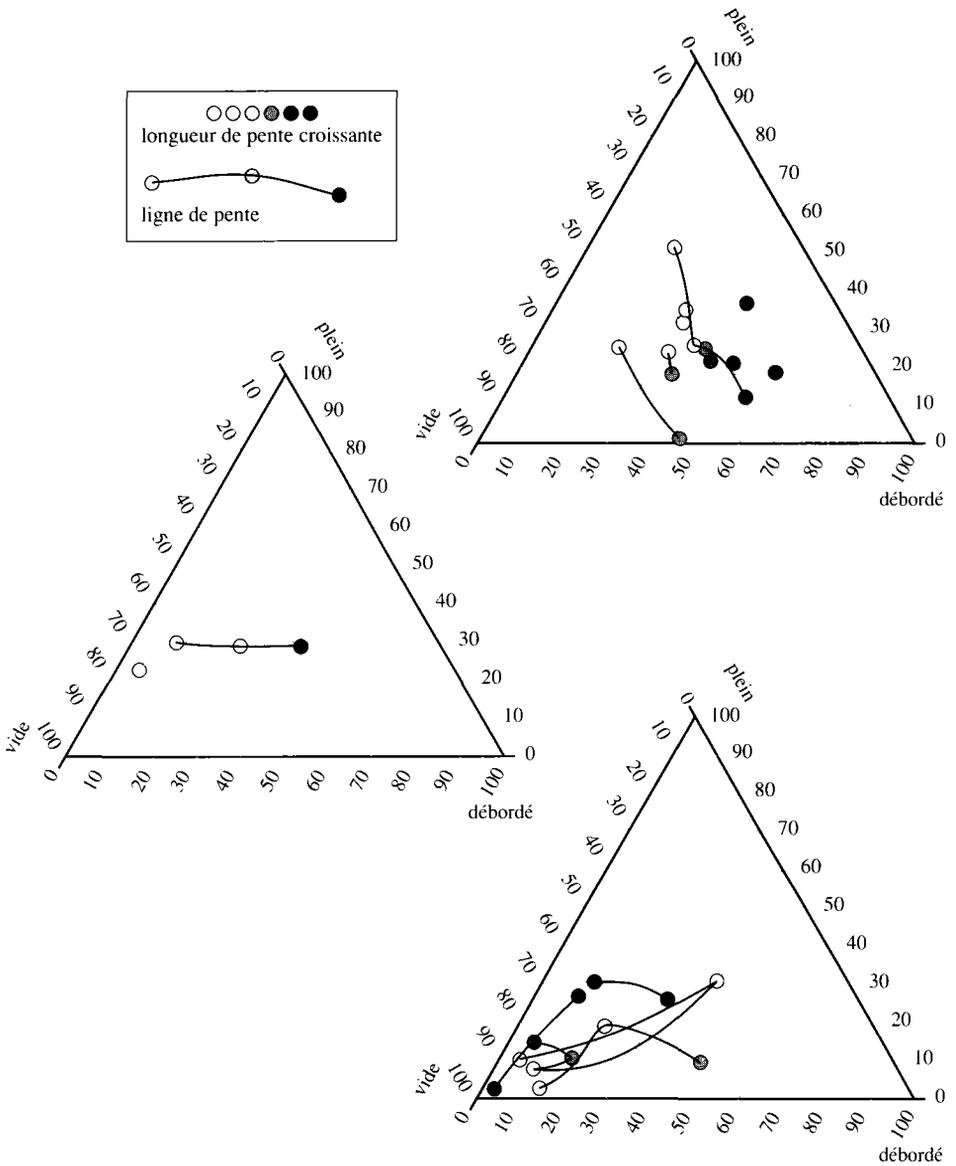


Figure 3. Résultats : 3a : site des champs. 3b : site protogriffe. 3c : site de savane.

- de l'amont vers l'aval du versant, même les mini-pièges situés exactement sur la même ligne de pente ne sont pas alignés sur l'axe théorique, ce qui signifie que les conditions locales d'infiltration dominent sur l'organisation générale du ruissellement à l'échelle du versant;
- en bas du versant (points noirs), les mini-pièges débordent moins d'une fois sur trois, et trois d'entre eux moins de deux fois sur dix. Ces valeurs sont

Ruissellement le long d'un versant

à comparer au résultat du site des champs, pour lequel les mini-pièges situés les plus bas sur le site, c'est-à-dire juste à l'amont de la rupture de pente de mi-versant, débordent près de deux fois sur trois. Ceci signifie, là encore, que quelles que soient les modalités du ruissellement dans la partie supérieure du versant, celui-ci est susceptible de se ré-infiltrer avant d'atteindre le bas de la pente.

Discussion

Deux thèmes de discussion doivent être développés pour aboutir à des propositions de modélisation. Il s'agit de l'organisation de l'infiltration le long d'un versant, et de sa variabilité locale.

Variabilité locale de l'infiltration

Le site des champs possède une faible variabilité locale de l'infiltration en raison de la dégradation uniforme de celle-ci introduite par la culture du riz.

Le site protogriffe possède une variabilité locale de l'infiltration faible d'un mètre carré à l'autre, mais importante à l'intérieur de chacun d'entre eux :

- infiltration pratiquement nulle à travers les croûtes présentes entre les touffes d'herbe. C'est ce que mesure la simulation de pluie, qui ne crée au sol qu'une lame d'eau trop peu épaisse pour atteindre le collet des touffes d'herbe;
- infiltrabilité très importante sur chacune des touffes, au pied desquelles l'activité faunique importante remanie en permanence les réorganisations pelliculaires susceptibles de s'y développer. Pour autant que le sol sous-jacent ne soit pas saturé, celui-ci est suffisamment poreux pour permettre une infiltration importante de l'eau qui y tombe directement, ou de celle provenant d'une lame d'eau ruisselant depuis le haut du versant, et qui aurait atteint une épaisseur suffisante pour accéder à cette porosité.

La figure 4 illustre schématiquement l'effet de cette variabilité sur l'infiltration, en présentant une coupe transversale entre deux touffes d'herbe.

Enfin, le site de savane présente le même type de variabilité locale. Une variabilité supplémentaire s'y superpose. La végétation y est en effet composée d'arbres irrégulièrement disséminés. Ceux-ci peuvent former localement des groupements de quelques arbres au milieu desquels se développe une végétation herbacée différente. *Andropogon gayanus* réapparaît et les conditions d'infiltration redeviennent favorables. Si ces groupements occupent une faible partie de l'espace, il reste que la distance séparant deux d'entre eux le long d'une même ligne de pente est bornée, et que l'infiltration importante que l'on peut y observer par simulation de pluie (pas de ruissellement pour une averse décennale) limite probablement à cette même distance la longueur de pente le long de laquelle il peut y avoir cumul du ruissellement.

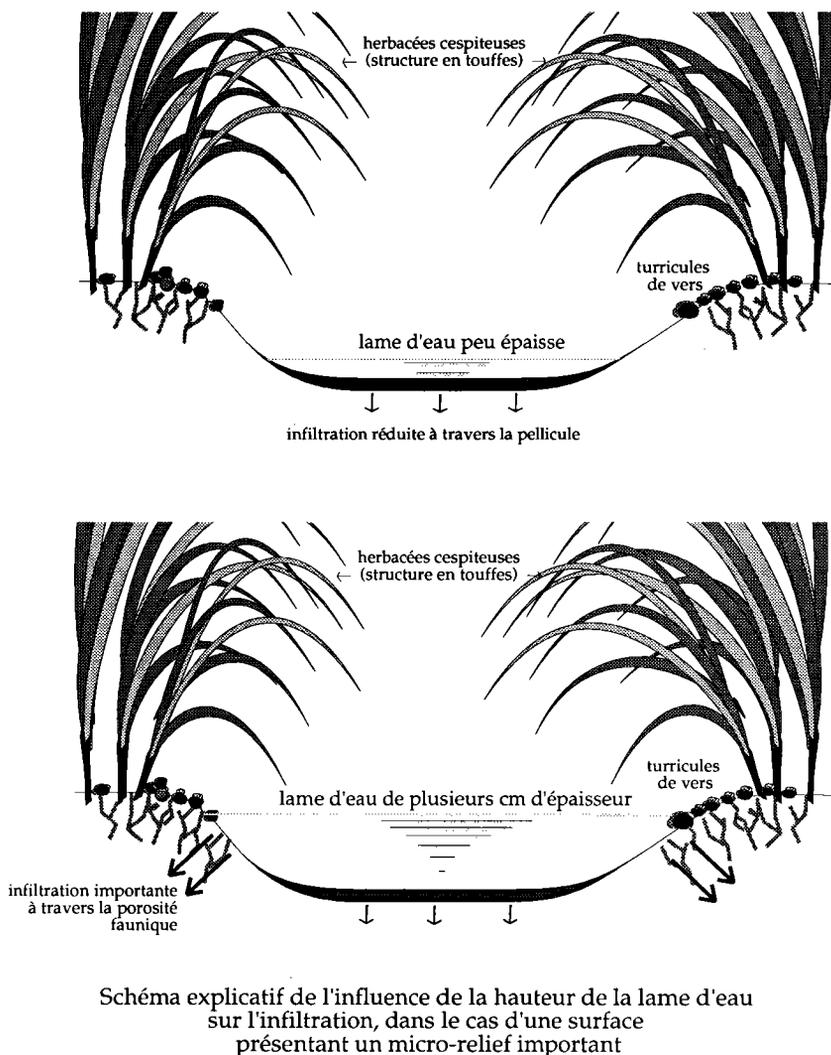


Figure 4. Schéma de l'accès différentiel à la porosité.

Organisation de l'infiltration le long d'un versant

Le site de savane, pour lequel le modèle théorique est particulièrement mis en défaut, est le seul des trois qui intègre un versant complet depuis la ligne de crête jusqu'au cours d'eau. Le long de ce versant, l'infiltration présente une organisation spatiale particulière, importante en haut de versant, minimale à mi-pente et quasi illimitée dans les sables de haut et de bas de versant.

Sur ce site, qui combine une variabilité spatiale de l'infiltration à plusieurs échelles, celle de la touffe d'herbe et celle du groupement de quelques arbres, à une organisation de la perméabilité, croissantes vers le bas de la pente à partir de la mi-versant, on comprend que les résultats des mini-pièges indiquent que les flux de ruissellement sont soumis aux seules caractéristiques locales et ne sont pas organisés le long du versant.

Modélisation

Il ressort de la discussion précédente que la variabilité locale d'un paramètre quelconque utilisé pour le calcul de l'infiltration prend au moins autant d'importance que sa valeur moyenne.

Une modélisation de la propagation du ruissellement le long de la pente devra donc tenir compte de l'organisation longitudinale et de la variabilité de chacun de ses paramètres.

L'organisation longitudinale peut être prise en compte en privilégiant la direction de la pente dans la modélisation. L'importance de la variabilité des paramètres nous impose une prise en compte stochastique de chacun d'eux.

Ce paragraphe traite successivement de la discrétisation de l'espace que nous proposons, du calcul de la propagation le long de chacun des éléments discrétisés, et de l'aspect stochastique qu'il nous faudra introduire dans les calculs.

Discrétisation de l'espace

La première étape de la modélisation consiste à partager le domaine étudié, un petit bassin versant par exemple, en un certain nombre de sous-ensembles le long desquels la propagation sera modélisée. La traditionnelle discrétisation en mailles régulières ne correspond à aucune réalité physique. Ce mode d'appréhension de l'espace s'est longtemps imposé pour des raisons purement informatiques de facilité de mise en œuvre; raisons qui ne résistent pas à l'augmentation croissante de la puissance de calcul de nos ordinateurs. Nous lui avons préféré une discrétisation selon les lignes de pente. Le premier travail consiste à déterminer des lignes de pentes caractéristiques et à isoler les portions de versant se trouvant entre celles-ci. Par définition, il n'y a pas d'échange latéral entre deux portions contiguës ainsi définies, ce qui nous permet de les modéliser séquentiellement.

Sur chacune de ces portions de versant, tous les points situés à égale distance de l'exutoire sont confondus en un seul, et la propagation n'est calculée que le long de la ligne de pente fictive ainsi construite. La dimension transversale, assimilée à la largeur, est connue en tout point de cette ligne. Les lois de répartition des autres paramètres, tels que la pente et les caractéristiques de l'infiltration, sont également connues en tout point de la ligne.

Propagation sur un versant à largeur variable

Le problème se résume ainsi à la modélisation de la propagation sur un versant à largeur variable d'une part, et à la prise en compte des paramètres pour lesquels on ne connaît que la loi de répartition, d'autre part. Ce paragraphe aborde le problème de la propagation.

Description de la lame d'eau

La seule discrétisation de l'espace qui est apparente à l'utilisateur de notre futur modèle est celle en portions de versant. Il choisit le nombre et la position des lignes de pente caractéristiques qui vont cloisonner l'espace en autant de sous-systèmes indépendants. A l'intérieur de chaque portion de versant, le modèle doit se charger de propager l'eau entre chaque pas de temps, en utilisant pour cela une discrétisation qui lui sera propre et, autant que faire se peut, indépendante de l'échelle d'étude.

Dans cet objectif, la discrétisation eulérienne, en biefs fixes, n'est pas justifiée car, au moins dans un premier temps, seul le débit à l'exutoire de la portion de versant doit être connu pour alimenter, au pas de temps suivant, le réseau hydrographique ou une éventuelle portion de versant située à l'aval. Nous proposons d'adopter un point de vue lagrangien en discrétisant le volume d'eau sur le versant plutôt que l'espace.

Les caractéristiques de la lame d'eau (hauteur, vitesse, etc.) ne sont calculées qu'en un certain nombre de sections de référence, mobiles dans l'espace et caractérisées par le volume total d'eau se trouvant à l'amont.

Soit Q le débit traversant une section donnée du versant située à la distance X du haut du versant, soit c la vitesse moyenne caractéristique de ce débit, soit S la surface mouillée de la section.

$$c = Q/S$$

Soit dx la distance parcourue à cette vitesse c pendant le pas de temps dt , si l'on suppose que la vitesse ne varie pas pendant dt , les molécules d'eau appartenant initialement à la section X se trouveront « équitablement » réparties de part et d'autre de la section $X + dx$ au bout du temps dt (figure 5).

La section $X + dx$ a donc « derrière elle » le même volume que, précédemment, la section X . La seule possibilité pour que cette condition ne soit pas vérifiée est que la vitesse moyenne c' de la section située immédiatement à l'amont de la section X soit supérieure à c . Or ceci est une condition de non application des lois classiques de la propagation. Elle reviendrait à simuler le déferlement d'une vague.

L'idée de la modélisation est de suivre les positions successives $X, X + dx, \dots$ d'un certain nombre de sections caractéristiques. Le pas de discrétisation n'est pas un pas d'espace mais un pas de volume pV qui peut être soit fixe, soit une proportion fixe du volume total d'eau se trouvant à la surface du versant à chaque instant.

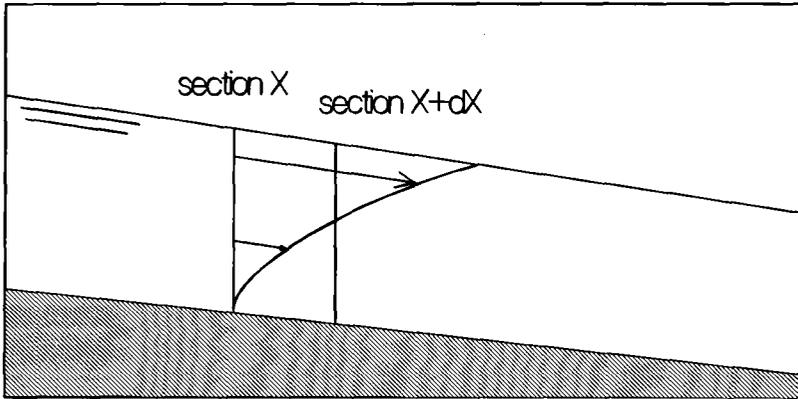


Figure 5. Déplacement d'une section X et construction de la section X + dx.

Méthode de calcul

La méthode peut être expliquée sur la base de la fonction $V(X,t)$ ou t : temps.

Soit x = distance hydrologique à l'exutoire, soit $Max(X)$ = plus grande distance x existant sur le versant,

$$X = Max(X) - x$$

X est donc une représentation de la distance à l'exutoire. Par commodité, X est compté nul en haut du versant. Il ne faut pourtant pas que ce changement de signe prête à confusion : X n'est pas la distance à la crête.

La méthode de calcul est présentée sur les figures 6a et 6b. Elle consiste à calculer pour chaque pas de temps la courbe $V(X)$. Pour ce faire, soit V_i le volume caractéristique de la i ème section et X_i sa position sur le versant, on effectue successivement les calculs suivants :

- calcul de la section $S(X_i) = dV/dx(V_i)$;
- calcul de la hauteur d'eau $Y(X_i) = S/L(X_i)$; $L(X)$ = largeur du versant au point X ;
- calcul de la vitesse moyenne $c(X_i)$ de la section;
- calcul de la distance parcourue dx pendant le pas de temps dt . $dx = c(X_i).dt$;
- calcul de la nouvelle abscisse $X_i = X_i + dx$.

Conservation du volume

On s'étonne un peu de l'absence d'équations différentielles dans cette méthode. L'équation de continuité a été « ignorée ». Y a-t-il conservation du volume ?

La réponse est Oui. L'équation de continuité est en effet un problème spécifique des méthodes eulériennes. La figure 7 montre d'ailleurs qu'elle est vérifiée par construction. Cette méthode n'est pourtant pas une solution miracle sur ce point : la dérivation, à chaque pas de temps, de la représentation intégrale du volume pour connaître la section est le pendant de la résolution analytique classique de l'équation de continuité dans les méthodes eulériennes.

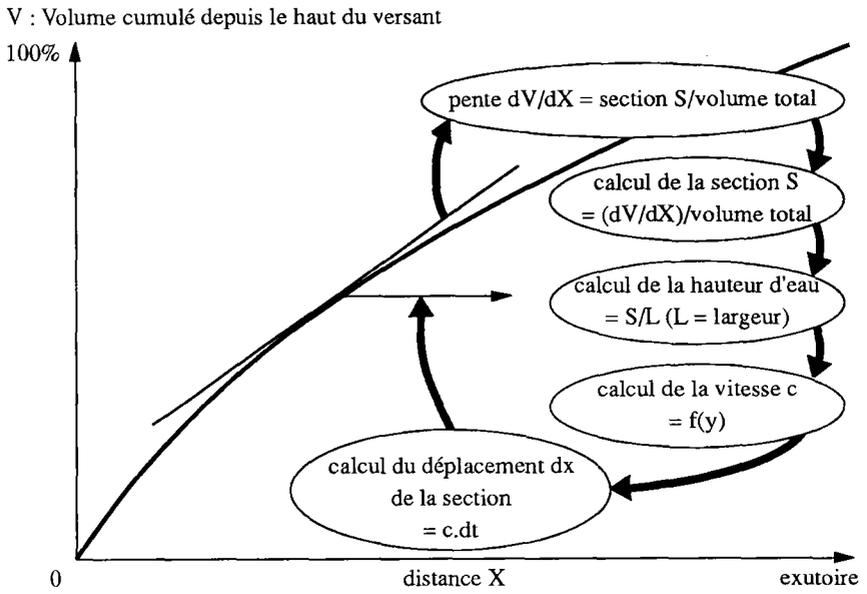


Figure 6a. Calcul du déplacement d'une section.

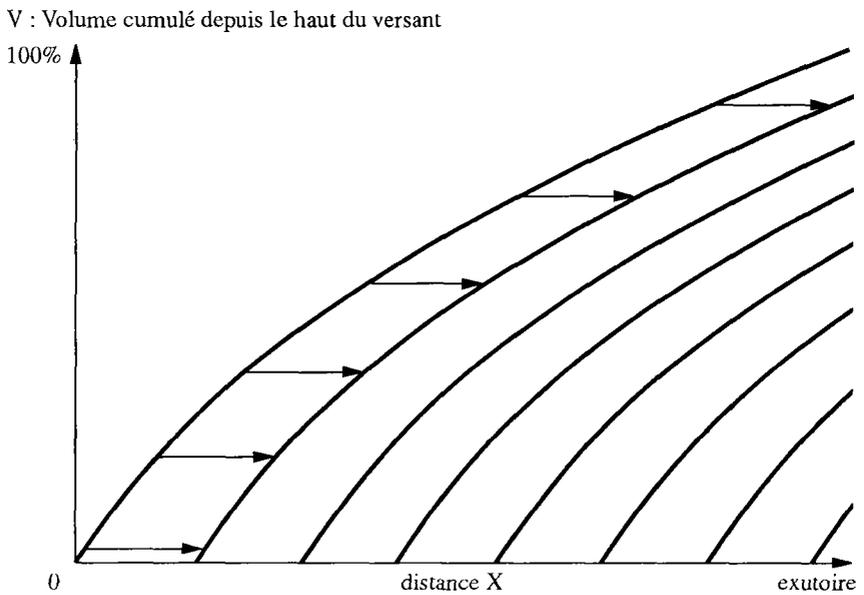


Figure 6b. Déplacement de toutes les sections.

Avantages

- La discrétisation spatiale fixe, en biefs, avec calcul du débit d'entrée et du débit de sortie oblige à puiser uniformément sur l'ensemble du bief pour fournir le débit de sortie. La pente de la lame d'eau à l'intérieur du bief est ainsi toujours parallèle au sol. Sur un versant où, par nature, l'écoulement est destiné à devenir rapidement nul, elle a le gros défaut de provoquer un amortissement parasite directement fonction du nombre de biefs pris en compte. Cette approximation, et les amortissements parasites qu'elle provoque, sont évités par la méthode proposée.
- La structure du programme informatique est évolutive : on peut lui « brancher » n'importe quel module de calcul de la vitesse et refaire tourner le modèle sans changer ni sa formulation ni même la valeur des autres paramètres, en particulier les paramètres de discrétisation. De façon plus générale, cette structure est à même de supporter un véritable générateur de modèles hydrologiques, dans la mesure où elle ne repose que sur l'équation de conservation de la masse. On peut ainsi envisager d'implémenter sur cette structure aussi bien les équations classiques de l'hydraulique que des équations entièrement empiriques si les hypothèses simplificatrices nécessaires aux premières sont jugées par trop irréalistes, et dans la mesure où des observations spécifiques permettent de proposer d'autres solutions.
- L'augmentation du nombre de sections prises en compte pour le même pas de temps aboutit toujours à un résultat identique ou meilleur. Il n'y a plus de conditions de stabilité et d'algorithmes oscillants qui obligent à un choix concerté des pas de temps et d'espace.
- Inversement, l'augmentation du pas de temps aboutit à une dégradation régulière du résultat, sans franchissement de la même limite de stabilité, qui n'existe plus.

Inconvénient

Le volume cumulé V est dérivé à chaque pas de temps, et la méthode est sensible au calcul des dérivées. Ce calcul est un peu long et fait perdre une partie du temps de calcul économisé par la réduction du nombre de sections à prendre en compte à qualité équivalente du résultat.

Résultats

Ce modèle est actuellement à l'état de maquette programmée sur un tableur. Ceci a permis de vérifier que la méthode numérique présentée ci-dessus ne provoque aucun des amortissements parasites reprochés à l'approximation de l'onde cinématique résolue par des réservoirs se vidangeant les uns dans les autres. Il a été testé sur un versant fictif de 100 mètres de long et de 0,5 ha de superficie, aux pas de temps de 20 et 80 secondes, et avec, comme condition initiale, 10 mm d'eau uniformément répartis sur le versant. Le débit est constant sur un versant plan, croissant sur un versant conique concave et décroissant sur un versant conique convexe. Dans tous les cas, le débit s'annule brutalement, sans amortissement, lorsque la section située en haut du versant à $t = 0$ atteint l'exutoire.

La programmation du modèle avec un compilateur classique est en cours. Elle permettra de tester des conditions initiales moins sommaires, et d'apprécier sa robustesse lorsque la largeur du versant ne varie pas continûment le long de la

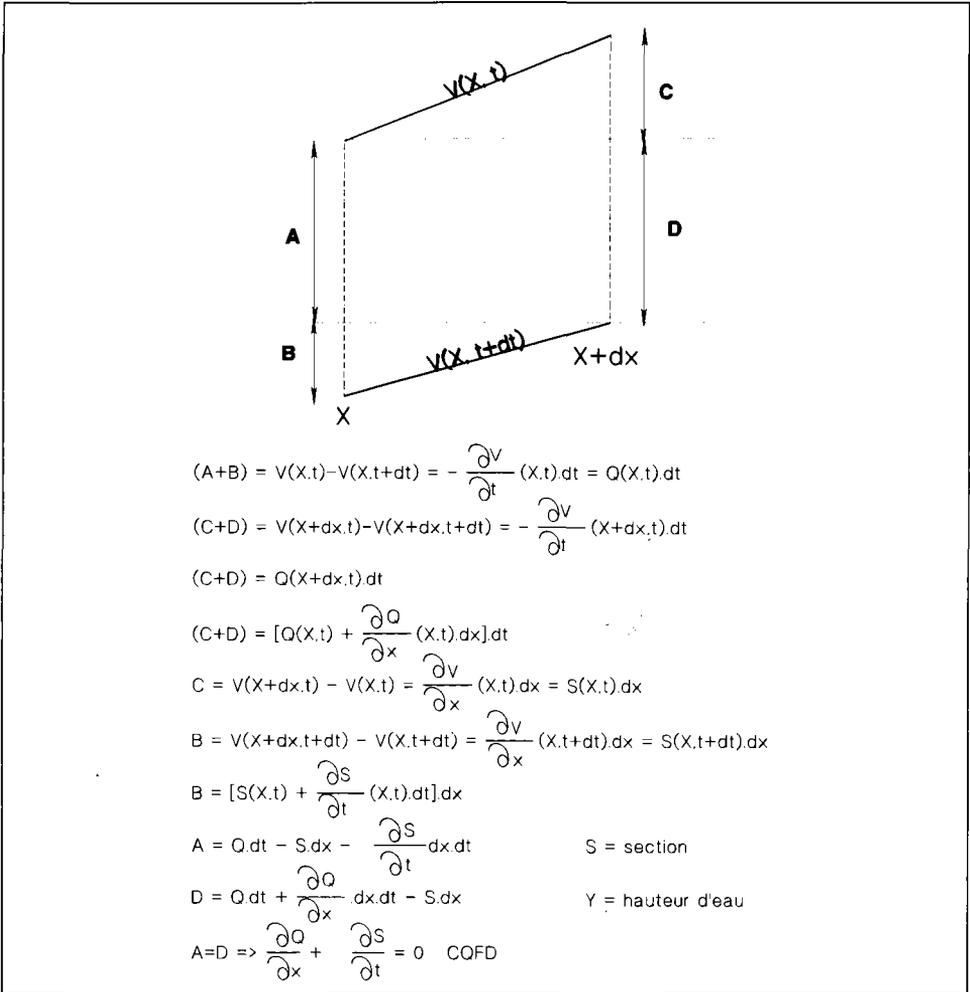


Figure 7.

penne, comme c'est le cas pour les versants c6niques, seuls 2 avoir 6t6 test6s jusqu'2 pr6sent.

Enfin, pour introduire l'infiltration dans ce mod6le purement propagatif, il faudra d6terminer s'il est possible de mod6liser s6quentiellement l'infiltration et la propagation, c'est-2-dire ind6pendamment l'un de l'autre, ou si l'on devra calculer l'interaction entre les deux ph6nom6nes.

Variabilit6 des param6tres

Si les param6tres du mod6le ne sont plus parfaitement connus en un point, la hauteur d'eau devient une fonction al6atoire. Pour chaque hauteur d'eau, la vitesse

est également une fonction aléatoire. Par combinaison des deux, on obtient la fonction aléatoire de la distance parcourue par chaque section. L'introduction de cette variabilité dans un modèle initialement déterministe ne pose pas de problème technique majeur, si ce n'est le temps de calcul nécessaire à la simulation, pour une même période, d'un nombre suffisant de réalisations de l'ensemble des fonctions aléatoires à prendre en compte.

Il restera à vérifier que l'hydrogramme fourni par un versant donné converge vers un hydrogramme limite qui correspond à une discrétisation en un grand nombre de portions de versant à l'intérieur desquels la variabilité des paramètres devient faible.

Conclusion et perspectives

Le travail présenté est l'expression d'une démarche naturaliste. La simulation de pluie couplée à la description des états de surface, technique éprouvée en milieu sahélien, a été utilisée au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, dans un milieu hétérogène et complexe. Les limites atteintes par la méthode dans ce nouveau milieu ont été analysées et ont conduit dans un premier temps à mener les observations complémentaires que constituent les mini-pièges. Les résultats, une fois analysés, ont permis de définir de nouveaux besoins en terme de modélisation : prise en compte privilégiée de l'organisation du milieu le long de la pente, et traitement de la variabilité spatiale des paramètres.

Ces besoins, issus du terrain, ont ensuite été analysés mathématiquement pour aboutir à une *formulation numérique originale*, dans laquelle les raccourcis sont choisis en fonction de besoins propres.

Dans l'état actuel de l'avancement des travaux, qui n'en sont qu'à leurs prémices, les résultats sont satisfaisants. S'ils le restent, nous aurons à notre disposition une chaîne de traitement de l'information complète adaptée aux incessants problèmes de transfert d'échelle, incontournables dans les nombreuses disciplines où il n'y a pas identité des échelles d'étude et des échelles de mesure.

Appliqué aux petits bassins versants, cet outil pourra bénéficier de la facilité de mise en œuvre des campagnes de simulation de pluie, et fournir ainsi à faible coût les prédéterminations nécessaires à la mise en œuvre de petits aménagements agricoles, de versant ou de bas-fond.

D'autres perspectives lui sont également ouvertes. Pour nous limiter à celles d'ores et déjà envisagées, nous citerons l'Hydrologie, aux échelles plus couramment étudiées par cette discipline, et la Conservation de l'Eau et des Sols.

En Hydrologie, le simple fait que le relief soit explicitement pris en compte au travers du découpage selon des lignes de pente caractéristiques rend cette méthode proche des nombreuses questions portant sur le rôle du relief et de la forme des réseaux hydrographiques dans les processus de transfert.

Dans le domaine de l'étude de la sensibilité des sols agricoles à l'érosion, le modèle pourra fournir des probabilités de dépassement des seuils de vitesse correspondant à l'apparition de griffes d'érosion.

7

Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface

A. CASENAVE

ORSTOM, BP 375, Lomé, Togo

L'un des problèmes les plus délicats à résoudre en matière d'hydrologie appliquée est la transposition des résultats d'un bassin versant à un bassin non observé. Nombreux sont les hydrologues qui ont rêvé de déterminer les caractéristiques d'un bassin — débit moyen annuel ou débit de pointe de crue de telle ou telle fréquence — après un simple examen, sans observation, ni mesure de débit.

Pour tenter de résoudre ce problème, deux types d'approche sont possibles, l'une déterministe, l'autre stochastique.

La première de ces approches est illustrée par les travaux des hydrologues de l'ORSTOM qui, depuis le milieu des années 50, ont étudié plus de 300 Bassins Représentatifs et Expérimentaux (BRE), principalement en Afrique.

Le but de ces hydrologues était d'élaborer, à partir de l'analyse d'un échantillon le plus consistant possible, une typologie des bassins versants, fondée sur des paramètres caractéristiques du milieu (paramètres physiques : indice de compacité, de pente, ...; grands types de couvert végétal, nature géologique du substratum, grands types de sols), facilement mesurables.

Lors des premières synthèses de ces résultats, que ce soient ceux des crues décennales (Rodier-Auvray [15]) ou des écoulements (Dubreuil *et al.* [10]; Rodier [14] et 1976), on s'est heurté à un certain nombre de difficultés :

- Impossibilité de quantifier l'aptitude au ruissellement d'un bassin. Faute de mieux, on a classé les bassins en 5 catégories, P1 à P5 (Rodier en 1988 a remplacé ces symboles par les termes « très imperméables », « imperméables », « relativement imperméables », « perméables » et « très perméables »),

plus en accord avec le caractère subjectif de cette classification) mais plus à partir des résultats observés que de critères objectifs. Cette déficience semblait provenir d'une incapacité à prendre en compte les caractéristiques pédologiques des bassins. La nature des sols n'apparaissait pas, lors de l'analyse statistique des résultats, comme un facteur discriminant vis-à-vis du ruissellement ce qui pouvait paraître, a priori, comme surprenant.

- Impossibilité de donner un mode de calcul précis de la crue décennale en zone forestière, les coefficients de ruissellement y variant dans des proportions telles, sans qu'on puisse en déterminer exactement les causes, qu'il n'était même pas possible de classer ces bassins dans des catégories d'aptitude au ruissellement, comme on l'avait fait pour la zone de savane. Là encore, il semblait que l'absence de connaissances sur le comportement hydrodynamique des sols forestiers, était à l'origine de cet échec.

La seconde méthode, stochastique, est illustrée par les travaux du CIEH (Puech et Chabi Gonni [13]). Ces auteurs ont fait des régressions multiples entre les résultats hydrologiques compilés dans le « Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM » (Dubreuil [9]) et les principaux facteurs du ruissellement, plus particulièrement la surface et la pente, pour les bassins du Sahel. Les résultats de cette méthode, beaucoup plus simple d'emploi, sont très nettement améliorés si on peut faire intervenir dans les régressions le coefficient de ruissellement ce qui revient à estimer, comme dans la méthode déterministe, l'aptitude au ruissellement du bassin à partir de critères objectifs.

Les facteurs conditionnels du ruissellement en Afrique de l'Ouest

Depuis le milieu des années 70, les hydrologues et pédologues de l'ORSTOM utilisent, pour améliorer leur connaissance de l'hydrodynamique des sols, des simulateurs de pluie qui permettent de s'affranchir des aléas des précipitations naturelles.

Après avoir utilisé un premier appareil dérivé du simulateur de type Swanson, arrosant deux parcelles de 50 m², ils ont mis au point, en 1977, un minisimulateur de pluie permettant d'étudier des parcelles de 1 m² (Asseline et Valentin [3]). La comparaison des résultats obtenus sur ces parcelles avec ceux des parcelles de 50 m² (Collinet [8]) ou avec les données des bassins représentatifs (Casenave *et al.* [5]) a montré que, malgré la faible surface étudiée, l'appareil était fiable sous réserve d'une utilisation appropriée. Depuis 1980, l'ORSTOM a largement développé cette nouvelle technique dans de nombreux pays d'Afrique francophone (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Cameroun, Congo, Sénégal).

L'ensemble de ces mesures (environ 1 000 averses simulées sur 150 parcelles) a permis de déterminer, sur une vaste zone géographique, les facteurs conditionnels de l'infiltration et du ruissellement et de hiérarchiser l'importance relative de ces différents facteurs (Valentin [17]).

En zone Sahélienne, l'analyse statistique des données obtenues, a montré que trois variables caractéristiques du milieu — couvert végétal, activité faunique et

nature des croûtes — suffisent à expliquer significativement ($R^2 = 0,84$) le coefficient d'infiltration.

De trop nombreux exemples montrent cependant que l'utilisation aveugle de telles formules statistiques n'est pas exempte de dangers et qu'une approche plus naturaliste, de type système expert, peut constituer un « garde fou » précieux, en fournissant un mode d'emploi de ces régressions. C'est pourquoi Casenave et Valentin [6] ont proposé une typologie des surfaces élémentaires, qui essaye de concilier les deux approches; statistique et naturaliste. Cette typologie est fondée sur une base expérimentale et des traitements statistiques, mais ses résultats sont pondérées par des critères d'ordre morphologique.

La typologie des surfaces élémentaires

A la base de cette typologie se trouve le concept de « 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 : les croûtes.

Les critères d'identification

La typologie des surfaces élémentaires repose sur un certain nombre de critères caractéristiques du milieu, dont l'analyse statistique a montré qu'ils influençaient de manière sensible la capacité d'infiltration. Ces principaux critères sont les suivants :

Le type de croûte

L'étude des processus et l'analyse des facteurs de formation des croûtes superficielles, associées à la description des microhorizons, ont amené Casenave et Valentin [6] à la définition d'une typologie morpho-génétique des principales croûtes sahéliennes. Cette typologie, synthétisée dans la figure 1, permet de distinguer 9 types principaux dont la désignation fait référence à leur mécanismes de formation.

La nature du milieu : naturel ou cultivé

Deux facteurs conditionnels importants de l'infiltration, la couverture végétale et le microrelief, sont considérablement modifiés par la mise en culture. De plus, l'évolution des surfaces est différente en milieu naturel où les croûtes, une fois formées, sont relativement protégées et en milieu cultivé où les croûtes sont souvent détruites par les travaux cultureux. Ceci a amené à distinguer ces deux types de milieu.

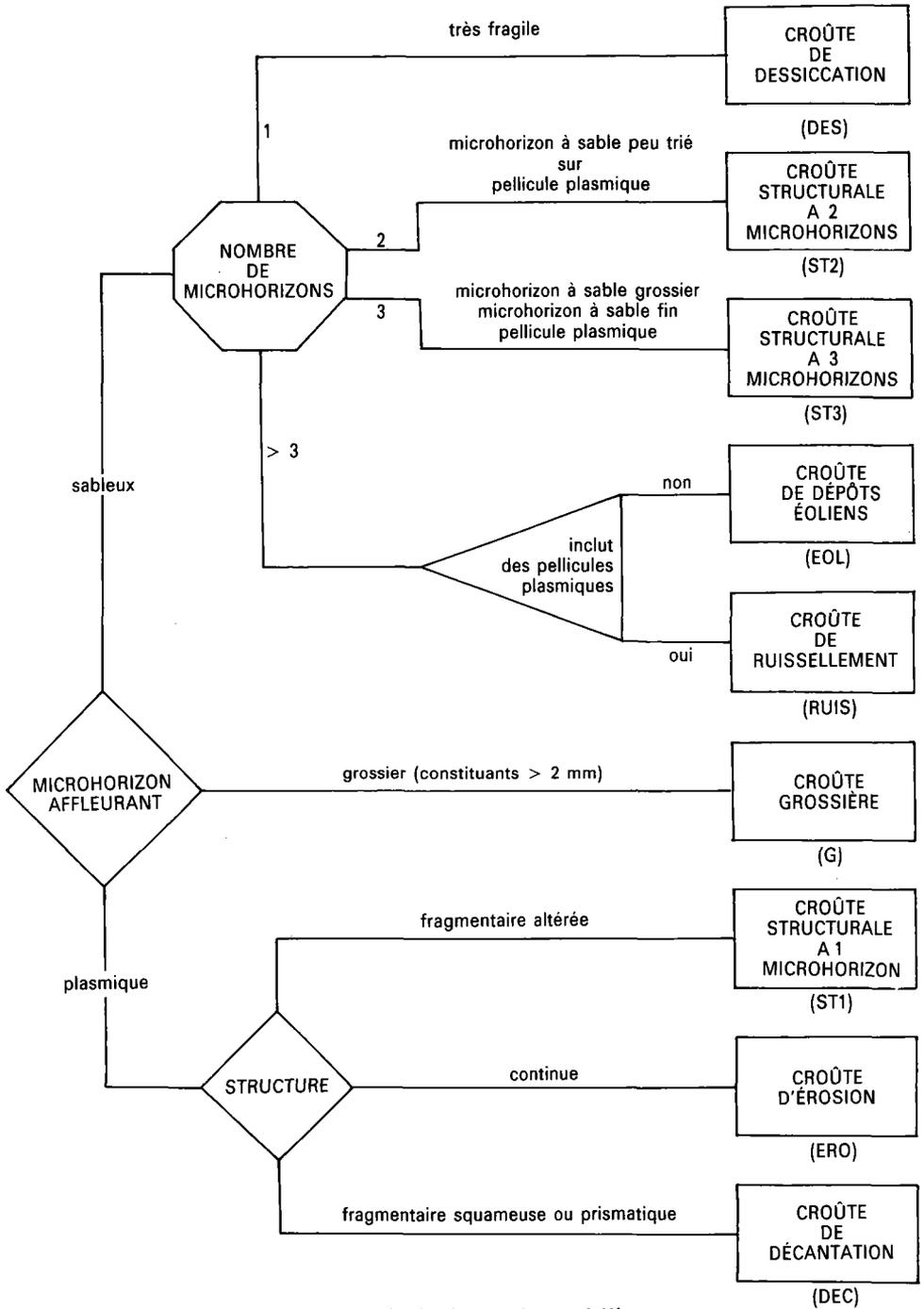


Figure 1. Clé de détermination des principales croûtes sahéliennes.

La porosité vésiculaire

Les microhorizons des croûtes sahéliennes sont souvent riches en vésicules qui peuvent créer une très forte porosité. Celle-ci n'est cependant pas fonctionnelle, les pores ne communiquant pas les uns avec les autres. Il s'agit pourtant d'un indice précieux de conditions peu favorables à l'infiltration. Ces vésicules se forment en effet, lors de l'humectation, lorsque l'air du sol ne peut s'échapper dans aucune direction, du fait d'une forte imperméabilité du milieu. L'analyse statistique a mis en évidence une très bonne relation entre l'abondance de ces pores et l'aptitude au ruissellement (Albergel *et al.* [2]).

L'activité faunique

Elle a une influence directe sur l'infiltration par la porosité qu'elle génère. Lavelle [11], par exemple, a montré qu'à Lamto (Côte d'Ivoire), les vers rejettent 30 à 40 m³ de terre en surface, par hectare et par an. A ce volume de rejets correspond un volume comparable de pores à l'intérieur du sol et cette porosité communique avec la surface, facilitant ainsi le drainage rapide de l'eau. De plus, et ce n'est pas là le moindre des effets du travail de la mésofaune, elle détruit, au moins localement, les croûtes qui s'opposent à l'infiltration.

La charge grossière

Il s'agit des fractions granulométriques de taille supérieure à 2 mm. Cette charge grossière peut être utilisée comme indicateur de l'infiltrabilité parce qu'en zone aride et semi-aride, elle s'accompagne, le plus souvent, d'un degré de réorganisation maximal. Les éléments grossiers sont, dans la majeure partie des cas, englobés dans une croûte à trois microhorizons (Type ST3) très imperméable.

Les éléments « modulateurs »

Pour tenir compte de la diversité des milieux étudiés, on a été amené à définir, dans certains types de surface, des variantes en fonction d'éléments « modulateurs » qui sont :

- La couverture végétale

Elle intervient en assurant la protection du sol contre les « agressions » extérieures (pluie, vent, ...) qui sont les principaux agents de formation des croûtes. Elle n'est prise en compte que lorsqu'elle couvre une surface au sol supérieure à 50 %.

- Le microrelief

Ce sont les petits accidents du terrain, d'une amplitude comprise entre 5 et 50 cm, naturels ou induits par les techniques culturales, qui confèrent au sol la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau.

- La texture du sol

Pour la zone sahélienne, seules la texture très sableuse (taux des sables > 90 %) et la texture argileuse (taux d'argile > 40 %) ont une influence sur l'infiltration.

Ces éléments modulateurs ne changent pas la définition du type de surface, mais ont une influence sur les valeurs de l'infiltration qui lui sont liées.

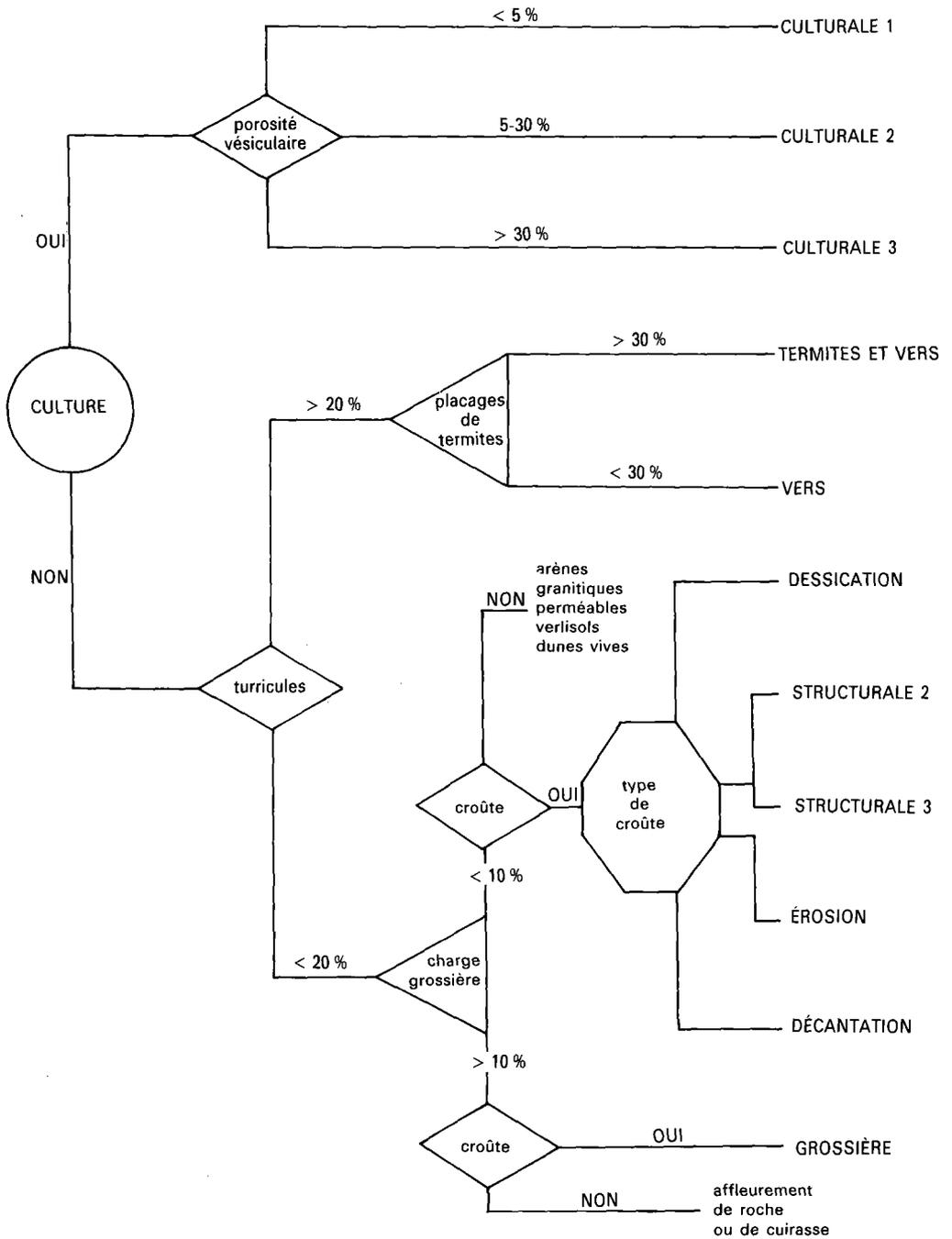


Figure 2. Clé de détermination des types de surfaces élémentaires.

Les grands types de surfaces élémentaires

A partir des critères d'identification précédents, on peut classer toutes les surfaces élémentaires en 11 grands types. La clef de détermination en est donnée sur la figure 2.

A chaque type de surface élémentaire (type modal ou variante) correspond un fonctionnement hydrologique particulier qui est caractérisé par une équation du ruissellement (uniquement pour le type modal) et les fourchettes des valeurs que peuvent prendre certaines variables de l'infiltration. Un exemple en est donné ci-après pour les surfaces de type ST2.

Surface de type structurale 2 : ST2

Définition

Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte structurale à 2 microhorizons (sable grossier continu légèrement pris en masse recouvrant une pellicule plasmique).

Ruissellement

$$L_r = 0,85 P_u + 0,01 I_K + 0,003 P_u I_K - 8,0$$

L_r : lame ruisselée en mm.

P_u : hauteur de l'averse en mm.

I_K : indice des précipitations antérieures (Casenave [4]).

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I1 mmh ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-55	60-75	50-65	5-15	10-20	3-6

Variante

Si la couverture végétale est supérieure à 50 %.

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I1 mmh ⁻¹	Pis mm	Pih mm
60-70	80-90	75-85	10-20	20-30	5-10

Ki = Coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole des pluies simulées sur une parcelle;

Ki0 = Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm et $I_K = 0$;

Ki20 = Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm et $I_K = 20$;

I1 = Intensité limite de ruissellement (Casenave, 1982);

Pis = Pluie d'imbibition pour un sol sec ($I_K = 0$);

Pih = Pluie d'imbibition pour un sol très humecté ($I_K > 80$).

Utilisations hydrologiques de la typologie

Le concept d'état de surface

S'il est possible, comme nous venons de le voir, de décomposer la surface du sol, à l'échelle de la parcelle, en un nombre limité de fractions hydrologiquement homogènes, les « surfaces élémentaires », il n'en est pas de même à l'échelle directement supérieure, celle du petit bassin versant. A cette échelle, le nombre trop élevé de combinaisons possibles entre les surfaces élémentaires impose, pour caractériser le milieu, un nouveau concept : celui d'« état de surface ». Ce terme peut désigner :

- une seule surface élémentaire, si elle est de grande taille; par exemple, un reg en zone sub-désertique qui couvre souvent plusieurs km²;
- la juxtaposition de plusieurs; par exemple, une steppe qui comprend au moins deux surfaces élémentaires : les zones enherbées alternant avec des taches dépourvues de végétation et couvertes de croûtes;
- un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire un ensemble au sein duquel jouent des interactions. Dans un tel système, les surfaces élémentaires ne sont pas seulement juxtaposées mais interdépendantes. C'est le cas de la brousse tigrée, où la zone nue, toujours fortement encroûtée alimente par son fort ruissellement la zone boisée située à l'aval. La face amont du fourré a tendance à s'étendre tandis que la face aval dépérit. Ainsi l'ensemble du système progresse vers l'amont.

Etats de surface et fonctionnement hydrologique des bassins

Les concepts de surface élémentaire et d'état de surface ont été utilisés pour définir un nouveau mode de représentation cartographique du milieu (Valentin, 1986), où ne sont prises en compte que les variables conditionnant l'infiltration et le ruissellement, c'est-à-dire, pour toute la zone sahélienne, celles caractérisant les états de surface. Les unités définies dans cette méthode répondent à des critères d'homogénéité tant au niveau de leur dynamique évolutive qu'à celui de leur fonctionnement hydrologique.

Pour répondre totalement aux besoins des hydrologues, cette méthode cartographique devait encore s'avérer extensible et transposable. Pour ce faire, on a utilisé les images satellitaires. La cartographie des états de surface d'un petit bassin versant (9,14 km²) alimentant la mare d'Oursi au nord du Burkina Faso (Valentin [16]) a été étendue à l'ensemble du bassin de la mare (263 km²) à partir des données d'une image Landsat (Lointier et Lortic [12]). De même, les thèmes déterminés sur les bassins d'Oursi ont été transposés aux deux petits bassins versants de Gagara, situés à une cinquantaine de km de la mare (Albergel [1]).

Le fonctionnement hydrodynamique de chaque surface élémentaire est caractérisé par une relation de type :

$$Lr = A.Pu + B.IK + CPu IK + D$$

Le problème qui se pose, et qui n'est encore que très imparfaitement résolu, est d'étendre les résultats des parcelles de 1 m² au bassin versant, c'est-à-dire à comprendre comment se fait la composition des ruissellements élémentaires le long des versants. Sur les bassins imperméables et très imperméables ou dont l'imperméabilisation est croissante lorsque l'on passe du haut au bas des versants (cas fort heureusement très répandu en zone sahélienne) un modèle additif, pourtant très sommaire (les ruissellements élémentaires sont combinés au prorata des pourcentages occupés par chaque surface élémentaire), suffit à une estimation satisfaisante des fortes crues du bassin.

Pour les bassins plus perméables, l'introduction dans un modèle à discrétisation spatiale des cartes des états de surface et des fonctions de production qui leur sont associées, permet de modéliser le fonctionnement du bassin. C'est ainsi que Chevallier [7] arrive à simuler avec précision les niveaux de la mare d'Oursi, ou que Albergel [1] reconstitue, avec une erreur inférieure à 5 %, les volumes écoulés des deux bassins de Gagara.

Conclusion

Les mesures sous pluies simulées ont mis en évidence le rôle prépondérant des caractéristiques de la surface du sol, particulièrement le couvert végétal, l'activité faunique et le type de croûte, sur l'infiltrabilité.

De l'identification des grands types de croûtes, et d'autres critères relatifs à l'activité faunique, à la couverture et au travail du sol, découle une typologie des principales surfaces élémentaires. A chacune correspond un comportement hydrodynamique particulier.

S'il est possible de définir ainsi, à l'échelle du m², un fonctionnement hydrologique, à partir d'une description très simple du milieu, la transposition de ces résultats à l'échelle du petit bassin versant pose encore quelques problèmes. Pour tenter de les résoudre, des recherches sont menées actuellement selon trois voies :

- Utilisation conjointe de la télédétection pour la cartographie des états de surface et de MNT pour l'introduction, dans des modèles mathématiques de ruissellement, des positions respectives de ces différents états de surface.
- Mesure des ruissellements à l'échelle du versant pour tenter de mieux expliciter la composition des ruissellements élémentaires.
- Définition de nouveaux modèles mathématiques de ruissellement permettant une meilleure représentation du fonctionnement des bassins.

Références

1. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Univ. Paris VI, 336 p.

2. 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, pp. 25-48.
3. Asseline J., Valentin C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XV(4), pp. 321-349.
4. Casenave A. (1982). Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX(4), pp. 207-227.
5. Casenave A., Guigen N., Simon J.-M. (1982). Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX(4), pp. 229-252.
6. Casenave A., Valentin C. (1988). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM-CEE, tome 1, 260 p., 43 fig. et cartes + annexes, tome 2, 197 photos.
7. Chevallier P. (1986). Simulation de pluie, télédétection, modélisation. Exemple de la Mare d'Oursi, Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 90-104.
8. Collinet J. (1986). Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 117-153.
9. Dubreuil P. (1972). Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
10. Dubreuil P., Morell M., Sechet P. (1975). Comportement et interactions des paramètres physiques des petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XII(1), pp. 13-36.
11. Lavelle P. (1983). The soil fauna of tropical savannas. II. The earthworms in : Tropical Savannas. Bourlière (F.) édit., Elsevier, Amsterdam, pp. 485-504.
12. Lointier M., Lortic B. (1984). Mare d'Oursi (Haute-Volta). Traitement numérique de la vue Landsat du 4 février 1976. ORSTOM, Cayenne, 13 p.
13. Puech C., Chabi Gonni D. (1983). Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH, 77 p.
14. Rodier J. (1975). Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Trav. et Doc. de l'ORSTOM, n° 46, Paris, 121 p. + fig.
15. Rodier J., Auvray C. (1965). Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM-CIEH, Paris, 30 p., 13 fig.
16. Valentin C. (1981). Esquisse au 1/25 000^e des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (Polaka-Oursi, Nord Haute-Volta). ORSTOM, Abidjan, 11 p.
17. Valentin C. (1986). Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 50-74.

8

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

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

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

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

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

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

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

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

Enquêtes agronomiques et hydrauliques

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

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

Aménagement des conditions de ruissellement



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

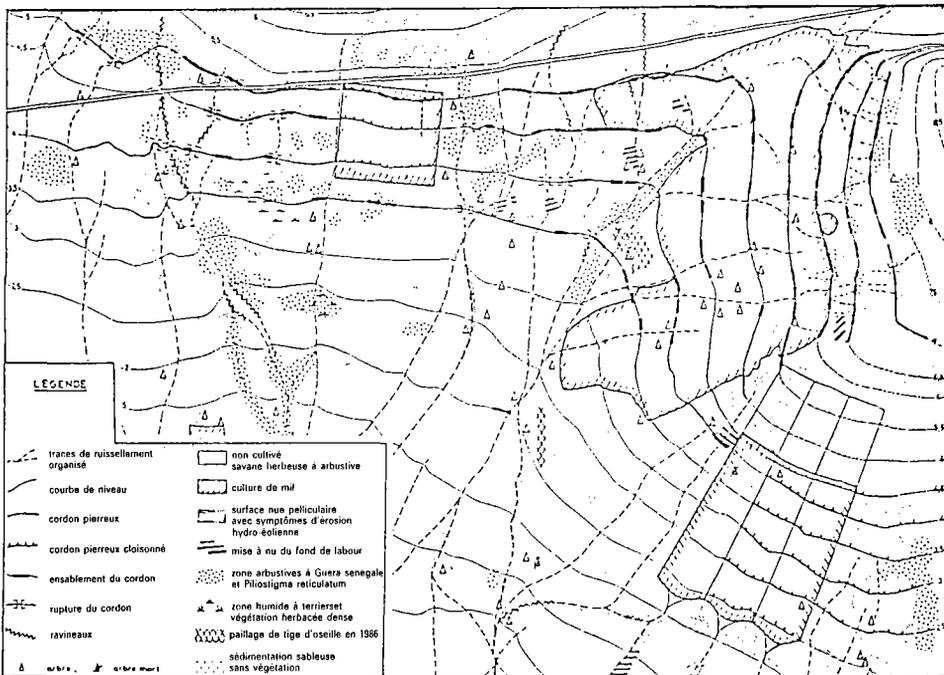


Figure 2. Carte des états de surface. Site de Samniweogo, décembre 1987.

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

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

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

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

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

Expérimentation et modélisation

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

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

L'expérimentation de Bidi Samniweogo

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

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

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

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

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

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

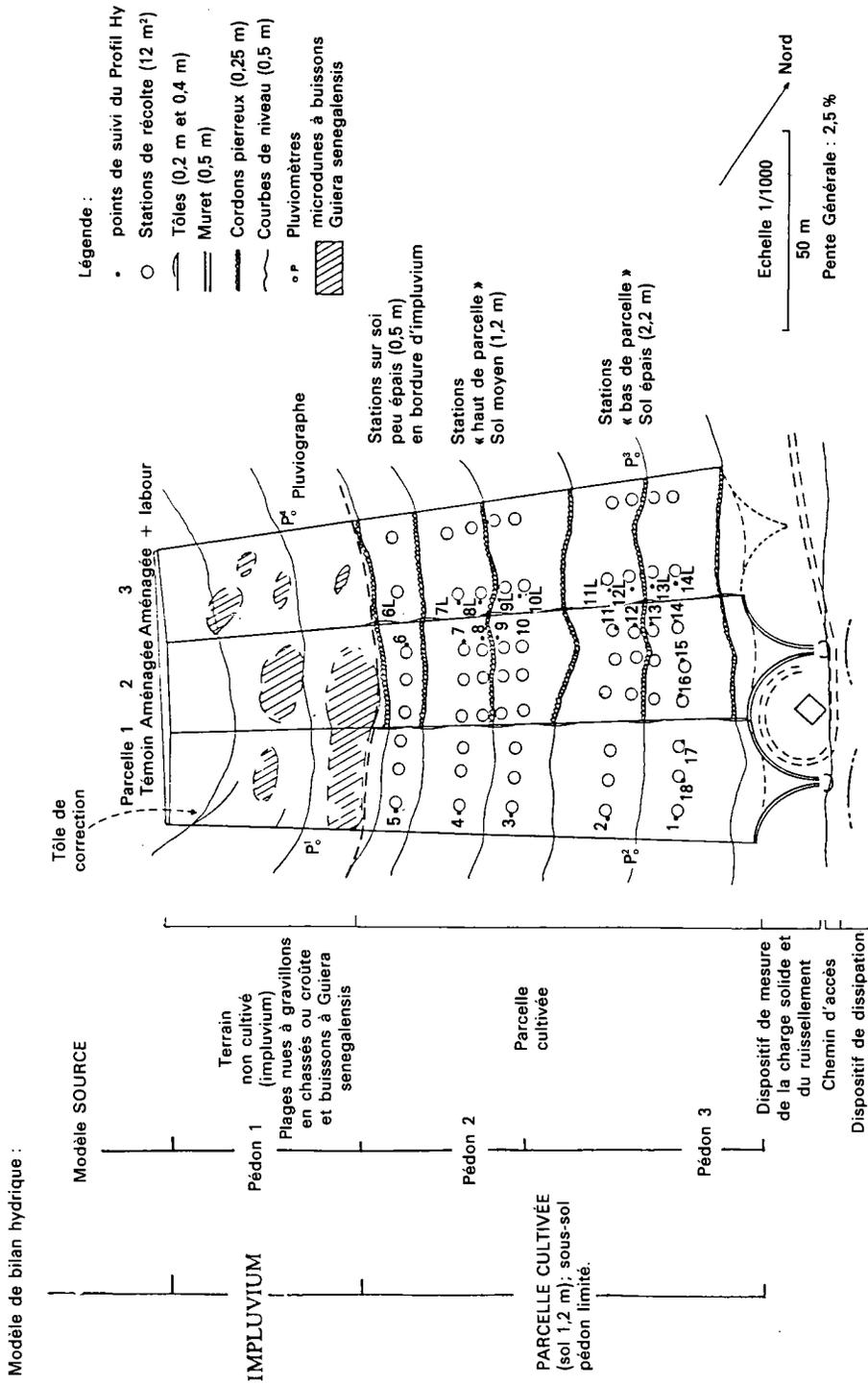


Figure 3. Plan d'ensemble de l'essai de Samniweogo (1986).

Aménagement des conditions de ruissellement

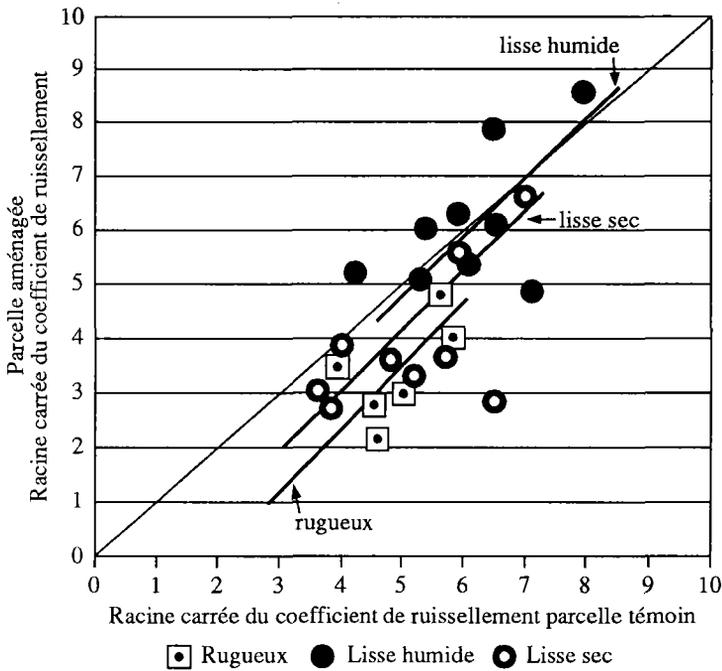


Figure 4. Comparaison des ruissellements parcelles témoin / parcelles aménagées. Pluies standard.

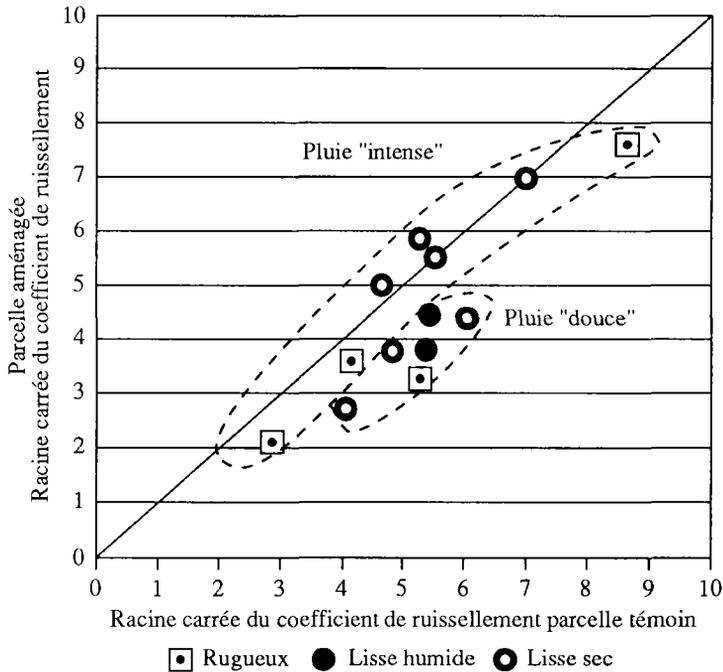


Figure 5. Comparaison des ruissellements parcelles témoin / parcelles aménagées. Autres pluies.

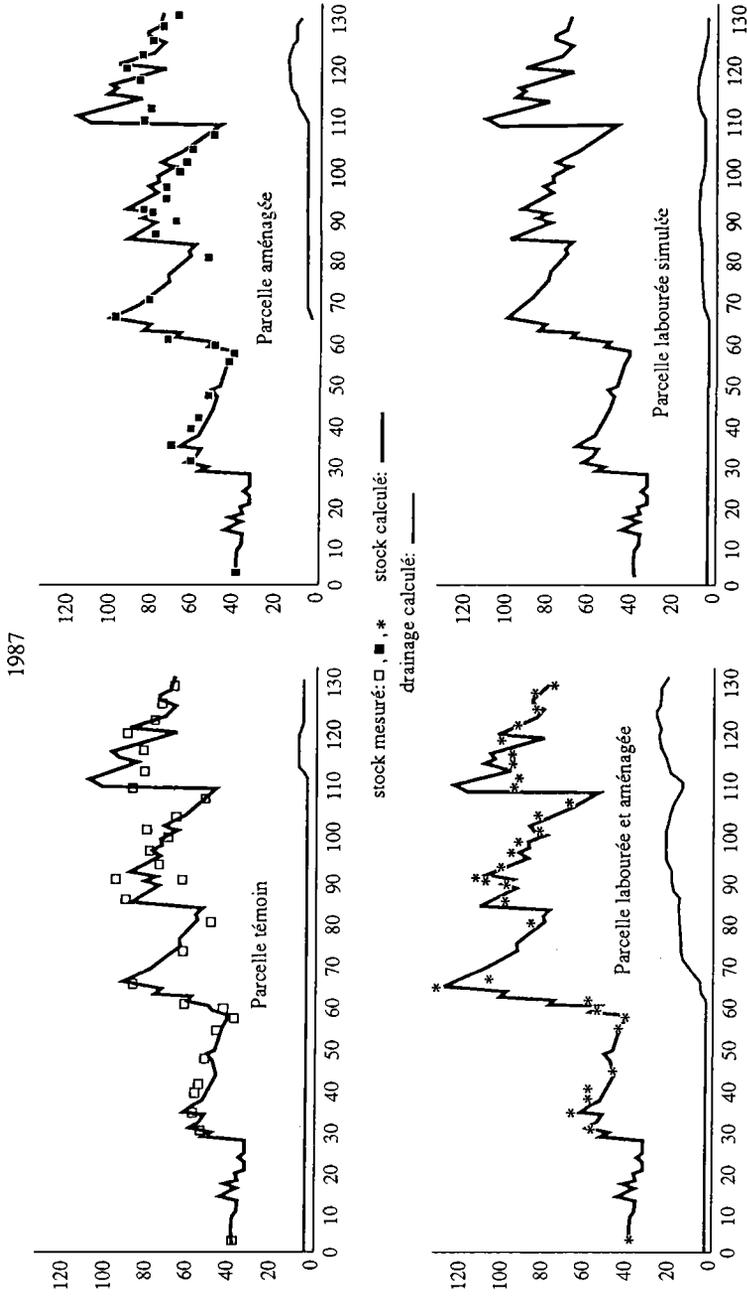


Figure 6. Stocks calculés par le modèle de bilan hydrique comparés aux mesures (moyenne de huit profils hydriques par parcelle).

Aménagement des conditions de ruissellement

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

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

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

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

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

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

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

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

Sur une période $j = 1$ jour

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

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

- Pj : pluie au sol pendant la période j
- REj : ruissellement entrant pendant la période j
- RDj : reprise de drainage par les racines pendant la période j
- RSj : ruissellement sortant pendant la période j
- DRj : variation du stock sous-jacent ou drainage (vertical et latéral)
- ETRj : évapotranspiration réelle et évaporation du sol pendant la période j

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

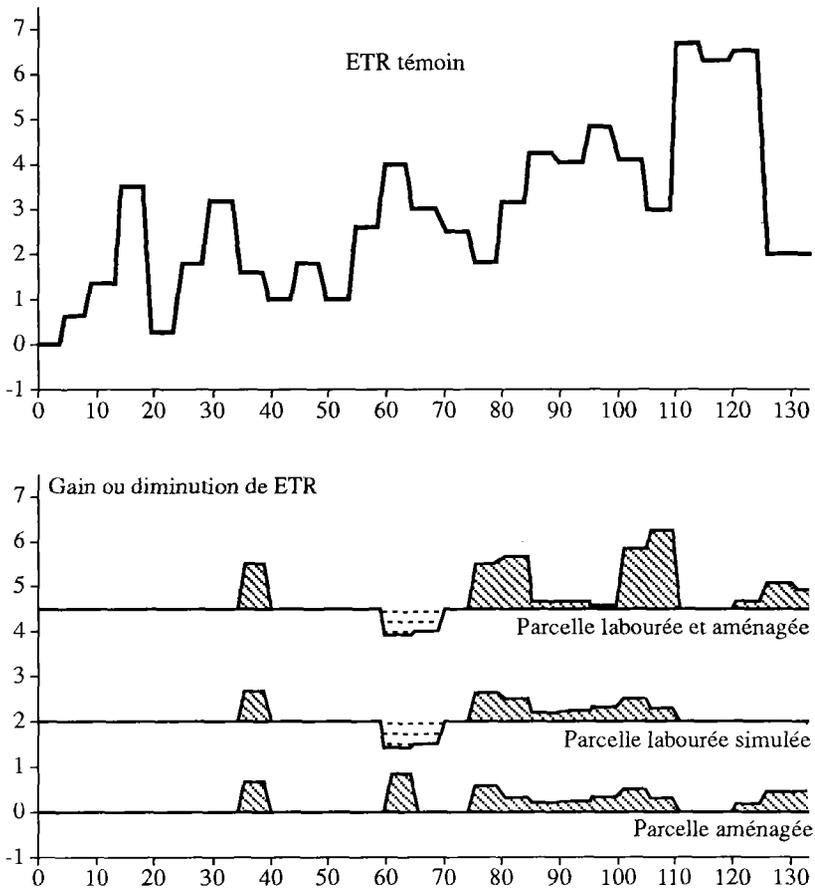


Figure 7. Comparaison des ETR des 3 parcelles réelles et d'une parcelle simulée sur modèle de bilan hydrique.

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

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

Modélisation des transferts hydriques

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

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

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

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

La représentation formelle de l'objet d'étude

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

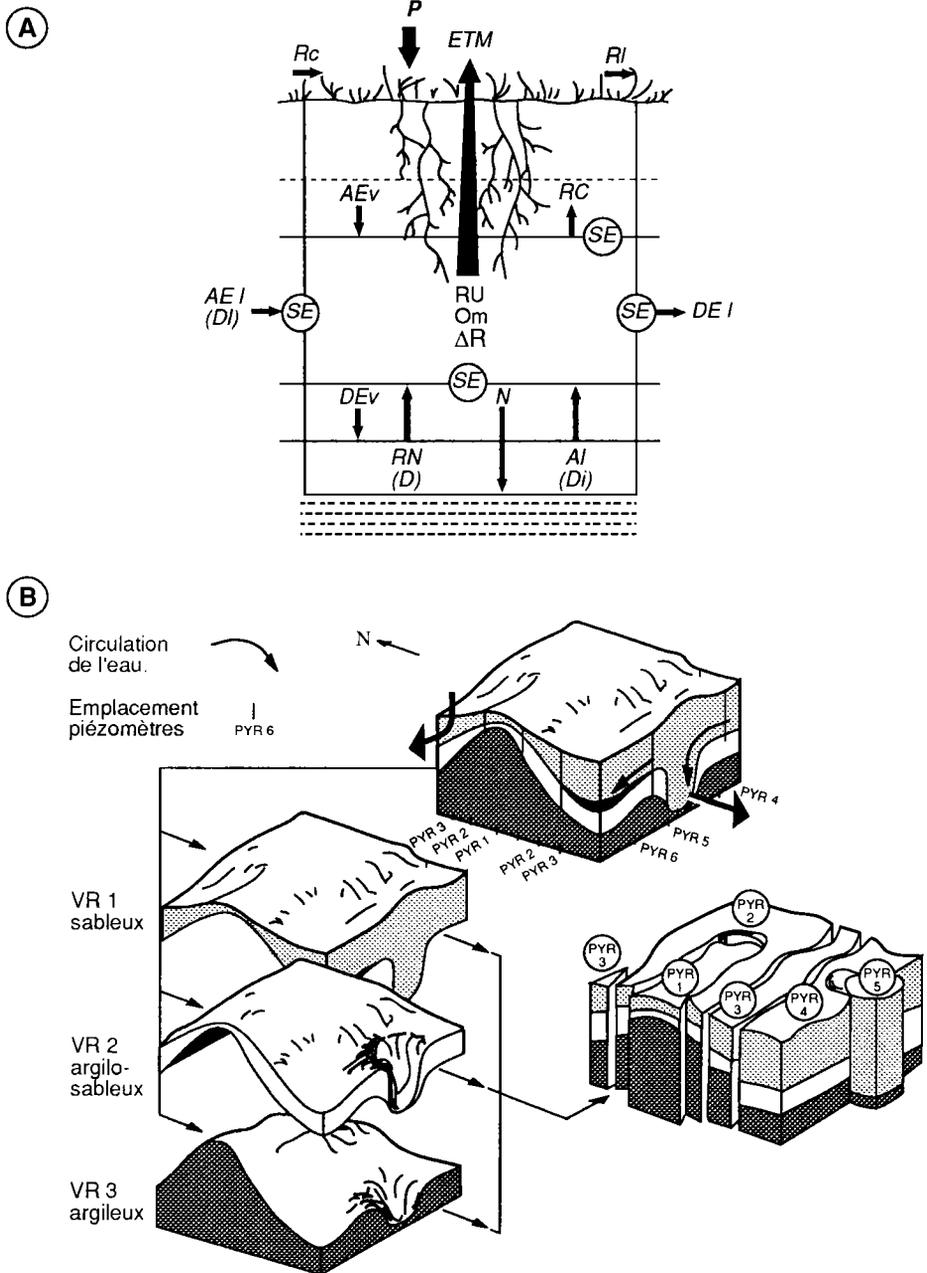


Figure 8. Représentation schématique des fonctions du modèle Source.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Application aux parcelles d'essai « Ruissellement »

Description

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

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

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

Modélisation des parcelles

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

Les caractéristiques initiales

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

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

La simulation

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

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

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

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

Aménagement des conditions de ruissellement

Tableau I. Simulation et modifications apportées.

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

Tableau I. (Suite).

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

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

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

tampon de 20 cm

vitesse de drainage 40

translat 2

Rac : racine

CV : couverture végétale

ES : état de surface

PI : pluie d'imbibition

PKR : paramètre de pluie limite

KR : Kr max coefficient de ruissellement

FH : front d'humectation

Sarcl. : sarclage

Fbl : faible densité du couvert végétal

Moy : densité moyenne

Dens : couvert dense

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

Interprétation et critique des simulations

Interprétation

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

Aménagement des conditions de ruissellement

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

On extrait des simulations cinq résultats :

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

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

Résultats (figures 9 et 10)

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

En 1987 : lames ruissellées;

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

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

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

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

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

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

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

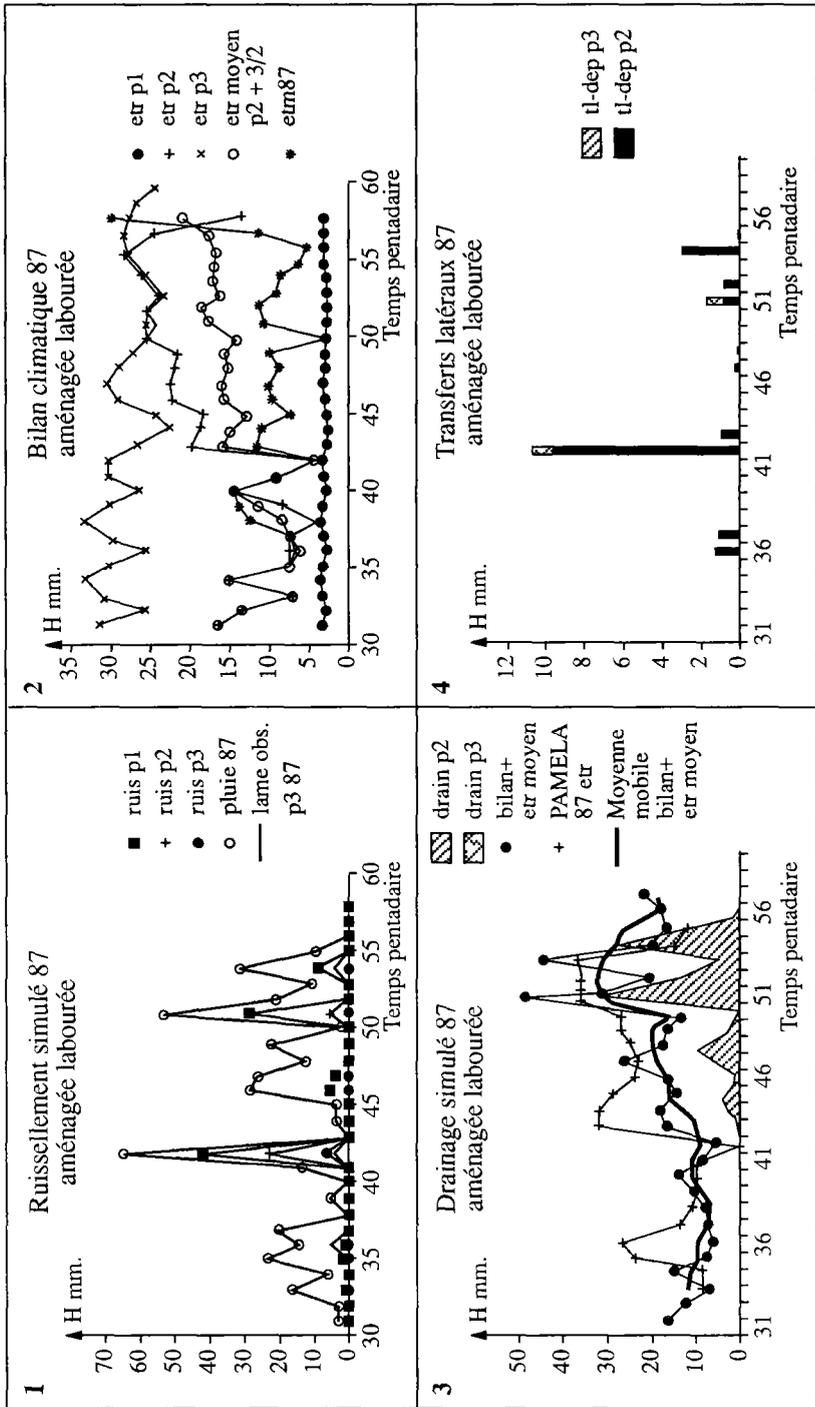


Figure 9. Simulation sur « Source ». Pluviométrie 1987. Différents termes du bilan dans les trois pédon constituifs du micro-bassin versant — « Aménagée et labourée ».

Aménagement des conditions de ruissellement

PROFIL TYPE HAUT DE PARCELLE

PROFIL TYPE BAS DE PARCELLE

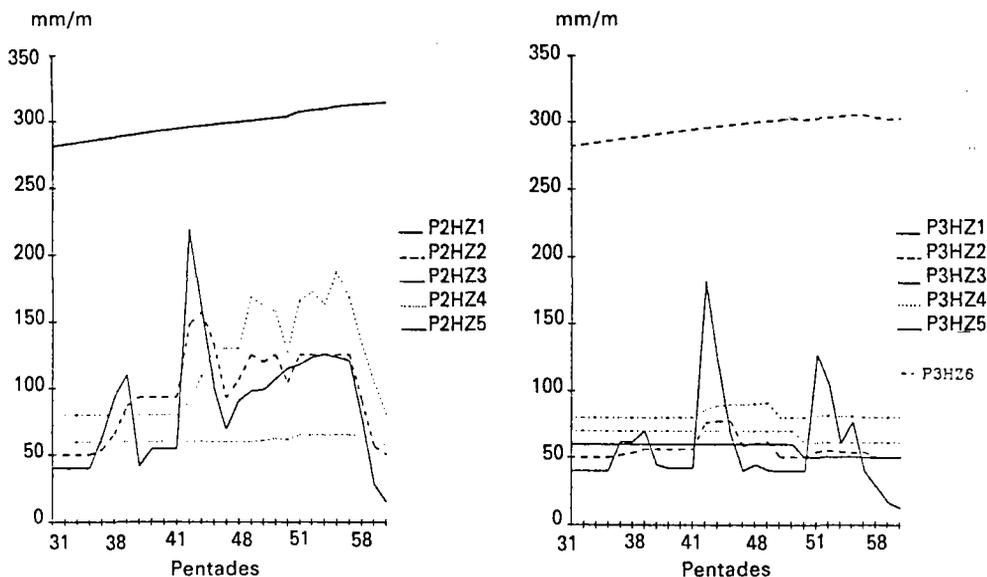


Figure 10. Evolution des humidités simulées de différents horizons (HZ) des deux pédon cultivés P2 et P3. Pluviométrie 1987. « Aménagé et labouré ».

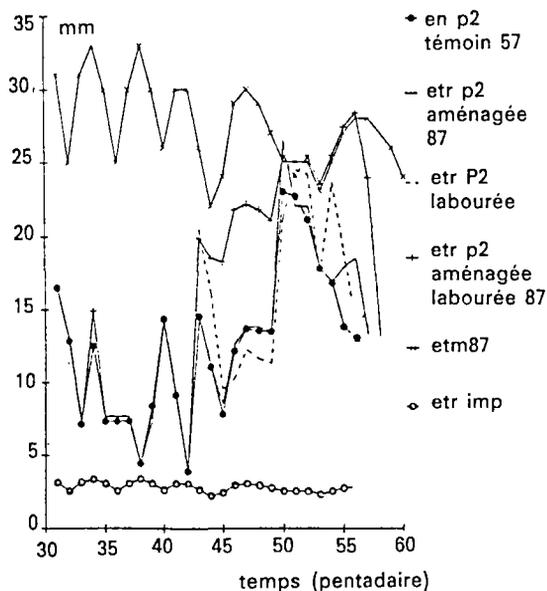


Figure 11. Comparaison ETR simulé entre différents traitements pour le haut de pente (pédon P2).

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

Critiques des simulations

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(1) Plus que l'aménagé seul.

Conclusions

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Références

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

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

9

Recharge artificielle de la nappe des calcaires de Sebikotane par le stockage des eaux de ruissellement

A. NIANG, P. CURETTI

Direction des études hydrauliques, BP 4021 Dakar, Sénégal

Le site du barrage de Panthior est situé à 7 km de Diame Niadio, sur la route de Yenne, soit à une distance de 40 km de Dakar.

Le barrage est situé dans la localité de Ndiodio Sène (communauté rurale de Sébikotane) et sur le marigot de « Panthior ».

Au cours de l'hivernage 1982, le déversoir de crue fut emporté par une forte crue et sa réfection a été un des objectifs du Projet « Ressources en eau ».

Les travaux se sont déroulés entre décembre 1986 et avril 1987 et ont consisté en trois tâches principales :

- décapage de la cuvette pour mettre les calcaires à nu,
- construction d'un seuil déversoir en béton armé,
- mise en place d'une protection du seuil et des berges en gabions et en enrochement.

Contexte hydrologique et hydrogéologique

Cadre hydrologique

Le bassin de Panthior s'étend sur 93,7 km² et recueille les eaux de la cuvette de Déni Mali Guèye, Sébikotane et de Dogor.

Les apports du marigot ont été évalués à 3,4 millions de m³ en année moyenne, d'après les études de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique des Territoires d'Outre-Mer (ORSTOM).

Cadre hydrogéologique

Le compartiment calcaire paléocène de Sébikotane est limité au Nord par l'érosion des calcaires, à l'Est et à l'Ouest respectivement par les failles de Sébikotane et de William Ponty (figure 1).

A l'Ouest se développe une épaisse série de marnes éocènes imperméables. A l'Est, on trouve un Maestrichtien à tendance argileuse.

Répercussions de l'exploitation

Avant exploitation

L'écoulement naturel de la nappe des calcaires s'effectuait du Nord vers le Sud.

Exploitation

L'exploitation de cette nappe a débuté en décembre 1958 et dès juillet 1959, après seulement 7 mois de pompages par les forages de Ponty-Sébikotane à raison de 14 000 m³/jour (pour alimenter Dakar), l'écoulement vers le Sud est interrompu et s'est même inversé. Il s'effectue de Panthior vers Sébikotane et aussi de la vallée fossile vers le compartiment Paléocène.

Cette inversion de l'écoulement met en évidence le rôle particulier de « barrage naturel d'eau douce » de Panthior.

La nappe salée du compartiment méridional que l'on considérait comme fossile, ne l'était en fait que par le seul jeu d'une surcharge d'eau douce.

Dès octobre 1962, le « barrage » s'efface, et en février 1962, alors que le débit pompé est de 33 000 m³/jour, on enregistre une élévation brutale de la salure au piézomètre de Panthior où la teneur en chlorure de l'eau passe en un mois de 1,4 à 4 g/l.

Le phénomène s'est ensuite poursuivi en s'accroissant. En février 1964, la teneur en Cl⁻ atteignait 8 g/l.

Dès que fut constatée cette évolution, un dispositif de surveillance strict fut mis en place, comportant notamment des prélèvements et analyses d'eau hebdomadaires et des mesures de niveaux piézométriques très rapprochées. Il permit d'enregistrer à Damboussane et à Santhia les premiers effets de l'invasion salée.

Mécanisme de la recharge

La recharge ne se fait pas au seul profit du compartiment septentrional. Une partie des eaux de la retenue s'infiltré dans la nappe salée du compartiment méridional.

Bien que la pente entre Yenne et Panthior se soit accentuée par rapport à 1960, les pompages n'arrivent plus entre deux saisons des pluies à effacer l'eau douce artificiellement infiltrée.

Cela s'est traduit pour le piézomètre de Panthior, d'abord par une stabilisation de la salure à l'hivernage 1965, et ensuite par une lente régression de la teneur en chlorure.

La retenue d'eau s'étale sur les affleurements calcaires du marigot et sur les sables de la vallée fossile, provoquant une double suralimentation de la nappe : directe au travers de la faille de Panthior et indirecte par le biais de la vallée fossile.

Rappel historique

En 1964, le service de l'hydraulique a édifié dans le marigot de Panthior, en aval immédiat du dernier affleurement calcaire, un barrage calé à la cote + 4,27 m et un déversoir calé à la cote + 3,10 m.

Le but de cet aménagement était de :

- faciliter la recharge de la nappe des calcaires paléocènes karstifiés de Sébikotane;
- protéger cette nappe contre l'invasion saline en provenance de la mer, en relevant son niveau statique.

Au cours de l'hivernage de 1982, le déversoir de crue a été emporté. Les travaux de réfection du seuil déversoir et le décapage de la cuvette du barrage pour mettre les calcaires à nu étaient une des composantes des travaux du Projet « Ressources en eau » et ont été entrepris entre décembre 1986 et avril 1987.

Le but de ce rapport est de faire le point des observations effectuées après deux hivernages consécutifs (1987 et 1988).

Equipement du site

Le site est équipé depuis plusieurs années d'une série de piézomètres d'observation captant les calcaires paléocènes. Ce sont : Panthior I, Damboussane Est, Damboussane Ouest, etc. (figure 1). Des mesures régulières y sont effectuées. Pour les deux campagnes d'observation, le souci était de pouvoir estimer avec une certaine précision le volume d'eau infiltré dans la nappe à partir du lac du barrage : une batterie de 7 éléments d'échelle limnimétrique a été installée dans la cuvette, le niveau 6,73 lu sur la dernière échelle correspondant à la cote 3,10 m du déversoir de crue.

- Un observateur sur place faisait deux lectures d'échelle : une le matin, une le soir.

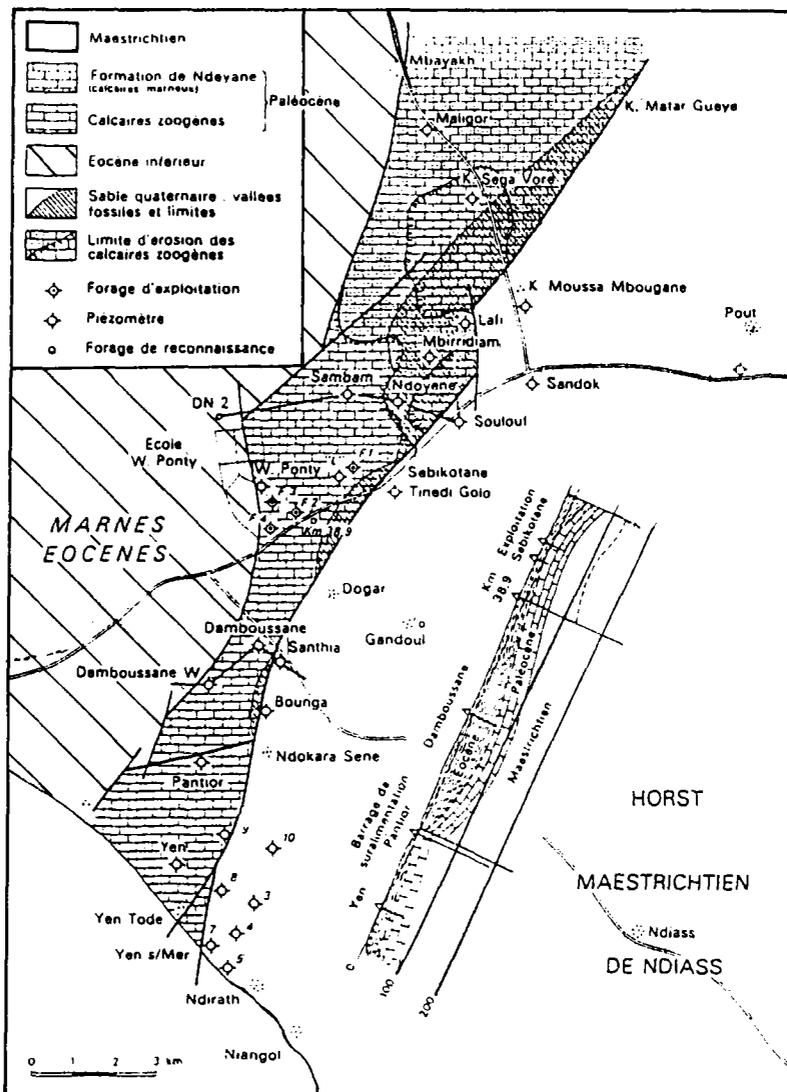


Figure 1. Ecorché du compartiment de Sébikotane. Extrait du rapport « les nappes de la presqu'île du Cap-Vert ». A. Martin, 1970.

Recharge de la nappe des calcaires de Sebikotane

- La surface du lac de retenue à la cote + 3,10 m correspondant à 6,73 à l'échelle a été mesurée à la suite d'un lever topographique.
- Les surfaces en dessous de 6,73 à l'échelle ont été calculées à partir de levés de terrain effectués à la boussole Topochaix.
- Aucun prélèvement n'étant effectué dans le barrage pendant la période d'observation, l'abaissement journalier ne peut correspondre qu'à une infiltration dans la nappe sous-jacente, moins bien entendu l'évaporation.
- Pour l'évaporation, nous avons pris les valeurs de Dakar calculées pour la période 1968-1977 et qui sont de : 142 mm pour le mois d'août, 131 mm pour le mois de septembre, 145 mm pour le mois d'octobre, 128 mm pour le mois de novembre.

Résultats des observations

Hivernage 1987

Pluviométrie (Thiès)

La pluviométrie de cette période est consignée dans le tableau suivant :

	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total
Pluviométrie en mm	2,1	79,2	130	148	46,3	405,6
Nombre de jours de pluie	2	6	12	12	6	38

L'hivernage 1987 à Thiès et dans le bassin versant de Panthior est caractérisé par quelques pluies éparses en juin et juillet, d'abondantes chutes de pluies début août (du 1^{er} au 8), quelques averses le reste du mois, puis de très fortes précipitations du 25 septembre au 3 octobre 1987. Seules les précipitations de début août et celles de fin septembre, début octobre, ont déterminé des écoulements importants dans le marigot, remplissant la cuvette du barrage et provoquant un déversement par le seuil.

Comportement de la retenue

Le barrage s'est rempli du 2 au 3 août, et jusqu'au 24 septembre 1987, il n'y a plus eu d'apport notable dans la cuvette. Pendant cette période, les vitesses d'infiltrations journalières ont été assez variables (l'évaporation ayant été déduite) :

- 13,5 cm du 2 au 11-08-87;
- 17,5 cm à 19,5 cm du 12 au 28-08-87 (cette vitesse élevée est due probablement au débouillage des fissures);
- 12,5 cm du 29-08 au 31-08-87;
- 15,6 cm à 17,5 cm du 1-09 au 09-09-87;
- 7,5 cm à 12,5 cm du 10-09 au 24-09-87.

Du 24-09 au 02-10-87 de fortes pluies pratiquement continues maintiennent la cuvette à son remplissage maximum. Pendant cette période, et jusqu'au 09-10-87, la vitesse d'infiltration est de 13,5 cm par jour; par la suite, elle oscille entre 28,5 cm

et 15,5 cm du 10-10 au 22-10-87, se maintient entre 8,5 cm et 10,5 cm du 23-10 au 31-10-87 pour osciller entre 0,5 cm et 3,5 cm entre le 11 et 21-11-87, date à partir de laquelle les observations ont été arrêtées, car les vitesses observées devenaient trop faibles. On peut même considérer que les observations pour la campagne d'infiltration n'ont plus de valeur significative à partir du 11-11-87 (2,5 cm), car à partir de cette époque, on assiste à l'arrivée d'importants troupeaux de bovins et caprins qui s'abreuvent dans la cuvette perturbant ainsi les mesures.

A la date du 10-11-87, on a eu un volume infiltré de 222 082 m³.

Hivernage 1988

Pluviométrie (Thiès)

La pluviométrie 1988 est consignée dans le tableau suivant :

	Janvier	Février	Juin	Juillet	Août	Septem- bre	Total
Pluviométrie en mm	4,7	5,4	19,5	44,3	330,1	104,6	508,6
Nombre de jours de pluie	1	2	2	5	3	14	27

L'hivernage 1988, dans le bassin versant de Panthior a été caractérisé par des averses en juin et juillet, des chutes de pluies quasi-permanentes du 17-08-88 au 22-09-88, puis par un arrêt brutal des précipitations à partir de cette date.

Comportement de la cuvette

Une première pluie, le 30-07-88, a rempli la cuvette du barrage (sans déversement par le seuil) et les observations sur le terrain ont réellement débuté le 31-07-88. De cette date jusqu'au 11-08-88, les vitesses d'infiltration varient de 14,50 à 19,50 cm/j et chutent entre 8,50 et 10,50 cm/j du 12-08 au 16-08-88.

Suite aux pluies intenses du 17-08 au 23-09-88, le plan d'eau est à la cote maximum et la vitesse d'infiltration se maintient à 15,50 cm/jour.

A partir du 24-09-88, il n'y a plus une seule précipitation, et dans la cuvette, les vitesses d'infiltration décroissent assez rapidement :

- 12,50 cm/j le 24-09-88;
- 8,50 à 9,50 cm/j du 25-09 au 8-10-88;
- 4,50 à 7,50 cm/j du 09-10-88 au 17-10-88;
- 3,50 à 5,50 cm/j du 18-10-88 au 27-10-88;
- 2,50 à 4,50 cm/j du 28-10-88 au 11-11-88;

Pour les mêmes raisons que l'hivernage précédent (arrivée des troupeaux), nous avons arrêté les observations le 11-11-88. A cette date, le volume d'eau infiltré est de 362 587 m³.

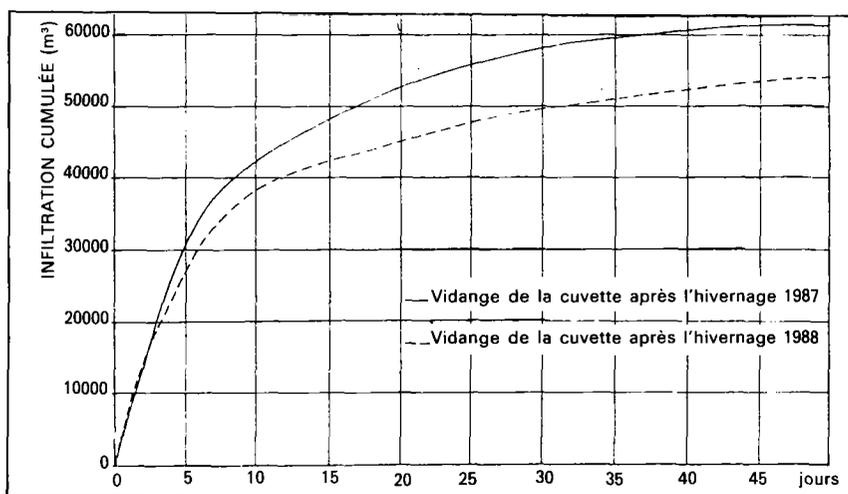


Figure 2. Comparaison de la vidange de la cuvette entre les hivernages 1987 et 1988.

Evolution piézométrique et hydrochimique

Piézométrie

Début août (2-08-87), à la veille du remplissage de la cuvette, le niveau du piézomètre de Panthior est à la cote la plus basse ($-14,21$ m). Dès le remplissage du barrage, le piézomètre réagit positivement à la recharge et fin août 1987, le battement est de $+3,32$, puis une descente s'amorce jusqu'à fin septembre. A la suite des importantes précipitations de la fin du mois, le niveau remonte pour culminer avec un battement de $+6,38$ m le 9-10-88, puis une lente descente commence jusqu'à l'hivernage suivant ($-15,57$ m fin juillet 1988).

Dès les premières pluies d'août 1988, le niveau piézométrique amorce une remontée ininterrompue jusqu'en fin septembre 1988 où le niveau culmine à $-3,96$ m déterminant un battement positif de $+11,61$ m. A partir de cette date, la cote du piézomètre commence à descendre sans interruption.

Hydrochimie

Début janvier 1987, la valeur du résidu sec au niveau du piézomètre de Panthior était de 972 mg/l. Celle-ci, du fait de la mise en mouvement du biseau salé, augmente régulièrement pour atteindre 2568 mg/l le 18-06-88. Dès le début de l'injection, l'extrait sec diminue (1901 mg/l le 08-07-88) pour atteindre 725 mg/l le 28-10-88. De même, les chlorures diminuent régulièrement en passant de 514 mg/l le 06-09-88 à 248 mg/l le 07-12-88 démontrant l'apport bénéfique des eaux infiltrées à partir de la cuvette du barrage. Les courbes de la figure 3 synthétisent parfaitement ces observations.

Le Tableau ci-après permet de comparer les différentes mesures effectuées au piézomètre de Panthior à l'étiage, et après l'hivernage, depuis 1982 :

Année	Altitude du plan d'eau en m		Remontée maximum	Extrait sec en mg/l		Différence mg/l	Pluviométrie annuelle en mm
	Juin	Sept./Oct.		Juin	Octobre		
1982	- 12,22	- 10,64	+ 1,58		685	-	460
1983	- 14,03	- 13,81	+ 0,22	771	750	- 21	240
1984	- 14,73	- 5,87	+ 8,86	2 005	264	- 1 741	320
1985	- 14,06	- 9,18	+ 4,88	755	190	- 565	404
1986	- 14,54	- 8,86	+ 5,68	667	845	+ 178	367
1987*	- 14,21	- 7,86	+ 6,35	698	414	- 284	406
1988	- 15,57	- 3,96	+ 11,61	2 568	725	- 1 843	508

* 1987 : année de construction du déversoir de crue.

La construction du déversoir de crue, en relevant la cote topographique du plan d'eau du barrage, a agrandi notablement la surface de la retenue, permettant ainsi un volume d'infiltration maximum pendant un temps relativement court : ainsi, pendant les 14 premiers jours d'août 1987, alors que le plan d'eau était à sa cote maximum, 70 347 m³ ont été infiltrés sur un total de 222 082 m³ soit pratiquement le quart des apports d'une campagne qui a duré trois mois.

De même, en 1988, grâce à une pluviométrie plus abondante, 278 000 m³ ont été apportés à la nappe en seulement 37 jours, sur un total de 362 587 m³ infiltrés en trois mois et demi.

Colmatage de la cuvette

Les observations de la descente du plan d'eau pendant les deux hivernages permettent de constater que :

- tant que le plan d'eau est à sa cote maxima et que l'infiltration se fait surtout par les parois latérales de la retenue, les vitesses journalières d'infiltration sont sensiblement identiques : 0,14 m en 1987; 0,16 m en 1988.
- Dès que le plan d'eau a baissé d'environ 1,50 m dénoyant en grande partie les parois latérales calcaires, l'infiltration ne peut se faire pratiquement que par le fond de la cuvette, les vitesses d'infiltration journalières ne sont plus les mêmes d'une année sur l'autre. En 1988, elles sont la moitié de celles de 1987, année de décapage de la cuvette, comme l'indique le Tableau ci-après :

Hauteur à l'échelle	Vitesse d'infiltration en 1987 en m	Vitesse d'infiltration en 1988 en m
5,50	0,15	0,09
4,50	0,16	0,06
3,50	0,09	0,04

L'examen de ce Tableau montre bien que, seulement après deux hivernages, le colmatage de la cuvette est très important ainsi d'ailleurs que l'atteste l'observation des dépôts de limon fin visible dans le fond de la cuvette du

Recharge de la nappe des calcaires de Sebikotane

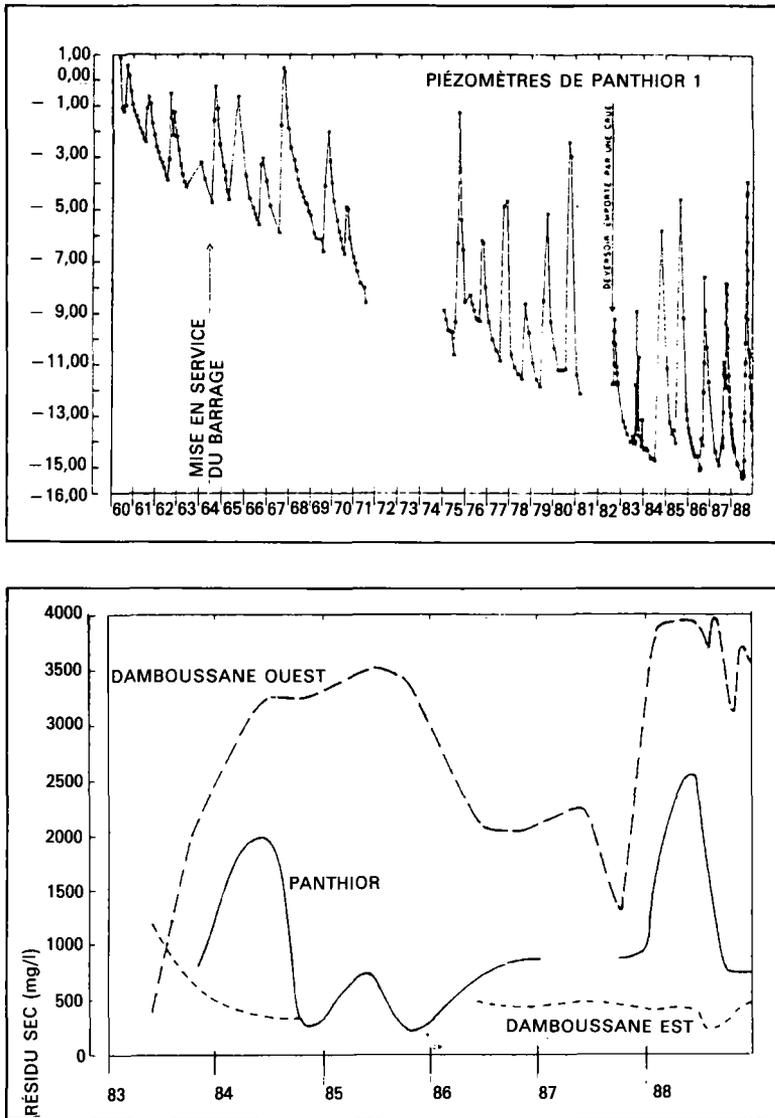


Figure 3. Fluctuations des niveaux piézométriques de Panthior 1. b : résidu sec sur les piézomètres de Panthior.

barrage qui, après la première campagne d'observation de 1987, atteignent déjà une hauteur de 27 cm par endroit.

Pour comparer les vitesses d'infiltration entre les deux hivernages, nous avons adopté le raisonnement suivant :

Après les dernières chutes de pluies ayant alimenté la cuvette, soit le 2-10-87

pour l'hivernage 1987 et le 22-09-88 pour l'hivernage 1988, et en tenant compte des vitesses réelles d'infiltration observées sur le terrain, nous avons calculé à partir de ces dates respectives, en faisant abstraction des apports antérieurs, les volumes infiltrés correspondants.

- Hivernage 1987 : après 50 jours, le volume infiltré est de 61 707 m³, la hauteur à l'échelle est de 2,20 m.
- Hivernage 1988 : après 50 jours, le volume infiltré est de 54 200 m³, la hauteur à l'échelle est de 3,60 m.

Le graphique de la figure 2 permet de mieux visualiser cela : les jours sont portés en abscisses et les volumes cumulés en ordonnées. Les courbes des deux hivernages ont la même origine : la première partie est quasi commune avec une forte pente indiquant une infiltration par les parois latérales de la cuvette, puis à mesure que le plan d'eau baisse dénoyant les parois, la pente des courbes devient moins accentuée, elles s'écartent progressivement l'une de l'autre (colmatage du fond de la cuvette).

Pour que le site ait un rendement maximum et pour ne pas être astreint à des travaux de décapage très importants et onéreux dans quelques années, il faudrait procéder après chaque hivernage à une opération d'entretien de la cuvette. Cette opération pourrait être effectuée par les villageois riverains et a été estimée à 500 000 F CFA.

Conclusions

La construction du seuil déversoir de crue de Panthior et le décapage de la cuvette ont redonné toute sa vitalité à ce site d'injection en permettant localement de recharger la nappe d'une manière appréciable et de diluer les fortes concentrations en sels. Mais si ce compartiment continue à être surexploité, le barrage de Panthior ne pourra plus jouer aussi efficacement son rôle et laissera échapper vers les zones d'exploitation des « masses d'eau saumâtre » entre deux hivernages ainsi qu'en témoigne la lente dégradation piézométrique et chimique qui prévaut au droit du piézomètre de Panthior.

Sur le plan financier, le calcul ci-après permet d'estimer le coût du m³ d'eau infiltré :

- coût des aménagements : 90 000 000 F CFA;
- durée de vie du seuil : 20 ans;
- volume infiltré en 2 ans : 222 083 + 362 587 = 584 670 m³.

$$\text{Coût du m}^3 : \frac{90\,000\,000 \times 2}{20 \times 584\,670} = 15,39 \text{ F CFA/m}^3$$

Ces calculs sont assez sommaires mais permettent néanmoins d'avoir une idée du coût du m³ de l'eau infiltrée artificiellement. Ce prix est à rapprocher du coût du m³ d'eau brute (39 F CFA) qui serait produite par le Canal de Cayor.

10

Recharge de l'aquifère superficiel de la vallée de Baïla (Basse Casamance, Sénégal)

R. MALOU⁽¹⁾, J. MUDRY⁽¹⁾, J.-L. SAOS⁽²⁾

⁽¹⁾ *Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar-Fann, Sénégal*

⁽²⁾ *ORSTOM, BP 1386, Dakar-Fann, Sénégal*

Le marigot de Baïla est un cours d'eau situé en basse Casamance, dans le département de Bignona, il est partiellement affecté par la marée. L'aquifère qui lui est associé est une nappe libre qui imprègne les formations superficielles du Continental Terminal et du Quaternaire.

Des mesures piézométriques et conductimétriques permettent d'apprécier la pluie efficace sur le bassin. A l'hivernage (juin à octobre) la remontée piézométrique est difficile sous les plateaux latéritisés, elle est rapide et fonction de la hauteur des précipitations sous les terrasses bordant la vallée (+ 0,49 m en 1987 avec 1 006,7 mm de pluie, + 3,23 m en 1988 avec 1 355,8 mm). Dès la fin des épisodes pluvieux, la nappe subit une ponction évaporatoire perceptible même entre les pluies de l'hivernage. Ce phénomène, combiné au déficit pluviométrique observé depuis plusieurs années est responsable de l'important abaissement piézométrique observé depuis 1965.

Les mesures de conductivités effectuées pendant l'hivernage montrent un lessivage des sels stockés dans la zone non-saturée pendant la phase évaporatoire de la saison sèche, les zones de forte variation étant à la fois la zone maritime à langue salée et les zones de plateaux à lessivage important. En revanche, les zones de terrasses, avec une infiltration facile, subissent de faibles variations.

Un calcul de bilan à l'échelle journalière a été tenté en déduisant (par corrélation) les valeurs d'ETP des mesures de Piche. L'évapotranspiration réelle a été calculée en tenant compte de la réserve en eau du sol ainsi que du tarissement de cette réserve et de la nappe, compte tenu de la porosité efficace.

Ainsi donc, le bilan 1987 fait apparaître un déficit de 30 mm et le bilan 1988 un excédent de 333 mm.

Si la tendance actuelle à un excédent pluviométrique se confirme, l'espoir de voir une remontée piézométrique suffisante pour ramener les nappes à leur cote d'avant la sécheresse demeure.

Présentation

Ce travail a été réalisé au laboratoire d'hydrogéologie de l'ORSTOM (Malou [2]).

Géographie

La Casamance occupe le Sud de la République du Sénégal. Elle est limitée au nord par la Gambie, au sud par la Guinée Bissau, à l'ouest par l'Océan atlantique et à l'est par la rivière de Gouloumbou, affluent du fleuve Gambie (figure 1).

Le marigot de Baïla est un affluent du Diouloulou lui même affluent de la Casamance. Son bassin versant qui constitue la zone d'étude s'étend sur 1 634 km² au nord de la ville de Bignona et empiète légèrement sur le territoire gambien.

Climat

Située en zone tropicale sèche, la Casamance connaît deux saisons bien marquées : une saison sèche de novembre à avril, et une saison des pluies ou hivernage de mai à octobre.

Pendant la saison sèche la région est parcourue par l'Alizé maritime, vent humide non générateur de pluie, issu de l'anticyclone des Açores. Ce vent devient de plus en plus sec en pénétrant dans le continent où il rencontre l'Alizé continental ou Harmattan en provenance de l'anticyclone maghrébin.

Pendant la saison des pluies c'est la Mousson qui domine sur toute la zone par suite de l'affaissement de la cellule des Açores. Il s'agit d'un vent chaud et humide générateur de précipitations.

D'est en ouest, c'est-à-dire d'amont en aval du fleuve Casamance deux grandes régions climatiques se distinguent :

- La région du Fouladou en amont où l'effet de continentalité se fait sentir par de grandes amplitudes thermiques et une faible pluviométrie moyenne annuelle (1 000 à 1 300 mm).
- La région de la Basse-Casamance en aval sous influence océanique, où les fluctuations thermiques sont moins accentuées et la pluviométrie moyenne annuelle plus abondante (1 300 à 1 700 mm).

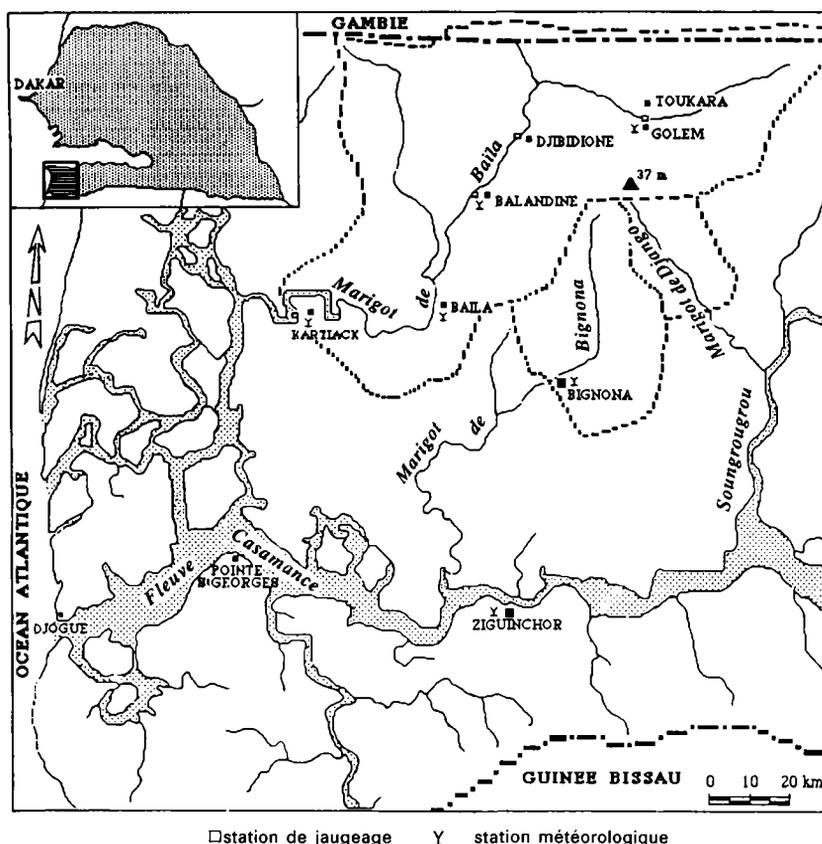


Figure 1. Localisation géographique du bassin versant du Marigot de Baila.

Géologie

La Basse Casamance fait partie du bassin Sénégal-Mauritanien, elle a subi une longue histoire sédimentaire du Jurassique au Miocène. Sur les dépôts miocènes, atteints seulement par des forages d'eau, des grès bariolés interstratifiés de couches d'argile constituent la série détritique du Continental Terminal qui fut modelée en glaciais au cours de la période aride qui a suivi. Le Quaternaire est caractérisé par une suite d'oscillations du niveau marin (minimum - 120 m vers 18 000 BP et maximum + 1,5 m vers 5 500 BP, période pendant laquelle s'est effectué le creusement des vallées).

Le golfe marin de Basse Casamance se comble très récemment, des cordons littoraux le ferment vers 1 500 BP.

La morphologie actuelle est peu accusée, le point culminant ne dépassant pas 36 m. Elle est constituée de bas-fonds, de versants et de plateaux.

Les bas-fonds sont subdivisés en deux zones : une zone aval (influencée par la marée) remplie de vases récentes où se développent la mangrove et les tannes, et une zone amont non maritime de sédiments limono-sableux occupée par les rizières.

Les versants sont constitués de terrasses marines : la plus basse (2 m) est occupée par les colluvions, elle est cultivée en rizières. La terrasse de 2-5 m, plus ancienne est sableuse, elle est peuplée de palmiers à huile et de kapokiers. La terrasse de 10 m est également sableuse, on y cultive le riz pluvial, le mil et l'arachide.

Les plateaux sont formés de buttes circulaires ou sinueuses de Continental Terminal, ils supportent des sols sableux rouges plus ou moins indurés. Il existe donc un contraste important dans la nature des formations de surface entre les plateaux et les autres zones.

Rôle de l'hivernage dans la recharge

Pluviométrie

La Casamance, comme toute la zone inter-tropicale, subit depuis l'année 1968 un déficit pluviométrique important. De 1980 à 1986, ce déficit a atteint 30 % de la moyenne inter-annuelle (Saos *et al.* [6]). Cependant, la Casamance est la région la plus favorisée du Sénégal, les hauteurs de pluie dépassant 1 000 mm.

En 1987, le bassin versant du marigot de Baïla a reçu des hauteurs totales de pluie comprises entre 850 mm (frontière gambienne) et 1 350 mm (Baïla); en 1988, les hauteurs vont de 950 mm (frontière gambienne) à 1 500 mm (Bignona). La répartition spatiale est bien sûr influencée par la latitude (gradient N-S), mais les courbes s'infléchissent au niveau des vallées (il tombe plus sur le marigot que sur les plateaux qui le bordent), et les vallées les plus arrosées changent avec les années.

Variations piézométriques

La plupart des points d'eau n'ayant pas été nivelés, il n'a pas été possible d'établir de carte piézométrique. En revanche, des cartes d'isovariations telles que celle de la figure 2, qui représente la remontée piézométrique entre juillet et octobre 1988, mettent en relief la différence de comportement des zones géomorphologiques :

- dans les basses terrasses, la nappe remonte de 4 à 5 m;
- dans les terrasses moyennes, de 3 à 4 m;
- dans la haute terrasse, de 1 à 3 m;
- sous le plateau, de moins d'un mètre.

Cette difficulté de recharge sous les plateaux est responsable de l'important abaissement piézométrique qu'a subi la zone haute au cours de la sécheresse sahélienne (— 7 m de 1967 à 1987. Saos et Dacosta [5]).

Vallée de Baïla : recharge de l'aquifère

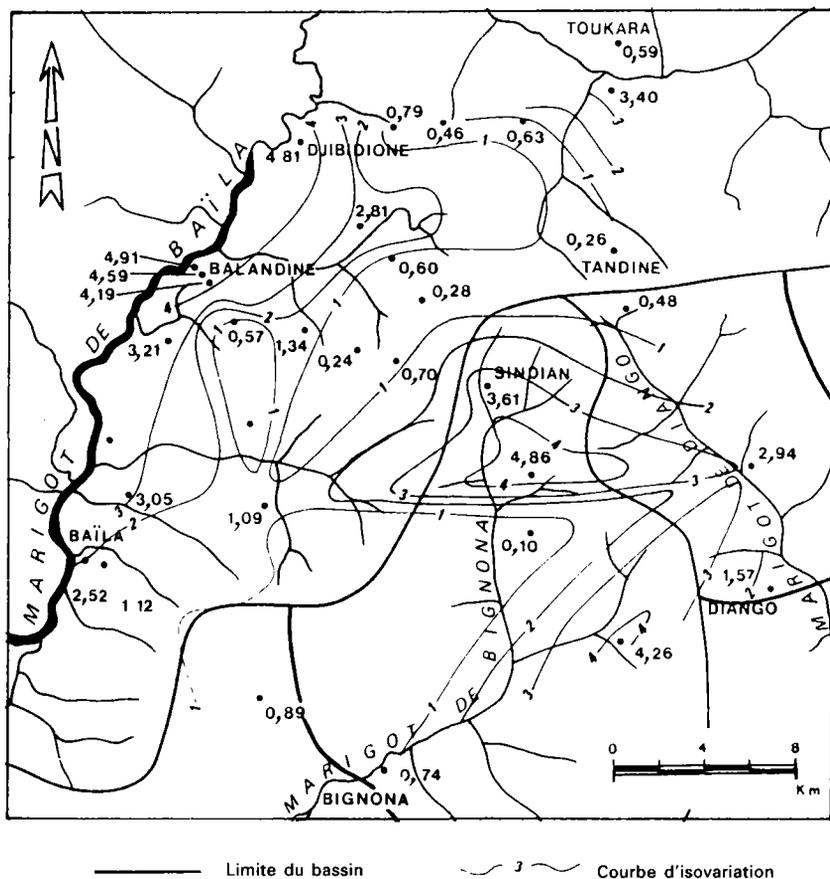


Figure 2. Carte d'isovariations piézométriques entre juillet et octobre 1988.

Variations chimiques

La conductivité de l'eau des différents puits a été mesurée à chaque campagne piézométrique. On distingue deux zones de forte conductivité, une de faible, et une de conductivité moyenne.

- Les fortes conductivités ($> 100 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) sont observées sur les zones à influence maritime (bas-fonds et basses terrasses aval), mais aussi sous les plateaux : la reprise évaporatoire presque total des dernières précipitations, facilitée par la faible infiltration, est suivie par un lessivage aux pluies suivantes. Ce phénomène est responsable de ces fortes minéralisations.
- Les faibles conductivités ($20 \text{ à } 50 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) s'observent sur la moyenne terrasse, les conductivités moyennes ($50 \text{ à } 100 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) sous la haute terrasse.

Hormis la zone basse maritime, il existe donc une relation inverse entre la pluie efficace responsable de la remontée piézométrique à l'hivernage, et la concentration des eaux, ce qui atteste du rôle de l'évapotranspiration dans ce phénomène.

Les variations saisonnières de la conductivité confirment ce schéma (figure 3) : les fortes variations saisonnières (800 à $1\,000\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) sont observées dans la zone maritime et sous les plateaux, les faibles sur les terrasses.

L'explication de ce zonage peut être ainsi envisagée :

- En zone maritime, la langue salée progresse vers le continent en période sèche. A la première crue, l'aquifère est rechargé avec ces eaux salées. Plus tard, au cours de l'hivernage, les eaux douces devenues abondantes repoussent les eaux minéralisées vers le marigot et les diluent.
- Sous les plateaux, il existe également un grand contraste de conductivité entre les eaux de début d'hivernage, chargées en sels lessivés dans le sol (ces sels ont été accumulés pendant la reprise évaporatoire de la saison sèche précédente), et les eaux de la fin de l'hivernage qui n'ont plus de stock à lessiver dans le sol.
- Sous les terrasses plus perméables en revanche, les eaux s'infiltrent plus facilement en abandonnant moins de leur charge saline lors de la reprise évaporatoire. Cette meilleure infiltration a une composition plus homogène au cours du temps.

Les mesures de conductivité confirment donc en tous points les résultats de l'étude piézométrique.

Bilan hydrique à la station de Toukara (puits de Golem)

Evaluation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle est calculée par la méthode de Turc et la fiabilité des résultats vérifiée par une corrélation avec les valeurs d'évaporation « Piche » recueillies à la station de Ziguinchor. La corrélation est médiocre. Cependant, un rapport \mathcal{L} de l'ETP Turc mensuelle à l'évaporation « Piche » mensuelle a permis de reconstituer une série journalière de l'ETP Turc à partir des valeurs de « Piche » :

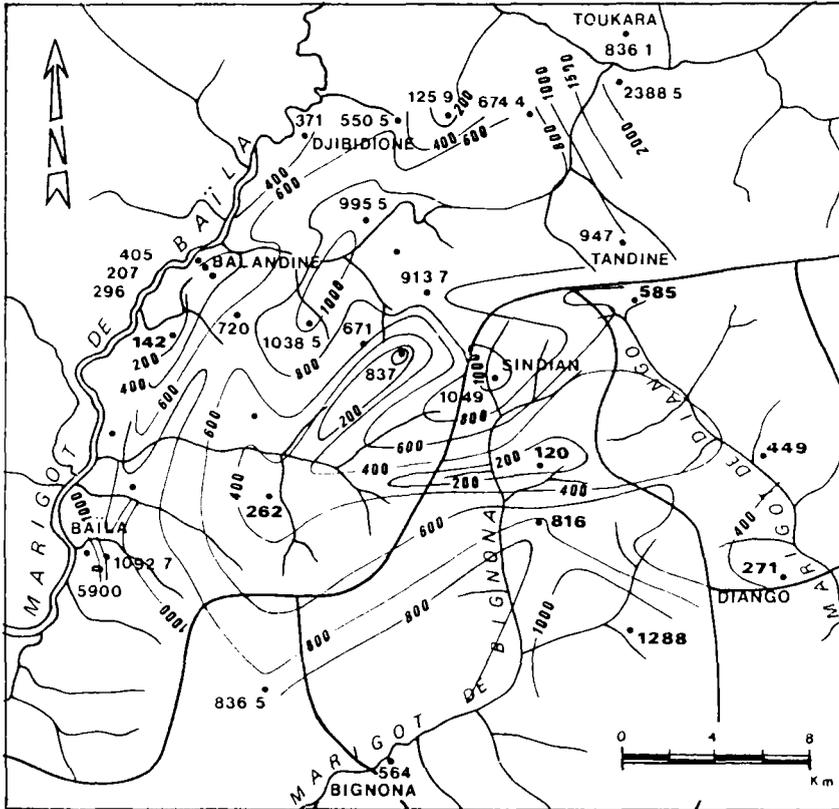
$$\text{ETP Turc journalière} = \mathcal{L} * \text{EP journalière}$$

$$\mathcal{L} = \frac{\text{EPT Turc mensuelle}}{\text{EP mensuelle}}$$

Méthode du bilan

Un modèle original basé sur le principe de Thornthwaite a été utilisé. Ce principe tient compte des ponctions évapotranspiratoires que subit la nappe d'eau souterraine lorsque toutes les réserves du sol sont épuisées pendant la saison sèche. Il est également tenu compte d'un autre paramètre homologue à la réserve facilement utilisable du sol, mais qui en diffère par son caractère dynamique — du fait de

Vallée de Baila : recharge de l'aquifère



— Limite du bassin ~200~ Courbe d'isovariation

Figure 3. Carte d'isovariations conductimétriques entre juin et octobre 1988.

la pesanteur —, et appelé ici percolation. Cette quantité d'eau en transit dans le sol parvient à la nappe en même temps qu'elle fait l'objet d'une reprise évapotranspiratoire lors des fréquents déficits pluviométriques observés au cours de l'hivernage.

Les principaux paramètres utilisés dans le calcul de ce bilan sont ainsi définis.

Les réserves du sol

- La réserve de survie des végétaux (Rs)

Elle détermine un seuil d'humidité du sol en-dessous duquel une restriction évapotranspiratoire s'opère du fait des phénomènes biologiques (fermeture des stomates) et physiques (forces de capillarité). C'est une limite estimée à 60 mm d'eau dans la zone non saturée. A ce stade d'humidité du sol l'évapotranspiration

réelle est inférieure à la valeur potentielle et la quantité d'eau prélevable dans la réserve du sol est réglée par un coefficient K dont la formule est la suivante :

$$H = \frac{Hd}{Rs}$$

H = eau disponible; Rs = réserve de survie des végétaux.

- La réserve facilement utilisable (RFU)

Elle définit, toujours dans la zone saturée, le volume d'eau compris entre le seuil de survie des végétaux (Rs) et celui de la saturation du sol (RU).

- La réserve utile du sol (RU)

Elle représente le seuil de saturation du sol au-delà duquel tout excédent de pluie est disponible pour l'écoulement et la percolation. Ce seuil de saturation du sol est estimé à 100 mm d'eau.

La pluviométrie

- La pluviométrie annuelle (Pc)

Elle est obtenue en cumulant les valeurs mensuelles.

- La pluie efficace (Pe)

Elle est définie ici comme étant la part de la pluie disponible à l'infiltration.

La percolation (p)

C'est la pluie efficace non encore parvenue à la nappe aquifère.

La recharge (re)

Elle représente l'infiltration efficace évaluée par des mesures piézométriques.

Le calcul du bilan hydrique dans ce bassin versant comprend trois phases ainsi articulées :

$$1^{\text{re}} \text{ phase : } R = RU$$

Toutes les réserves du sol sont satisfaites, le surplus de pluie alimente la percolation :

$$\begin{aligned} ETR &= ETP \\ Hd &= (P - E) + RU + p \\ Pec &= (Pc^* - Ec) - ETR \\ pc &= Pec - rec \end{aligned}$$

la recharge est une valeur positive correspondant à la période de l'hivernage.

$$2^{\text{e}} \text{ phase : } Rs \leq R < RU$$

* La lettre C indique la valeur cumulée du paramètre concerné.

Vallée de Baila : recharge de l'aquifère

Dans ce cas il y a un déficit pluviométrique mais les réserves du sol demeurent encore facilement utilisables; il n'y a pas encore de déficit évapotranspiratoire :

$$\begin{aligned} \text{ETR} &= \text{ETP} \\ \text{Hd} &= \text{P} + \text{R} + \text{p} \\ \text{Pec} &= (\text{Pc} - \text{Ec}) - \text{ETR} \\ \text{pc} &= \text{Pec} - \text{rec} \\ \text{E} &= 0 \\ \text{Pe} &= 0 \end{aligned}$$

Cette période correspond à la fin de l'hivernage.

$$\begin{aligned} 3^{\text{e}} \text{ phase : } 0 \leq \text{R} < \text{Rs} \\ \text{ETR} < \text{ETP} &= \text{K} * \text{ETP} - \Delta \text{re} \\ \text{pc} &= 0 \end{aligned}$$

Cette période correspond à la saison sèche pendant laquelle la nappe est sollicitée par l'évapotranspiration et varie négativement.

Résultats obtenus

Dans le cas de la vallée de Baila une campagne de suivi pluviométrique, hydrologique et piézométrique a permis d'établir un bilan journalier sur deux cycles annuels (1987-88, 1988-89).

Les résultats présentés sur le Tableau I et sur la figure 4 indiquent le caractère saisonnier du cycle de l'eau dans cette vallée : un remplissage des réserves hydriques du sol pendant l'hivernage, suivi d'une vidange pendant la saison sèche. Cette reprise évapotranspiratoire se fait ainsi (par ordre de priorité) :

- Dès la fin des pluies de la mi-octobre, l'ETR est alimentée à partir de la percolation (pc) qui maintient égale à la RU la réserve (R) du sol.
- Vers la fin du mois de décembre, la percolation s'annule.
- A la mi-janvier la RFU est entièrement reprise. A compter de cette période la nappe est affectée jusqu'au prochain hivernage.

Tableau I. Comparaison des bilans 1987-1988 et 1988-1989.

	P	ETP	ETR	R	E	PE	p	rc	T
Juin 1987 - Mai 1988	1 014	1 598	1 027	0	0	0	0	0	13
Juin 1988 - Mai 1989	1 340	1 587	1 013	0	9,5	334	0	334	17

Ainsi, en 1987, la ponction évapotranspiratoire dans la nappe est supérieure à l'apport total de l'hivernage, ce qui a occasionné un bilan négatif de - 30 mm (en lame d'eau), pour une porosité efficace de 15 %.

En 1989, où la pluviométrie est meilleure qu'en 1987 (1 014 mm en 1987; 1 339 mm en 1988), le bilan s'est avéré positif, + 330 mm d'eau.

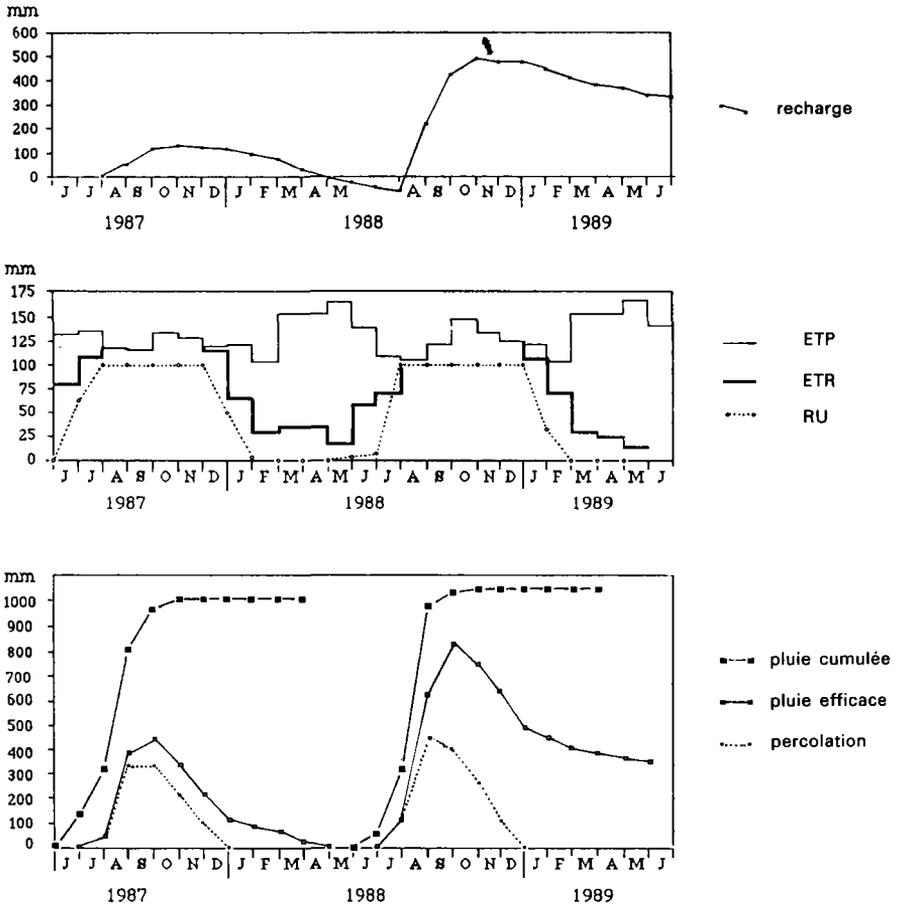


Figure 4. Bilan hydrique à la station de Golem.

Conclusion

L'analyse de la figure 5 rappelle deux observations majeures faites dans cette zone de Baïla pendant ces deux cycles annuels d'étude :

- d'une part, l'abondance pluviométrique de l'hivernage 1988 par rapport à 1987 (courbes des pluies cumulées);
- d'autre part, le zonage de la recharge qui a une importance croissante des zones de plateaux vers les bas-fonds (courbes de remontée du niveau statique des puits de Toukara et de Golem).

Vallée de Baïla : recharge de l'aquifère

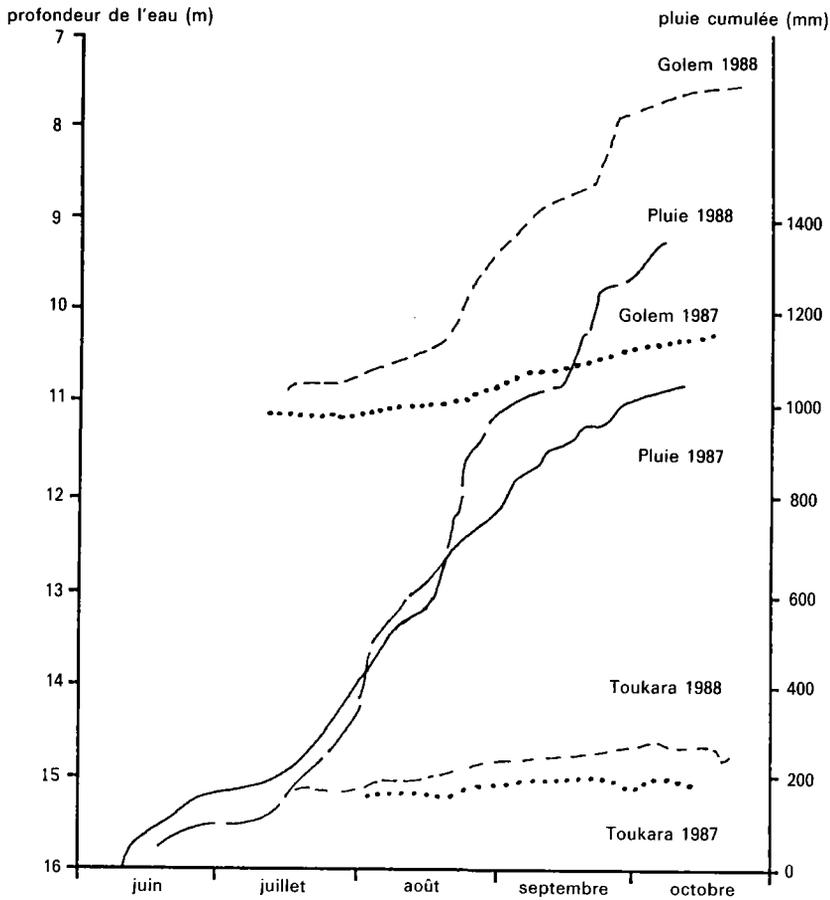


Figure 5. Comparaison des recharges 1987 et 1988 sur les puits de Golem et de Toukara (pluies cumulées et niveaux piézométriques).

La pluviométrie des années 1987, 1988

La pluie cumulée de 1987 dépasse à peine 1 000 mm, alors que celle de 1988 avoisine les 1 400 mm, ce qui a donné un bilan déficitaire de 30 mm en 1987 (toutefois proche de l'équilibre) et un excédent de 330 mm en 1988.

La remontée piézométrique qui s'en est suivie corrobore nettement ces observations au niveau des puits de Toukara et de Golem. A Golem la remontée piézométrique n'a pas dépassé un mètre en 1987 alors qu'en 1988 elle était proche de quatre mètres.

Le zonage de la recharge

Les mesures piézométriques et conductimétriques signalent que la recharge se fait préférentiellement au niveau des terrasses. Ainsi le puits de Toukara, sur plateau est moins affecté par la recharge que celui de Golem, sur terrasse, surtout en 1988 : l'excédent pluviométrique profite surtout aux terrasses.

Depuis 1968, la région soudano-sahélienne a accumulé des hauteurs de pluies en dessous de la normale, ce qui a considérablement abaissé les niveaux piézométriques (parfois de 10 mètres). Depuis 1987, des hauteurs de pluies proches de la moyenne (1987) ou au-dessus (1988), se sont succédées. La seule année 1988 a permis une remontée de 4 mètres à Golem ce qui donne un espoir de restauration des niveaux piézométriques dans les aquifères qui ne sont pas surexploités.

Références

1. Galaire R. (1980). Etude hydrogéologique du marigot de Baïla, ORSTOM, Dakar, 104 p.
2. Malou R. (1989). Etude hydrologique de l'aquifère superficiel de la vallée de Baïla (Basse Casamance). Bilan hydrique 1987-1988. Rapport DEA Geol. Appl. Univ. Cheikh Anta Diop (Dakar), 60 p., 25 fig., 15 tabl.
3. Michel P. (1960). Recherches géomorphologiques en Casamance et en Gambie méridionale. Dakar : BRGM, 64 p.
4. Olivry J.-C., Chouret A. (1981). Etude hydrogéologique du marigot de Bignona : Quelques aspects intéressants des mesures réalisées en 1970/1971, ORSTOM, Dakar, 93 p.
5. Saos J.-L., Dacosta H. (1987). Evolution hydrogéologique d'un bassin margino-littoral : Le marigot de Baïla en Basse Casamance. *In* Etude des estuaires et lagunes du Sénégal. Rapp. EPEC-UNESCO. Déc. 1987, Dakar, pp. 59-75.
6. Saos J.-L., Dacosta H., Le Troquer Y., Olivry J.-C. (1987). Le marigot de Baïla en Basse Casamance : Pluviométrie et écoulement (résultats des campagnes 1983/1984, 1984/1985, 1985/1986), ORSTOM, Dakar, 55 p.

11

Transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Recharge des nappes en climat soudano-sahélien

B. DIENG, P. BAZIE, A. SCHMITT

*École Inter États d'Ingénieurs de l'Équipement Rural, BP 03, 7023 Ouagadougou,
03 Burkina Faso*

En Afrique soudano-sahélienne, les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées pour la satisfaction de besoins divers (alimentation en eau des populations et du cheptel, agriculture, industrie...).

C'est ainsi que près de 100 000 points d'eau ont été prévus dans les 13 pays membres du CIEH dans le cadre de la Décennie de l'Eau Potable et de l'Assainissement 1980-1990.

Pour que ces prélèvements ne créent pas de difficultés, il est nécessaire de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les réserves des nappes à exploiter ?
- Comment et à quel taux ces nappes se rechargent-elles ?

Plusieurs méthodes sont utilisées pour répondre à ces questions, mais les résultats fournis sont souvent assez disparates au point qu'on puisse douter de leur validité.

Dans cet article, il est proposé une réflexion sur ce thème ; les principales méthodes d'estimation de la recharge et les difficultés qu'elles sont susceptibles de rencontrer sont analysées. Nous exposerons ensuite les grandes lignes d'un programme de recherche. L'objectif de ce travail sera de mieux étudier les phénomènes de transferts verticaux d'eau en zone non saturée en vue de bâtir une méthodologie d'estimation de la recharge des nappes, mieux adaptée au contexte soudano-sahélien.

Méthode d'estimation et problématique de la recharge

Méthode du bilan de thornthwaite

Il s'agit de la méthode la plus utilisée. La recharge est calculée à partir de l'équation du bilan hydrologique :

soit : $P = ETR + R + I$, avec :

P = pluviométrie de la période considérée,

R = ruissellement,

I = infiltration,

ETR = évapotranspiration réelle.

Le schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite suppose que la zone non saturée est divisée en deux parties :

— une zone d'échange (sol-plantes-atmosphère), d'épaisseur relativement faible (généralement moins d'un mètre) et d'humidité très variable;

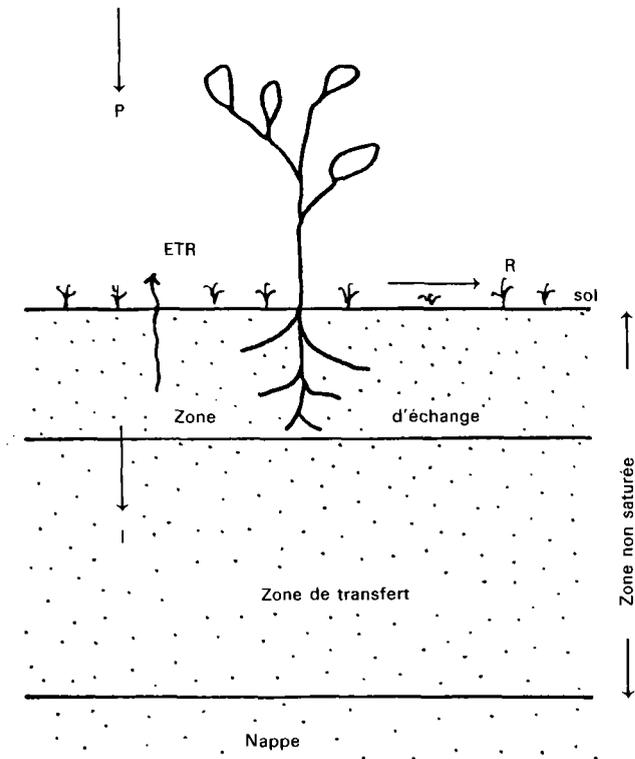


Figure 1. Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite.

— une zone de transfert, d'humidité peu variable et au moins égale à celle correspondante à la capacité au champ.

Dans le fonctionnement de ce système, la pluie P satisfait préférentiellement les besoins suivants :

- l'évapotranspiration ETR;
- la reconstitution de l'humidité de la zone d'échange jusqu'à la capacité au champ. Le volume d'eau correspondant appelé Réserve Utile du sol (RU) doit satisfaire l'évaporation en période de non apport.

Après satisfaction de ces deux premiers besoins, l'excédent éventuel d'apport constitue :

- l'infiltration qui traverse la zone de transfert pour atteindre la nappe;
- le ruissellement de surface.

Lorsqu'il existe des mesures de ruissellement, l'infiltration peut se déterminer directement, sinon la pluie efficace ($P_e = I + R$) est prise comme étant un indicateur significatif de la recharge. Elle est alors égale à un pourcentage de la pluie efficace. Ce pourcentage est variable et fonction de la lithologie, de la morphologie des bassins, de la profondeur de la surface piézométrique, de la couverture végétale... La figure 2 donne des valeurs de pluie efficace dans quelques pays de la zone soudano-sahélienne.

Cette approche peut donner une estimation de la recharge, mais elle pose un certain nombre de problèmes, en particulier la prise en compte de l'évaporation en période sèche et le choix des valeurs de la réserve en eau du sol. Ces valeurs dépendent de la nature du sol et de l'épaisseur de la zone d'échange considérée.

Les tableaux 1 et 2, proposés par deux auteurs différents, donnent des résultats de bilan pour les mêmes régions géographiques du Burkina. Les disparités apparaissent clairement ; selon les auteurs, la recharge varie de moins de 1 % à 25 % de la pluviométrie totale annuelle. Elles laissent dans tous les cas comprendre que l'épaisseur de sol considérée est relativement faible.

Signalons que 100 mm représentent la lame d'eau nécessaire pour amener un sol d'un mètre d'épaisseur d'une humidité au point de flétrissement de 12 % à une humidité correspondante à la capacité au champ de 22 %.

L'aridité du climat en région soudano-sahélienne peut être importante. Dans ce cas, l'épaisseur de la zone d'échange, et donc la valeur de la réserve en eau du sol, peuvent être nettement plus importantes.

Des études basées sur des méthodes isotopiques semblent confirmer cette hypothèse. Elles montrent que la zone d'échange pourrait atteindre à la limite toute la frange non saturée sus-jacente à la nappe, ce qui explique les disparités des résultats obtenus par cette méthode de calcul.

C'est pour pallier ces insuffisances qu'on prend souvent le soin d'adjoindre à cette méthode d'autres devant valider ses résultats.

Calage à partir des fluctuations de nappe

Lorsque les paramètres hydrodynamiques de la nappe, en particulier le coefficient d'emménagement, sont bien connus, la valeur la plus vraisemblable de la recharge est celle qui permet de restituer avec une bonne fiabilité les variations consécutives du niveau de la nappe.

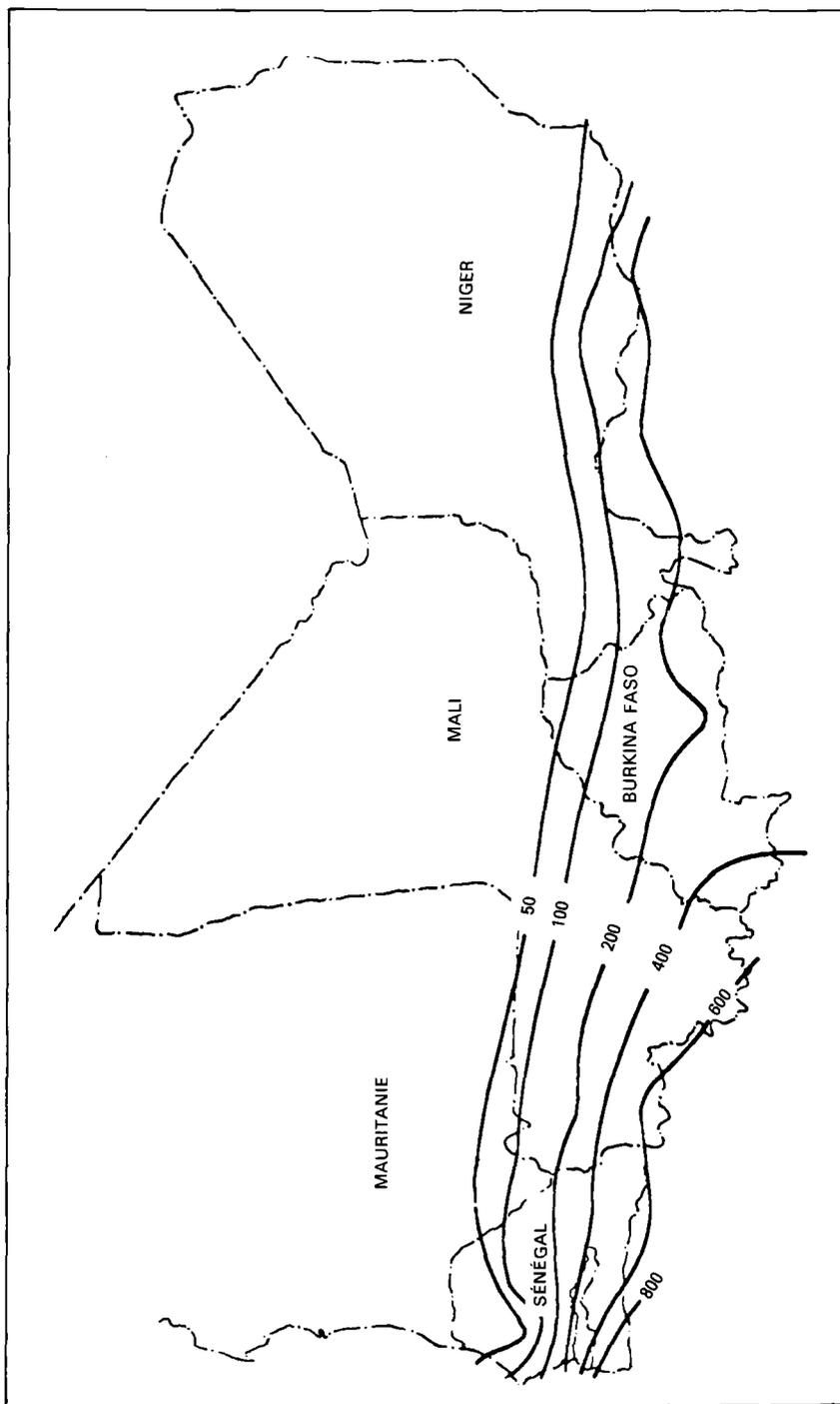


Figure 2. Courbe d'égale valeur de pluie efficace (d'après CIEH-BRGM, 1976).

BILAN HYDROLOGIQUE MOYEN AU BURKINA FASO

Tableau I. d'après BRGM 1986.

RÉGIONS	NORD	CENTRE		SUD
Stations	Katchari	Silmissin	Barogo	Sidéradougou
Capacité de rétention (mm)	10	10	10	30
Coef. emmag. (%)	1	3	5	1
Pluie moyenne (mm/an)	513	807	807	1 076
Evaporat. moy. (mm/an)	310	446	446	874
Ruissel. moy. (mm/an)	69	111	137	134
Recharge moy. (mm/an)	136	251	221	266

Tableau II. d'après IWACO 1990.

SITUATION	NORD		SUD	
	mm	%	mm	%
Précipitation	500	100	1 000	100
Ruissellement	25	5	90	9
Évapotranspiration	473	94,6	850	85
Recharge des nappes	2	0,4	60	6
Réserve en eau zone altérée saturée	0		390	
Réserve en eau zone fissurée saturée	100		100	
Réserve totale	100		100	

Cette restitution se fait avec des modèles simples : pluie-infiltration-niveau piézométrique.

A priori, une telle approche devrait aboutir à des résultats satisfaisants. Malheureusement, le coefficient d'emmagasinement est connu avec peu de précision. En effet, ce coefficient est mesuré par essai de pompage. La nappe est alors sollicitée en un temps limité (quelques heures). Au contraire, l'alimentation d'une nappe par infiltration est un phénomène diffus de longue durée (quelques mois).

Ainsi, le calage de la recharge devient en même temps un calage des coefficients d'emmagasinement, ce qui se traduit par une non unicité de la solution. La valeur de la recharge trouvée peut alors être sujet à discussion. Il faut aussi ajouter que des variations de niveau peuvent résulter de phénomènes autres que la recharge.

Calage à partir de modèles hydrodynamiques

Il s'agit de modèles globaux. Ils représentent l'écoulement souterrain et prennent en compte les débits aux exutoires et les variations de paramètres hydrodynamiques.

L'utilisation de tels modèles, par exemple au Sénégal, montre que les valeurs de recharge résultant du bilan classique de Thornthwaite peuvent être relativement surestimées. Il a fallu envisager qu'une bonne partie de l'infiltration devait être reprise par évaporation pour que les niveaux piézométriques restitués soient conformes à ceux observés.

Bilan annuel de la nappe du bassin de Kamobeul en 1979.

Pluie :	1 167 mm
Évaporation :	790 mm
Pluie efficace :	377 mm
Reprise par évaporation dans la nappe :	291 mm
Débit d'écoulement superficiel (mesuré) :	83 mm
Débit d'écoulement superficiel (calculé par modèle) :	81 mm

soit le bilan définitif suivant :

Pluie :	1 167 mm
Évaporation :	1 081 mm soit 93 % de la pluie
Ruissellement :	81 mm
Recharge effective :	5 mm soit 0,4 % de la pluie

Signalons que ces valeurs seraient conformes à celles du tableau 2 à la même latitude au Burkina.

En définitive, on serait tenté de penser que :

- les phénomènes d'évaporation sont souvent insuffisamment pris en compte dans les calculs de bilan hydrologique en région soudano-sahélienne;
- la recharge des nappes correspond à une fraction limitée de la pluie.

Ceci mérite d'être vérifié par des études plus poussées, ce qui est l'objet du programme de recherche proposé.

Le programme d'étude proposée

Il vise essentiellement les objectifs suivants :

- étude des mécanismes de transferts verticaux de l'eau en milieu poreux non saturé (transfert descendant : infiltration; transfert ascendant : reprise par évaporation);
- une quantification de la valeur de la réserve utile du sol en fonction de l'épaisseur effectivement atteinte par les échanges (sol-plantes-atmosphère) pouvant avoir un impact hydrologique;
- amélioration de la conceptualisation des modèles de calcul de recharge.

Transfert d'eau en milieu poreux non saturé

Pour ce faire, il sera réalisé sur le site de l'EIER un lysimètre profond, explorant toute la zone non saturée d'une épaisseur voisine de 8 m.

Ce dispositif sera muni de système de récupération des eaux de drainage et de suivi dans le temps des variations d'humidité et de succion du sol.

Cette étude, bien que ponctuelle, permettra de mieux appréhender les mécanismes de transfert et ses paramètres caractéristiques en vue de pouvoir éventuellement transposer la méthodologie à d'autres échelles et contextes.

12

Bilan hydrique de la rivière Comoé en amont de Karfiguela au Burkina Faso. Application au dimensionnement d'un barrage réservoir pour l'irrigation

E. ESKENAZI

Université de Liège, Quai Banning, 6, 4000 Liège, Belgique

Le but de cette étude est le dimensionnement de la retenue d'un barrage réservoir sur la rivière Comoé en amont de Karfiguela au Burkina Faso.

Caractéristiques générales de la région

La rivière Comoé coule sur un plateau de grès qui s'interrompt en falaises au nord de Banfora. Les vallées y sont ouvertes et le relief peu marqué en dehors de quelques escarpements en rive gauche de la Comoé, à l'amont des chutes de Karfiguela (figure 1).

Au pied du plateau, les vallées de la Comoé traversent la zone de collines qui constitue la plaine de Banfora. Ces vallées sont en voie de comblement et la rivière coule au-dessus du niveau moyen de la plaine.

La configuration générale des lieux présente donc des caractéristiques différentes dans les deux zones paysagistes principales. En amont des falaises, la pente

de la rivière est généralement forte (plus de 4 ‰) avec souvent la présence de chutes, et corrélativement un accroissement de la pente moyenne.

En aval des falaises, les pentes des vallées sont bien plus faibles (environ 1 ‰); mais les sites nécessitent de très longues digues de fermeture et il n'est pas possible de créer des retenues avec une hauteur d'eau importante sans noyer les grandes superficies de terres déjà cultivées en canne à sucre (Tarfila) ou aménagées en rizières modernes (Comoé Karfiguela).

Situation du futur barrage

Le barrage projeté est situé sur la rivière Comoé juste en amont du point de confluence avec la Lobi à 12 km environ de Karfiguela (figure 1). Le barrage se trouve donc dans la vallée supérieure de la Comoé, en haut des falaises qui marquent fortement le relief dans cette région.

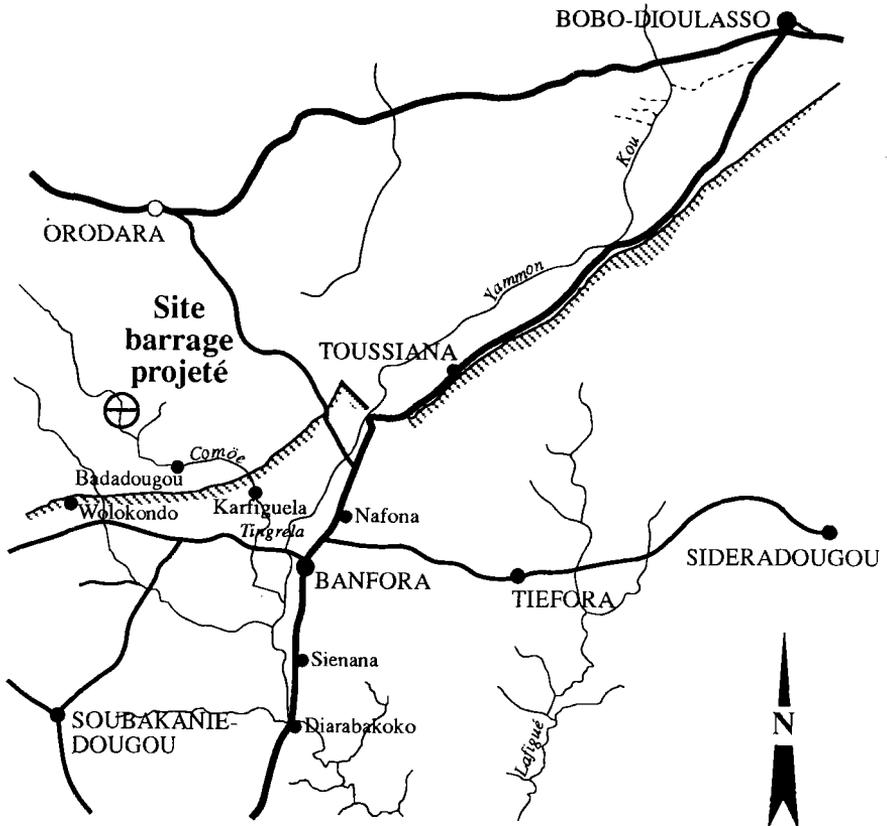


Figure 1. Plan de situation.

Surface du bassin versant

En amont du barrage, la Comoé draine un bassin de 560 km² sur une longueur de 45 km avec une pente moyenne de 4 mètres au kilomètre (0,004). En aval, à la station de Karfiguela, la Comoé a un bassin versant de 815 km².

Surface du plan d'eau et volume de la réserve

Le tracé des lignes de niveau au site du barrage (entre les cotes 432 et 455) a permis d'établir les courbes hauteurs/volumes et hauteurs/surfaces de la retenue (figure 2).

On voit, par exemple, qu'il est possible de stocker 27, 33 ou 38 millions de mètres cubes environ suivant que le niveau normal de la retenue est de 452, 453 ou 454 mètres.

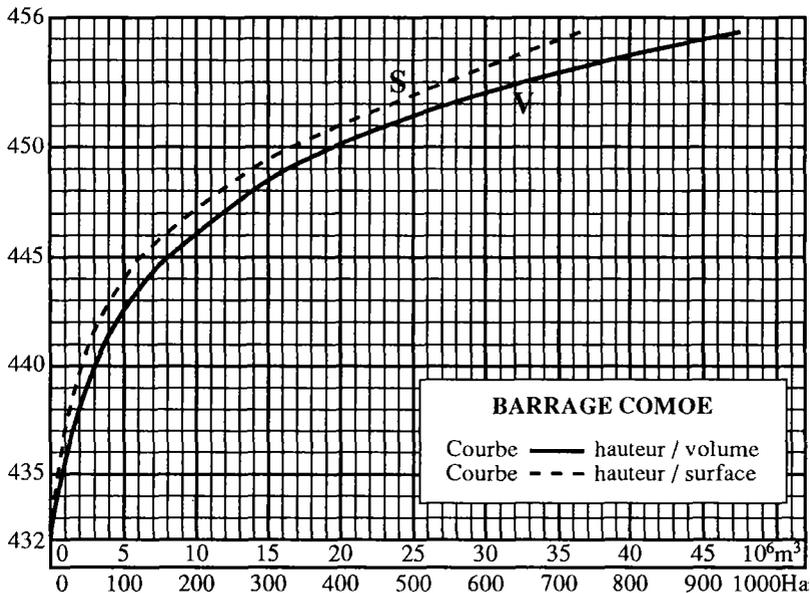


Figure 2. Courbes hauteurs/surfaces et hauteurs/volumes.

Données pluviométriques

Pluviométrie annuelle

La carte des isohyètes de la figure 3 donne les hauteurs moyennes des précipitations annuelles observées au Burkina Faso. On voit qu'au site du barrage projeté, le module moyen annuel est de 1 200 mm.

Pluviométrie mensuelle

La répartition moyenne mensuelle des précipitations peut être obtenue à partir des observations effectuées aux stations de Banfora et Orodara : les valeurs trouvées sont données au Tableau I.

Tableau I. Précipitations moyennes mensuelles.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P (mm)	2	10	19	74	117	142	209	325	208	68	18	8	1 197

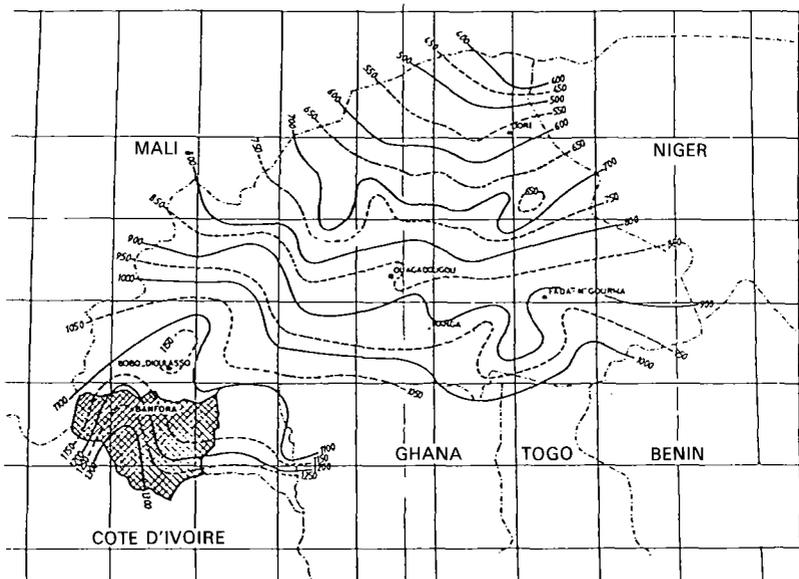


Figure 3. Courbes isohyètes.

Estimation des pertes par infiltration

La cuvette du barrage est assise sur un substratum gréseux qui est le siège d'infiltration.

Dans les grès de Banfora, ces infiltrations sont estimées à 50-100 mm/an (voir carte de planification des ressources en eaux souterraines des états membres du CIEH, 1976).

Etant donné que la charge maximale dans la retenue est assez importante (20 m), nous estimons que les pertes par infiltrations pourraient atteindre 125 mm/mois et varieraient suivant la racine carrée de la charge.

Estimation des pertes par évaporation

L'évaporation dans la réserve peut provoquer des pertes importantes sensiblement proportionnelles à la surface du plan d'eau.

L'évaporation en bac classe A a été mesurée à Séréfédougou depuis 1971.

Les valeurs trouvées sont données au Tableau II.

Tableau II. Évaporation (en mm) observée à Séréfédougou.

Années	Évaporation	Années	Évaporation	Années	Évaporation
1971	2 169,9	1976	2 383,5	1981	2 620,4
1972	2 021,3	1977	2 534,2	1982	2 394,5
1973	2 403,8	1978	2 300,2	1983	2 843,7
1974	2 254,9	1979	2 536,2	1984	2 694,0
1975	2 446,1	1980	2 490,8	1985	2 492,9

En appliquant la loi de Gauss à cette série de mesures, on en déduit les valeurs caractéristiques suivantes.

Tableau III. Évaporations caractéristiques.

Fréquence au non dépassement	Évaporations annuelles caractéristiques (en mm)
0,1	2 173
0,2	2 264
moyenne	2 439
0,8	2 613
0,9	2 704

On voit que la valeur « forte » susceptible d'être dépassée 1 année sur 10 est égale à 2 704 mm.

En comparant cette valeur caractéristique aux données, on voit que l'année 1984 présente la valeur la plus proche : 2 694 mm.

Nous adopterons donc l'année 1984 comme année décennale caractéristique. Par conséquent, les valeurs moyennes mensuelles à prendre en considération sont celles

observées en 1984 qui, affectées du coefficient 0,7, donnent l'ordre de grandeur de l'évaporation en surface libre qui se produit à la surface de la retenue (Tableau IV).

Tableau IV. Estimation de l'évaporation du lac.

Mois	Evaporation du bac	Evaporation du lac
J	320,1	224
F	370,6	259
M	319,2	223
A	291,9	204
M	206,6	145
J	174,0	122
J	145,7	102
A	132,4	93
S	125,1	87
O	150,0	105
N	201,7	141
D	256,7	180
Total	2 694 mm	1 885 mm

Données hydrométriques

La figure 4 montre le réseau hydrographique existant. On voit que la station la plus proche du site du barrage est celle de Karfiguela située au bas des falaises. Cette station existe depuis 1952.

En 1975, une étude de la Sogréah a permis de déterminer les débits moyens mensuels à Karfiguela (Tableau V).

Tableau V. Débits moyens mensuels de la Comoé à Karfiguela (en m³/s).

Année	Moyenne	Année	Moyenne	Année	Moyenne
1952	8,80	1960	5,81	1968	5,65
1953	6,51	1961	4,82	1969	6,26
1954	8,38	1962	6,88	1970	5,21
1955	6,37	1963	9,61	1971	4,78
1956	5,10	1964	8,63	1972	3,08
1957	7,58	1965	6,25	1973	3,07
1958	6,70	1966	7,71	1974	4,26
1959	5,57	1967	7,39		

Pour passer des valeurs obtenues à Karfiguela aux débits à considérer au droit du barrage, une étude basée sur le rapport des surfaces des bassins a été entreprise et a abouti aux résultats donnés au Tableau VI.

A partir de 1975, les débits observés à Karfiguela ont été modifiés par :

- la construction du barrage de la Lobi;

Bilan hydrique de la rivière Comoé

Tableau VI. Débits moyens mensuels (m³/s) au site du barrage projeté.

Année	Moyenne	Année	Moyenne	Année	Moyenne
1952	6,49	1960	4,45	1968	4,33
1953	5,00	1961	3,55	1969	4,52
1954	6,26	1962	5,19	1970	3,91
1955	4,88	1963	7,18	1971	3,59
1956	3,98	1964	6,42	1972	2,37
1957	5,67	1965	4,78	1973	2,26
1958	5,05	1966	5,78	1974	3,04
1959	3,83	1967	5,56		

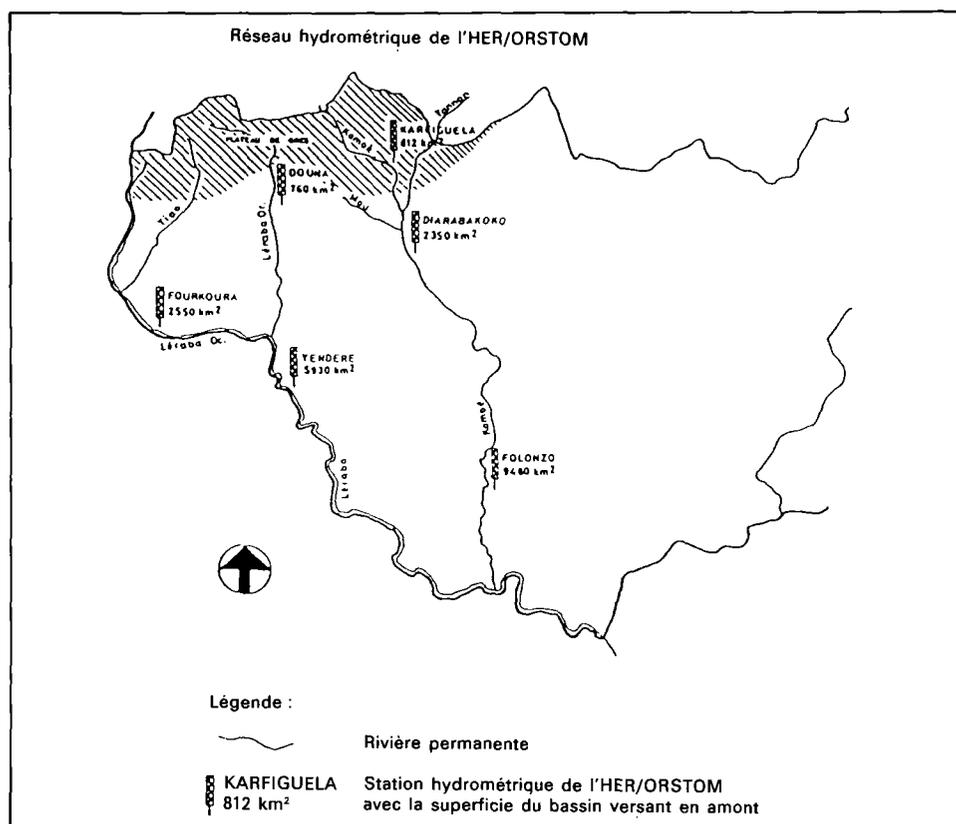


Figure 4. Réseau hydrographique de l'HER/ORSTOM.

— la prise de la So.Su.Co (Société Sucrière de la Comoé).

Compte tenu de ces perturbations, la période s'étendant de 1975 à 1985 semble être difficilement exploitable.

Pour reconstituer les débits à Karfiguela de 1975 à 1985, une première approche consiste à corriger les relevés opérés à ce poste à l'aide des mesures faites sur le lâcher de la Lobi et sur la prise So.Su.Co.

La reconstitution a consisté à ajouter aux mesures faites à Karfiguela les débits captés par la prise So.Su.Co après avoir déduit les débits lâchés par le barrage de la Lobi.

Malheureusement, les données présentaient des lacunes relatives à des périodes peu suivies. Ainsi, pour contourner cette difficulté, une corrélation avec le poste de Douna sur la Léraba Orientale (figure 4) a été entreprise. Elle a permis d'estimer les débits au site du barrage de 1975 à 1985 (Tableau VII).

Tableau VII. Débits moyens annuels à Douna sur la Léraba orientale et au site du barrage (en m³/s).

Année	Débits à Douna	Débits au site du barrage
1975	3,52	2,60
1976	2,75	2,08
1977	3,75	2,74
1978	3,06	2,26
1979	2,52	1,84
1980	2,16	1,58
1981	3,22	2,33
1982	1,76	1,29
1983	0,94	0,69
1984	0,49	0,36
1985	1,19	0,85

La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes laisse apparaître une sous-estimation des débits de la Comoé par la corrélation avec le poste de Douna.

En se basant sur le fait que les mesures faites (au cours des années 1980, 1983, 1984 et 1985) sur le lâcher de la Lobi et sur la prise So.Su.Co sont exactes, une « correction » des débits a donc été opérée sur l'ensemble des valeurs obtenues par corrélation avec le poste de Douna.

Les résultats sont consignés sur la figure 5.

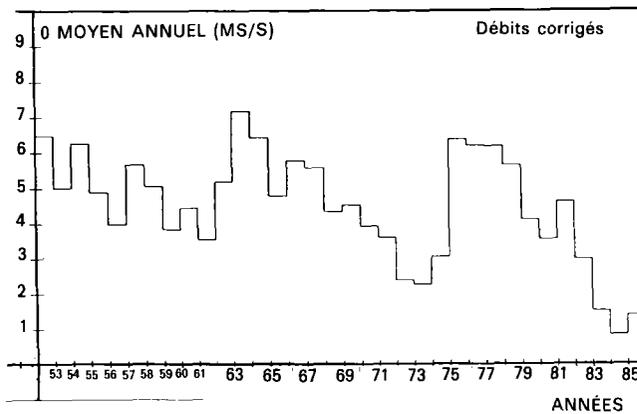


Figure 5. Débits moyens annuels « corrigés » au site du barrage (en m³/s).

Estimation des apports annuels caractéristiques

Il s'agit à présent de déterminer, à partir des débits de la Comoé, les apports annuels en fonction de leur fréquence. Les modules annuels trouvés sont donnés au Tableau VIII.

Tableau VIII. Débits moyens annuels au site du barrage (en m³/s).

Année	Débits	Année	Débits	Année	Débits	Année	Débits
1952	6,49	1961	3,55	1970	3,31	1979	4,10
1953	5,00	1962	5,19	1971	3,59	1980	3,54
1954	6,26	1963	7,18	1972	2,37	1981	4,60
1955	4,88	1964	6,42	1973	2,26	1982	2,96
1956	3,98	1965	4,78	1974	3,04	1983	1,51
1957	5,67	1966	5,78	1975	6,36	1984	0,83
1958	5,05	1967	5,56	1976	6,18	1985	1,39
1959	3,83	1968	4,33	1977	6,15		
1960	4,45	1969	4,52	1978	5,62		

En admettant que le module moyen annuel puisse être considéré comme une variable aléatoire qui suit la loi statistique normale, on trouve les débits caractéristiques suivants :

- apport décennal (sec) 2,398 m³/s = 75 10⁶ m³/an
- apport moyen 4,450 m³/s = 140 10⁶ m³/an
- apport décennal (humide) 6,503 m³/s = 205 10⁶ m³/an

En comparant le module décennal sec (2,398 m³/s) aux débits calculés au site du barrage, on voit que les années 1972 et 1973 présentent les modules annuels les plus proches du module caractéristique sec.

Nous adopterons donc les débits moyens mensuels les plus faibles (année 1973) comme débits de base pour le calage du volume de la retenue.

Estimation des besoins en eau pour le calage du volume de la retenue

Une étude des différents schémas d'aménagement a permis d'évaluer les besoins en eau que le barrage devrait assurer pour satisfaire les besoins actuels des projets existant dans la région et ouvrir de nouvelles perspectives dans le domaine agricole pour la population riveraine de la Comoé.

Parmi tous les programmes envisagés nous adopterons, pour le calage du volume utile de la retenue, le cas le plus défavorable, c'est-à-dire le schéma des besoins les plus élevés respectant à la fois l'ensemble des programmes prioritaires et secondaires.

Les besoins mensuels correspondant à ces programmes d'aménagement peuvent être résumés comme suit (encadré ci-dessous).

Tableau IX.

	Débits moyens (en l/s)
Alimentation en eau de la ville de Banfora (Horizon 2005)	161,0
Alimentation de l'Usine So.Su.Co	137,5
Irrigation des périmètres sucriers de la So.Su.Co (3 888 Ha)	1 381,5
Réhabilitation et extension de la plaine de Karfiguela (300 + 400 Ha).....	303,0
Arrosage des périmètres maraîchers de Toussiana (20 Ha et 40 Ha) et du périmètre rizicole (100 Ha).....	90,5
Maintien d'un débit minimum dans le lit de la Comoé ..	75,0
Besoins totaux mensuels	2 148,5
Eaux utiles venant du Lobi.....	- 133,0
et du Yannon	- 128,0
Besoins nets	1 887,5
Soit un volume annuel total de 59 524 200 m ³	

Calage du volume utile de la retenue

Le volume utile de la retenue peut être déterminé en tenant compte de la répartition des apports et des besoins au cours d'une année.

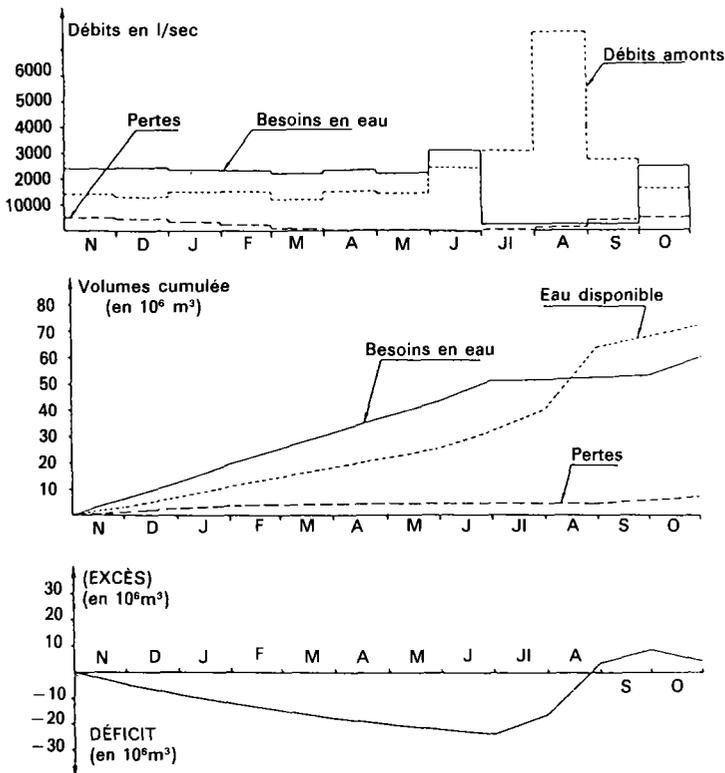


Figure 6. Apports, besoins et pertes en eau au cours d'une année.

Bilan hydrique de la rivière Comoé

La figure 6 représente les apports mensuels de l'année décennale sèche (1973) ainsi que les besoins globaux et les pertes dues à l'infiltration et à l'évaporation du plan d'eau.

Les courbes cumulées de ces différentes quantités conduisent au bilan annuel suivant :

volume total des apports	71,6 10 ⁶ m ³
volume total des besoins.....	59,5 10 ⁶ m ³
volume total des pertes.....	7,3 10 ⁶ m ³
volume total de l'eau excédentaire	4,8 10 ⁶ m ³

D'autre part, la courbe intégrale de la différence des débits permet de définir le volume minimum de stockage, soit 25 000 000 m³ auquel il faudra ajouter un volume mort de l'ordre de 2 000 000 m³ pouvant encaisser les dépôts solides pendant quelques années :

$$\int (Q_{\text{apport}} - Q_{\text{besoins}} - Q_{\text{pertes}}) dt$$

Enfin, en partant de la courbe hauteur/volume de la réserve, on en déduit les niveaux et volumes caractéristiques suivants (encadré ci-dessous) :

Tableau X.

Niveau	Volume 10 ⁶ m ³	
452	27,4	Niveau normal de la retenue permettant d'alimenter la Lobi par gravité
442,3	4,8	Niveau d'eau minimal en fin d'exploitation (après 1 année décennale sèche)
438	2,0	Niveau correspondant à la cote de la prise d'eau et à un volume mort pouvant encaisser des dépôts solides

Notons qu'entre le plan d'eau en fin d'exploitation (442,5) et le plan d'eau mort (438), il reste une tranche de 4,3 mètres représentant une réserve de 2 800 000 m³ utilisable au cas où l'année qui suit serait elle aussi relativement sèche.

Simulations et optimisations

La simulation consiste à faire la comparaison des ressources et des besoins non pas sur une seule année (année décennale sèche) mais, pas à pas, en considérant une série continue de ressources et de besoins tout en prenant en compte les dimensions de la retenue, la surface du plan d'eau, les apports des précipitations et les pertes par évaporation et infiltration.

Disposant de la série des données moyennes mensuelles calculées de 1952 à 1985 aux paragraphes précédents, nous avons pu simuler les variations du niveau de la retenue (calé à la cote 452) en confrontant, mois par mois, les besoins, les ressources et les pertes en eau (figure 7a).

En choisissant deux autres niveaux de retenue (453 et 454) et en effectuant la même simulation dans les deux cas, on obtient de meilleurs résultats en ce qui concerne, par exemple, le volume disponible dans la retenue à la fin de deux années décennales sèches (1974 et 1983).

Pour tenir compte des possibilités de variation du régime de la rivière Comoé et permettre éventuellement une accumulation supplémentaire au cours des années

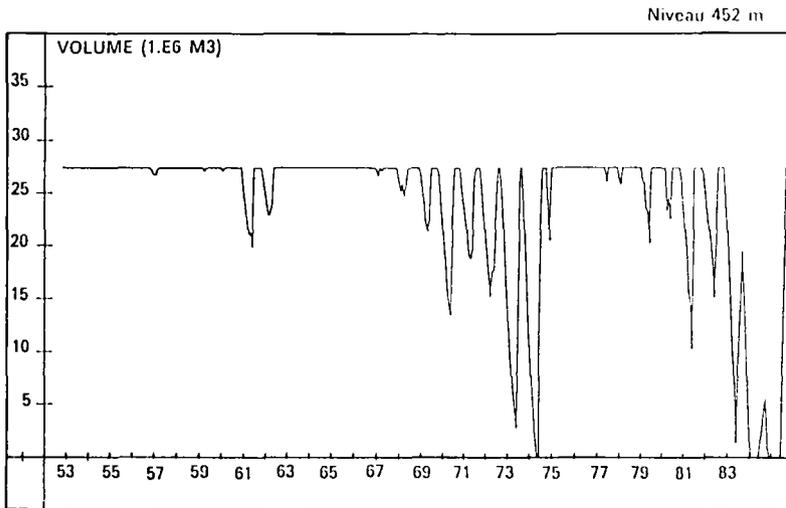


Figure 7a. Simulation. Niveau initial de la retenue : 452 m.

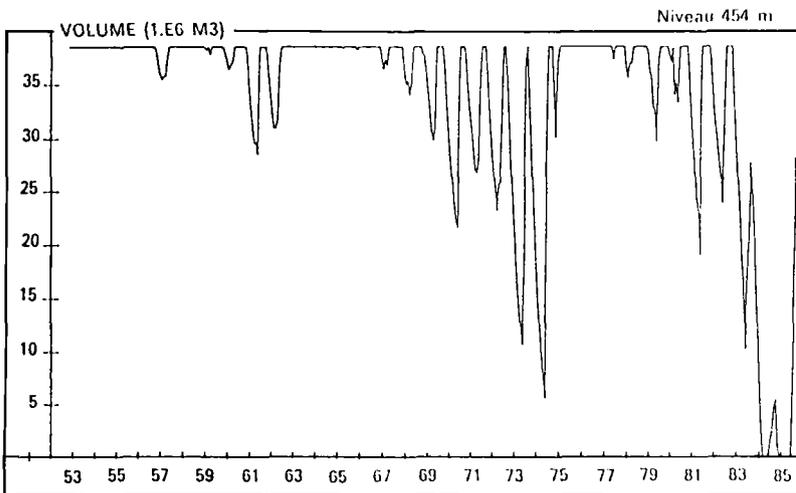


Figure 7b. Simulation. Niveau initial de la retenue : 454 m.

Bilan hydrique de la rivière Comoé

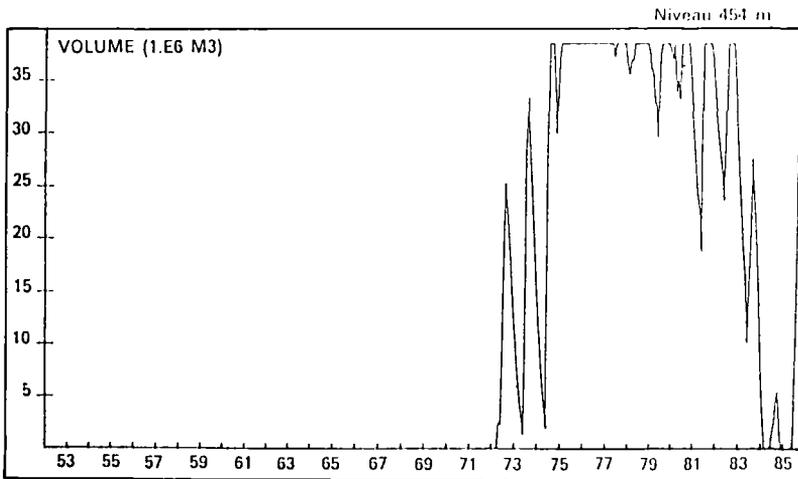


Figure 7c. Simulation. Niveau initial de la retenue : 0 m.

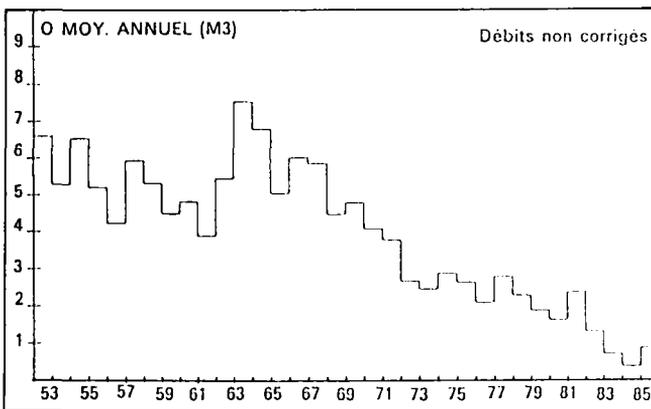


Figure 8. Débits moyens annuels au site du barrage (obtenus par corrélation avec le poste de Douna).

humides (ou par exemple au cours d'une succession de crues), il serait préférable de caler le niveau de la retenue à la cote 454 qui, comme on peut le voir à la figure 7b, permettra de maintenir un volume minimal (en fin d'une année décennale sèche) de l'ordre de 5,5 millions de m³ pouvant assurer l'irrigation future de quelques 300 à 400 ha supplémentaires.

De plus, le calage à la cote 454 peut se justifier par la création d'une tranche d'écrêtement des crues de l'ordre de 5,5 millions de m³ par rapport au niveau 453.

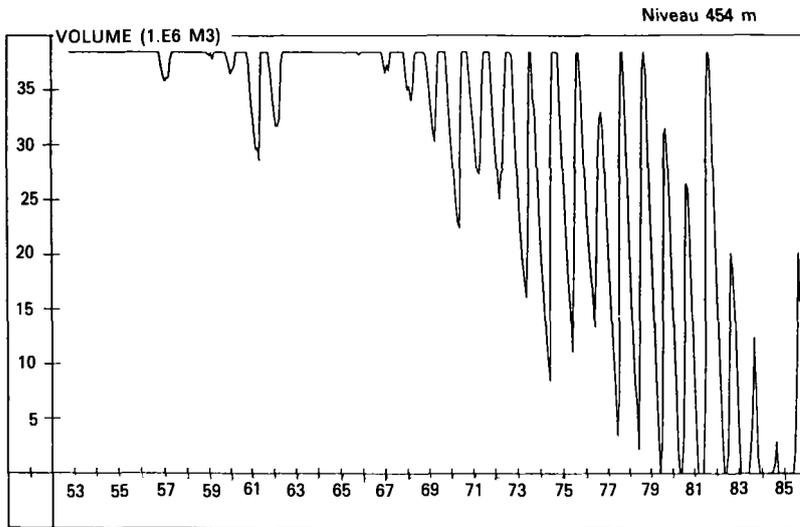


Figure 9a. Simulation. Niveau initial de la retenue : 454 m. (Débits estimés par corrélation avec le poste de Douna.)

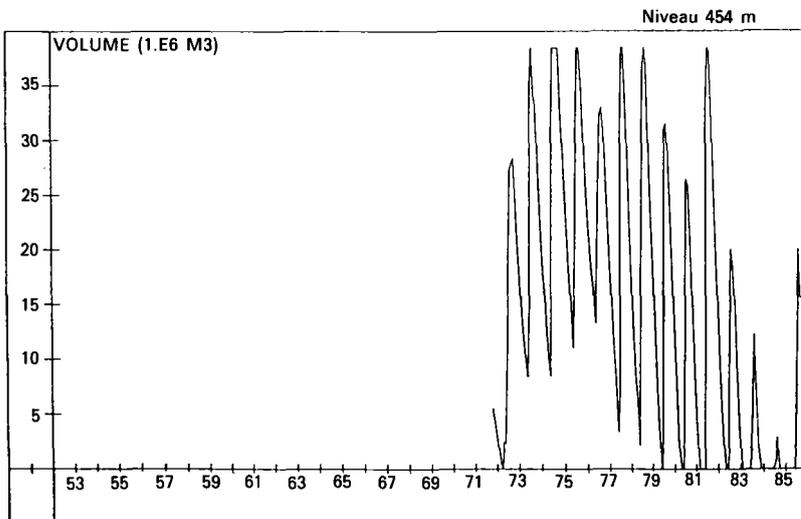


Figure 9b. Simulation. Niveau initial de la retenue : 0 m. (Débits estimés par corrélation avec le poste de Douna.)

Cette importante possibilité de laminage des crues assurera entre autres la protection des cultures dans toute la plaine de la Comoé située en aval des falaises.

Enfin, pour vérifier si le remplissage de la réserve s'effectue rapidement, nous avons simulé la série d'apports moyens mensuels au cours des années allant de 1971 à 1985, comprenant trois années sèches qui se succèdent à 10 ans d'intervalle (1972-73-74 et 1983-84-85). Les résultats de cette dernière simulation sont donnés à la figure 7c.

On voit que la réserve, supposée vide en octobre 1971, se remplit progressivement dès le mois de mai 1972.

Le volume minimal ne descend pas en dessous de $1,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ au cours des années relativement sèches (1974 et 1983) avec cependant une vidange en 1984 et 1985 où les apports ont été exceptionnellement faibles.

En conclusion, le calage du barrage à la cote 454 apparaît être une solution intéressante qui doit être envisagée pour les raisons énoncées ci-dessus avec une garantie de satisfaction des besoins de 90 %, c'est-à-dire de neuf années sur dix.

Signalons cependant que si les apports en eau avaient été estimés par corrélations avec le poste de Douna (sans tenir compte des lâchers de la Lobi et des captages de la So.Su.Co), les résultats auraient été nettement différents (figure 8).

En effectuant les mêmes simulations avec cette nouvelle série de données, on trouve les résultats des figures 9a et 9b.

On voit que le remplissage de la réserve ne se fait plus aussi rapidement et que le barrage se vide plus fréquemment indépendamment du niveau maximum de la retenue.

La comparaison de ces deux exemples de simulations met bien en évidence l'importance qu'il faudra accorder à la qualité des apports dans tout projet d'aménagement situé en zone semi-aride.

13

Bilans hydriques sur sols latéritiques du plateau Mossi. Étude comparée d'un sol sous culture non labouré et labouré à billons cloisonnés

A. IBRAHIMA⁽¹⁾, A. SCHMITT⁽¹⁾, A. GUILLERMINET⁽¹⁾,
A. MERMOUD⁽²⁾

⁽¹⁾ *Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) 03 B.P. 7023
Ouagadougou 03 Burkina Faso*

⁽²⁾ *Institut du Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
Ecublens, 1015 Lausanne, Suisse*

En climat soudano-sahélien, la productivité des cultures pluviales est liée aux aléas climatiques. La régularité des précipitations, leur valorisation durant le cycle cultural, leur possibilité de stockage dans le sol déterminent les rendements céréaliers.

Le site expérimental de Gampéla, au Burkina Faso, a été retenu pour étudier les diverses composantes du bilan hydrique pour différentes techniques culturales. Cet article présente les résultats obtenus après une première campagne de mesures.

Expérimentation

La parcelle expérimentale de Gampéla est située à une quinzaine de kilomètres au Nord-Est de Ouagadougou. Le climat est de type soudano-sahélien avec une saison des pluies, de juin à octobre, et une saison sèche, de novembre à mai. La pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 800 mm et la température moyenne

de 30 °C. Le sol, ferrugineux, est représentatif des sols agricoles du plateau Mossi. Une couche superficielle sablo-limoneuse de 15 à 20 cm d'épaisseur recouvre des horizons constitués de mélanges argilo-limoneux en proportions variables. La cuirasse latéritique apparaît à 1,1 m. Le secteur est à vocation agricole et pastorale.

Sur 4 000 m², le site est divisé en seize parcelles d'égales dimensions (7 × 16 m) (figure 1). Huit parcelles font l'objet d'un labour à plat suivi d'un billonnage et d'un cloisonnement. Les huit autres, non labourées, constituent des témoins. Toutes sont cultivées en sorgho (IRAT S29).

Des tubes d'accès de sonde à neutrons sont installés sur quatre parcelles labourées et quatre non labourées. Des batteries de tensiomètres placés à 20, 40, 60 et 100 cm de profondeur équipent 2 parcelles labourées et 2 non labourées.

Le labour a été réalisé le 9 juillet, après une pluie de 70 mm. Le semis a été effectué le 10 juillet, le billonnage sur parcelles labourées le 10 août, et le cloisonnement des billons le 10 septembre 1989.

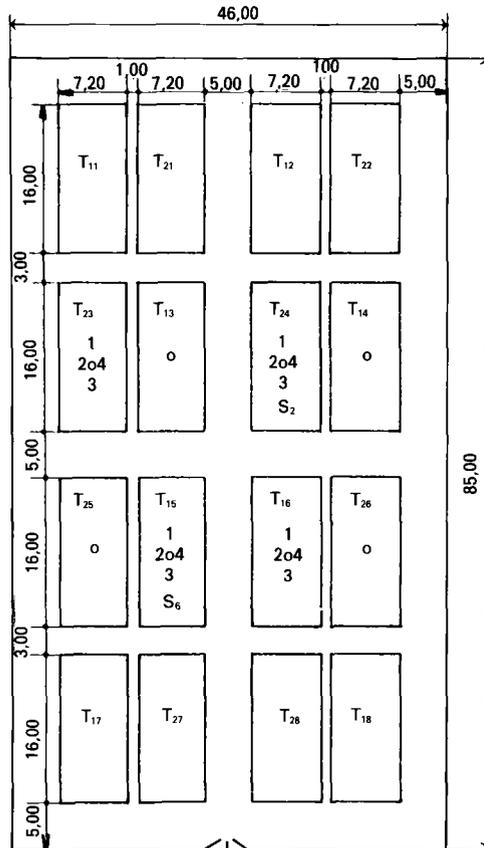


Figure 1. Plan de la parcelle expérimentale. T1 : Parcelle non labourée. T2 : Parcelle labourée à billons cloisonnés. o : Tubes sonde à neutrons. 1, 2, 3, 4 : Batterie de tensiomètres (20-40-60-100 cm). I : Entrée. Cotes en mètres.

Humidité et succions sont relevées quotidiennement du 3 août au 22 octobre 1989. Deux profils racinaires sont analysés durant le cycle cultural.

Résultats et discussion

Les résultats montrent que deux sites sont représentatifs de l'ensemble des parcelles expérimentales :

- S2 : parcelles labourées;
- S6 : parcelles non labourées.

L'évolution de l'humidité du sol dans le temps peut s'apprécier en considérant les profils (figure 2) :

- du 3 août (début des mesures);
- du 25 août (humidité maximale de fin de période humide);
- du 16 septembre (période de transition entre saison humide et saison sèche);
- du 18 octobre (fin du cycle cultural, profil sec);
- du 25 octobre (après la récolte, profil sec).

Durant le mois d'août, l'humidité reste sensiblement constante, proche de la capacité de rétention. Les teneurs en eau sont supérieures de 1 à 2 % dans le sol labouré. L'assèchement du profil est plus précoce et plus prononcé en sol non labouré. Le point de flétrissement est pratiquement atteint sur S6 dès le 16 septembre. A la mi-octobre, les deux profils n'évoluent plus et les humidités sont voisines du point de flétrissement.

Profils racinaires

Les profils racinaires (figure 3) montrent qu'en sol labouré, le bulbe radiculaire est plus dense dans l'horizon 0-30 cm. Pour les deux traitements, la profondeur d'enracinement maximale reste inférieure à 60 cm. La colonisation racinaire est moins développée en profondeur sur sol labouré.

Pluviométrie et stock d'eau

Dès le 6 août, il apparaît (figure 4) que la réserve en eau du sol est entièrement reconstituée, suite aux fortes pluies de juillet (225 mm). Les valeurs maximales de stock mesurées sur S2 et S6 et celles des teneurs en eau moyennes correspondantes sont données dans le Tableau I, ci-dessous.

Tableau I.

Site	Profondeur considérée (cm)	Stock (mm)	Teneur en eau moyenne (%)
S2	0-60	133	22
S6	0-60	125	21

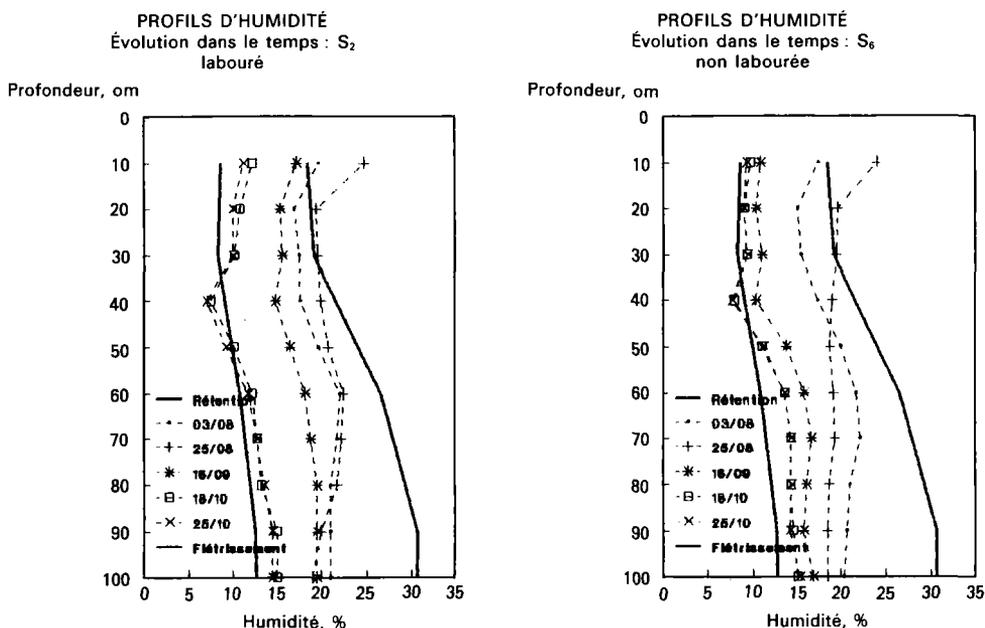


Figure 2. Profils d'humidité sur les parcelles labourées (S₂) et non labourées (S₆).

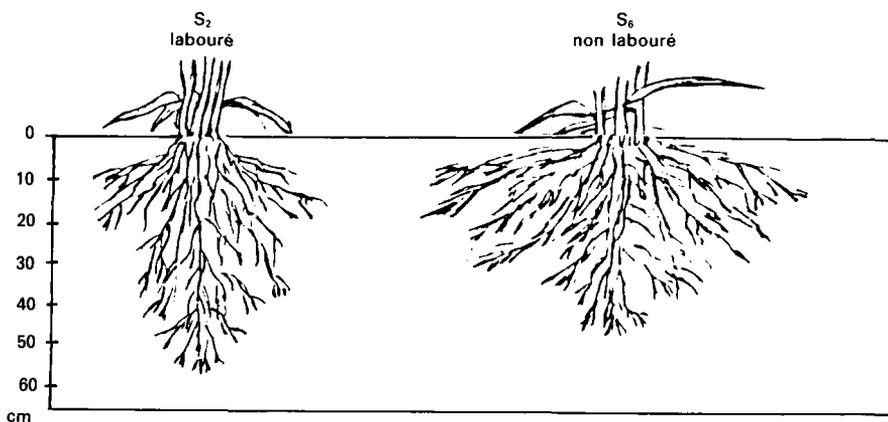


Figure 3. Profils racinaires sous sol labouré (S₂) et sous sol non labouré (S₆).

Puis le stock d'eau reste élevé jusqu'au 27 août qui correspond à la fin de la période très pluvieuse. L'apport par les précipitations est alors régulier. L'effet des précipitations n'apparaît que lorsqu'un ressuyage suffisant a pu avoir lieu.

L'absence d'influence des précipitations peut avoir deux significations :

- une percolation rapide des précipitations sous la zone racinaire, n'en permettant pas l'observation;

Bilans hydriques du plateau Mossi

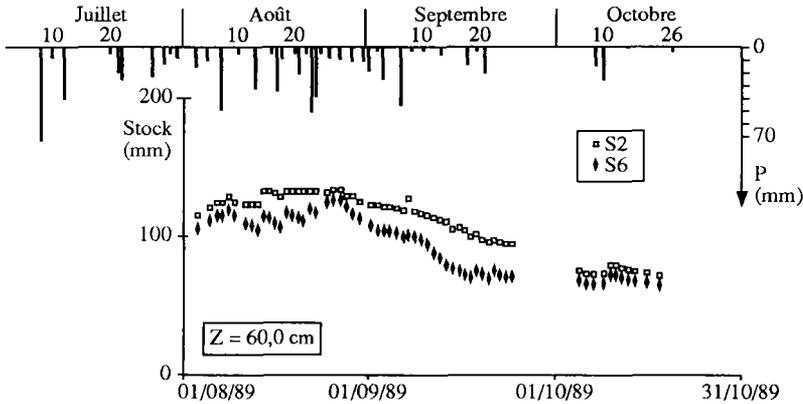


Figure 4. Pluviométrie et évolution des stocks d'eau dans le sol.

— un ruissellement accru sur un sol trop humide.

Compte tenu des mesures effectuées, il est difficile aujourd'hui de trancher. Seuls, la mesure ou le calcul de ces deux paramètres dans la suite de ce travail devrait permettre d'expliquer l'absence d'effet des précipitations sur les réserves hydriques.

La diminution des réserves en eau débute fin août pour les deux traitements. Elle est plus rapide sur le traitement non labouré. Les précipitations ralentissent l'assèchement du sol sans permettre la reconstitution de la réserve en eau. L'effet des pluies est moins important sur sol non labouré, ce qui laisse envisager une moins bonne infiltration.

Dès le 18 septembre en sol non labouré, début octobre sur sol billonné cloisonné, le stock d'eau sur les 60 premiers centimètres atteint une valeur minimale et n'évolue plus dans le temps. L'humidité du sol atteint donc le point de flétrissement 2 semaines après la fin de la période à pluviométrie régulière sur sol non labouré, contre 4 semaines pour l'autre traitement.

Bilan hydrique en fin de saison culturale

Cette première approche du suivi hydrique de Gampéla permet d'estimer sommairement les termes du bilan hydrique en fin de saison culturale.

L'équation simplifiée du bilan hydrique sur un sol s'écrit :

$$\Delta S = P - R - ETR - D$$

où ΔS représente la variation du stock d'eau sur la tranche de sol considéré;

P : les précipitations;

R : le ruissellement;

ETR : l'évapotranspiration réelle;

D : le flux drainant sous le profil racinaire.

La variation du stock d'eau se déduit des profils hydriques mesurés aux dates de référence. Les précipitations sont connues, en revanche, évapotranspiration, ruissellement et drainage profond n'ont pu être déterminés avec précision.

Cependant, il est possible d'estimer ces valeurs sur la fin de la période culturale.

En effet, dès début septembre (sol non labouré) ou à partir de la deuxième quinzaine de septembre (sol labouré), les gradients hydrauliques sous la zone racinaire deviennent négligeables. Les précipitations sont de faibles intensités et le ruissellement est voisin de 0. Le bilan s'écrit alors :

$$\Delta S = P - ETR$$

Il est alors possible de calculer ETR durant les mois de septembre et août (Tableau II).

Avant arrêt du drainage profond, l'évapotranspiration du sorgho est proche de l'Evapotranspiration Réelle Maximale (ETM) calculée par la relation :

$$ETM = kc \cdot EP_{Penman}$$

EP_{Penman} est l'Evaporation de Penman
 kc le coefficient cultural du sorgho

Tableau II. Valeurs de l'évapotranspiration réelle.

	Période	P (mm)	ΔS^* (mm)	ETR (mm)	ETR (mm/j)	ETM (mm/j)
S6	10-09 - 20-09	15,0	29,5	44,5	4,4	4,4
	21-09 - 07-10	17,9	5,2	23,1	1,4	4,1
	08-10 - 21-10	31,5	1,3	32,8	2,3	2,5
S2	21-09 - 07-10	17,9	28,2	46,1	2,7	4,1
	08-10 - 21-10	31,5	0,3	31,8	2,3	2,5

Sur ces périodes, l'évapotranspiration réelle est inférieure à l'ETM. Le déficit d'évapotranspiration est plus important sur parcelle non labourée.

Rendements de Sorgho

Les rendements ont été mesurés sur chaque parcelle (Tableau III).

Tableau III. Valeurs des rendements mesurés sur l'ensemble des parcelles.

Parcelles non labourées	Rdt mesuré (qx/ha)	Parcelles labourées	Rdt mesuré (qx/ha)
T14 (S1)	18,2	T24 (S2)	21,7
T13 (S3)	18,3	T23 (S4)	17,3
T15 (S6)	14,0	T25 (S5)	30,0
T16 (S7)	14,3	T26 (S8)	22,3
T11	19,2	T21	25,2
T12	15,9	T22	22,4
T17	19,1	T27	15,5
T18	11,9	T28	15,2
Moyenne	16,4		21,2
Ecart-type	2,6		4,7

Les rendements de sorgho sont supérieurs de 20 % sur parcelles labourées. Une relation a été recherchée entre rendements observés et rapport ETR/ETM durant la période allant du 21 septembre à la récolte sur les 8 parcelles équipées de sondes à neutrons. Les valeurs observées s'alignent selon deux droites d'équation différente pour chaque traitement (figure 5). Bien que le nombre de mesures soit insuffisant pour faire apparaître une différence significative, cette différence semble indiquer que des facteurs autres que l'alimentation hydrique puissent favoriser la production sur sol billonné.

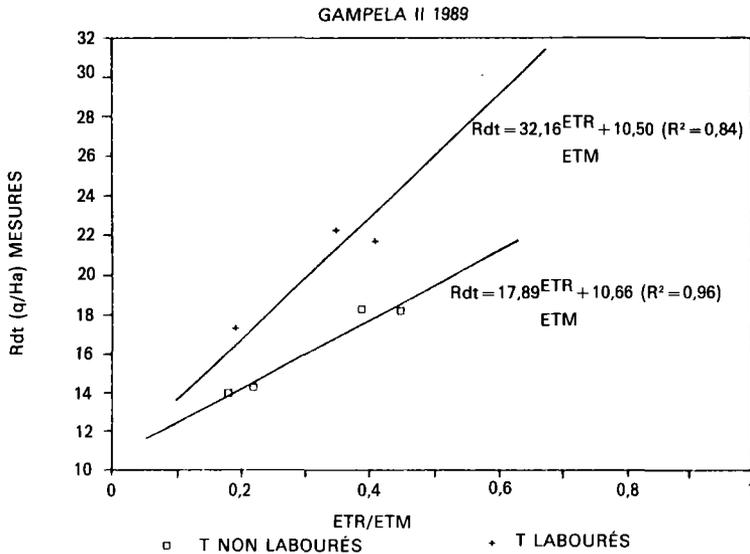


Figure 5. Droites de régression Rdt-ETR/ETM pour les quatre traitements labourés et les quatre non labourés sur la période 21 septembre/récolte.

Conclusions

Cette première campagne de mesures a permis de mettre en évidence l'intérêt de la technique du labour à plat, suivi d'un billonnage et d'un cloisonnement par rapport aux méthodes traditionnelles du semis direct.

Une meilleure infiltration et une augmentation du pouvoir de rétention permet au sol labouré de rester plus longtemps humide en fin de saison des pluies. Un gain d'une quinzaine de jours a été obtenu durant cette campagne. La fin de saison se caractérise quelque soit le traitement par une évapotranspiration réelle inférieure à l'évapotranspiration maximale. Le déficit d'évaporation est cependant moins prononcé en sol labouré.

Il en résulte un rendement significativement supérieur sur parcelle labourée. Une interprétation des courbes de rendement en fonction du rapport ETR/ETM semble indiquer un effet supplémentaire du labour et du billonnage cloisonné.

Cette étude n'a pas permis d'approcher de façon satisfaisante les bilans hydriques durant la période la plus pluvieuse : l'absence de mesures sur le ruissellement, l'impossibilité de calculer le flux drainant en l'absence de mesures de conductivité hydraulique ne nous permet pas d'expliquer l'absence de variations de stock d'eau durant les événements pluvieux. La prise en compte d'une fraction seulement de la saison pluvieuse n'a pas permis d'appréhender la phase d'imbibition du sol et la progression du front d'humectation.

La suite de ce travail prend en compte ces insuffisances. Elle devrait aboutir à une modélisation plus fine des transferts hydriques et des prélèvements racinaires dans le sol.