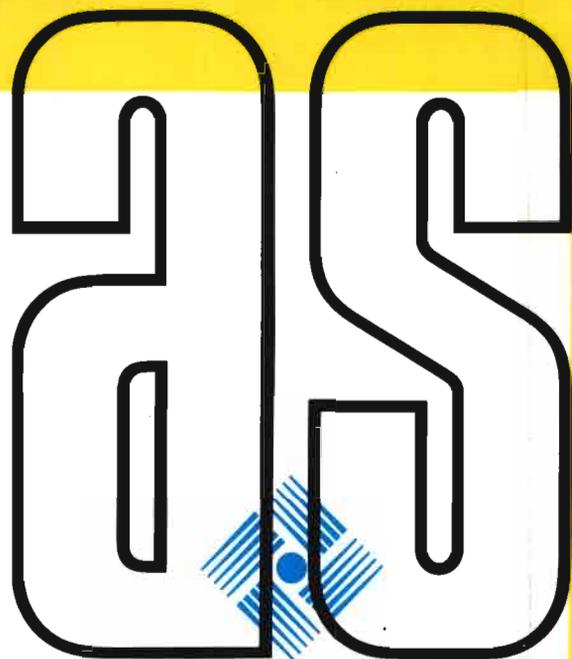


André Kergreis
Jacques Claude

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

AUPELF



actualité scientifique

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

British Library Cataloguing in Publication Data

Kergreis, André

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

1. Hydrology

I. Title

551.49

ISBN 0-86196-315-6

Editions John Libbey Eurotext

6, rue Blanche, 92120 Montrouge,
France

Tél : (1) 47 35 85 52

John Libbey and Company Ltd

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

Tél : (81) 947 27 77

John Libbey CIC

Via Spallanzani 11,
00161, Rome, Italy

Tél : (06) 862.289

© 1991, Paris

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

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

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

COORDINATION

André Kergreis

Jacques Claude



Les collections « *Universités francophones* » de l'UREF :

Un instrument nouveau pour consolider l'espace scientifique francophone

L'Université des Réseaux d'Expression Française (l'UREF), a créé un ensemble de collections « Universités francophones » qui sont les instruments nécessaires d'une vie scientifique de qualité dans l'espace scientifique francophone.

Fruit de la collaboration de chercheurs du Nord et du Sud, dans le cadre; notamment, des journées scientifiques et des colloques organisés par les réseaux de recherche partagée de l'UREF, ces « Actualités scientifiques » veulent, en consolidant la coopération scientifique entre tous les partenaires de la francophonie, contribuer à la promotion de la recherche en langue française.

Cette nouvelle collection est complétée par une collection de manuels universitaires et par une collection d'ouvrages scientifiques (« Sciences en marche »).

Professeur Michel Guillou
Délégué Général de l'UREF
Recteur de l'UREF

Sommaire

Liste des auteurs	IX
Avant-propos. <i>A. Kergreis, J. Claude</i>	XIII

Partie I. Bilan hydrologique : données générales et modèles

1. Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel : approche déterministe ou stochastique ? <i>M. Vauclin (Grenoble), G. Vachaud (Grenoble)</i>	3
2. Modèle hydrogéologique en zone aride ou semi-aride. <i>A. Dassargues (Liège), A. Monjoie (Liège)</i>	17
3. Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemples d'application. <i>G. Morin (Québec)</i>	23

Partie II. Ruissellement-Pluviométrie. Bilan hydrique

4. Caractérisation fractale de la succession des jours pluvieux au Burkina Faso. <i>F. Friggit (Ouagadougou), P. Hubert (Fontainebleau), J.-P. Carbonnel (Paris)</i>	43
5. Le programme Hapex-Sahel. <i>M. Hoepffner (Montpellier), J.-P. Goutorbe (Toulouse), P. Sellers (Etats-Unis), A. Tinga (Niamey)</i>	51
6. La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation. <i>O. Planchon (Montpellier)</i>	59
7. Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface. <i>A. Casenave (Lomé)</i>	77
8. L'aménagement des conditions du ruissellement sur les pentes cultivées soudano-sahéliennes. Résultats d'une approche triple : enquêtes, expérimentation, modélisation. <i>F. Guillet (Montpellier), J.M. Lamachère (Ouagadougou), J.-L. Sabatier (Montpellier), G. Serpantie (Ouagadougou)</i>	87
9. Recharge artificielle de la nappe des calcaires de Sebikotane par le stockage des eaux de ruissellement. <i>A. Niang (Dakar), P. Curetti (Dakar)</i>	109
10. Recherche de l'aquifère superficiel de la vallée de Baïla (Basse Casamance, Sénégal). <i>R. Malou (Dakar), J. Mudry (Dakar), J.-L. Saos (Dakar)</i>	119

Sommaire

11. Transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Recharge des nappes en climat soudano-sahélien. *B. Dieng (Ouagadougou), P. Bazie (Ouagadougou), A. Schmitt (Ouagadougou)* 131
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 (Liège)* 139
13. Bilans hydriques, sur sols latéritiques du plateau Mossi. Etude comparée d'un sol sous culture non labouré et labouré à billons cloisonnés. *A. Ibrahima (Ouagadougou), A. Schmitt (Ouagadougou), A. Guillerminet (Ouagadougou), A. Mermoud (Lausanne)*..... 155

Partie III. Erosion et conservation des sols

14. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi. *J.-M. Lamachère (Ouagadougou), G. Serpantie (Ouagadougou)* 165
15. Quantification de l'érosion à l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride. *A. Demmak (Alger), M. Ouaar (Alger), A. Guedjtal (Alger)* 179

Partie IV. Gestion de l'eau pour l'agriculture et autres utilisations

16. Les eaux de surface : leur place dans l'alimentation en eau des centres urbains. *F. Lo (Paris), G. Escourrou (Paris)* 191
17. Utilisation combinée de l'eau pour la consommation et l'énergie dans les cas de débits non pérennés. *Y. Zech (Louvain), B. Huberlant (Louvain)* 207
18. Aspects climatologiques liés aux possibilités d'alimentation en eau potable par collecte des eaux pluviales dans le Nord-Cameroun. *M.A. Morel (Dakar), J.-P. Laborde (Sophia Antipolis)* 223
19. Comparaison d'algorithmes de prévision des crues sur le fleuve Sénégal. *C. Thirriot (Toulouse), S. Sambou (Dakar), J.-P. Lamagat (Dakar)* 237
20. Avantages et techniques du barrage de régulation. *P.-J. Martin (Ouagadougou)* 255
21. Influence du seuil d'épandage sur la végétation naturelle et les perspectives d'utilisation pour la production végétale (vallée de Tamazalak, Aïr, Niger). *H. Bender (Zurich), J. Bozza (Agadez), I. Ousseini (Niamey)* 267
22. Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). *J. Albergel (Dakar), D. Brunet (Dakar), G. Dubée (Dakar), J.-P. Montoroi (Dakar), P. Zante (Dakar)* 275
23. Dégradation des vertisols dans le Nord-Cameroun : modification du régime hydrique des terres et tentatives de réhabilitation. *L. Seiny Boukar (Maroua), Ch. Floret (Montpellier), H. Moukouri Kuoh (Yaoundé), R. Pontanier (Tunis)* 287

Sommaire

24. Introduction d'un système d'irrigation adapté aux conditions sahéliennes. <i>W. Klemm (Karlsruhe)</i>	295
25. Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale de dispositifs agronomiques. <i>M. Vauclin (Grenoble), J.-L. Chopart (Bouaké)</i>	307
26. Le défi de la formation de techniciens de terrain. <i>N.G. Camphuis (Ouagadougou)</i>	317
27. Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne. <i>C. Puech (Montpellier)</i>	323

Liste des auteurs

- Albergel J.** Département des eaux continentales de l'ORSTOM, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal.
- Bazie P.** Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de l'équipement rural, BP 03, 7023 Ouagadougou, 03 Burkina Faso.
- Bender H.** EPFZ, IGB-ETH-Honggerberg, 8093 Zurich, Suisse.
- Bozza J.** IRAT-EPFZ, BP 195, Agadez, Niger.
- Brunet D.** Département des eaux continentales, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal.
- Camphuis N.G.** Ecole Inter-Etats des techniciens supérieurs de l'hydraulique et de l'équipement rural (ETSHER), BP 01, 594, Ouagadougou, 01 Burkina Faso.
- Carbonnel J.-P.** CNRS, URA 1367, Laboratoire de géologie appliquée, Université P. et M.-Curie, 4, place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05, France.
- Casenave A.** ORSTOM, BP 375, Lomé, Togo.
- Chopart J.-L.** IDESSA/Département des cultures vivrières, BP 635, Bouaké, Côte-d'Ivoire.
- Curetti P.** Direction des études hydrauliques, BP 4021, Dakar, Sénégal.
- Dassargues A.** Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, bâtiment B 19, 4000 Liège, Belgique.
- Demmak A.** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Clairbois, avenue Mohammedi Bir Mourad Rais, Alger, Algérie.
- Dieng B.** Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de l'équipement rural, BP 03, 7023 Ouagadougou, 03 Burkina Faso.
- Dubée G.** Département des eaux continentales, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal.
- Escourrou G.** Université de Paris-Sorbonne, Paris, France.
- Eskenazi E.** Université de Liège, quai Banning, 6, 4000 Liège, Belgique.
- Floret Ch.** CEPE/CNRS, BP 5051, 34033, Montpellier, France.
- Friggit F.** Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de l'équipement rural (EIER), 03 BP 7023, Ouagadougou 03, Burkina Faso.
- Goutorbe J.-P.** CNRM, 42, avenue G.-Coriolès, 31057, Toulouse, France.
- Guillet F.** Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières, BP 5035, 34032 Montpellier, France.
- Guedjtal A.** Agence Nationale des Ressources hydrauliques, Clairbois, avenue Mohammedi-Bir-Bourad-Rais, Alger, Algérie.

Liste des auteurs

- Guillerminet A.** Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de l'équipement rural (EIER), BP 03, 7023 Ouagadougou, 03 Burkina Faso.
- Hoepffner M.** ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France.
- Huberlant B.** Université catholique de Louvain, unité de génie civil, place du Levant, 1, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Hubert P.** CIG, Ecole des Mines de Paris, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France.
- Ibrahima A.** Ecole Inter-Etats d'ingénieur de l'équipement rural (EIER), BP 03, 7023 Ouagadougou, 03 Burkina Faso.
- Klemm W.** Institut des constructions hydrauliques et du génie rural (IWK), Université de Karlsruhe, Allemagne.
- Lamachère J.-M.** Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM) BP 01, 182, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Laborde J.-P.** Université de Nice, Faculté de géographie, Sophia Antipolis, France.
- Lamagat J.-P.** ORSTOM, Dakar, Sénégal.
- Lo F.** Université de Paris-Sorbonne, Paris, France.
- Malou R.** Département de géologique, Université Cheikh Anta Diop, Dakar-Fann, Sénégal.
- Morel M.A.** Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.
- Morin G.** INRS-Eau, Université du Québec, CP 7500, Ste-Foy, Québec, G1V 4C7, Canada.
- Montoroi J.-P.** Département des eaux continentales, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal.
- Moukouri Kuoh H.** IRA/CNS, Yaoundé, Cameroun.
- Martin P.J.** EIER, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Mermoud A.** Institut du Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Ecublens, 1015 Lausanne, Suisse.
- Mudry J.** Département de géologique, Université Cheikh Anta Diop, Dakar-Fann, Sénégal.
- Monjoie A.** Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, bâtiment B 19, 4000 Liège, Belgique.
- Niang A.** Direction des études hydrauliques, BP 4021, Dakar, Sénégal.
- Ouaar M.** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Clairbois, avenue Mohammedi-Bir-Mourad-Rais, Alger, Algérie.
- Ousseini I.** Université de Niamey, BP 418, Niamey, Niger.
- Planchon O.** ORSTOM, BP 5045, 34032, Montpellier, France.
- Pontanier R.** ORSTOM, Tunis, Tunisie.
- Puech C.** Laboratoire commun de télédétection, CEMAGREF/ENGREF, BP 5095, 34033 Montpellier Cedex 01, France.
- Sabatier J.-L.** Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières, BP 5035, 34032 Montpellier, France.

Liste des auteurs

- Sambou S.** Faculté des Sciences, Dakar, Sénégal.
- Sellers P.** NASA/GSFC, Greenbelt, MD, Etats-Unis.
- Saos J.-L.** ORSTOM, BP 1386, Dakar-Fann, Sénégal.
- Schmitt A.** Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de l'équipement rural, BP 03, 7023 Ouagadougou, 03 Burkina Faso.
- Serpantie G.** Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM), BP 01, 182 Ouagadougou, Burkina Faso.
- Seiny Boukar L.** IRA/CNS, Maroua, Cameroun.
- Thirriot C.** ENSHEIET, Toulouse, France.
- Tinga A.** Université de Niamey, BP 10662, Niamey, Niger.
- Vauclin M.** Institut de mécanique, Groupe hydrologique (UMR 101), BP 53X, Grenoble Cedex, France.
- Vachaud G.** Institut de mécanique, Groupe hydrologie (UMR 101), BP 53X, Grenoble Cedex, France.
- Zech Y.** Université catholique de Louvain, unité de génie civil, place du Levant, 1, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Zante P.** Département des eaux continentales, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal.

Avant-propos

Les Journées Scientifiques du Réseau Génie Para-Sécheresse de l'Université des Réseaux d'Expression Française (UREF) organisées à l'Ecole Inter-Etats des Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) de Ouagadougou avec le soutien du Réseau de Recherches sur la Résistance à la Sécheresse (R 3S) se sont déroulées du 12 au 15 mars 1990.

L'objectif du Réseau Génie Para-Sécheresse est, dans le domaine des « Sciences de l'Ingénieur » et dans un esprit pluridisciplinaire, de mobiliser enseignants, chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'aire francophone pour venir en soutien aux pays en développement confrontés à l'aridité, la sécheresse, la désertification.

Trois axes principaux d'intervention ont été retenus :

- l'eau;
- l'énergie;
- l'habitat économique et les matériaux locaux.

Si le choix du thème « eau » va de soi, celui des deux autres thèmes nécessite quelques explications. A la notion de « lutte contre » et donc d'antagonisme, les approches actuelles tendent sinon de substituer du moins d'adjoindre celle de « vivre avec » et donc d'adaptation. Et dans cette optique l'une des nécessités premières est le maintien sur place des populations. Combattre l'exode rural passe nécessairement par l'amélioration des conditions de vie quotidienne des populations dans leur environnement, et le Génie Para-Sécheresse par les volets « énergie » (en particulier énergies renouvelables) et habitat économique et matériaux locaux s'attache plus précisément à :

- réduire la « pénibilité » du travail humain;
- améliorer le « confort » domestique;
- accroître la production et la productivité agricoles.

Le thème « Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride » retenue pour cette rencontre de Ouagadougou pourrait paraître d'une portée limitée si l'on considère que la ressource en eau maîtrisable et utilisable sur des petits bassins versants ne représente qu'une toute petite fraction du bilan hydrique régional des zones arides sahéliennes et que les écoulements intermittents de ces petits bassins sont très faibles par rapport aux débits véhiculés par les grands fleuves alimentés à partir des massifs soudano-sahéliens.

L'utilisation de cette ressource est cependant fondamentale pour une stratégie de lutte contre la sécheresse, d'abord parce qu'étant rare elle doit être gérée au plus juste, chaque millimètre de pluie ayant son utilité pour la production agricole,

ensuite parce qu'elle est spatialement répartie sur toutes les surfaces agricoles, utilisable sur place sans transferts importants et grâce à de petits aménagements « à portée » du monde rural.

Cette utilisation rationnelle de l'eau est multiforme et demande la compétence de nombreux spécialistes à tous les niveaux d'intervention; il ne s'agit pas simplement d'ingénierie et d'application de modèles ou d'ouvrages types. L'approche pluridisciplinaire et la confrontation des expériences des enseignants, chercheurs, étudiants, professionnels du développement et techniciens de terrain étaient les objectifs principaux de ces Journées Scientifiques de Ouagadougou. La densité des discussions et l'aspect pratique des propositions d'actions qui ont remplacé les traditionnelles recommandations prouvent que ces objectifs ont été atteints.

Une autre ambition de ces Journées était de couvrir toute la filière du cycle de l'eau qui conditionne son utilisation. S'il est en effet impossible à un même spécialiste d'être à la pointe des avancées scientifiques dans tous les domaines, il est indispensable que chacun puisse situer son action et juger de son efficacité dans cette chaîne, qui va de la recherche de base à la mise en œuvre quotidienne sur le terrain de technologies diffusables. La diversité des communications présentées et discutées aura permis d'une part une bonne diffusion des résultats des recherches les plus avancées sur les phénomènes et mécanismes du cycle hydrologique et leur modélisation, d'autre part un questionnement des plus féconds sur les retombées de ces résultats et leur applicabilité dans la conception et la gestion des ouvrages de petite hydraulique et les pratiques agricoles en milieux arides.

Les communications qui sont présentées ici se répartissent en deux catégories :

— les études fondamentales sur les données et leur interprétation (avec une finalité encore lointaine de prédictibilité des phénomènes climatologiques) et sur les mécanismes du bilan hydrologique et des transferts aux interfaces sol-plante-atmosphère conduisant à leur modélisation;

— les études de cas sur des sites aménagés dont les performances et les effets induits ont été suivis et mesurés et qui démontrent tous à des degrés divers que la connaissance de ces mécanismes et l'utilisation des outils conceptuels les plus performants sont indispensables à une bonne mise en pratique des techniques d'utilisation de l'eau en agriculture.

Les échanges entre praticiens de terrain, enseignants et chercheurs du Nord et du Sud, se traduisant par des va-et-vient et des comparaisons entre le laboratoire ou le micro-ordinateur et les réalités du terrain ont donc été une caractéristique de cette rencontre

L'originalité et l'avantage de ces Journées Scientifiques auront bien été de rassembler un large éventail de spécialistes de la filière gestion de l'eau qui ont somme toute très rarement l'occasion de se rencontrer; ils auront pu ainsi mesurer l'écart entre leurs différentes préoccupations et le cloisonnement persistant entre les différents secteurs de la filière (enseignement, recherche, actions de développement, diffusion, vulgarisation) mais ils auront pu discuter des possibilités de réduire ces écarts et cloisonnements par relations multilatérales suivies.

Ainsi ont été évoqués, entre autres, la nécessité de recherches de suivis et d'accompagnement au sein des projets de développement, la possibilité d'intégrer des stages de DEA ou d'ingénieur dans ces projets, l'importance de la formation

Avant-propos

continue à tous les niveaux et le nécessaire recyclage des ingénieurs et techniciens supérieurs après 5 à 10 ans d'expérience professionnelle, la circulation des informations et la diffusion des résultats de la recherche sous une forme accessible aux utilisateurs qui ne se limite pas à des manuels pratiques vite dépassés mais incite à une réflexion sur l'adaptation des techniques à chaque cas d'espèces.

La nécessité d'une collaboration internationale mieux organisée, mieux structurée sachant se mobiliser sur des objectifs définis et reconnus comme prioritaires et la mise en commun des résultats des travaux sont ressorties comme une priorité. Ces Journées ayant été l'occasion d'une collaboration exemplaire entre les réseaux Génie Para-Sécheresse (GPS) de l'UREF et le Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse (R3S) montrent d'évidence qu'il ne s'agit pas là d'une utopie.

Pour une dizaine de communications à ces Journées, aucun document écrit autre que le résumé n'ayant été fourni par les auteurs, elles ne sont pas présentées dans cet ouvrage.

A. Kergreis

Professeur à l'Université Paris XII
Chargé du Réseau Génie Para-Sécheresse

J. Claude

Directeur de Recherche (ORSTOM)
Délégué aux affaires européennes (ORSTOM)
Animateur atelier Bassins Versants (R3S)

PARTIE I

Bilan hydrologique : données générales et modèles

1

Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel : approche déterministe ou stochastique ?

M. VAUCLIN, G. VACHAUD

*Institut de Mécanique de Grenoble / Groupe Hydrologie (UMR 101), BP 53 X,
Grenoble Cedex, France*

L'aptitude à décrire et prévoir quantitativement les transferts dans les couches superficielles du sol représente un objectif d'importance dans les domaines des sciences de l'environnement, de l'agronomie, du génie civil et sanitaire, de l'hydrogéologie, etc. C'est en effet dans cette zone, appelée classiquement zone non saturée, que se situent les réserves en eau utilisables par les plantes et qu'ont lieu l'essentiel des transferts conduisant à l'évaporation et l'évapotranspiration, à l'infiltration et à la recharge naturelle et/ou artificielle des aquifères à surface libre, à la fixation, la biodégradation et à la percolation des composés organiques et minéraux.

L'étude de ces transferts dans notre environnement naturel est rendue complexe par le fait qu'il s'agit de considérer un milieu polyphasique (eau-air-solide) pouvant se déformer et dans lequel les concentrations en fluides mouillant (l'eau) et non mouillant (l'air) varient dans le temps et l'espace sous l'action conjuguée de variations d'énergie mécanique et thermique, avec phénomènes d'échanges et de changement de phase, et ce, pour des conditions aux limites de type aléatoire (pluie, vent, rayonnement, etc.).

Les transferts dans un milieu poreux à degré de saturation variable sont décrits à l'échelle macroscopique par des équations aux dérivées partielles fortement non

linéaires. Il s'agit de modèles *conceptuels* puisque fondés sur la connaissance des processus physiques impliqués. Ces modèles permettent de prédire l'évolution spatio-temporelle du milieu poreux, en fonction des conditions initiales et aux limites, par l'intermédiaire de paramètres phénoménologiques.

Dans l'hypothèse d'un milieu continu uniforme et homogène, ces modèles conceptuels sont de type *déterministe* puisque la connaissance des paramètres en un point suffit à caractériser l'ensemble du domaine. De nombreuses études expérimentales, essentiellement effectuées en laboratoire, montrent que cette approche convient pour modéliser les transferts dans les milieux poreux non saturés. En revanche, son extension aux conditions naturelles in situ se heurte à de sérieuses limitations :

- Un sol n'est jamais uniforme et homogène, et ses propriétés physico-chimiques varient d'un point à un autre. Identifier et analyser cette variabilité nécessite alors l'utilisation de concepts statistiques.

Modéliser les transferts correspondants implique qu'à l'aspect déterministe des équations doit s'ajouter une description *stochastique* des paramètres caractéristiques et des conditions aux limites.

- L'aspect stochastique n'implique pas nécessairement que les paramètres et/ou les variables soient aléatoirement distribués dans l'espace. Ils (ou elles) peuvent présenter une structure spatiale horizontale et/ou verticale. Il est donc indispensable d'analyser et de prendre en compte l'éventuelle autocorrélation entre les paramètres, tant au plan de la reconnaissance du milieu que de sa modélisation.

- Dans l'environnement naturel, le caractère aléatoire des conditions aux limites (pluie, évaporation) renforce l'aspect stochastique des modèles conceptuels.

Dans le cadre de cette présentation, il est évidemment exclu de pouvoir traiter ces problèmes dans toute leur généralité.

On se propose ici de présenter, pour des cas de figure relativement simples, une extension possible à l'échelle géophysique, de la modélisation des transferts hydriques établie à l'échelle macroscopique et d'en apprécier la validité par comparaison avec des mesures expérimentales.

Modélisation des transferts hydriques en milieux hétérogènes

Approche conceptuelle

Les transferts isothermes d'eau pure dans un sol homogène et isotrope sont régis par la loi de Darcy généralisée aux milieux poreux non saturés. Jointe à l'équation de conservation de la masse et à la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques spécifiques à un sol considéré, elle conduit à l'équation classique de Richards :

$$C(h) \frac{\delta h}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \{K(h) \left(\frac{\delta h}{\delta z} - 1 \right)\} \quad (1)$$

Modélisation des écoulements d'eau

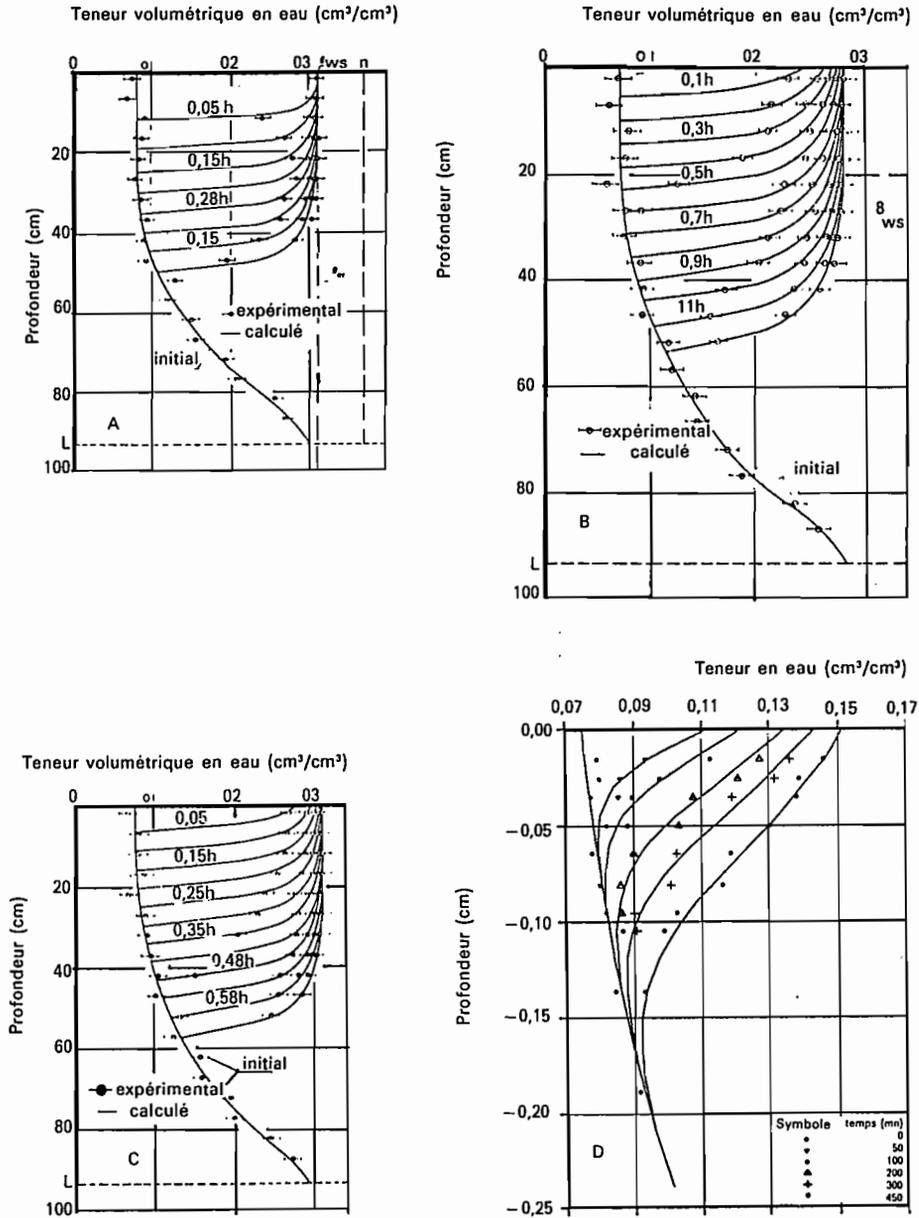


Figure 1. Exemples de comparaison observations/simulation dans les cas d'une infiltration submergente (A); d'infiltrations sous flux inférieur (B) et supérieur (C) à la perméabilité à saturation; et d'une infiltration à travers une croûte superficielle (D). Les 3 premières figures sont tirées de Touma et Vaucelin (1986), la quatrième est issue d'Aboujaoudé *et al.* (1990).

où h est la pression effective de l'eau qui est une fonction de la concentration volumique θ ; $C(h)$ est la capacité capillaire définie par $d\theta/dh$, $K(h)$ est la conductivité hydraulique, z est la coordonnée verticale orientée positivement vers le bas, t est le temps. Pour des conditions initiales et aux limites données, l'équation (1) qui est fortement non linéaire peut être résolue numériquement, ou dans certains cas particuliers quasi-analytiquement. De nombreux résultats expérimentaux obtenus sur modèles physiques de laboratoire montrent que cette approche mécaniste, conceptuelle, décrit très correctement les transferts dans les sols dont les caractéristiques hydrodynamiques sont homogènes et isotropes. A titre d'exemple, la figure 1 présente quelques résultats de simulation d'écoulements (résolution numérique de l'équation (1)) et leur comparaison avec des observations d'humidité effectuées sur colonne de sol par la spectrométrie gamma.

Variabilité des sols dans l'environnement naturel

Il est bien évident que le sol d'une parcelle, ou d'un bassin versant ne vérifie que très rarement l'hypothèse d'homogénéité sous-tendant ce type d'approche. De nombreuses études expérimentales ont montré que les propriétés hydrodynamiques et les écoulements résultants varient d'un point à un autre sur une verticale (présence de stratifications) et/ou d'une verticale à une autre. Alors que le premier cas de figure ne remet pas nécessairement en cause l'équation (1) (à titre d'exemple, la figure 2 tirée de Vauclin et Vachaud [6] présente la comparaison modèle/expérience dans le cas de l'infiltration et de la redistribution d'eau dans un profil stratifié), le second nécessite une description statistique des paramètres. A cet égard, la théorie de la similitude géométrique en milieux poreux offre un cadre physique agréable. Selon cette dernière (Miller et Miller [3]) les caractéristiques $h_i(\theta)$ et $K_i(\theta)$, en un site quelconque i , se déduisent des relations virtuelles $h^*(\theta)$ et $K^*(\theta)$ d'un milieu de référence par les expressions de similitude suivantes :

$$h_i(\theta) = a_i^{-1} h^*(\theta) \quad \text{et} \quad K_i(\theta) = a_i^2 K^*(\theta) \quad (2)$$

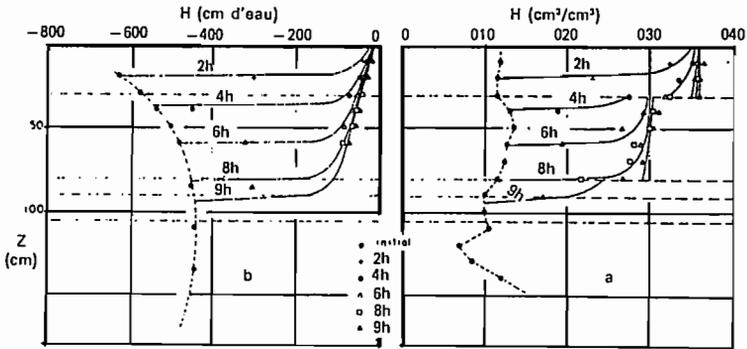
où a_i est le facteur d'échelle relatif au site i .

A titre d'exemple, les figures 3 et 4 donnent les résultats relatifs à des mesures effectuées en différents points et plusieurs profondeurs d'une parcelle de 0,95 ha située à Bambey, Sénégal (Vauclin *et al.*, 1983). Comme on peut le constater, les résultats présentent une grande variabilité. Ainsi pour $h = -100$ cm d'eau, le degré de saturation varie de 0,15 à 0,45 (CV = 95 %). Pour $S = 0,5$, K varie de $3 \cdot 10^{-2}$ mm h^{-1} à 10 mm h^{-1} d'un point à un autre de cette parcelle ! La procédure de mise en facteur d'échelle appliquée à ces résultats conduit à définir des relations moyennes d'échelle $h^*(\theta)$ et $K^*(\theta)$ représentées figures 3b et 4b et une série de facteurs a_i , dont la fonction de distribution est une loi log-normale : $m_A = -0,1229$; $\sigma_A = 0,5274$ avec $A = Lna$.

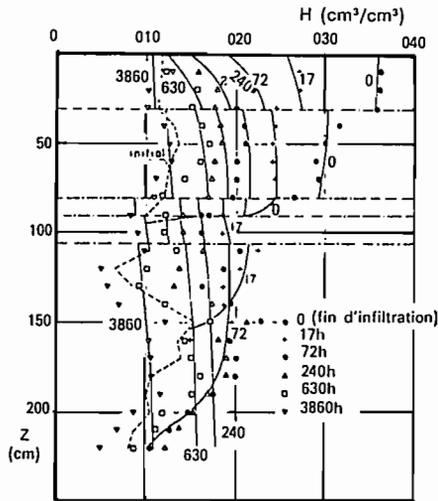
Modélisation stochastique

En assimilant le domaine d'étude à un ensemble de N colonnes verticales de sol, différant par leurs propriétés hydrodynamiques, (Eq. 2), la solution de l'équa-

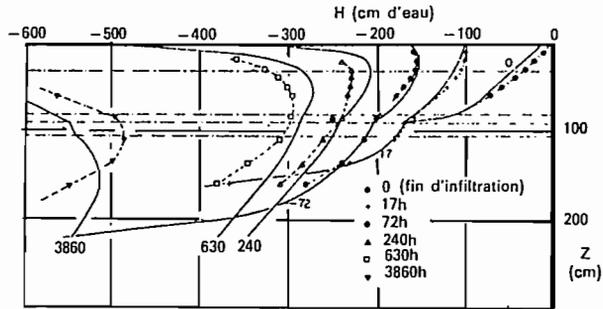
Modélisation des écoulements d'eau



Comparaison entre : (a) les profils hydriques; et (b) de charge hydraulique expérimentaux et numériques, au cours de l'infiltration.



Comparaison entre les profils hydriques expérimentaux (---) et numériques (—) pour la redistribution.



Comparaison entre les profils de charge hydraulique expérimentaux (---) et numériques (—) pour la redistribution.

Figure 2. Comparaison observations/simulation dans le cas d'une infiltration suivie de redistribution dans un profil de sol stratifié (tirée de Vaublin et Vachaud, 1981).

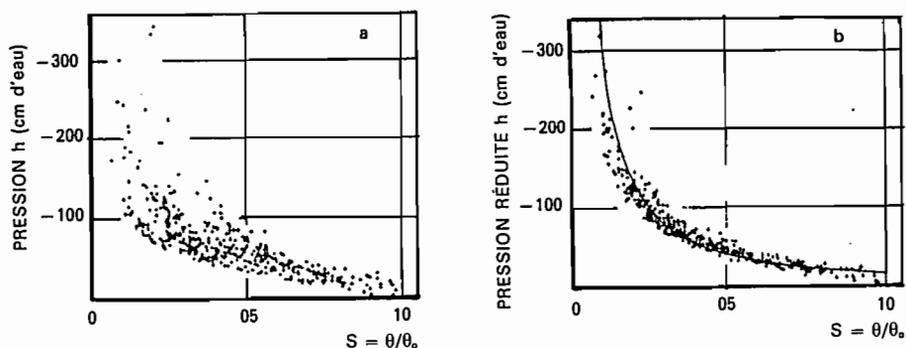


Figure 3. Relations pression-degré de saturation. a. valeurs brutes; b. valeurs réduites par la mise en facteur d'échelle.

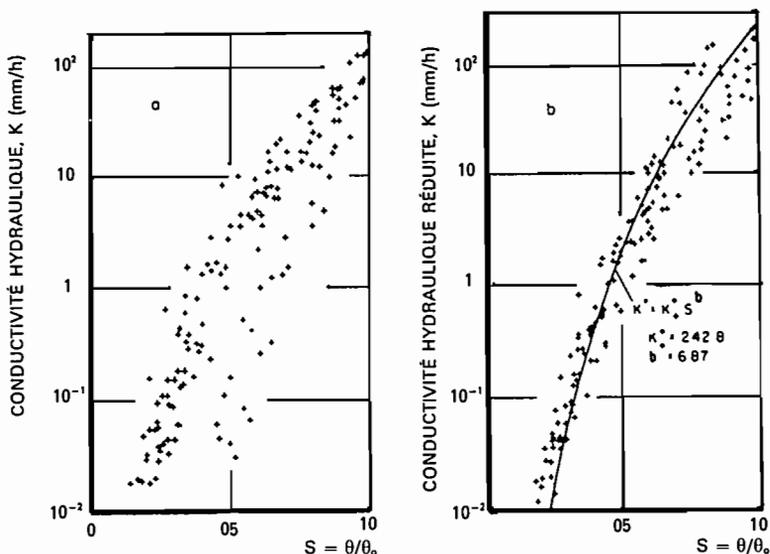


Figure 4. Relations conductivité hydraulique - degré de saturation. a. valeurs brutes; b. valeurs réduites par la mise en facteur d'échelle.

tion (1) pour des conditions initiales et aux limites spécifiées est non seulement une fonction des coordonnées d'espace et du temps, mais également du facteur d'échelle. Ainsi, pression et teneur en eau deviennent également des variables aléatoires de la forme générale suivante :

$$X = g(a, \text{paramètres}, t, z) \quad (3)$$

où les paramètres $h^*(\theta)$ et $K^*(\theta)$ sont uniques sur tout le domaine. Supposant connue (en fait identifiée) la loi de distribution des a , il s'agit donc d'inférer à partir

de la génération de N valeurs les propriétés statistiques de la solution X et notamment ses deux premiers moments : espérance mathématique, $E\{X\}$ qui sous l'hypothèse d'ergodicité est la moyenne spatiale, et variance, $\text{var}\{X\}$. On notera que dans le cas où la fonction g est analytique ces deux paramètres peuvent s'obtenir simplement par le développement de Taylor au 2^e ordre :

$$E\{X\} = g(m_a) \{1 + \varepsilon_x\} \quad \varepsilon_x = \frac{1}{g(m_a)} \cdot \frac{\delta g^2}{\delta a^2} \Big|_{m_a} \cdot \sigma a^2 / 2 \quad (4a),$$

avec

$$\text{var}\{X\} = \frac{\delta g}{\delta a} \Big|_{m_a}^2 \sigma a^2 \quad (4b)$$

où ε_x est l'écart relatif entre l'espérance mathématique de X et la moyenne déterministe $g(m_a)$ qui correspondrait à la solution du problème dans un milieu fictif homogène dont les paramètres hydrodynamiques seraient les moyennes d'échelle $h^*(\theta)$ et $K^*(\theta)$.

La démarche générale est illustrée ci-dessous pour quelques classes d'écoulement.

Quelques exemples de solutions stochastiques

Infiltration submergeante

La figure 5 donne l'évolution dans le temps de l'infiltration cumulée moyenne $E\{I\}$ calculée à partir de la résolution de l'équation (1) ainsi que les valeurs $I(t)$ correspondant aux premier et dernier quartiles de la fonction de distribution de a. Ainsi, à $t = 1$ h, sur 25 % de la surface du domaine d'étude, la lame d'eau infiltrée serait inférieure à 108 mm et supérieure à 405 mm. Les valeurs moyennes expérimentales estimées à partir de 23 essais à l'infiltromètre double-anneau ainsi que les domaines de variations associés sont également reportés.

Outre un accord très satisfaisant avec les valeurs prédites, on notera que supposer le milieu homogène et uniforme

[solution déterministe obtenue avec $a = 1$]

reviendrait à sous-estimer de 20 % environ la quantité moyenne d'eau infiltrée.

Le Tableau I donne à différents temps les principaux paramètres de la fonction de répartition du front d'infiltration. Le caractère fortement asymétrique et aplati de la fonction de répartition implique que les valeurs les plus probables (mode) sont très différentes des valeurs moyennes ($E\{z_i\}$).

Tableau I. Paramètres de la distribution du front d'infiltration.

t (h)	E {z _i } (cm)	var {z _i } (cm ²)	CV	Mode (cm)	Médiane (cm)
0,1	14,1	6,86	0,18	7,90	11,6
0,25	29,5	645,6	0,86	12,9	22,4
0,5	55,8	3 230,4	1,00	19,7	39,5
1,0	110,0	15 376	1,12	32,1	73,0

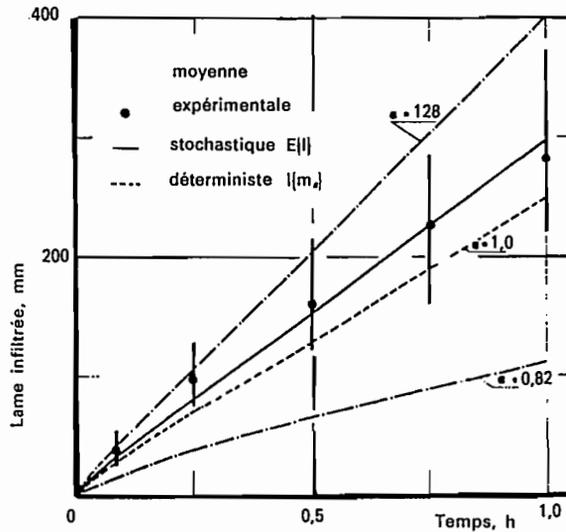


Figure 5. Évolution en fonction du temps de la lame infiltrée. Les barres verticales correspondent au domaine de variation des valeurs mesurées sur les 23 sites.

Cas du drainage gravitaire

Sous certaines hypothèses (gradient unitaire de charge hydraulique, flux nul à la surface, translation des profils hydriques parallèlement à eux-mêmes), il est possible de montrer (Vaucelin et Vachaud, 1987) que la solution stochastique de l'équation (1) compte tenu des relations (2) s'exprime par :

$$\theta(z,t,a) = \theta_0 \left\{ 1 + a^2 \frac{b-1}{\theta_0} K^* \cdot \frac{t}{z} \right\}^{1/1-b} \text{ pour la teneur en eau} \quad (5a)$$

et

$$q(z,t,a) = a^2 K^* \cdot \left\{ 1 + a^2 \frac{b-1}{\theta_0} K^* \cdot \frac{t}{z} \right\}^{b/1-b} \quad (5b)$$

pour le flux

La figure 6 donne les évolutions en fonction du temps de la teneur en eau à la cote $z = 110$ cm calculées pour $a = 1$ (solution déterministe), $a = 0,624$ (premier quartile), $a = 1,28$ (dernier quartile) ainsi que la valeur moyenne $E\{\theta\}$. Les valeurs moyennes expérimentales obtenues par humidimétrie neutronique en 23 sites sont également reportées ainsi que les écarts-types associés. L'accord entre moyennes et écarts-types expérimentaux et numériques est là encore très satisfaisant. Les paramètres de la fonction de répartition des humidités font apparaître que les teneurs en eau sont distribuées normalement comme le montrent de nombreuses études expérimentales.

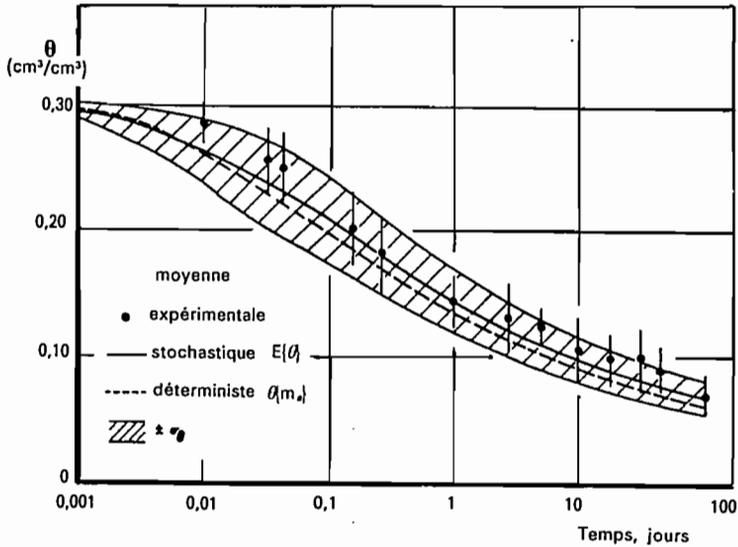


Figure 6. Évolution en fonction du temps de la teneur en eau volumique à la cote $z = 110$ cm, au cours du drainage gravitaire. Les barres verticales correspondent aux écarts-types expérimentaux.

On notera que les expressions (4) permettent d'étudier aisément la sensibilité des processus d'infiltration et de drainage à l'hétérogénéité du milieu, exprimée notamment par le coefficient de variation du facteur d'échelle :

$$CV_a^2 = \exp \sigma_A^2 - 1.$$

La figure 7 présente l'évolution en fonction du temps des écarts relatifs ε_X (équation 4a) entre moyenne stochastique $E\{X\}$ et déterministe $X(m_a)$ pour les flux d'infiltration et de drainage et 3 valeurs de CV_a . Il apparaît que, pour des sols certes fortement non uniformes mais non rares, comme le montrent de très nombreuses évidences expérimentales, les écarts peuvent atteindre 150 % !

Cas de l'infiltration sous flux

L'équation (1) a été résolue pour des conditions de Neumann par la méthode intégrale (Boulier *et al.* [2]) fondée sur la relation flux-concentration proposée par Philip [4]. La solution ainsi obtenue, couplée à la description statistique des paramètres hydrodynamiques suggérée par les équations (2) conduit là encore à exprimer la réponse du milieu en termes probabilistes. A titre d'exemple, la figure 8 présente les valeurs moyennes et les variances des profils hydriques pour 3 valeurs ($0,1 K^*$, K^* , $5 K^*$) du flux q_0 imposé à la surface. L'écart entre moyennes déterministe et stochastique est d'autant plus patent que le flux d'apport est important. On notera également les variances importantes de la teneur en eau avec des extrêmes situés au voisinage des fronts moyens d'humidification. La figure 9 illustre la fonction de répartition du temps de submersion qui peut aussi être

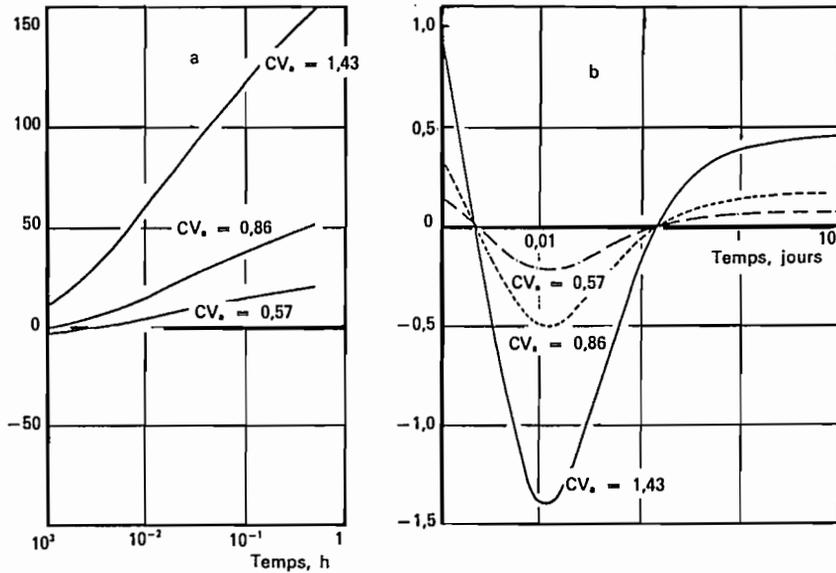


Figure 7. Étude de sensibilité de l'écart relatif entre moyennes stochastiques et déterministes au coefficient de variation du facteur d'échelle : $CV_z = 0,57$ correspond à la variabilité observée ($\sigma_L^2(n\alpha = 0,2782)$); $CV_z = 0,86$ et $CV_z = 1,43$ correspondent à $2\sigma_L^2 n\alpha$ et $4\sigma_L^2 n\alpha$ respectivement : a. flux d'infiltration; b. flux de drainage à la cote $z = 110$ cm.

interprétée comme l'évolution temporelle du pourcentage de flaques présentes sur la surface. Dans le cas $r = q_0/K^* \leq 1$, ce pourcentage, inexistant du point de vue déterministe, est déjà très significatif (59 %) pour le modèle stochastique. Il correspond, d'après la figure 10, à une lame ruisselée représentant environ 30 % de la lame d'eau apportée. Cette dernière figure illustre également l'influence de la variabilité du milieu sur la lame ruisselée. Alors que pour un sol homogène caractérisé par une perméabilité K^* uniforme, des intensités de pluie inférieures à K^* , n'engendrent aucun écoulement de surface, la variabilité du milieu tend à augmenter le ruissellement aux faibles valeurs de q_0/K^* , et ce d'autant plus que les variations sont plus importantes, et à le diminuer aux fortes valeurs. Ce résultat nous semble devoir être relié au problème de changement d'échelle dans l'estimation et la modélisation des bilans hydrologiques.

Conclusions

Au vu de ces quelques exemples, pris parmi beaucoup d'autres, il paraît indéniable, au plan théorique, qu'une conception trop étroitement déterministe des transferts dans les sols non uniformes peut conduire à des estimations erronées des écoulements. L'analyse théorique stochastique montre également que dans le cas

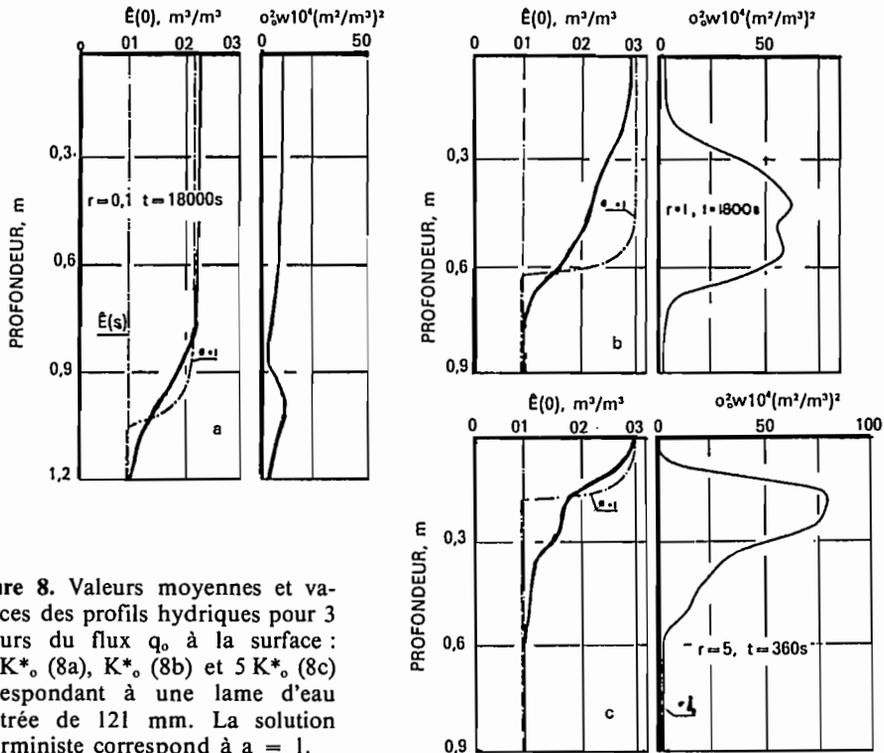


Figure 8. Valeurs moyennes et variances des profils hydriques pour 3 valeurs du flux q_0 à la surface : $0,1 K^*$ (8a), K^* (8b) et $5 K^*$ (8c) correspondant à une lame d'eau infiltrée de 121 mm. La solution déterministe correspond à $a = 1$.

général des écoulements transitoires non saturés, il n'existe pas de propriétés effectives, c'est-à-dire de caractéristiques hydrodynamiques pour lesquelles la solution de l'équation (1) serait celle de l'écoulement moyen.

A titre d'exemple, la figure 11 montre que de telles propriétés dépendraient notamment des conditions initiales et aux limites utilisées dans une expérimentation (simulée ici) visant à les déterminer. Autrement dit, on ne peut pas représenter un domaine de sol non uniforme par un milieu poreux homogène équivalent. Au plan pratique, il semble indispensable de prendre en compte la variabilité naturelle des sols, tant dans leur reconnaissance et échantillonnage que dans leur gestion.

Remerciements

Une partie de cette étude a été réalisée dans le cadre du projet « Spatial Variability of Land Surface Processes » financé par les Communautés Européennes - DG XII.

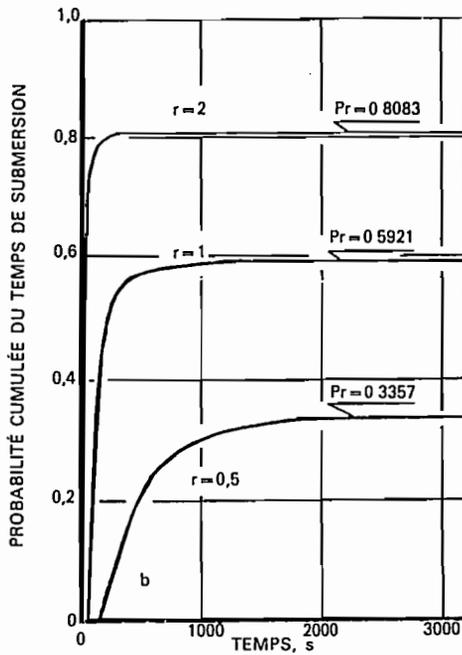


Figure 9. Loi de distribution du temps de submersion pour 3 valeurs du flux q_0 à la surface : $0,5 K^*$; K^* et $2 K^*$. Pr est le pourcentage de flaques en régime permanent.

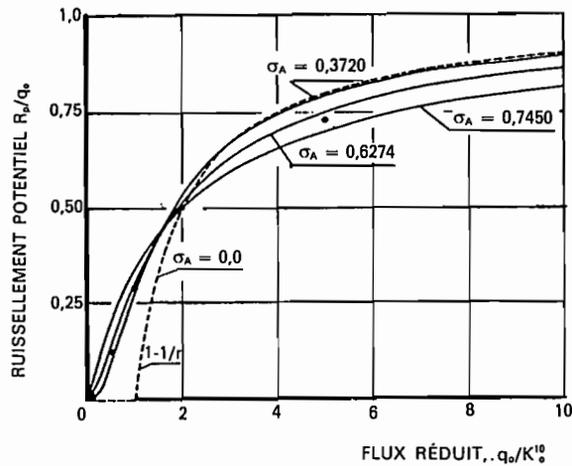


Figure 10. Relation ruissellement-intensité d'apport pour 3 variabilités σ_A et pour le cas déterministe (-----).

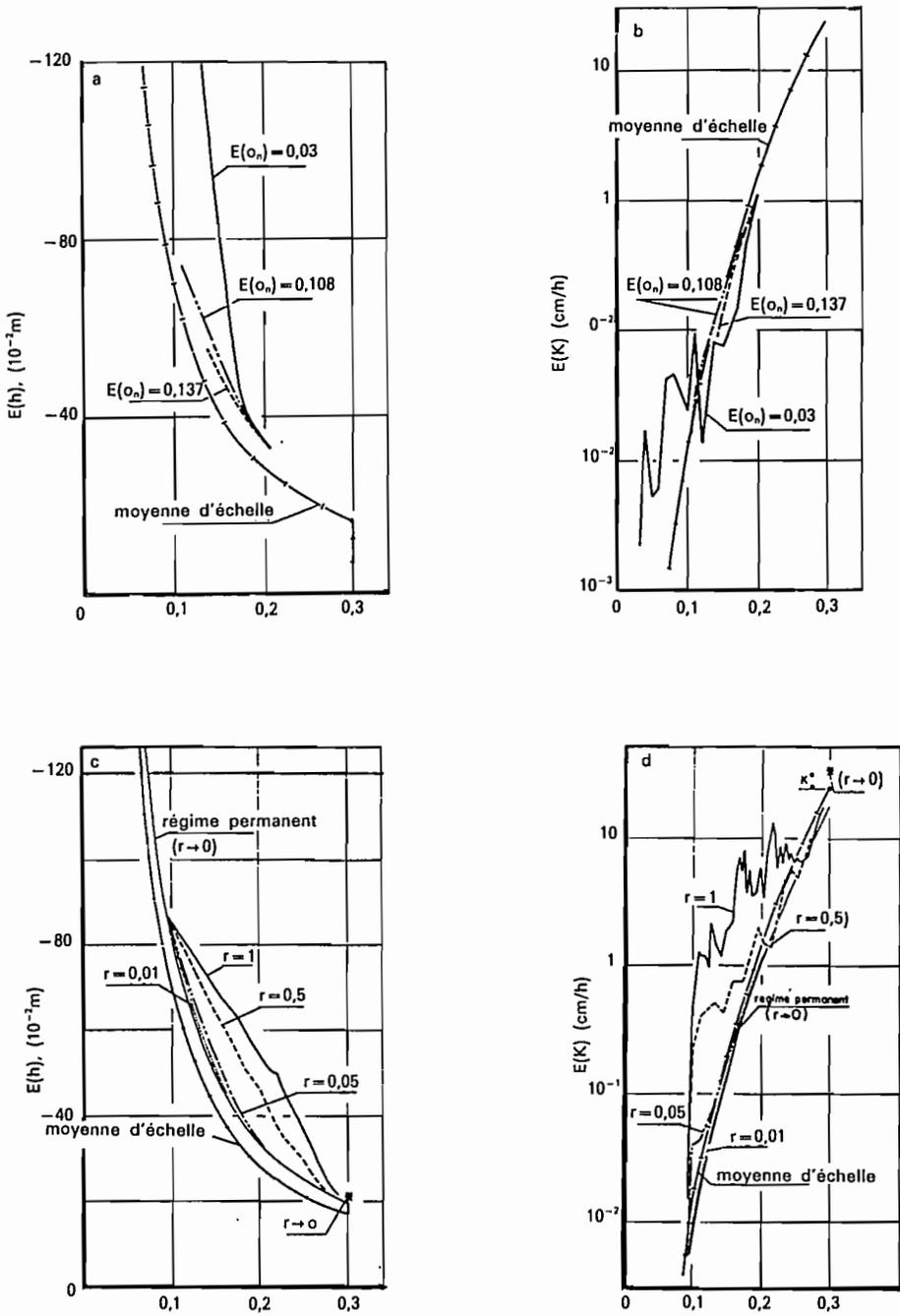


Figure 11. Propriétés effectives calculées pour différentes valeurs d'humidité initiale (11a et 11b) et du flux réduit $r = q_0/K^*$ (11c et 11d).

Références

1. Aboujaoudé A., Belleudy Ph., Vauclin M. (1990). A numerical study of infiltration through crusted soils : flat and other surface configurations. *Accepté pour publication à Soil Technology.*
2. Boulier J.-F., Touma J., Vauclin M. (1984). Flux-concentration based solution of constant flux infiltration equation. Infiltration into non uniform initial moisture profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 245-251.
3. Miller E.E., Miller R.D. (1956). Physical theory for capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.* 27 : 324-332.
4. Philip J.R. (1973). On solving the unsaturated flow equation. 1. The flux-concentration relation. *Soil Sci.* 116 : 328-335.
5. Touma J., Vauclin M. (1986). Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil. *Transp. in Porous Media* 1 : 27-55.
6. Vauclin M., Vachaud G. (1981). Bilan hydrique dans le Sud-Tunisien. II. Modélisation numérique et prévision des transferts hydriques en sol stratifié. *J. of Hydrol.* 49 : 53-73.
7. Vauclin M., Imbernon J., Vachaud G., Dancette C. (1983). Description expérimentale et modélisation stochastique des transferts par mise en facteur d'échelle des propriétés hydrodynamiques des sols. *Proc. IAEA SM 267/25* : 103-124.
8. Vauclin M., Vachaud G. (1987). Caractérisation hydrodynamique des sols : analyse simplifiée des essais de drainage interne. *Agron.* 7 : 647-655.

2

Modèle hydrogéologique en zone aride ou semi-aride

A. DASSARGUES, A. MONJOIE

*Faculté des Sciences appliquées, Université de Liège, au Sartliman,
Bâtiment B 19, 4000 Liège, Belgique*

Si les nappes d'eaux souterraines en zone aride à semi-aride ont des caractéristiques hydrogéologiques classiques, leurs conditions de réalimentation et d'exploitation induisent des problèmes particuliers dont on doit tenir compte lors de leur modélisation.

Au point de vue exploitation, le manque d'eau potable de ces régions conduit à exploiter des aquifères de faible capacité qui, en Europe, ne seraient retenus que pour des besoins individuels ou très locaux. En zone aride ou semi-aride, un puits donnant 1 à 18 m³/h est souvent une aubaine.

D'autre part, la dispersion des populations impose une implantation tout aussi diffuse des puits d'exploitation d'eaux souterraines.

Ces deux caractéristiques sont également imposées par le caractère aléatoire et très limité de l'alimentation naturelle des nappes. Il faut « tenir » sur les réserves de la nappe durant de longues périodes dépassant souvent quelques années.

De manière à optimiser l'exploitation des nappes sans épuiser leurs réserves, des modèles mathématiques déterministes et physiquement significatifs sont utilisés. Leur avantage consiste à intégrer toutes les données disponibles, d'approximer de façon logique et fiable les données manquantes et de fournir une réponse globale montrant les tendances de la nappe en régime transitoire.

Les modèles hydrogéologiques, physiquement significatifs, sont basés sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres la transmissivité (ou la perméabilité), le coefficient d'emmagasinement et des coefficients d'infiltration. Le calcul est réalisé en résolvant l'équation différentielle avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites imposées.

La solution proposée par le modèle consiste en une description de la piézométrie (ou du champ de pression).

Dans les hypothèses prises pour le calcul et dans la description géométrique de l'aquifère (discrétisation en sous-régions) nécessaires pour la simulation numérique, il est indispensable de prendre en compte les caractéristiques essentielles de chaque cas étudié.

Vu les faibles réalimentations naturelles des nappes, il est par exemple indispensable de réaliser des simulations en mode transitoire.

Caractéristiques principales des aquifères

Les principales nappes que nous avons eu l'occasion d'étudier en zone aride ou semi-aride peuvent être caractérisées comme suit.

Nappes alluviales logées dans les dépôts sablo-graveleux des Oued ou Kori

Généralement, le problème est classique et la modélisation n'implique pas de problèmes particuliers aux zones arides, hormis la réalimentation qui est épisodique, sauf pour les grands fleuves pérennes.

Ce point est certes important mais ne modifie pas la conception du modèle que nous appliquons en Europe.

Les nappes à surface libre doivent être étudiées en régime transitoire. Vu les larges superficies concernées, il est indispensable de pouvoir traiter le problème sans changement de discrétisation (remaillage) après chaque pas de temps. Le programme utilisé permet donc de prendre en compte la non-linéarité de la transmissivité car celle-ci dépend de la hauteur piézométrique qui est elle-même calculée par le modèle.

Moyennant une bonne gestion et si possible une réalimentation artificielle, ces aquifères offrent des potentialités remarquables. Dans certains cas, on trouve, sous les alluvions actuelles, un paléo-relief à dépôt graveleux, fournissant des réserves aquifères pluriannuelles à condition d'en assurer la réalimentation en périodes pluvieuses.

Nappes du manteau d'altération

Elles sont également classiques mais leur réalimentation est très limitée.

Elles se tarissent vite et sont surtout sensibles aux pollutions. Très exploitées par puits artisanaux, donnant des débits limités et très variables, elles méritent rarement une modélisation mathématique.

Nappes des « dallols » du Niger

Ces nappes méritent une attention particulière. Les horizons sableux qui les contiennent présentent des variations de faciès rapides, les corrélations entre deux puits, parfois distants de quelques centaines de mètres, étant aléatoires.

Modèle hydrogéologique

Les lentilles sableuses ont des extensions limitées, ce qui pose le problème de la réalimentation de tels aquifères via les horizons silto-argileux encaissants (aquitards). Ces intercalaires étant généralement assez compressibles, il en résulte qu'une baisse de pression de l'aquifère entraîne un tassement de l'aquitard avec expulsion d'eau de celui-ci. Si le phénomène est favorable à court terme, il implique par tassement de l'aquitard une diminution de la perméabilité de celui-ci et par voie de conséquence une réduction notable de l'alimentation de la lentille sableuse.

Le phénomène est souvent ignoré ou négligé par les hydrogéologues alors qu'il est bien connu des géotechniciens s'occupant des tassements induits en surface dans de tels environnements. Le phénomène, d'autant plus intense que le rabattement est important, est sans doute responsable pour une part de la baisse progressive du rendement des puits dans ces aquifères.

Le phénomène peut être approché mathématiquement et il est évident que tout modèle dans de tels aquifères doit en tenir compte.

Les paramètres intervenant dans l'équation d'écoulement en milieu poreux sont le coefficient de perméabilité K et le coefficient d'emmagasinement spécifique S_s .

Ces grandeurs sont fonction de l'état de contrainte régnant dans le milieu. Dans le cas où la compressibilité de l'eau et la compressibilité des grains solides sont négligées par rapport à la compressibilité du milieu poreux due à un réarrangement des grains (diminution de la porosité), on peut écrire :

$$S_s = \rho.g.\alpha$$

où $\rho.g$ = poids volumique de l'eau

α = coefficient de compressibilité du milieu poreux.

Les terrains compressibles ont un caractère argileux prépondérant et leur compressibilité est déterminée par des essais oedométriques. Il vient :

$$S_s = \rho.g/A.\sigma' \text{ en régime élastique}$$

$$S_s = \rho.g/C.\sigma' \text{ en régime plastique}$$

où A = constante de gonflement (élastique) du milieu

C = constante de compression (plastique) du milieu

σ' = la contrainte effective.

Les constantes A et C sont déterminées par l'essai oedométrique, de même que la contrainte effective de préconsolidation ($\sigma'_{préc}$) limitant le domaine élastique et le domaine plastique. On constate que S_s va varier en fonction de σ' et donc en fonction des conditions de pression d'eau dans le milieu poreux. Le modèle utilisé permet de tenir compte de cette variation du coefficient d'emmagasinement spécifique.

La réduction du volume des vides due au réarrangement des grains lors d'un tassement provoque une baisse de la perméabilité du milieu poreux. Différentes relations liant la perméabilité à l'indice des vides ou à la porosité peuvent être aisément introduites dans le modèle. Dans le cas des couches compressibles argileuses d'origine marine nous avons utilisé avec succès l'équation :

$$K = \exp(\alpha_N \cdot e + \beta_N)$$

Les coefficients α_N et β_N sont à déterminer pour chaque milieu poreux compressible de nature différente, sur base d'essais ayant fourni des valeurs de K et des valeurs de l'indice des vides e .

L'introduction dans le modèle des variations de S_s et de K entraîne l'apparition dans celui-ci d'un couplage écoulement — tassement, doublé des non-linéarités de ces paramètres.

Ce genre d'étude implique un modèle nettement tridimensionnel, de géométrie très complexe, fonctionnant en régime transitoire avec évolution des caractéristiques K et S_s en fonction des variations de pression.

Aquifère logé dans les fissures du substratum rocheux

Il correspond à une nappe classique de fissures. Hétérogène et très anisotrope, il est souvent difficile à modéliser correctement, même en Europe. Dans les cas que nous avons été amené à traiter, notamment au Mali, en Guinée..., le substratum n'est aquifère qu'au droit de certaines failles ou dans et à proximité de filons ou dyke de roches éruptives, notamment des dolérites.

En cas de substratum affleurant ou subaffleurant, le caractère rare et aléatoire des pluies conditionne fortement le débit moyen annuel exploitable. Heureusement, dans les zones arides ou semi-arides, le substratum rocheux est souvent recouvert par une épaisse couche de manteau d'altération, siège de la nappe superficielle dont il est question ci-avant.

Ces accidents constituent des axes de drainage préférentiels, autorisant des débits souvent élevés, fonction de l'extension des sillons de rabattement induit. Ceux-ci, drainant per descensum la nappe superficielle, assurent ainsi une alimentation plus pérenne et différée dans le temps, permettant de franchir des périodes plus ou moins longues de sécheresse.

Un tel aquifère implique une modélisation susceptible de représenter valablement les axes de drainage préférentiels que sont les failles ou filons et la drainance verticale de la nappe superficielle.

De plus, le caractère évolutif dans le temps de l'alimentation nécessite un fonctionnement en régime transitoire.

Seul un modèle réellement 3 D et fonctionnant en régime transitoire permet de simuler un tel comportement. Par contre, la géométrie du modèle est relativement simple par rapport à celle des dallols.

Modélisation de nappes captives classiques du type de la nappe du Maestrichtien

Elle ne pose pas de problème particulier en zone aride ou semi-aride.

Cependant leur modélisation en mode transitoire est impérative car trop souvent leur facilité d'exploitation et les bons débits obtenus conduisent à une surexploitation inquiétante avec baisse de pression et diminution des caractéristiques K et S_s s'il y a des terrains compressibles surincombants ou intercalaires.

Enfin, l'alimentation réduite des nappes en zone aride et semi-aride et son caractère aléatoire impliquent de pouvoir modéliser correctement le phénomène et de calculer correctement le temps de transfert entre surface et nappe.

De plus, l'augmentation des besoins par rapport aux dimensions souvent réduites de la plupart des aquifères conduit à envisager une réalimentation artificielle des nappes. Cette réalimentation peut provoquer des modifications de K et S_s par dissolution ou précipitation des ions, échanges de base, variation de température. Les modèles utilisés doivent pouvoir tenir compte de ces phénomènes.

Modèle hydrogéologique

Parmi les modèles mathématiques de type déterministe et physiquement significatifs, seuls les modèles éléments finis nous paraissent réunir les caractéristiques nécessaires pour « coller à la réalité ».

Les éléments peuvent être de forme quelconque (3 D, plan 2 D, 1 D type tube,...) et la variabilité des caractéristiques hydrogéologiques peut y être introduite. Avec le code LAGAMINE mis au point à l'Université de Liège par le laboratoire M.S.M. et adapté par les L.G.I.H. aux phénomènes hydrogéologiques, nous avons pu résoudre les différents problèmes cités ci-avant.

Le programme se présente sous forme modulaire, ce qui a permis les adaptations aisées de la loi constitutive pour tenir compte des phénomènes couplés (écoulement-tassement, par exemple) et des variations des paramètres en fonction du temps et éventuellement de la pression d'eau.

Cependant, un des gros problèmes subsistant en zone aride et semi-aride est le manque de données et le manque d'historique de données pour pouvoir caler valablement le modèle.

Les valeurs des paramètres ne sont connues que dans certaines zones locales et l'hydrogéologue doit fournir des estimations pour les autres zones.

Néanmoins, dès que le modèle est choisi, les reconnaissances hydrogéologiques in situ peuvent être orientées de manière à satisfaire ses besoins en données.

La procédure de « calibration » du modèle consiste ensuite à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable.

Une étude de la sensibilité du modèle par rapport aux différents paramètres est souvent très importante. Ce type d'analyse doit pouvoir couvrir les aspects suivants :

- étudier les interactions entre paramètres (relations éventuelles);
- déterminer la plage de variation optimum pour un paramètre, et l'influence d'une variation (choisie dans cette plage) sur certains résultats;
- déterminer éventuellement les « importances » respectives des différents paramètres intervenant dans le modèle.

Les conclusions de ce type d'étude peuvent amener à diriger les prospections ultérieures vers des endroits considérés comme particulièrement « sensibles » pour la précision des résultats du modèle.

Conclusions

Lors de l'utilisation d'un modèle mathématique pour simuler le comportement de nappes régionales, en zone aride ou semi-aride, il est indispensable de tenir compte de façon précise des caractéristiques propres de ces nappes :

- respecter le plus possible, par une approche 3 D, la géométrie de l'aquifère;
- évaluer les paramètres sur base d'un nombre suffisant d'essais et mesures;

- introduire des conditions initiales cohérentes et des conditions aux frontières influençant au minimum les résultats recherchés dans la zone sollicitée;
- réaliser les simulations en mode transitoire.

Préalablement à ces recommandations, qui influencent fortement le degré de fiabilité du modèle, il est nécessaire de réaliser une collecte de données aussi exhaustive que possible. Ensuite, en découle le choix des paramètres, la phase de calibration et les résultats prévisionnels du modèle.

D'autre part, il faut être vigilant par rapport à des phénomènes induits, tels que les tassements, diminution de porosité et de perméabilité... et en tenir compte dans les modélisations. Ce type de non-linéarités des paramètres, appliquées à un modèle réellement 3 D, augmente fortement le temps de calcul (CPU time) consommé, mais les ordinateurs ou « stations de travail » de plus en plus puissants et de moins en moins onéreux permettent et permettront dans l'avenir ce type d'analyse à des coûts raisonnables.

Références

1. Castany G. (1968). *Prospection et exploitation des eaux souterraines*. Paris : Dunod, 717 p.
2. Dassargues A., Bolly P.Y., Monjoie A. (1988). Finite difference and finite element modelling of an aquifer in Cretaceous chalk, Proceedings of the 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck : Balkema.
3. Dassargues A., Radu J.-P., Charlier R. (1988). Finite elements modelling of a large water table aquifer in transient conditions. *Advances in Water Resources*, 11 (2), Computational Mechanics Publications.
4. Dassargues A. (1990). Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation, *Bulletin de la Société Géologique de Belgique*, 1990 (à paraître).
5. Delvaux Th., Monjoie A. (1987). *Projet de forages à Dosso (Niger); ensablement des puits*. Rapport LGIH, Université de Liège pour l'Agence Générale de Coopération au Développement de Belgique (non publié).
6. De Marsily G. (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Paris : Masson, 440 p.
7. Fetter G.W. (1988). *Applied Hydrogeology*, Second edition, Messil Publishing Company.
8. Halleux L., Monjoie A., Van Lierde M. (1984). *Mission de Prospection hydrogéologique pour l'implantation de 35 puits le long de la voie ferrée Bamako-Kidira (Mali)*, Rapport LGIH, Université de Liège pour l'Agence Générale de Coopération au Développement de Belgique (non publié).
9. Michiels Th., De Rijdt R., Perin P. et Monjoie A., 1989. *Forages à Dosso (Niger)*, Rapport LGIH, Université de Liège pour l'Agence Générale de Coopération au Développement de Belgique, non publié.
10. Monjoie A. (1985). *Note au cours d'Hydrogéologie*, Université de Liège.

3

Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemples d'application

G. MORIN

INRS-Eau, Université du Québec, CP 7500, Ste-Foy, Québec, G1V 4C7, Canada

La prévision hydrologique est un des aspects les plus importants de l'hydrologie appliquée. Elle intervient nécessairement pour le contrôle des inondations, la régularisation des cours d'eau, la production hydro-électrique, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et, compte tenu de l'utilisation toujours plus intense des ressources en eau, la prévision devient de plus en plus nécessaire pour la gestion de la ressource et le contrôle de la pollution.

Pour répondre de façon adéquate à ces besoins, les hydrologues ont développé des outils que l'on appelle modèles hydrologiques. Ces modèles ont évolué très rapidement depuis quelques décades avec l'avènement des ordinateurs de plus en plus puissants.

Modèles hydrologiques

Bien que le terme « modèle » soit d'utilisation très générale, il est habituellement utilisé pour décrire un ensemble de formules mathématiques et d'algorithmes représentant l'état d'un système et son évolution sous l'influence de certaines variables.

En hydrologie, on distingue deux types de modèles : modèle déterministe; modèle stochastique.

Un modèle déterministe ne contient pas d'éléments aléatoires et détermine de manière « certaine » l'état et l'évolution du système en fonction des variables considérées.

Dans un modèle stochastique, en plus de variables mesurables et observables, interviennent une ou plusieurs variables aléatoires correspondant à l'effet possible de facteurs non contrôlés par les variables définissant le modèle.

Modèle déterministe

La plupart des modèles de ce type ne sont pas complètement déterministes. Certaines parties du cycle hydrologique sont schématisées; pour cette raison, il est plus précis de les appeler « modèles paramétriques » ou encore « modèles conceptuels ». Cela signifie qu'ils sous-entendent une certaine conception du cycle hydrologique et que les paramètres utilisés ont un sens physique représentant les variations propres à un phénomène (ex. : infiltration, fonte de neige, etc.).

Généralement, les modèles paramétriques décomposent le cycle hydrologique en « parties », telles que précipitation, fusion de la neige, infiltration, évaporation, écoulement superficiel et retardé, etc. Deux types d'approches sont utilisées pour conduire à des modèles qu'on appelle « modèle de ruissellement » ou « modèle à bilan ».

Dans les modèles de ruissellement, on considère comme « pertes » l'infiltration et l'évaporation. Inversement, les modèles à bilan cherchent à réaliser un bilan complet des volumes d'eau de la façon la plus réaliste possible.

Les modèles paramétriques peuvent être classés en deux groupes, soit :

(1) modèle global : le bassin versant est considéré dans son ensemble pour la lame d'eau produite et le débit est obtenu en utilisant une fonction d'étalement;

(2) modèle matriciel : le bassin versant est subdivisé en éléments et la lame d'eau produite sur chacun des éléments est transférée d'un élément à l'autre pour obtenir le débit à l'exutoire de chaque élément.

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'INRS-Eau depuis 1971, est un modèle paramétrique matriciel à bilan.

Le modèle hydrologique CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU est un modèle qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui-ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versant et de prendre en compte des réservoirs réels ou fictifs. Enfin, le découpage du bassin versant facilite l'utilisation de la télédétection pour définir certaines caractéristiques physiographiques et estimer certaines variables telles que précipitation, couvert neigeux, etc.

Schématisation du bassin versant

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité. Pour le modèle CEQUEAU, nous avons retenu des surfaces carrées

de dimensions semblables. En pratique, cela se traduit par la superposition d'une grille délimitant des éléments de surface que nous appellerons « carreaux entiers » (figure 1). La dimension de chaque « carreau entier » dépend de la superficie du bassin versant étudié, de sa topographie et du nombre de stations météorologiques disponibles. On considère que pour un bassin versant relativement homogène, un découpage donnant de 25 à 75 carreaux entiers nous permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Le modèle a été mis en opération avec des superficies de carreaux variant de 0,25 km² à 900 km².

Pour chaque « carreau entier », on évaluera les caractéristiques physiographiques (altitude du coin sud-ouest, % forêt, % lac, % marais) qui sont nécessaires pour effectuer le bilan hydrologique.

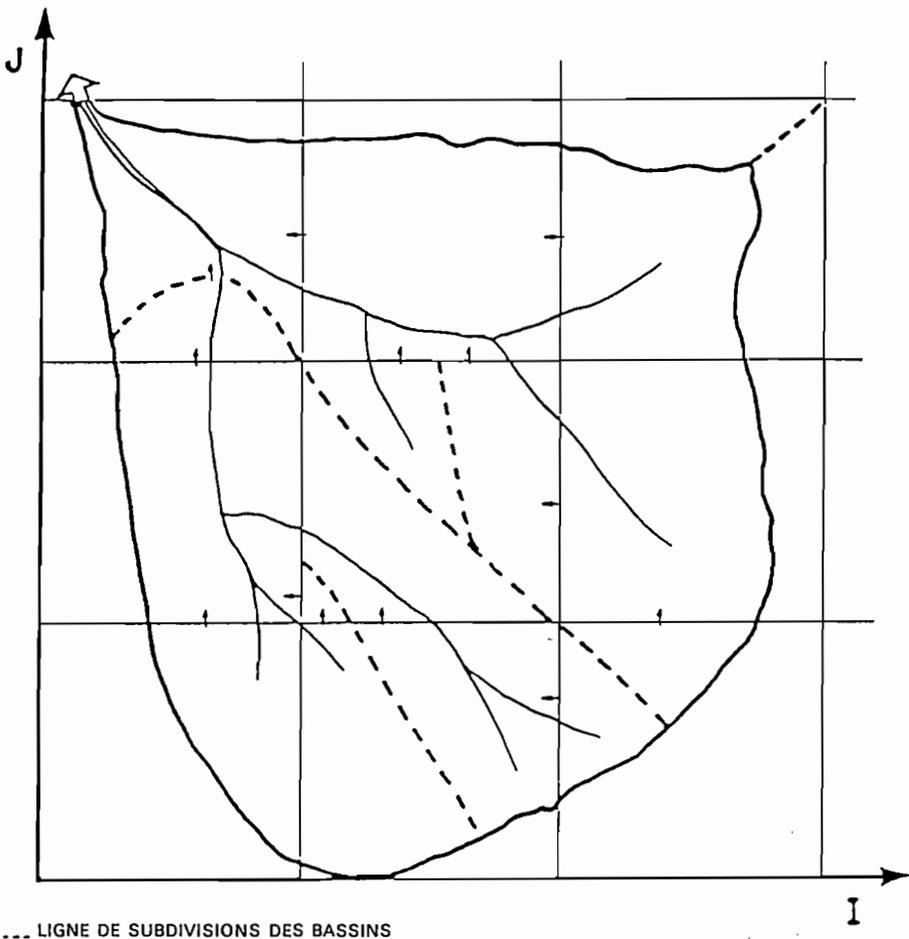


Figure 1. Subdivision du bassin versant en carreaux entiers et en carreaux partiels en fonction des subdivisions des bassins.

Un deuxième découpage est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau dans les rivières. Ceci est fait en subdivisant chaque « carreau entier » en « carreaux partiels » à l'aide des lignes de partage des eaux des sous-bassins (Figure 1). La seule caractéristique physique liée au « carreau partiel » est sa superficie exprimée en pourcentage du « carreau entier » et le sens de l'écoulement.

Ce second découpage permet de :

- suivre dans l'espace et le temps la formation et l'évolution des écoulements;
- introduire toute modification artificielle de l'écoulement dans les cours d'eau;
- fournir les débits à n'importe quel point du réseau de drainage.

Un « carreau partiel » peut s'écouler dans un autre « carreau partiel » du même « carreau entier » ou dans n'importe lequel des huit « carreaux entiers » voisins.

Les données physiographiques et les données relatives aux carreaux partiels seront traitées par un programme qui formera la banque physiographique et de drainage du bassin versant étudié.

Données météorologiques

En plus des données physiographiques des carreaux entiers, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à un pas de temps journalier, les données suivantes : la précipitation liquide; la précipitation solide; la température maximale de l'air; la température minimale de l'air.

Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet différentes options d'interpolation, qui sont la régression, la pondération et le polygone de Thiessen.

L'option régression consiste à établir à chaque jour une relation entre l'altitude et la température de l'air. La température de l'air sur un carreau est estimée en fonction de l'altitude du carreau.

L'option pondération consiste à utiliser les données (précipitation ou température) des trois stations météorologiques les plus près d'un carreau, pondérées d'un facteur inversement proportionnel à la distance à ce carreau pour estimer la valeur de la précipitation ou de la température sur un carreau.

L'option polygone de Thiessen consiste à estimer les données météorologiques en fonction de la station la plus proche.

Le modèle

Le modèle CEQUEAU comporte deux parties principales visant à décrire le mieux possible le cheminement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant.

La première partie, qu'on appelle « fonction de production », concerne l'écoulement vertical de l'eau et a pour but d'effectuer sur chaque carreau entier le bilan de l'eau dans le sol et les lacs et marais.

La seconde partie, qu'on appelle « fonction de transfert », concerne l'écoulement dans le réseau de drainage et a pour but d'effectuer sur chaque carreau partiel le transfert de l'eau en rivière et de tenir compte, s'il y a lieu, des ouvrages de régularisation.

Fonction de production

La fonction de production a pour but de représenter de manière simple, mais réaliste, les différentes voies que suivra l'eau atmosphérique entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint la rivière. L'origine de l'alimentation en eau atmosphérique du bassin versant est la pluie ou la neige.

Quelle que soit l'origine de l'eau atmosphérique entrant dans un carreau avant sa mise en disponibilité pour l'écoulement vers l'exutoire, elle sera soumise à divers processus qui auront une influence directe sur la formation de l'onde d'écoulement.

Ces processus sont schématisés dans le modèle CEQUEAU par la représentation du sol sous forme de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle journalière, les différents transferts de masse (figure 2).

La première étape de la fonction de production dans le modèle CEQUEAU consiste à calculer la hauteur d'eau disponible, au niveau du sol, sur chaque carreau entier. Cette eau peut avoir deux origines : l'eau de pluie ou l'eau provenant de la fusion du manteau nival.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'eau de pluie disponible sur chaque carreau entier est obtenue directement par interpolation des précipitations liquides mesurées aux stations météorologiques de la région.

Pour calculer l'eau provenant de la fusion du manteau nival, le modèle effectue le bilan des stocks de neige sur chaque carreau entier, séparé en deux parties : une zone de forêt et une zone de clairière. Le bilan de la fonte est fait séparément sur chaque partie et la lame de fonte globale est la combinaison des deux lames produites, en forêt et en clairière, pondérées en fonction des surfaces respectives de chaque zone.

Les équations de base du calcul de la fonte sont tirées du rapport « Snow hydrology » du corps d'ingénieurs de l'armée américaine et utilisent une méthode simple de degré-jour qui permet d'estimer la fonte. On tient compte de deux phénomènes principaux qui retardent la disponibilité immédiate de l'eau de fonte, soit : le réchauffement du manteau nival qui a une faible conductivité thermique et le mûrissement du stock de neige pour que la lame de fonte qui se crée en surface puisse atteindre le niveau du sol.

Connaissant la fonte, on peut calculer l'eau disponible au niveau du sol en additionnant la précipitation liquide et la fonte.

S'il y a des surfaces imperméables sur le carreau entier, il y a du ruissellement qui est immédiatement disponible pour l'écoulement en rivière.

La lame restante est ajoutée au contenu antérieur du réservoir SOL. Le niveau d'eau dans le réservoir SOL est utilisé pour déterminer l'évaporation, l'infiltration et les évacuations qui reproduisent le ruissellement de surface, et le ruissellement retardé.

La méthode utilisée pour le calcul de l'évaporation journalière est celle de Thornwaite, modifiée pour tenir compte de la durée potentielle d'ensoleillement en fonction de la latitude, du jour de l'année et de la saturation du sol.

Les évacuations sont déterminées en fonction des coefficients de vidange et des hauteurs de chaque orifice. Ces évacuations sont additionnées au ruissellement sur les surfaces imperméables pour donner un volume d'eau disponible pour l'écoulement en rivière, sauf la partie infiltration qui s'écoule dans le réservoir NAPPE.

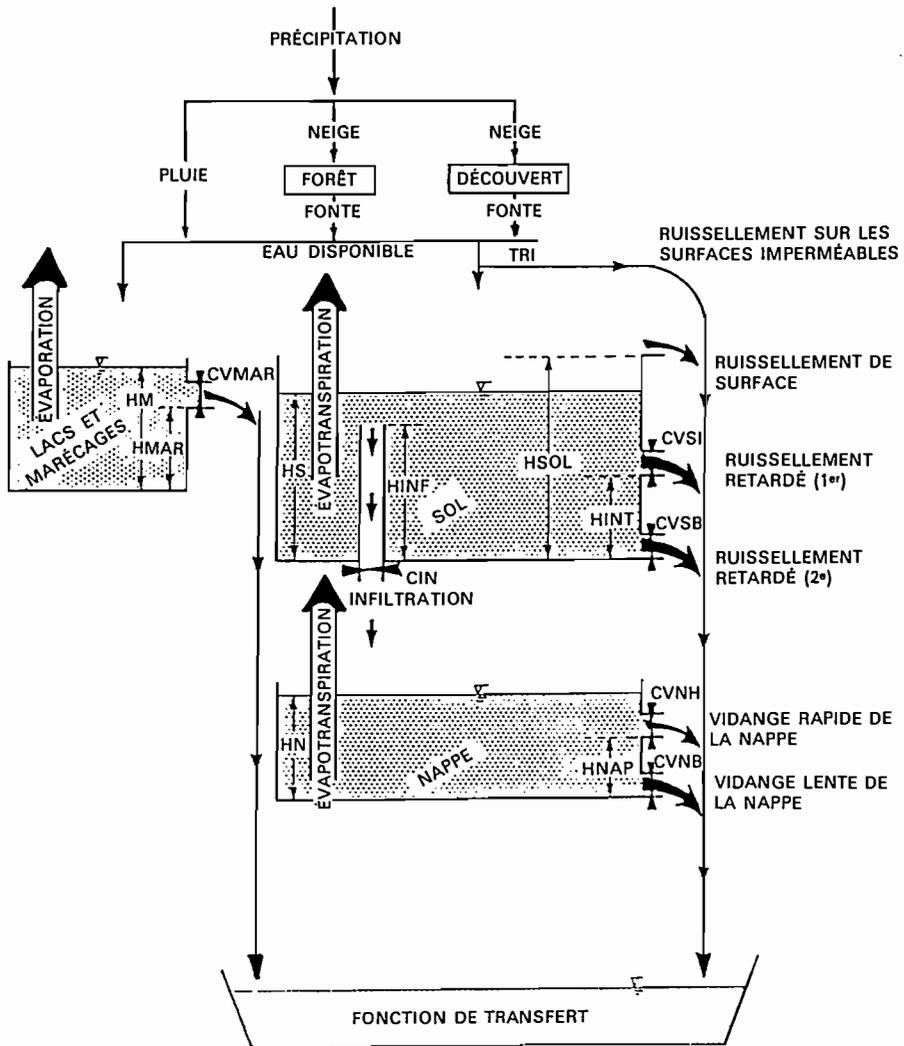


Figure 2. Schéma de production du modèle CEQUEAU.

Les écoulements issus du réservoir NAPPE dépendent du niveau d'eau dans le réservoir, du coefficient de vidange et de la hauteur de chaque orifice. Ces coefficients sont généralement très faibles puisque le réservoir NAPPE a pour but de reproduire les étiages.

Ceci complète les termes du bilan de l'eau sur la partie terrestre. Le bilan en eau sur la partie eau libre s'évalue à l'aide du réservoir LACS et MARÉCAGES. Les écoulements issus de ce réservoir dépendent du niveau d'eau, de l'apport qui

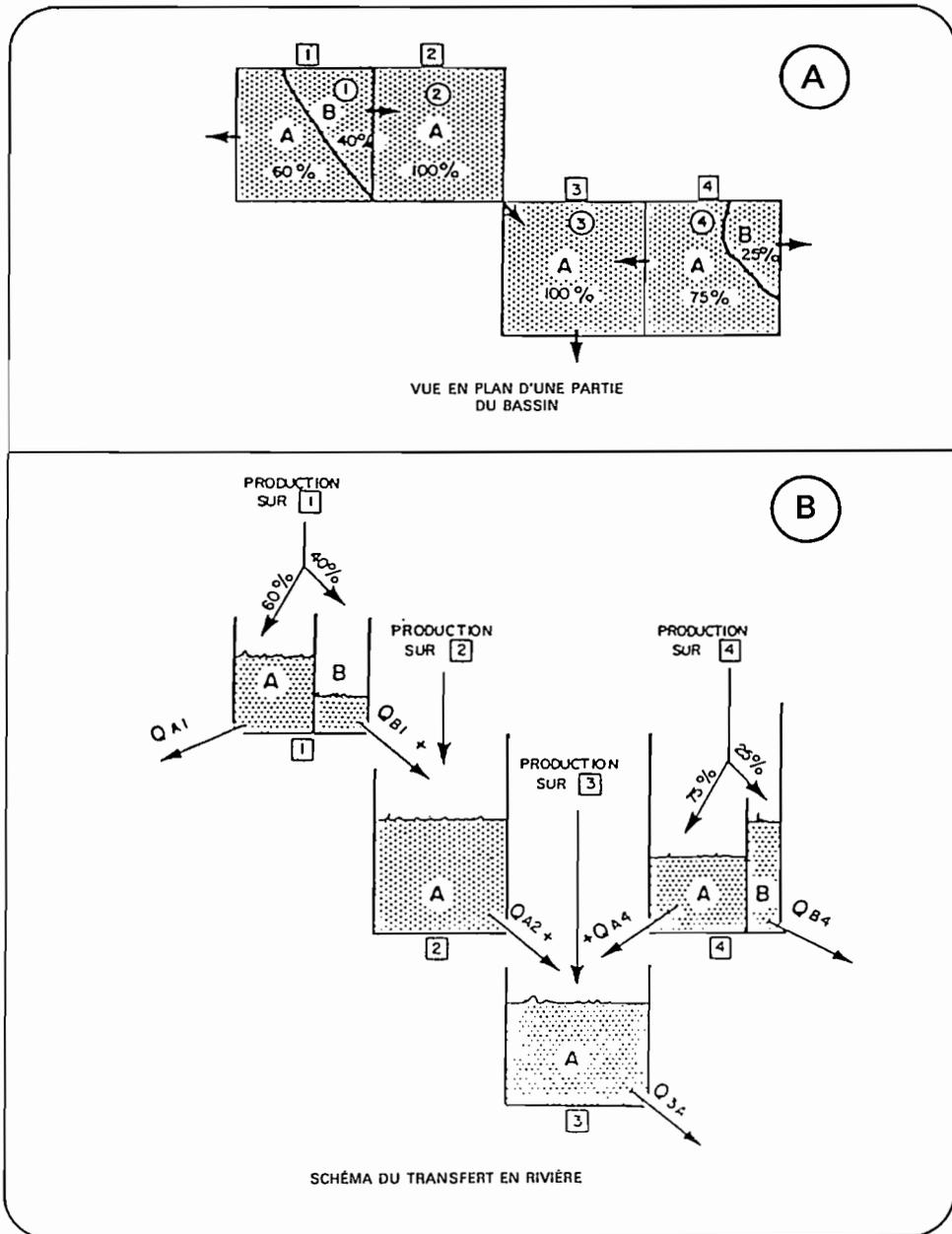


Figure 3. Schématisation de la fonction de transfert.

est la précipitation ajoutée à la fonte, de l'évaporation, du coefficient de vidange et de la hauteur de l'orifice.

La hauteur et les coefficients de vidange de chaque orifice sont fixés à l'aide des cartes de données du modèle. Le calage du modèle a pour but de déterminer les valeurs de ces paramètres pour reproduire le mieux possible les débits mesurés.

Fonction de transfert

La fonction de production qui vient d'être décrite aboutit à l'obtention d'un volume d'eau disponible pour le transfert en rivière. Ce transfert est effectué de carreau partiel à carreau partiel.

Le volume d'eau disponible sur chaque carreau partiel est obtenu en multipliant le volume d'eau produit sur le carreau entier par le pourcentage de superficie du carreau partiel considéré. Ce volume est ajouté aux volumes entrant dans ce carreau depuis le ou les carreaux partiels directement en amont. Le volume résultant devient le volume disponible pour le transfert vers le carreau immédiatement en aval. La figure 3 montre la schématisation de la fonction de transfert.

Le volume V_i étant le volume emmagasiné dans le carreau partiel i , il se vidangera dans le carreau partiel immédiatement en aval d'une quantité v_i proportionnelle, d'une part, au volume V_i et, d'autre part, à un coefficient de transfert propre au carreau partiel i .

Le coefficient de transfert de chaque carreau partiel est relié aux caractéristiques hydrauliques prépondérantes de l'écoulement, à savoir la capacité d'amortir l'onde par emmagasinement dans le réseau. Un bon index de cette capacité d'amortissement sur un carreau partiel est la superficie d'eau libre sur ce carreau. Un grand lac, par exemple, amortit l'écoulement; cependant, son influence dépend également de la superficie du bassin versant en amont. Un lac de 10 km², par exemple, a peu d'influence sur l'onde de crue d'un bassin versant de 5 000 km². Par contre, si le bassin versant est de 100 km², ce lac devient très important. Le modèle CEQUEAU calcule le coefficient de transfert de chaque carreau partiel en considérant la superficie couverte d'eau sur le carreau partiel et la superficie en amont de ce carreau à l'aide de l'équation suivante :

$$XKT_i = 1 - \exp \left\{ \frac{EXXKT \times SA_i}{SL_i} \times \frac{100}{CEKM2} \right\}$$

où XKT_i : coefficient de transfert du carreau partiel i pour le pas de temps d'une journée.

$EXXKT$: paramètre d'ajustement du coefficient de transfert, la valeur de ce paramètre étant déterminée par essai et erreur lors du calage du modèle.

SA_i : superficie (km²) du bassin versant en amont du carreau SL_i : superficie (km²) d'eau sur le carreau partiel i .

$CEKM2$: superficie (km²) des carreaux entiers.

Compte tenu que cette méthode de transfert peut être erronée pour des carreaux partiels particuliers (un grand lac ou encore une section en travers particulière),

le modèle permet une solution plus rigoureuse qui consiste à introduire, d'une part, la courbe d'emmagasinement en fonction de la cote et, d'autre part, la loi de vidange de l'exutoire. Le modèle permet également de prendre en considération des barrages existants ou prévus en introduisant les principales caractéristiques des retenues et le mode d'exploitation.

Calage du modèle

L'application d'un modèle paramétrique à un bassin versant nécessite l'ajustement des paramètres et constantes afin que le modèle reproduise le mieux possible les débits observés; cette opération est appelée « calage du modèle ».

Les paramètres et constantes utilisés par le modèle CEQUEAU (Tableau I) peuvent être groupés suivant les différentes parties du cycle hydrologique dans lesquelles ils interviennent. Ces paramètres sont de trois types différents selon qu'ils sont déterminés par essai ou erreur, par la physique du phénomène ou considérés comme constantes déterminées à l'aide des caractéristiques hydrologiques et physiographiques.

Notons que la schématisation du sol sous forme de différents réservoirs est conçue de façon à permettre la simulation de régime hydrologique très différente. Toutefois, si le régime est simple, on peut alléger cette schématisation en n'utilisant pas certains orifices. Ceci limite le nombre de paramètres et facilite le calage.

L'ajustement des paramètres se fait normalement par essai et erreur, c'est-à-dire analyse des résultats précédents et modification des paramètres pour améliorer les résultats; ceci est répété jusqu'à ce que les débits simulés soient comparables aux débits observés.

L'évaluation de la qualité des résultats d'une simulation consiste à vérifier si chacune des caractéristiques des écoulements observés est bien reproduite. Dans le modèle CEQUEAU, une approche semi-objective a été retenue. Le modèle fournit une série de tableaux et de graphiques présentant les débits observés et calculés à partir desquels on effectue les comparaisons entre les différents essais de simulation. La validité du calage est évaluée à partir de la comparaison des éléments suivants :

- les débits moyens annuels et mensuels observés et calculés;
- le synchronisme des débits observés et calculés;
- les crues observées et calculées (débits de pointe, volumes, formes);
- les étiages observés et calculés.

Les critères globaux calculés par le modèle sont : le coefficient de corrélation; le coefficient de Nash⁽¹⁾.

(1) Nash J.E. and Sutcliffe J.V. (1970). « Riverflow forecasting through conceptual model ». Journal of Hydrology, 10, 282-290.

Tableau I. Paramètres et constantes intervenant dans le modèle CEQUEAU.

Douze paramètres des réservoirs SOL-NAPPE-MARAIS :

CIN	(a)	coefficient d'infiltration du réservoir SOL au réservoir NAPPE
CVMAR	(a)	coefficient de vidange du réservoir LACS et MARAIS
CVNB	(a)	coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange basse)
CVNH	(a)	coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange haute)
CVSB	(a)	coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange basse)
CVSI	(a)	coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange intermédiaire)
HINF	(a)	seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE
HINT	(a)	seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL
HMAR	(a)	seuil de vidange du réservoir LACS et MARAIS
HNAP	(a)	seuil de vidange haute du réservoir NAPPE
HRIMP	(a)	hauteur de précipitation pour qu'il y ait ruissellement sur des surfaces imperméables
HSOL	(a)	hauteur du réservoir SOL

Sept paramètres régissant la fonte de neige :

STRNE	(b)	seuil de transformation pluie-neige
TFC	(b)	taux de fonte en forêt
TFD	(b)	taux de fonte en clairière
TSC	(b)	seuil de température de fonte en forêt
TSD	(b)	seuil de température de fonte en clairière
TTD	(b)	coefficient de déficit calorifique de la neige
TTS	(b)	seuil de mûrissement du stock de neige

Quatre paramètres qui gouvernent l'évapotranspiration :

EVNAP	(a)	pourcentage d'évapotranspiration pris dans le réservoir NAPPE
HPOT	(a)	seuil de prélèvement de l'eau à taux potentiel
XAA	(b)	exposant de la formule de Thornwaite
XIT	(b)	valeur de l'index thermique de Thornwaite

Un paramètre et une constante du transfert :

EXXKT	(a)	paramètre d'ajustement du coefficient de transfert
ZN	(c)	temps de concentration du bassin

Divers paramètres et constantes :

COET	(b)	coefficient de correction des températures avec l'altitude
COEP	(b)	coefficient de correction des précipitations avec l'altitude
FACT	(a)	facteur modifiant les précipitations moyennes sur un ensemble de carreaux entiers
JOEVA	(a)	variables décalant la date d'insolation potentielle maximale
JONEI	(b)	respectivement pour l'évapotranspiration et pour la neige
XINFMA	(b)	infiltration maximale par jour
XLA	(c)	latitude moyenne du bassin versant
TRI	(c)	pourcentage de surface imperméable

a : paramètre déterminé par essai et erreur; b : paramètre déterminé selon la physique du phénomène; c : constante déterminée à l'aide des caractéristiques hydrologiques et physiographiques du bassin versant.

Applications

Durant la dernière décennie, plusieurs applications sur des rivières du Québec, de la France et de l'Algérie ont été faites. Ces applications avaient pour but de vérifier ou d'améliorer si nécessaire, les principales fonctions du modèle pour des régimes hydrologiques très différents ou encore de répondre à des besoins précis tels que l'estimation des crues maximales possibles des principales rivières du nord québécois.

Influence des caractéristiques physiographiques

Un premier exemple d'application montre les simulations de deux bassins versants de superficie comparable, l'un avec des pentes fortes et boisées et peu de lacs tandis que le second a une pente faible et de nombreux lacs (Tableau II).

Tableau II. Caractéristiques physiographiques et hydrologiques des bassins versants des rivières Kénogami et Harricana.

Caractéristiques	Nom du bassin	
	Kénogami	Harricana
Bassin versant (km ²)	3 393	3 688
Altitude moyenne (m)	578	325
Pente moyenne (%)	1,8	0,3
Lacs et marais (%)	3,0	23,0
Forêts (%)	97,0	72,0
Débit maximal moyen annuel (m ³ /s)	462	189
Erreur selon NASH (Journalier)	0,85	0,92
Module spécifique (m ³ /s)	0,75	0,59

Les résultats obtenus sur ces deux bassins (figure 4) montrent clairement que les différents algorithmes qui forment le modèle rendent compte avec suffisamment d'exactitude des processus physiques de la formation et du transfert de l'écoulement en rivière, même si les caractéristiques physiographiques sont très différentes.

Transposabilité du modèle

Un second exemple, montrant les résultats obtenus lors de l'ajustement du modèle CEQUEAU au bassin de la rivière Orne en France, peut être utilisé pour montrer la transposabilité du modèle. La première simulation de ce bassin a été faite en utilisant les valeurs des paramètres de la rivière Harricana au Québec. Les simulations obtenues (figure 5) montrent des résultats satisfaisants sauf pour l'automne où les crues calculées sont beaucoup plus fortes que celles observées. Les simulations finales (figure 6) ont été obtenues en modifiant la hauteur du

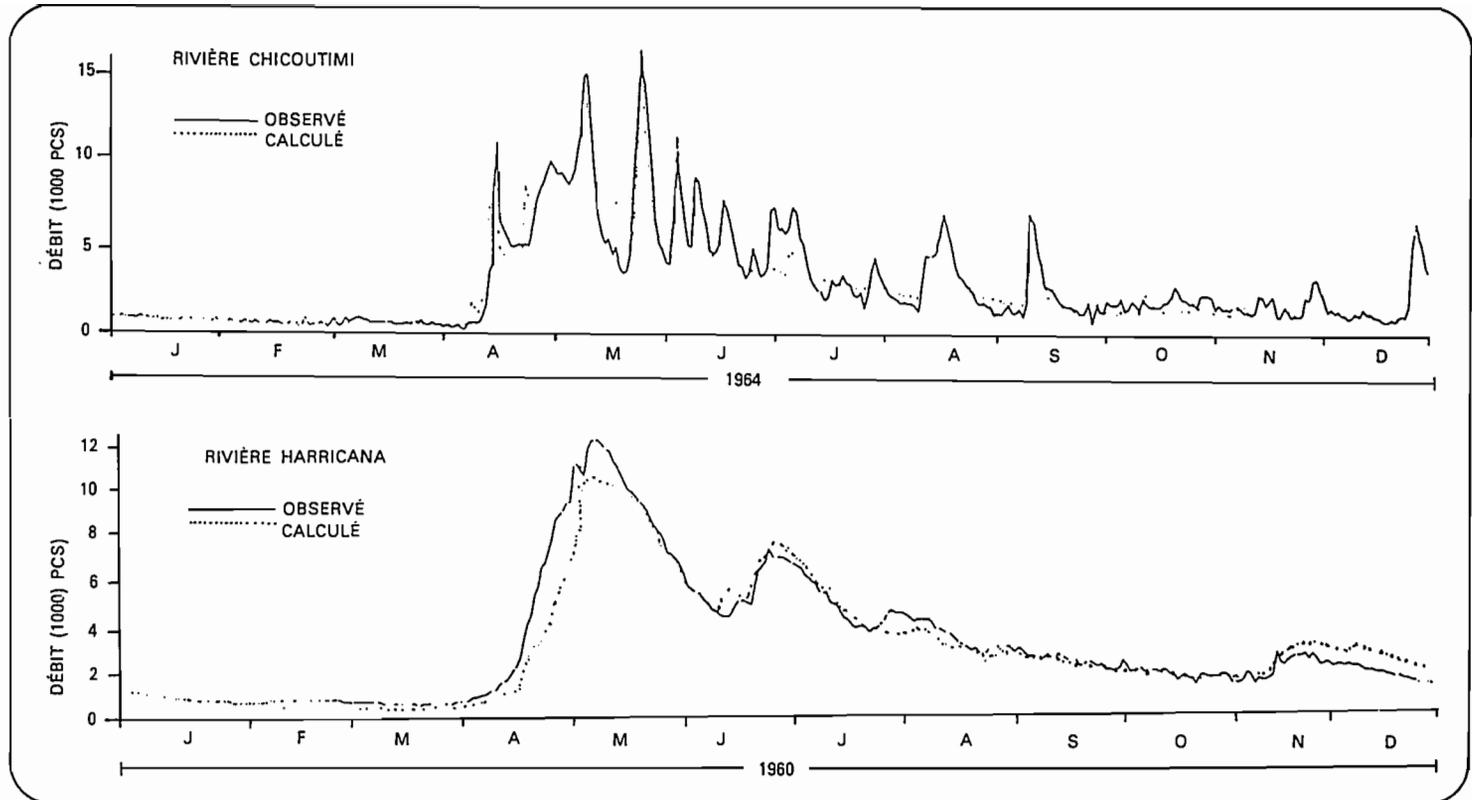


Figure 4. Résultats des simulations des bassins versants des rivières Chicoutimi et Harricana.

Modèle hydrologique CEQUEAU

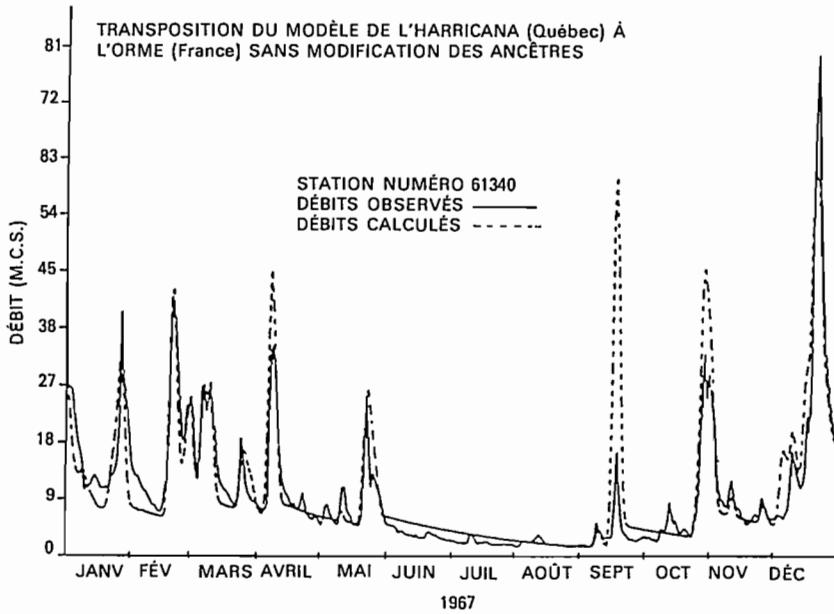


Figure 5. Débits observés et débits calculés sur le bassin versant de la rivière Orne (France).

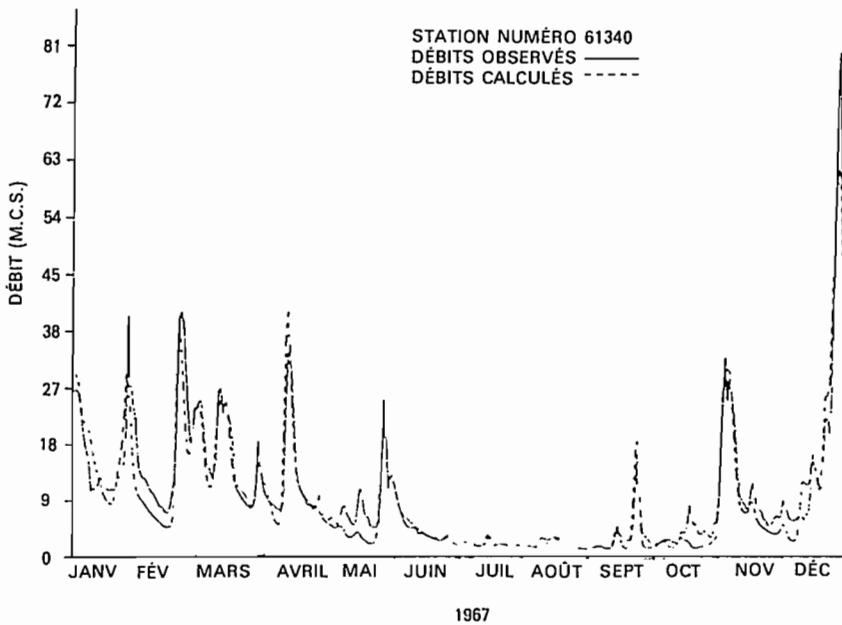


Figure 6. Débits observés et débits calculés sur le bassin versant de la rivière Orne (France).

réservoir SOL pour que les fortes précipitations d'automne soient utilisées à remplir les réserves et non à ruisseler.

Application en zone semi-aride

Le troisième exemple d'application simule les débits de la rivière Isser-Tafna d'Algérie, pour montrer les résultats obtenus sur un bassin versant semi-aride. Les débits mesurés durant la période septembre 1972 à août 1975 sont disponibles sur le bassin versant principal qui a une superficie de 1 223,8 km² et un sous-bassin d'une superficie de 173,9 km². Les données de huit stations météorologiques de la région ont été utilisées et quatre de celles-ci sont situées sur le bassin versant même. Le bassin versant est en région montagneuse et l'altitude varie de 384 mètres à 1 396 mètres et la précipitation moyenne pour les trois ans utilisés pour les simulations est de 630 mm.

Tableau III. Caractéristiques physiographiques et hydrologiques des bassins versants de la rivière Isser-Tafna (Algérie).

Caractéristiques	N° de station	
	# 160702	# 160601
Bassin versant (km ²)	1 224	174
Altitude moyenne (m)	828	1 184
Altitude minimum (m)	384	814
Altitude maximum (m)	1 396	1 396
Forêts (%)	14,1	24,2
Année 1972-1973		
Précipitation moyenne (mm)	676,98	742,64
Lame observée (mm)	96,62	162,60
Lame calculée (mm)	108,32	162,59
Coefficient de corrélation*	0,98	0,96
Coefficient de Nash*	0,96	0,93
Année 1973-1974		
Précipitation moyenne (mm)	611,78	724,85
Lame observée (mm)	91,67	172,15
Lame calculée (mm)	94,64	176,09
Coefficient de corrélation*	0,94	0,83
Coefficient de Nash*	0,83	0,69
Année 1974-1975		
Précipitation moyenne (mm)	604,40	664,62
Lame observée (mm)	73,07	113,16
Lame calculée (mm)	75,01	133,62
Coefficient de corrélation*	0,94	0,82
Coefficient de Nash*	0,82	0,91

* Coefficients calculés à l'échelle journalière.

Le Tableau III donne les principales caractéristiques des bassins versants et les résultats pour les trois ans de simulation.

La figure 7 montre les débits observés et calculés à la station principale pour les années 1972 à 1975 et la figure 8 montre les mêmes résultats pour le sous-bassin.

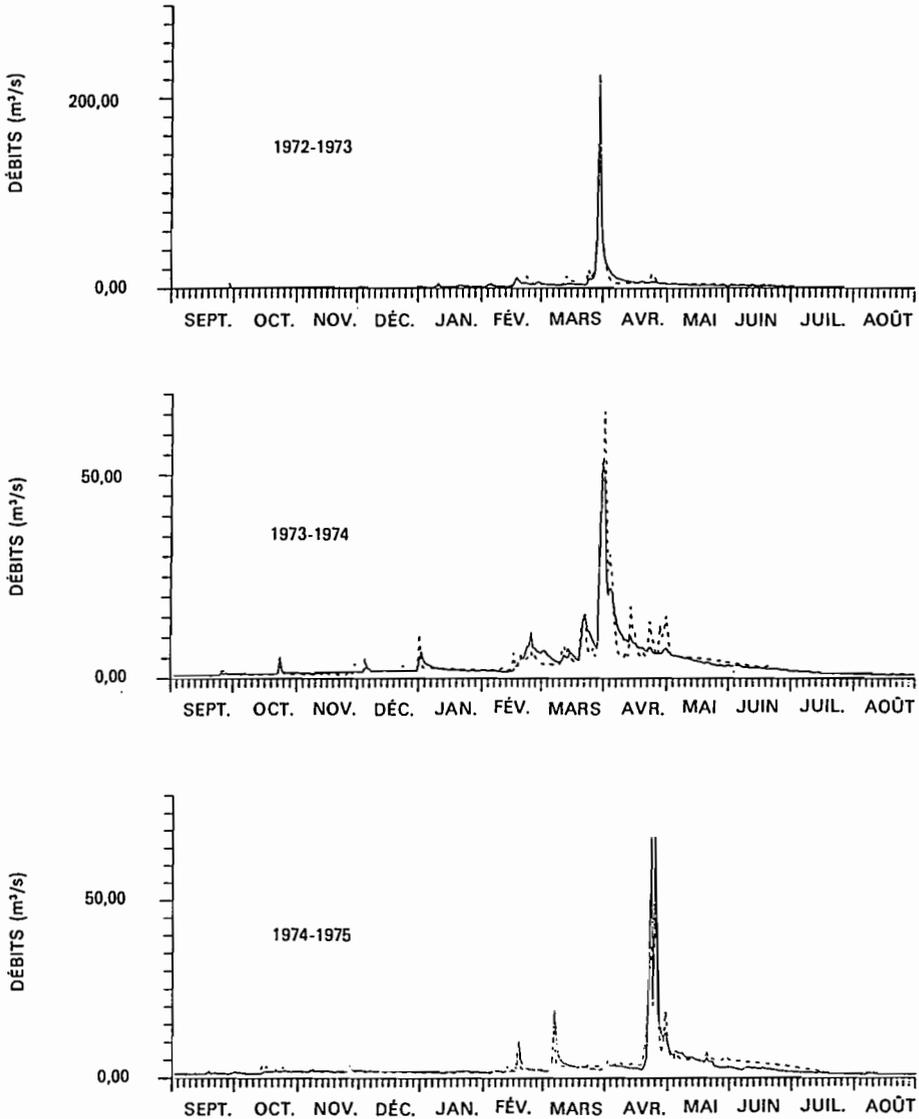


Figure 7. Débits observés et débits calculés sur le bassin versant de la rivière Isser-Tafna pour la période 1972 à 1975.

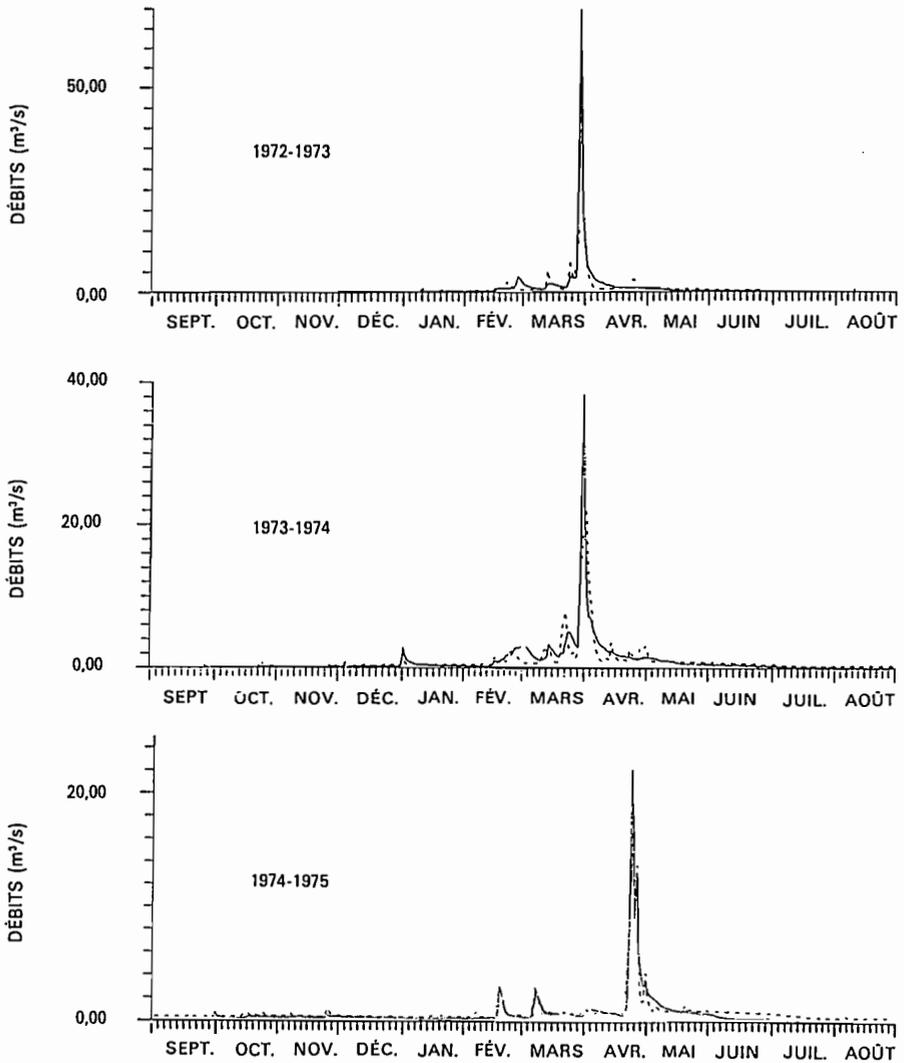


Figure 8. Débits observés et débits calculés sur le sous-bassin de la rivière Isser-Tafna pour la période 1972 à 1975.

Conclusion

En plus des quelques exemples cités précédemment montrant les possibilités du modèle hydrologique, il convient de noter l'existence de projets de recherche portant sur le développement de sous-routines de qualité couplées au modèle

CEQUEAU. Les paramètres température de l'eau, solides en suspension, oxygène dissous et demande biologique en oxygène sont développés. Des projets sur l'utilisation des données de satellite et de radar comme données d'entrée au modèle CEQUEAU sont également en cours. Le modèle est programmé en fortran et une version pour micro-ordinateur est disponible. Un programme permettant l'optimisation des principaux paramètres du modèle est également opérationnel.

Références

- Charbonneau R., Morin G., Villeneuve J.P., Ledoux E., Levassor A. (1976). Simulation des débits : l'Orne, la Dives, la Seulles, INRS-Eau (Rapport de coopération franco-québécoise). Rapport scientifique n° 72, 79 p.
- Morin G., Fortin J.P., Lardeau J.P., Sochanska W., Paquette S. (1981). Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation. INRS-Eau, rapport scientifique n° 93, 449 p.

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.

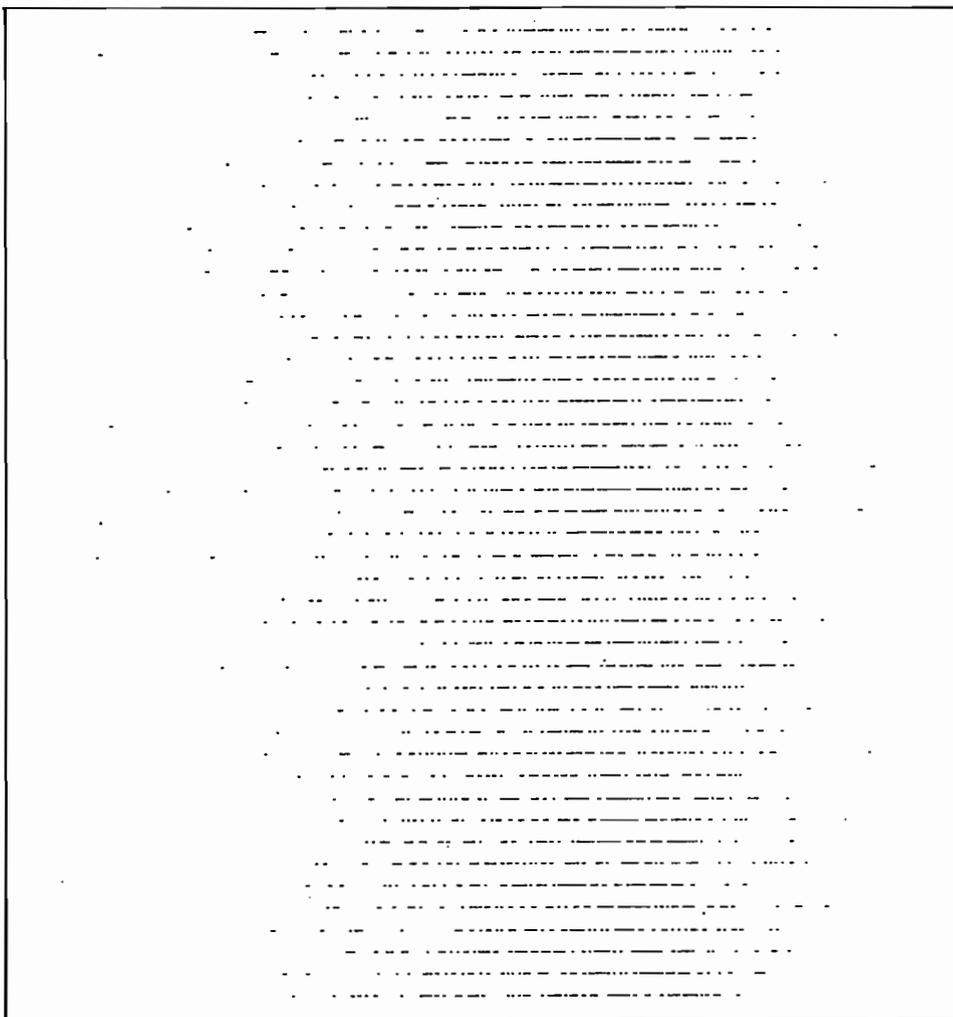


Figure 1. 45 années d'observations pluviométriques journalières à Dédougou (Burkina Faso). Chaque ligne correspond à une année d'observations. La première ligne, en trait plein, permet d'apprécier la longueur totale de l'année du 1^{er} janvier au 31 décembre. Sur les lignes suivantes représentant les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

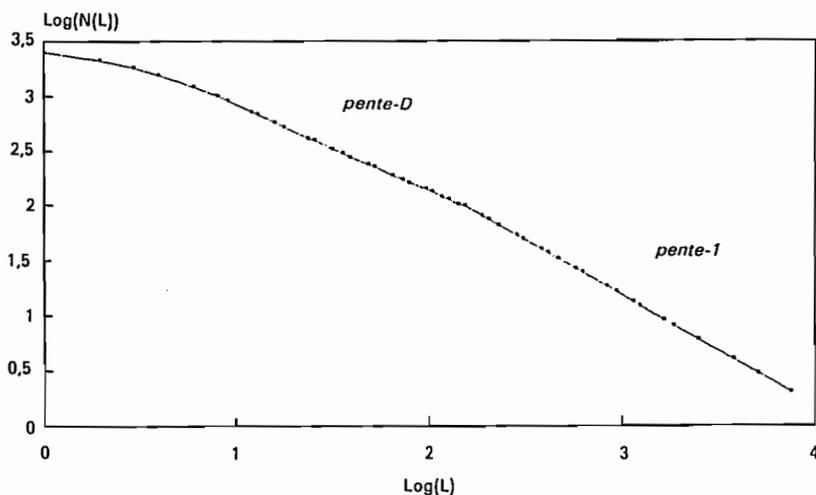


Figure 2. Station de Dédougou, seuil 0,1 mm. Variations de N en fonction de L période 1924/1964.

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 %.

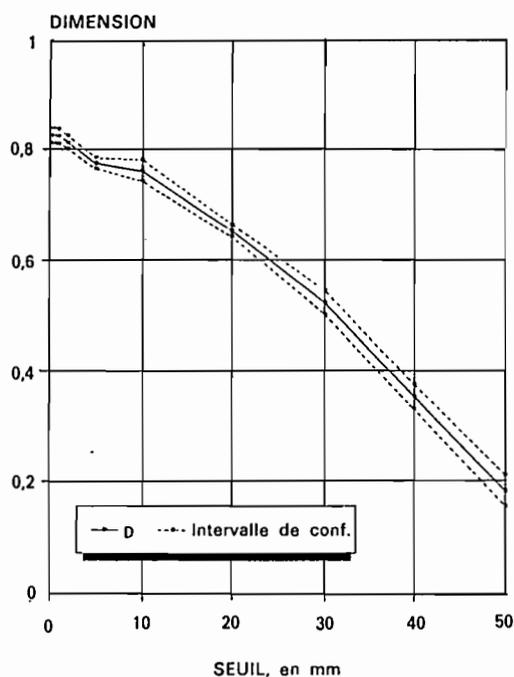


Figure 3. Station de Po. Variations de D en fonction du seuil. Période 1953/1975.

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.

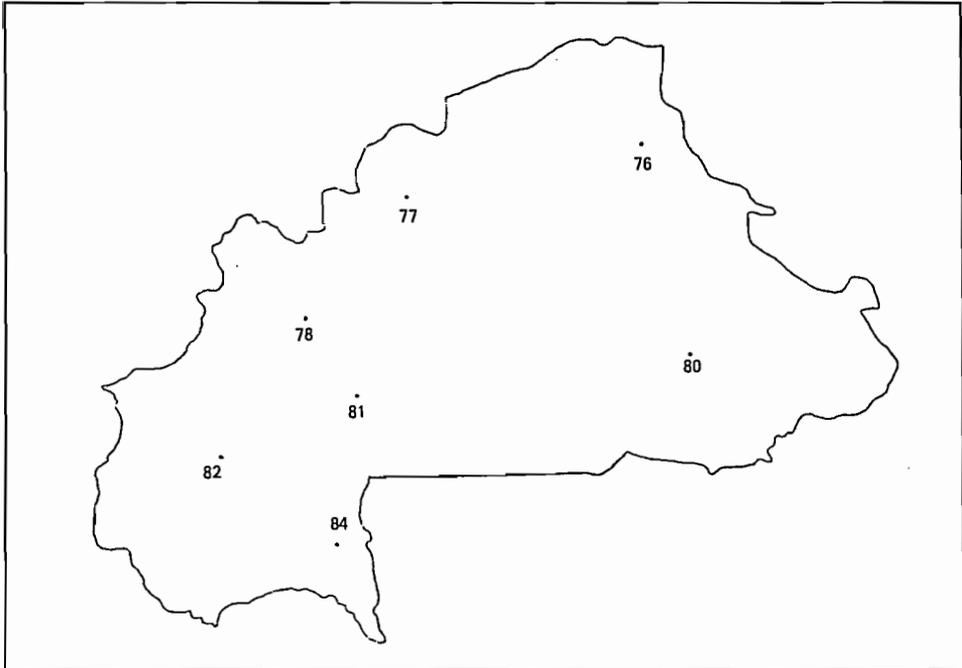


Figure 4. Carte des valeurs de D, en %, au Burkina Faso, calculée sur la période 1925/1979 pour un seuil de pluviométrie journalière de 0,1 mm.

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 trouvé puis comblé des jours, mois et années.

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 trouve 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

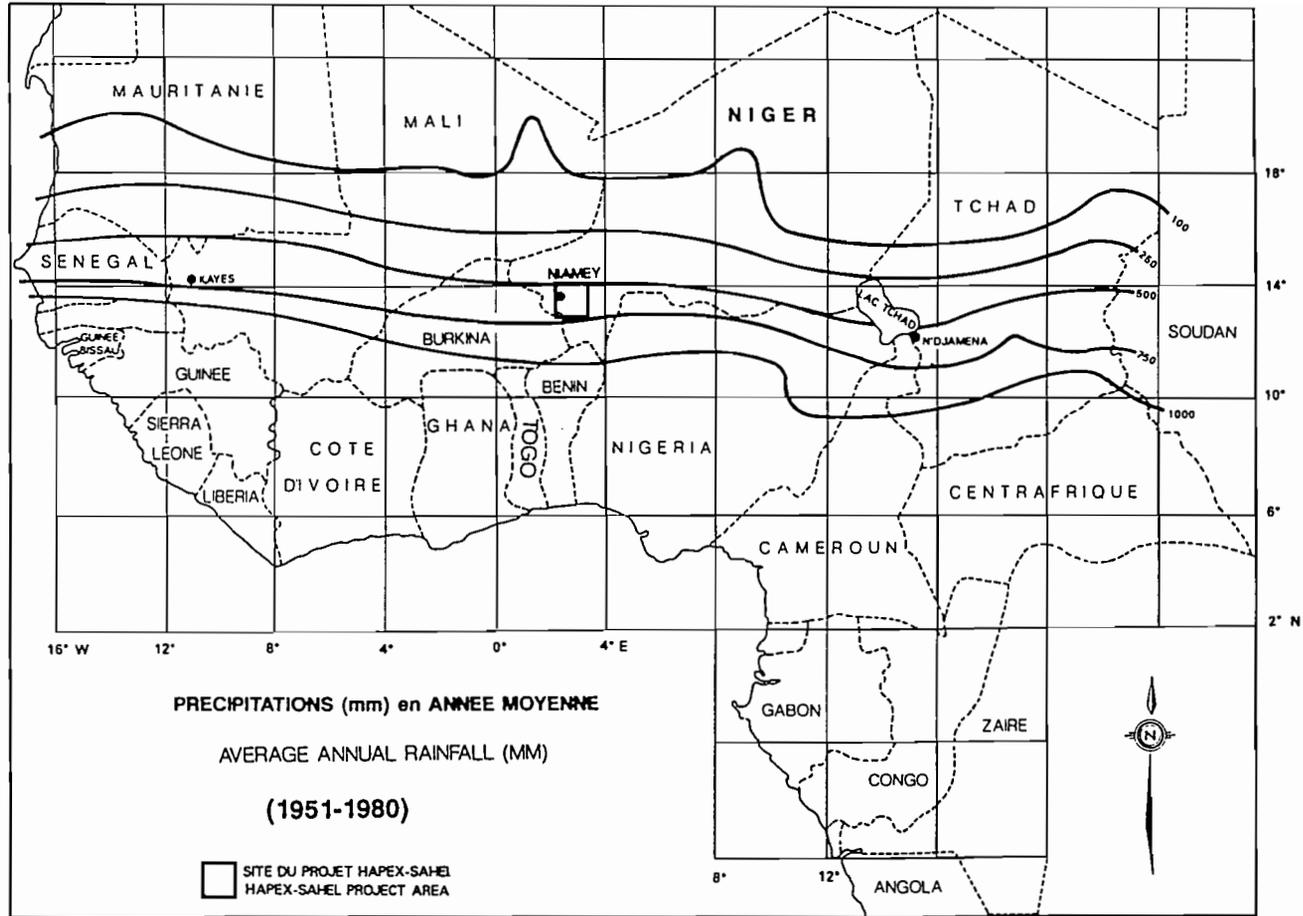


Figure 1.

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.

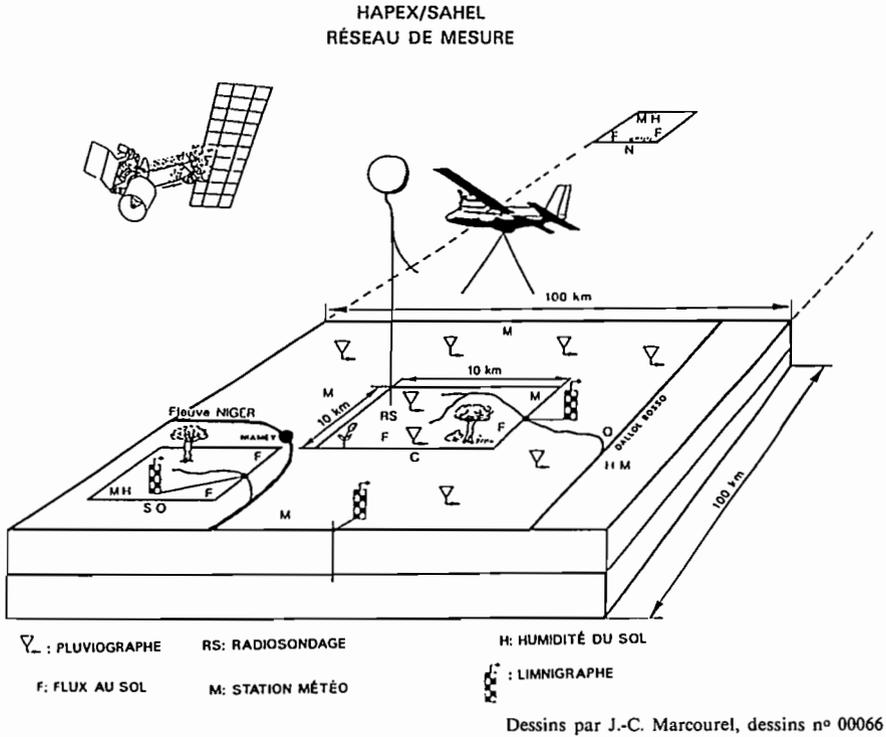


Figure 2.

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 inclura 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 réorganisation 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.

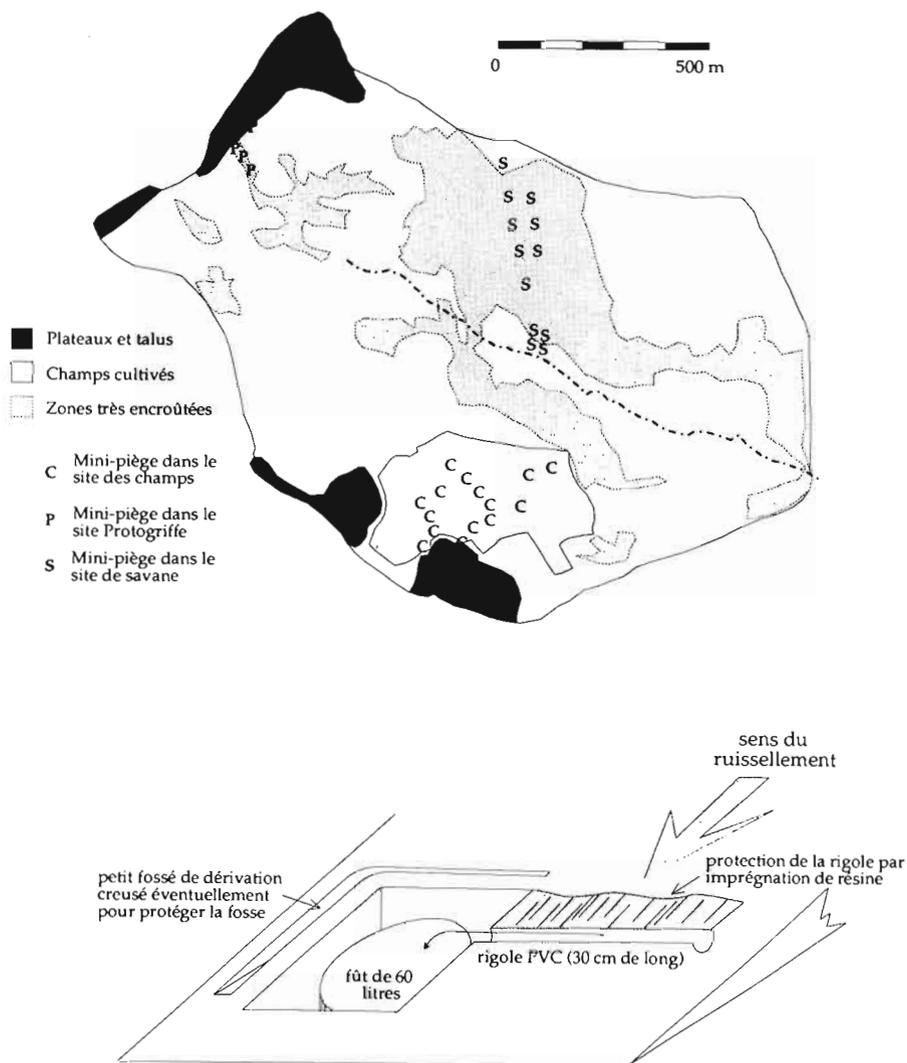


Figure 1. Installation . **1a** : schéma de localisation des mini-pièges. **1b** : schéma d'installation d'un mini-piège.

(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

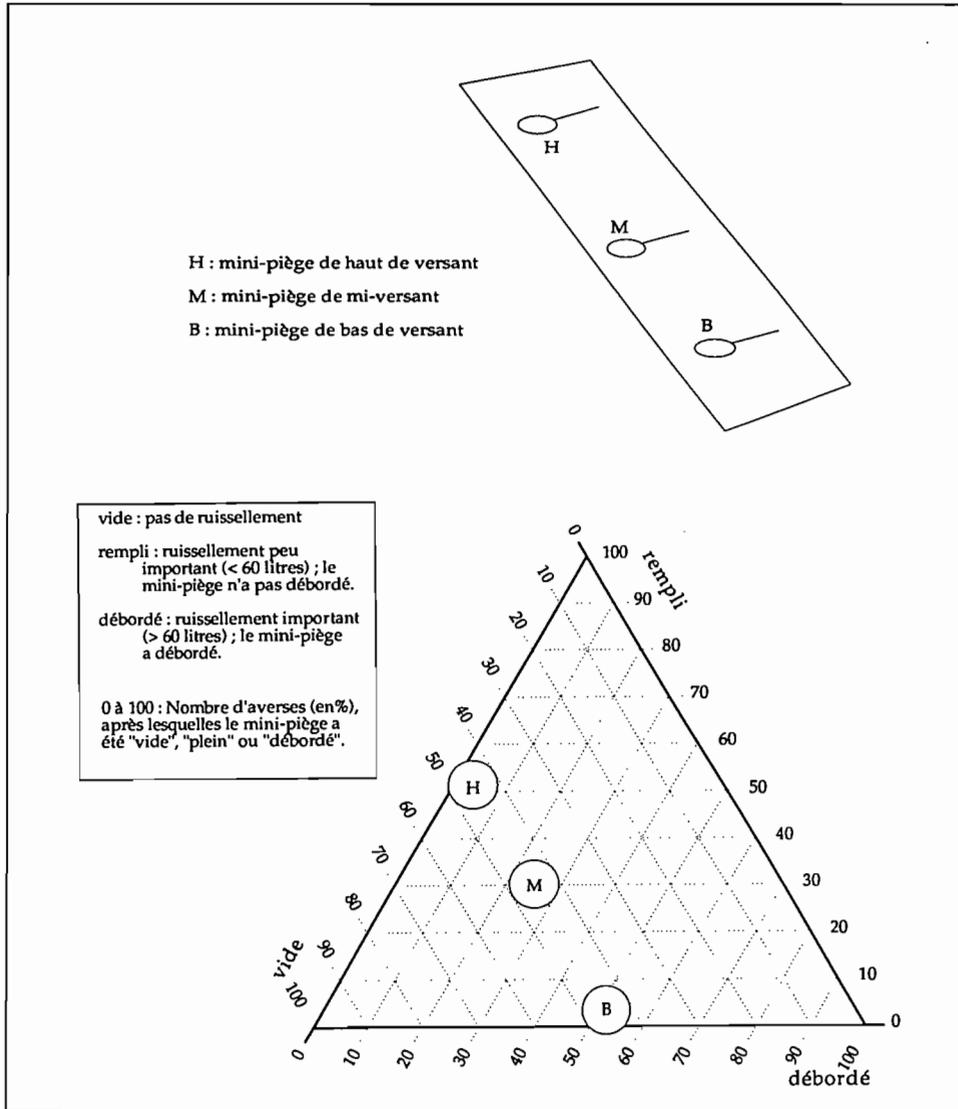


Figure 2. Schéma explicatif de la méthode d'interprétation des résultats. **2a** : un exemple de localisation pour trois mini-pièges. **2b** : présentation des résultats sur un diagramme ternaire : cas de l'exemple théorique ci-dessus.

- 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 présentée 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;

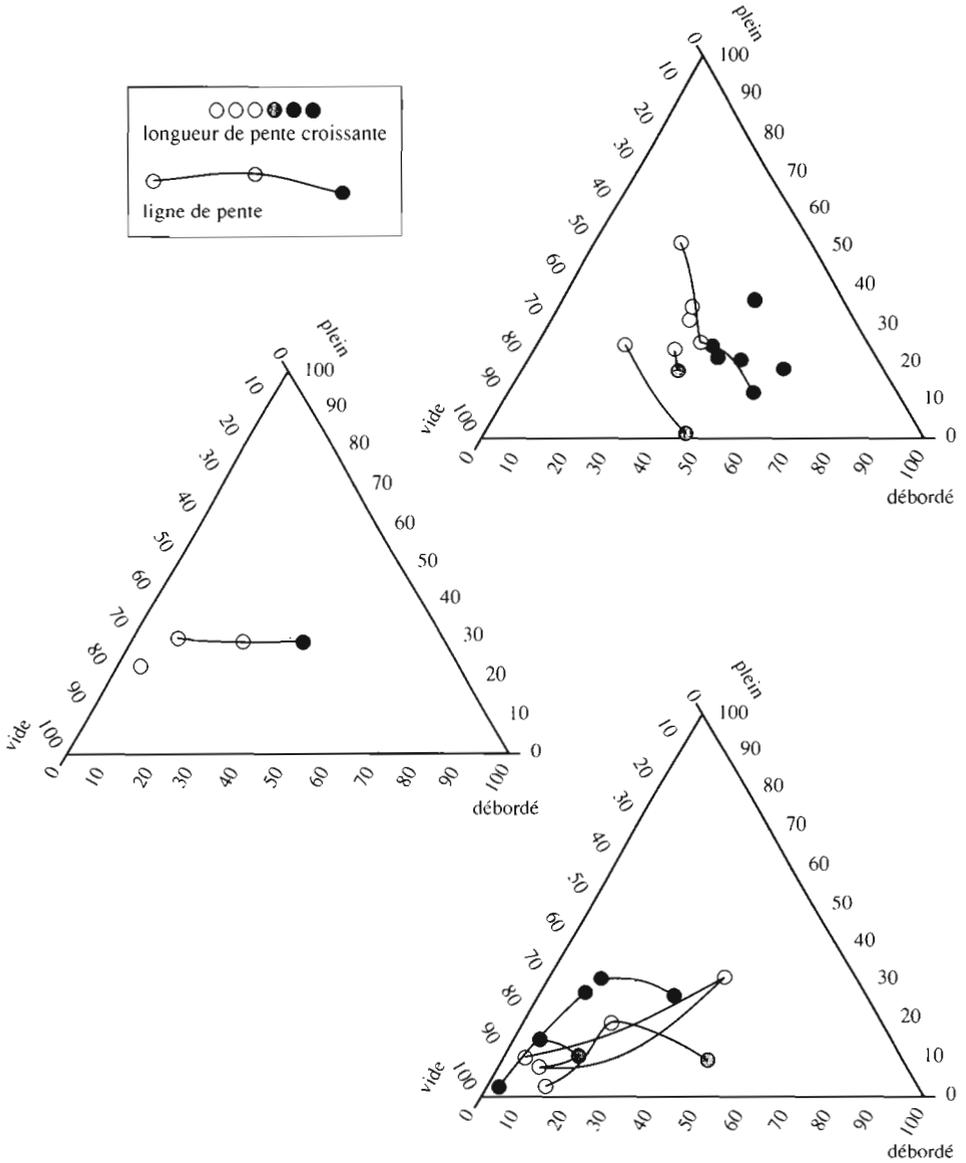


Figure 3. Résultats : 3a : site des champs. 3b : site protogriffe. 3c : site de savane.

- 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

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.

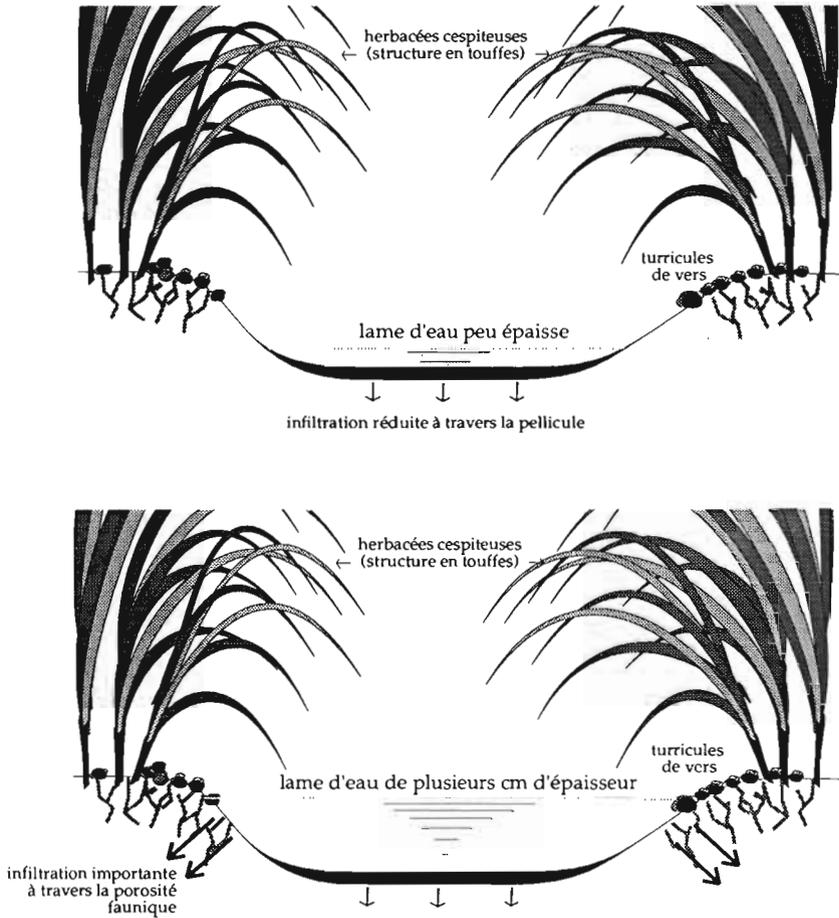


Schéma explicatif de l'influence de la hauteur de la lame d'eau sur l'infiltration, dans le cas d'une surface présentant un micro-relief important

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.

Ruissellement le long d'un versant

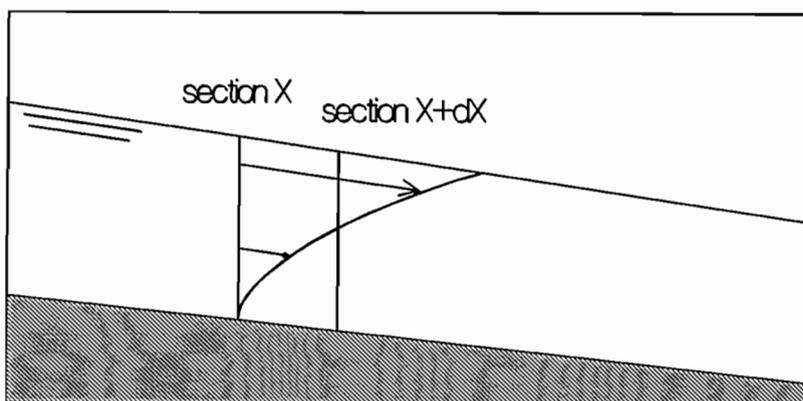


Figure 5. Déplacement d'une section X et construction de la section X + dx.

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 $\text{Max}(X)$ = plus grande distance x existant sur le versant,

$$X = \text{Max}(X) - x$$

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.

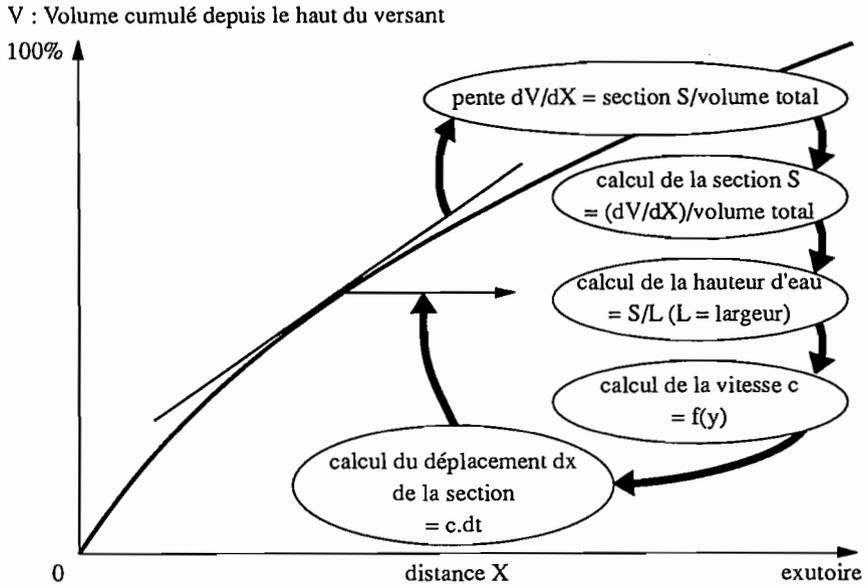


Figure 6a. Calcul du déplacement d'une section.

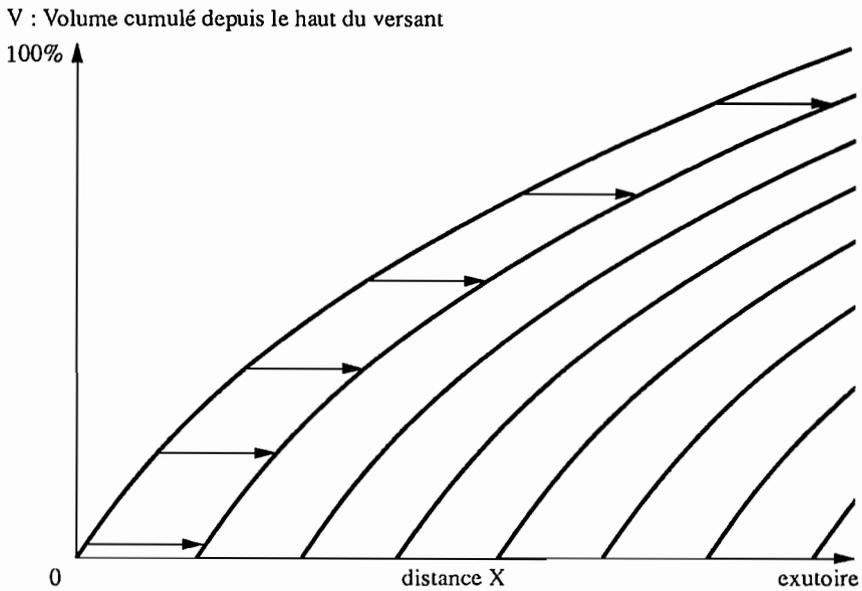


Figure 6b. Déplacement de toutes les sections.

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

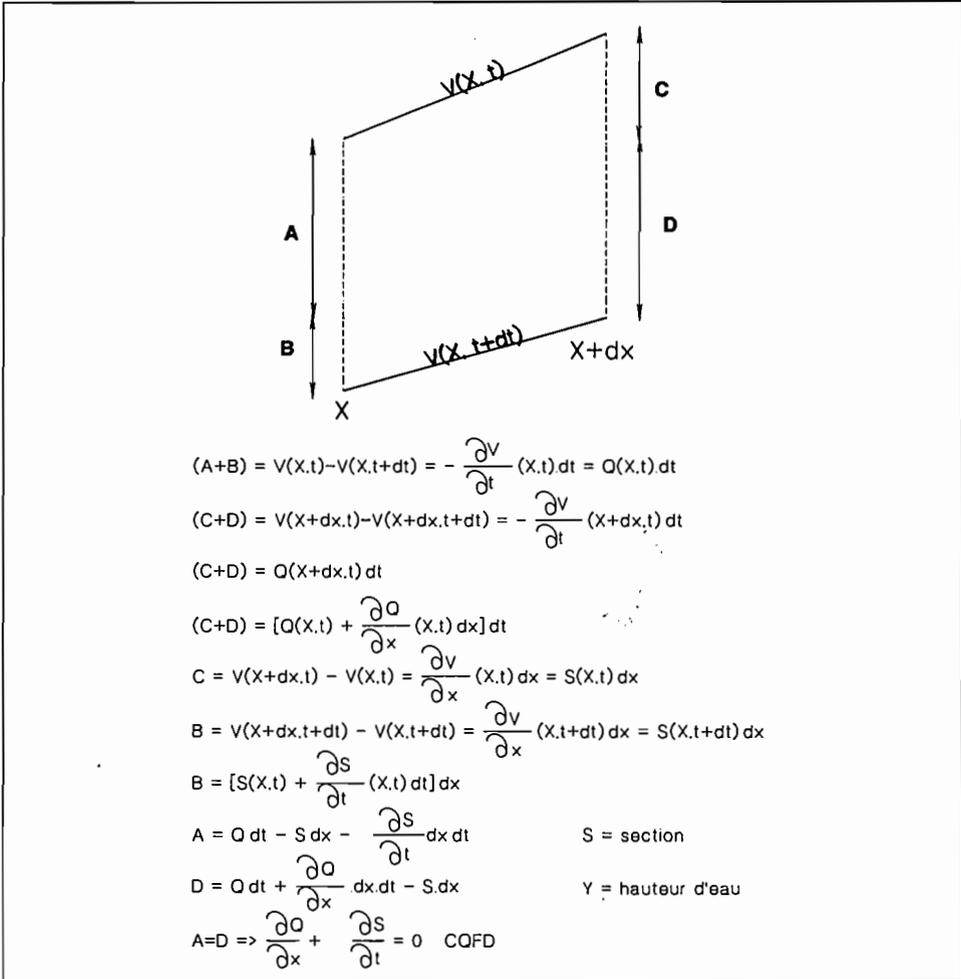


Figure 7.

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 culturels. Ceci a amené à distinguer ces deux types de milieu.

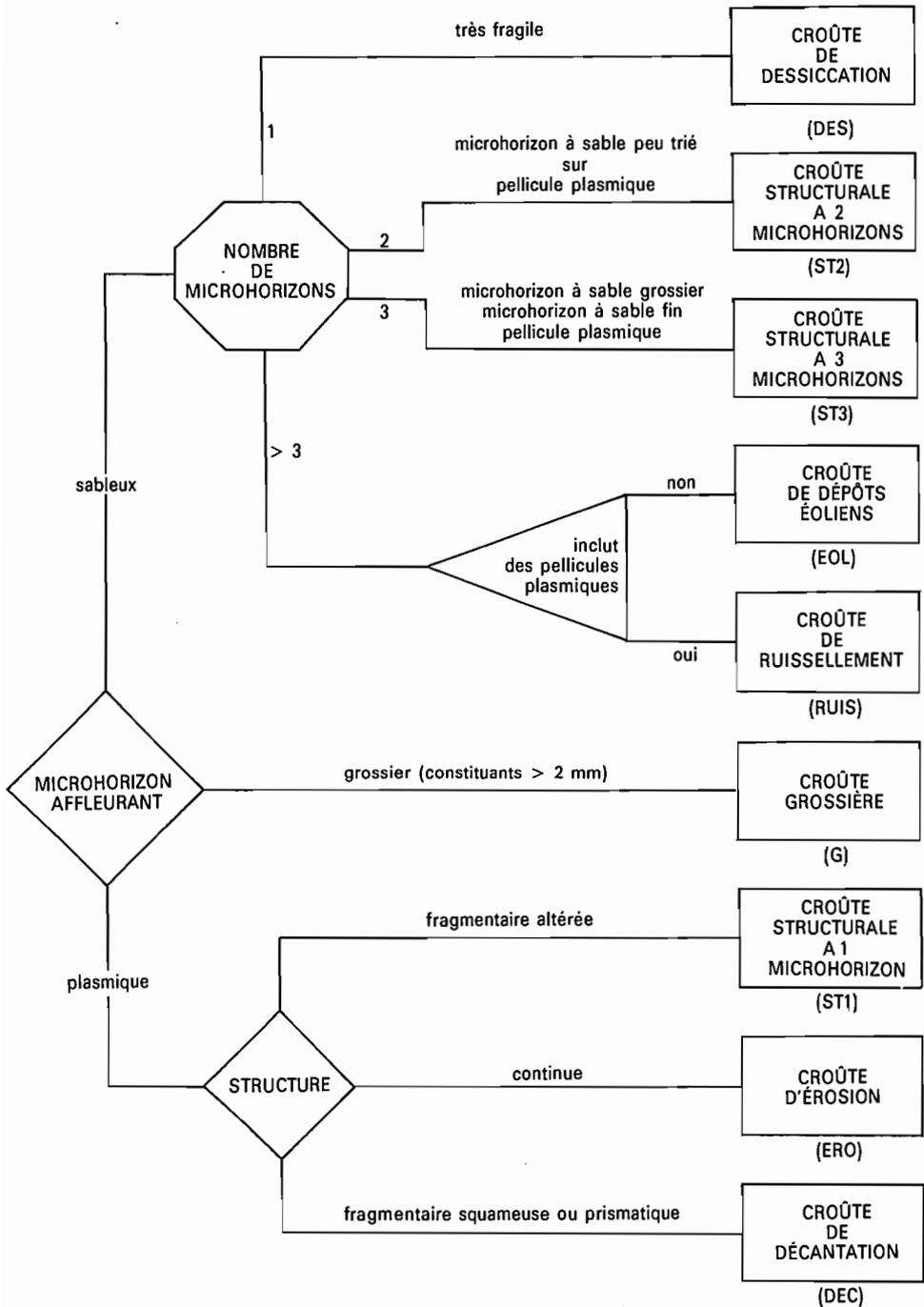


Figure 1. Clé de détermination des principales croûtes sahéniennes.

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.

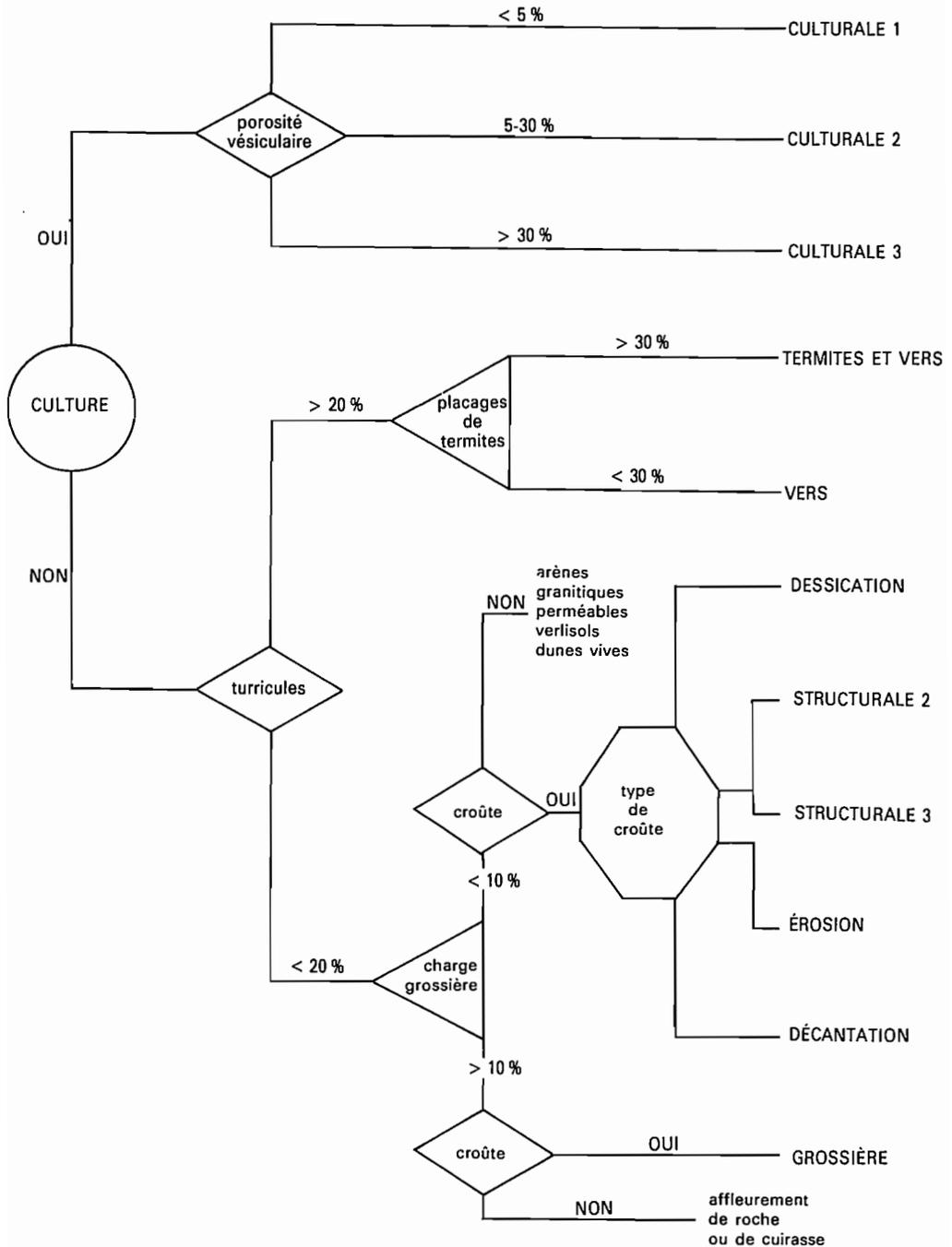


Figure 2. Clé de détermination des types de surfaces élémentaires.

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

$$Lr = 0,85 Pu + 0,01 IK + 0,003 Pu IK - 8,0$$

Lrq : lame ruisselée en mm.

Pu : hauteur de l'averse en mm.

IK : 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 IK = 0;

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

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

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

Pih = Pluie d'imbibition pour un sol très humecté (IK > 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 sahéenne, 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.

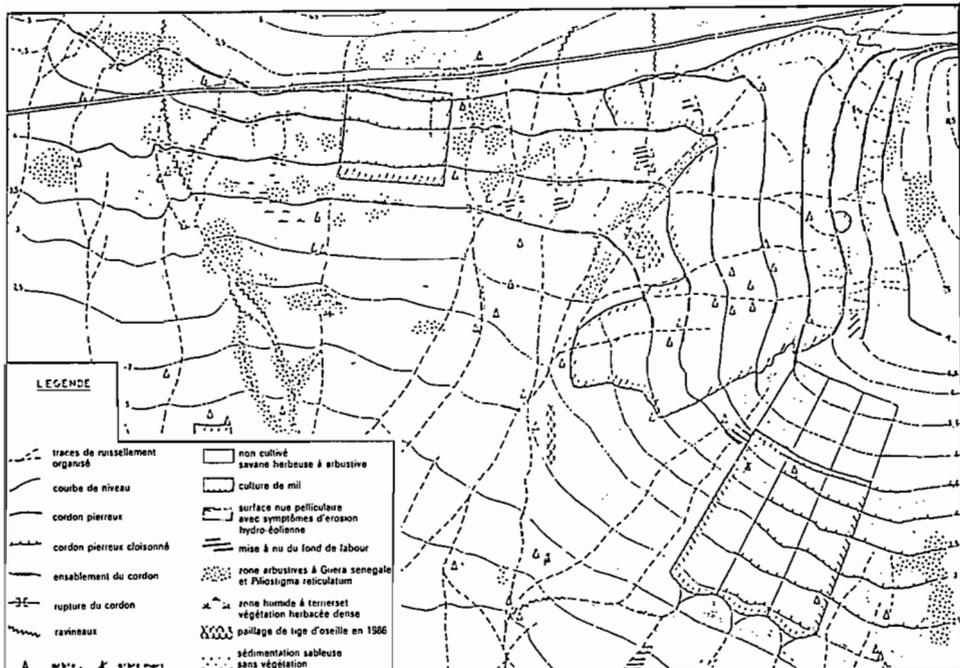


Figure 2. Carte des états de surface. Site de Samniweogo, décembre 1987.

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

Modèle de bilan hydrique :

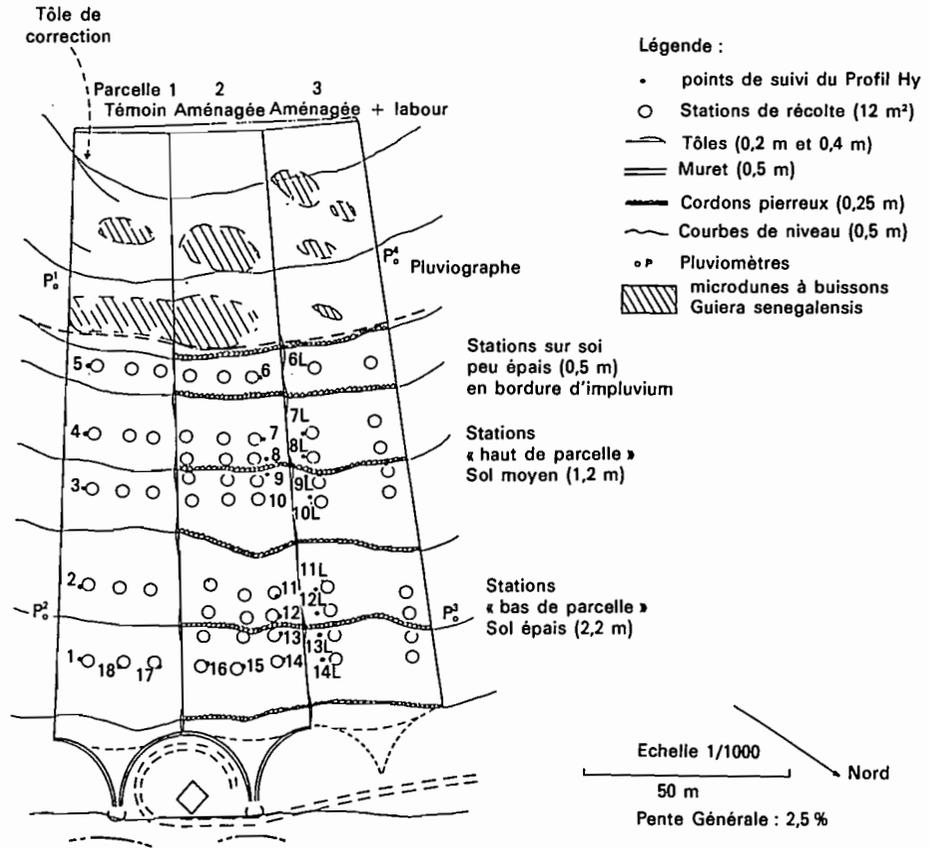
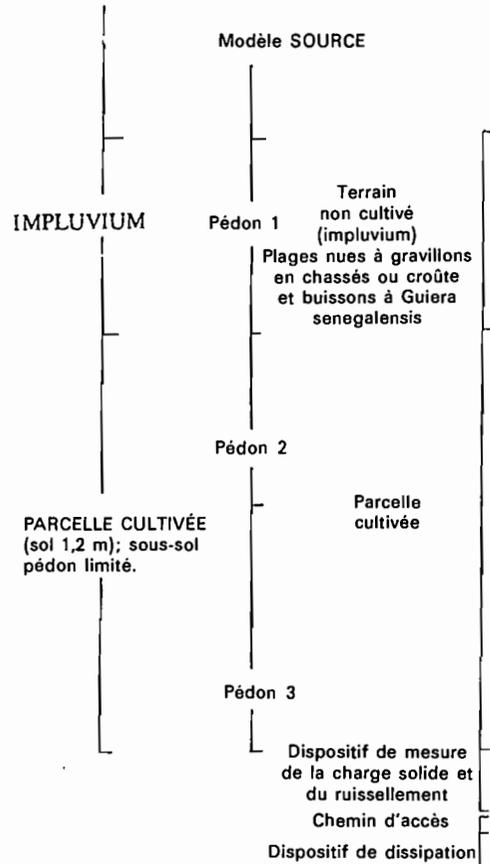


Figure 3. Plan d'ensemble de l'essai de Samniweogo (1986).

Aménagement des conditions de ruissellement

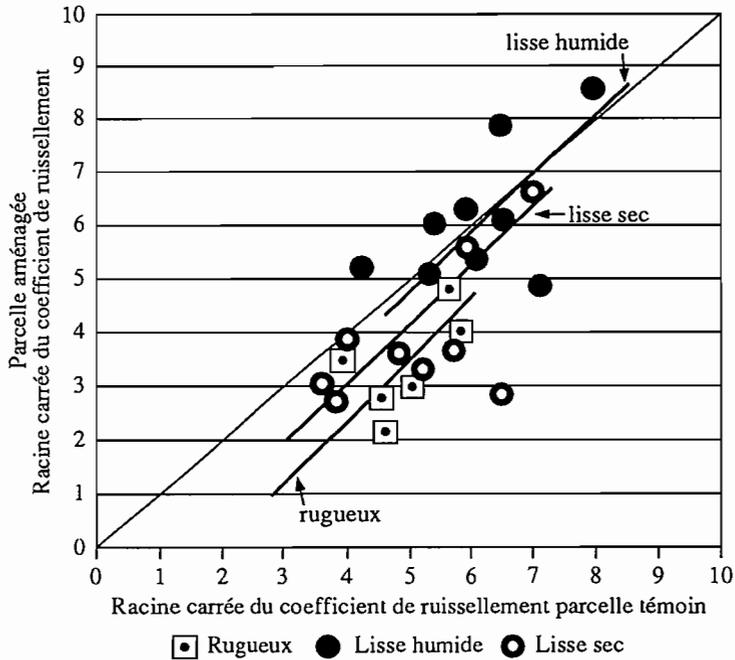


Figure 4. Comparaison des ruissellements parcelles témoin / parcelles aménagées. Pluies standard.

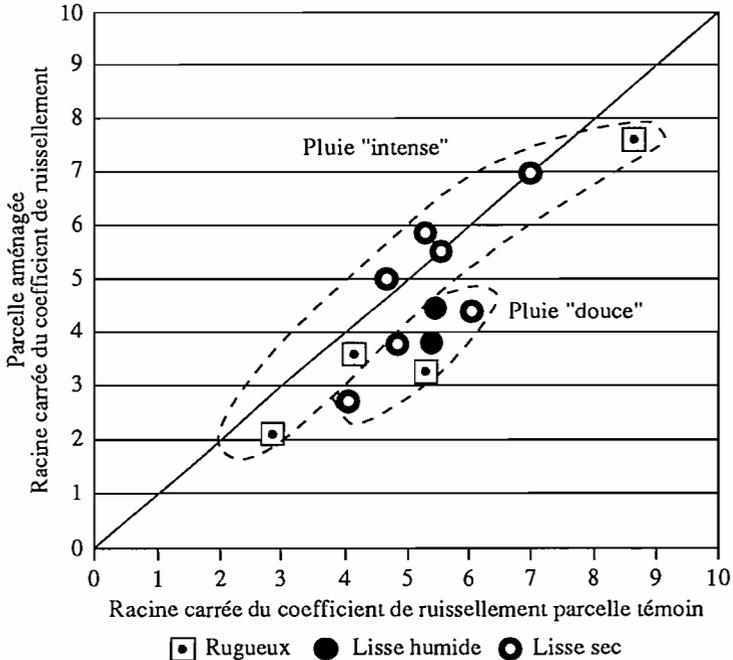


Figure 5. Comparaison des ruissellements parcelles témoin / parcelles aménagées. Autres pluies.

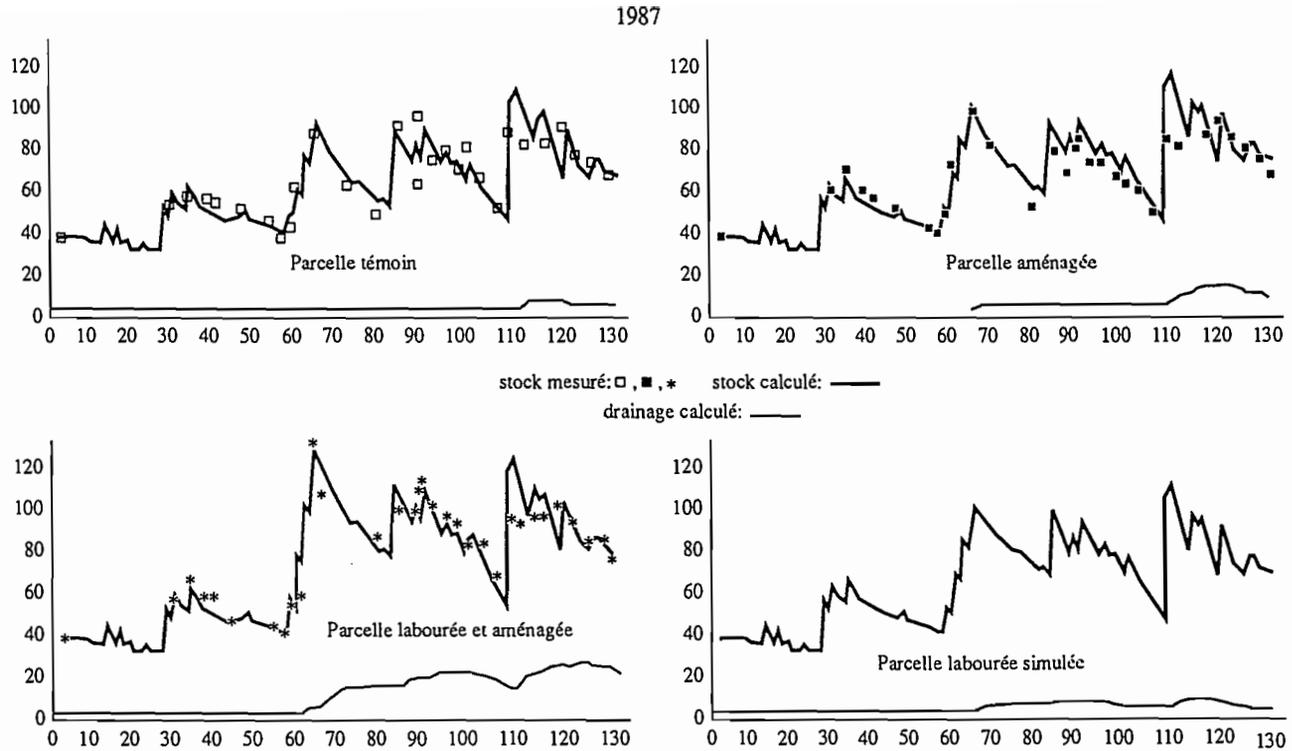


Figure 6. Stocks calculés par le modèle de bilan hydrique comparés aux mesures (moyenne de huit profils hydriques par parcelle).

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

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

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

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

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

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

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

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

Sur une période $j = 1$ jour

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

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

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

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

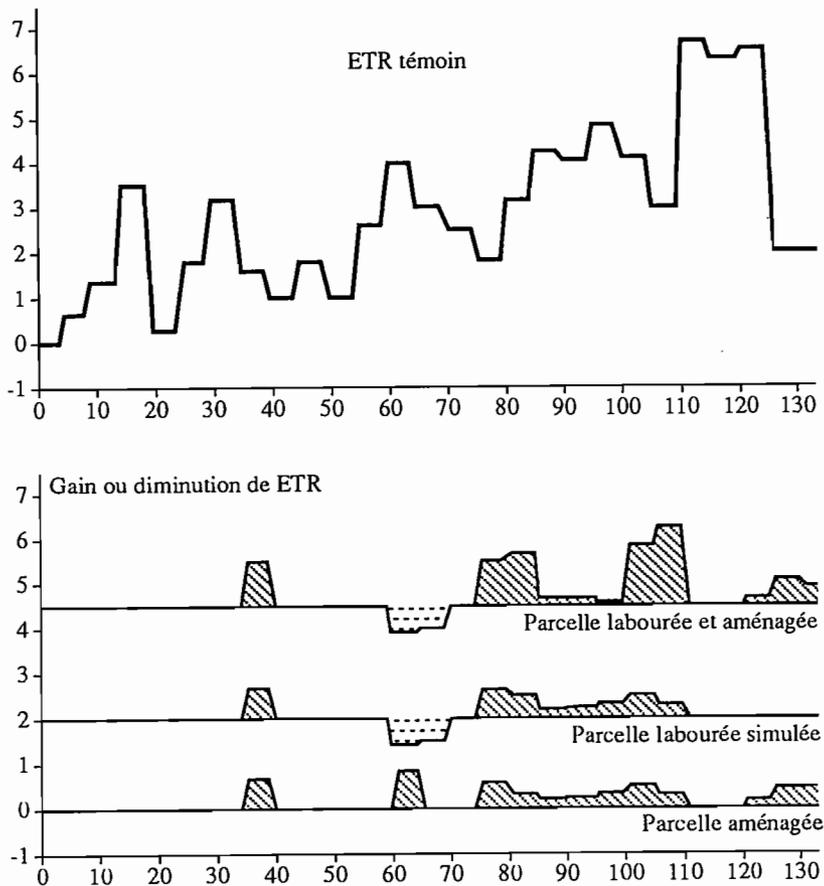


Figure 7. Comparaison des ETR des 3 parcelles réelles et d'une parcelle simulée sur modèle de bilan hydrique.

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

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

Modélisation des transferts hydriques

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

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

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

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

La représentation formelle de l'objet d'étude

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

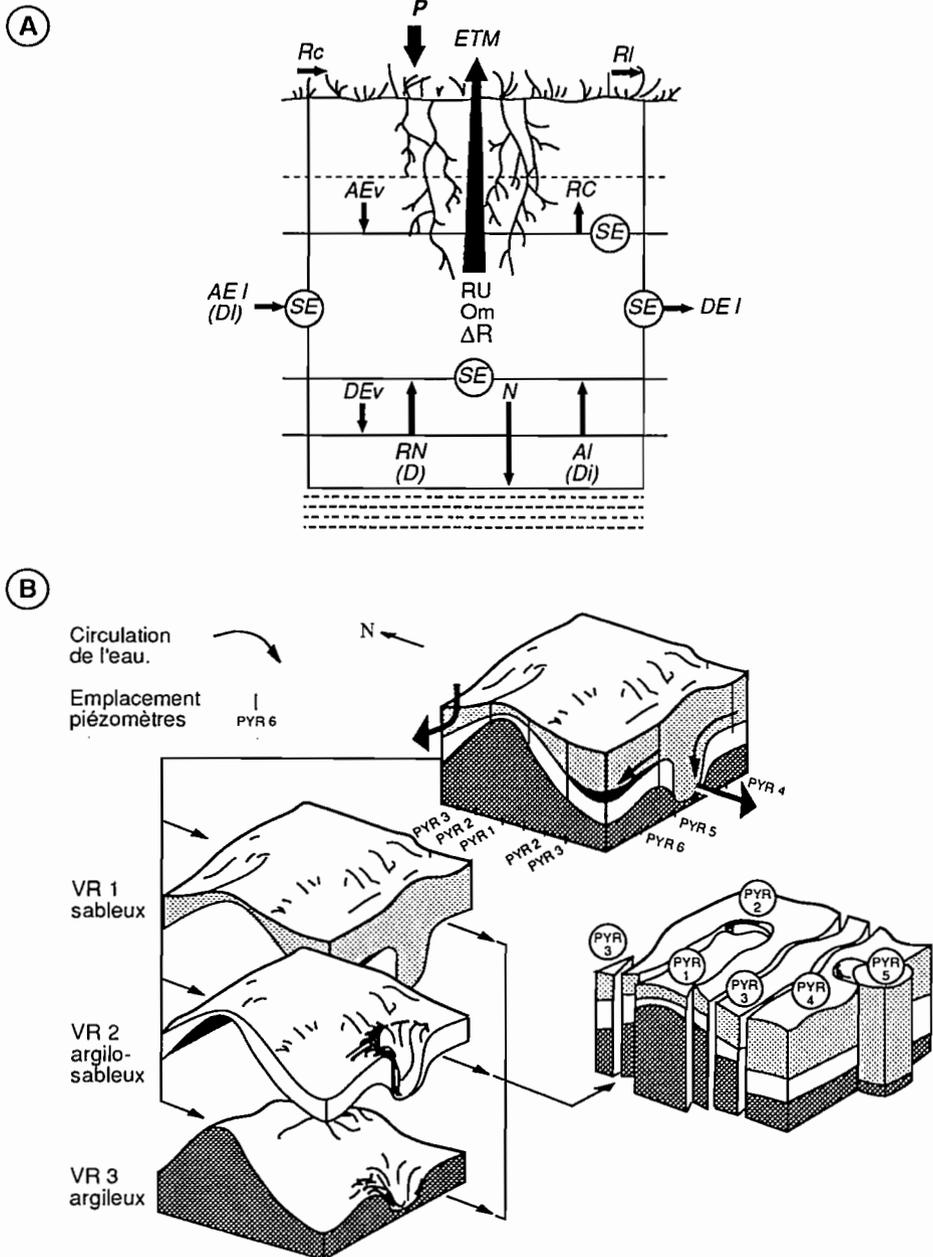


Figure 8. Représentation schématique des fonctions du modèle Source.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Application aux parcelles d'essai « Ruissellement »

Description

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

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

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

Modélisation des parcelles

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

Les caractéristiques initiales

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

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

La simulation

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

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

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

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

Aménagement des conditions de ruissellement

Tableau I. Simulation et modifications apportées.

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

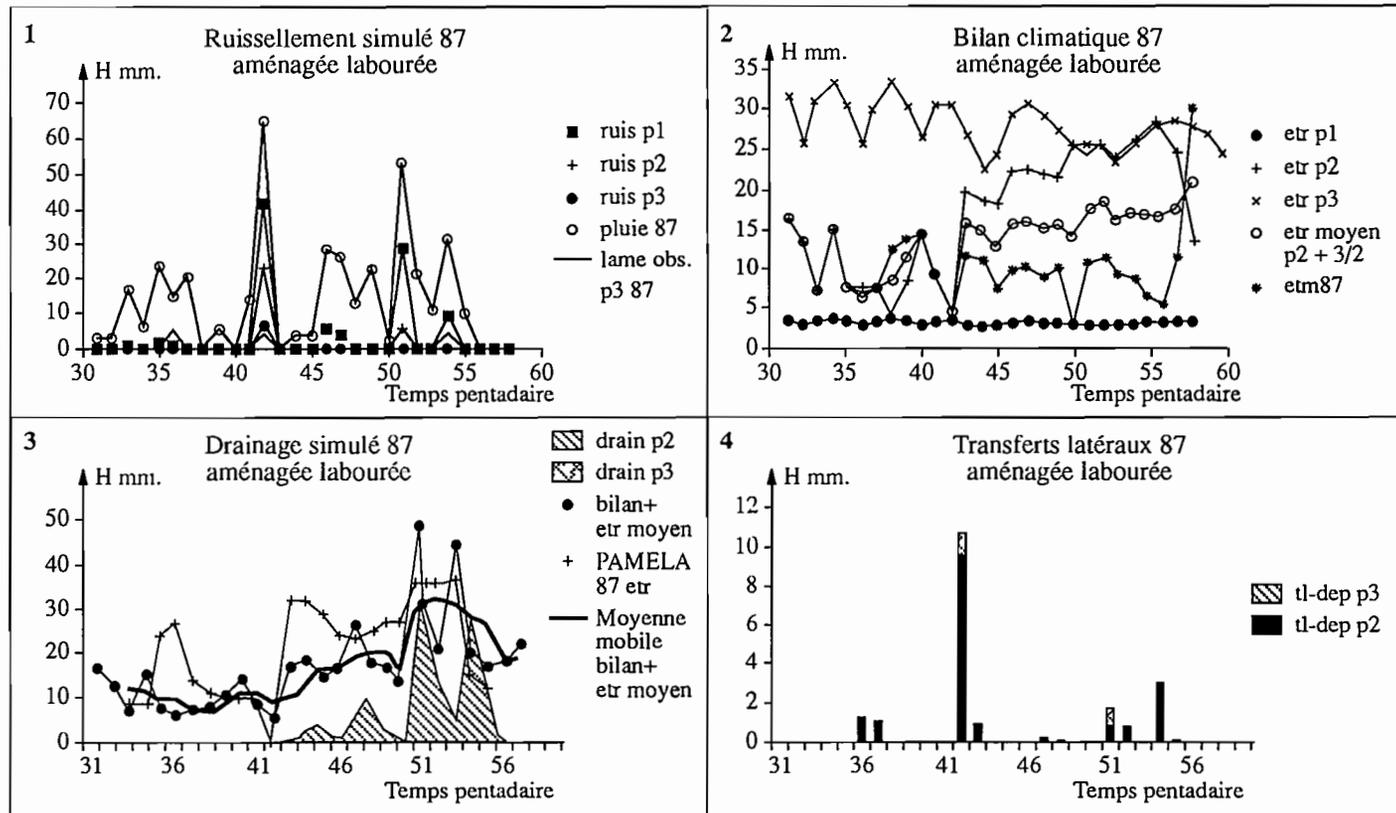


Figure 9. Simulation sur « Source ». Pluviométrie 1987. Différents termes du bilan dans les trois pédon constitutifs du micro-bassin versant — « Aménagé et labouré ».

Aménagement des conditions de ruissellement

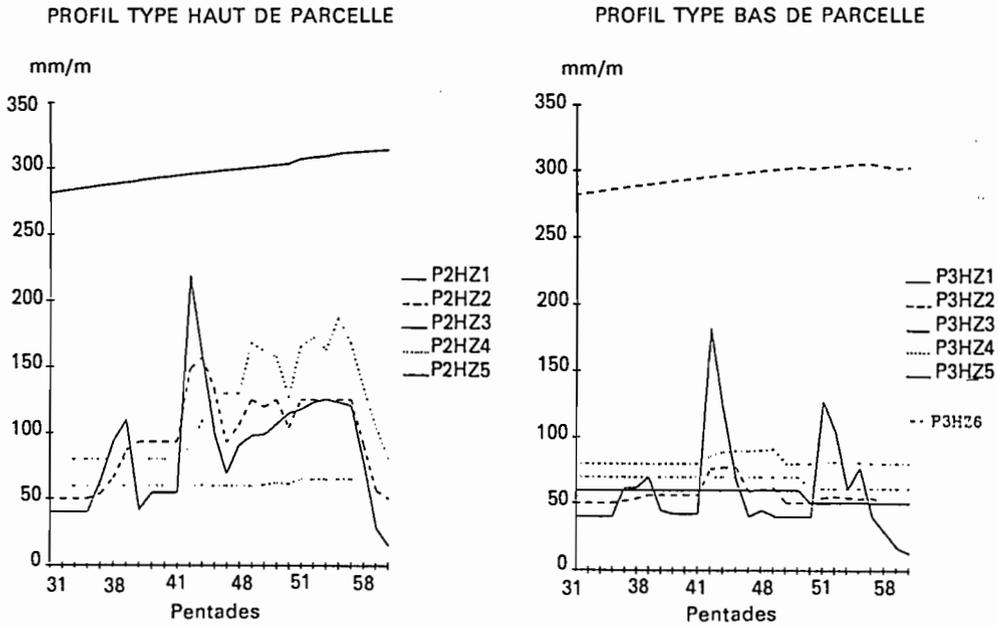


Figure 10. Evolution des humidités simulées de différents horizons (HZ) des deux pédon cultivés P2 et P3. Pluviométrie 1987. « Aménagé et labouré ».

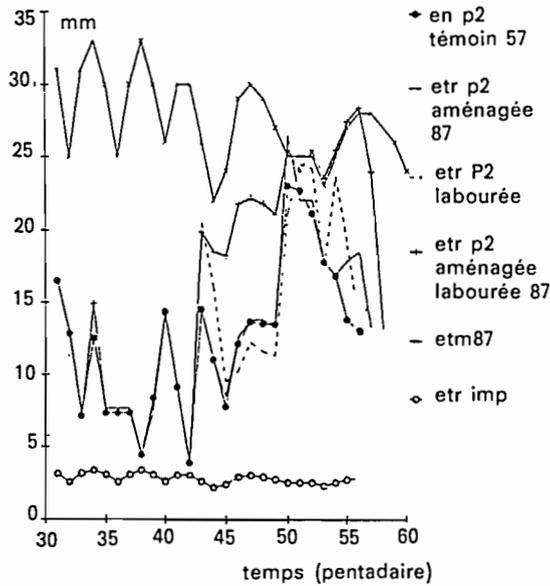


Figure 11. Comparaison ETR simulé entre différents traitements pour le haut de pente (pédon P2).

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

Critiques des simulations

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(1) Plus que l'aménagé seul.

Conclusions

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Références

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

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

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 Ndiadio 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 Dési 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.

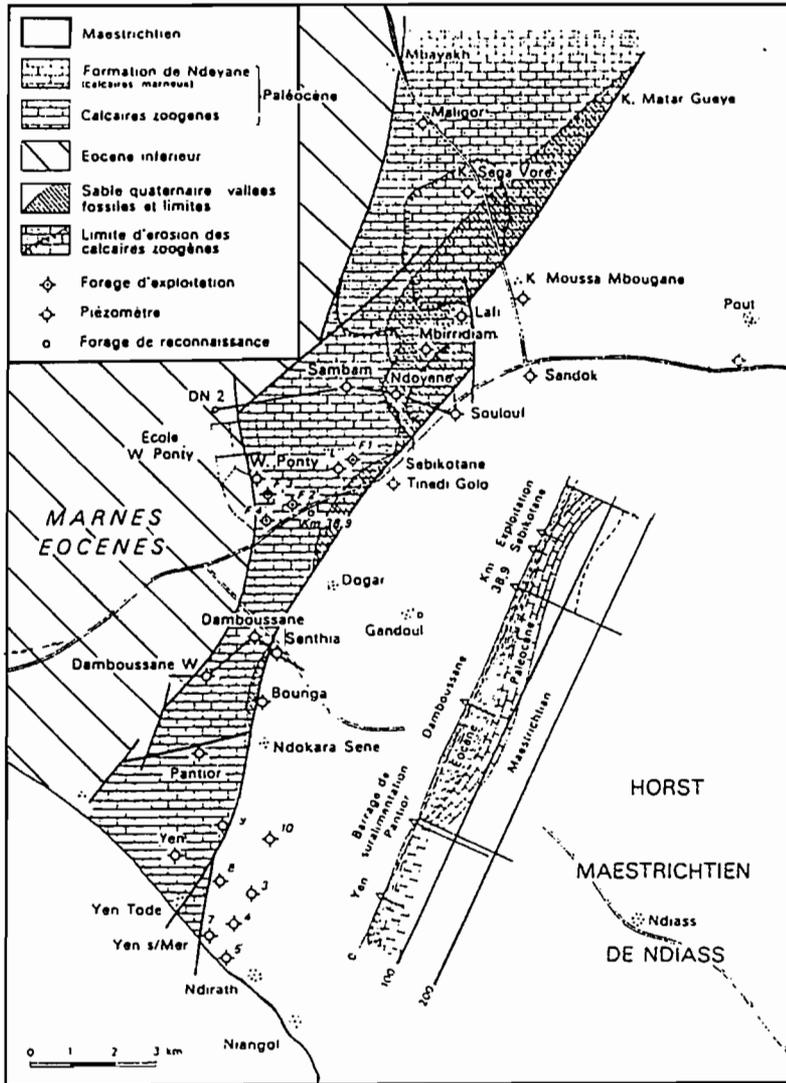


Figure 1. Ecorché du compartiment de Sébikotane. Extrait du rapport « les nappes de la presqu'île du Cap-Vert ». A. Martin, 1970.

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 éparées 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.

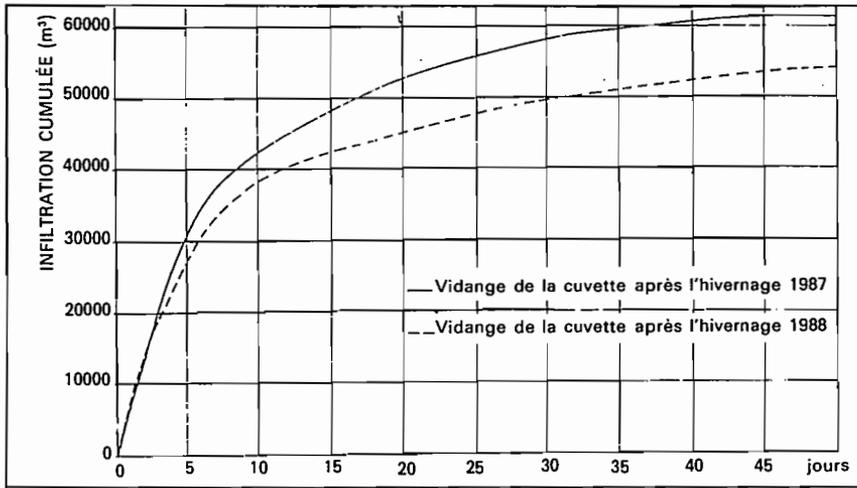


Figure 2. Comparaison de la vidange de la cuvette entre les hivernages 1987 et 1988.

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

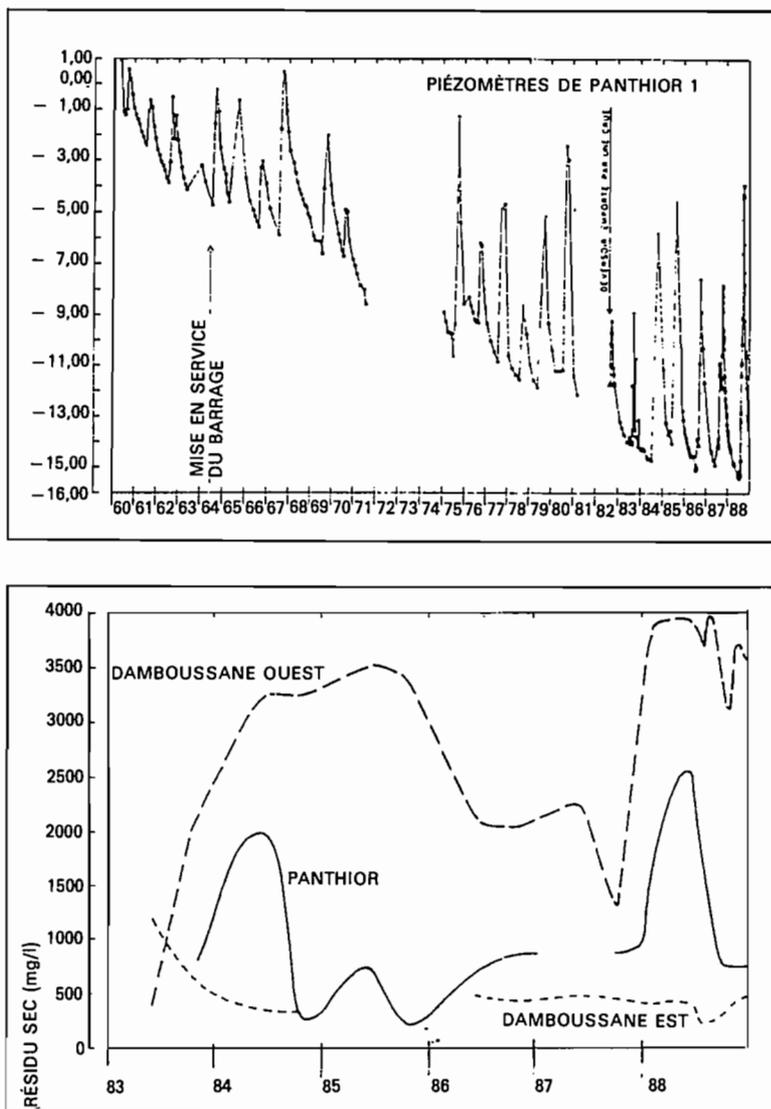


Figure 3. Fluctuations des niveaux piézométriques de Panthior 1. b : résidu sec sur les piézomètres de Panthior.

barrage qui, après la première campagne d'observation de 1987, atteignaient 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).

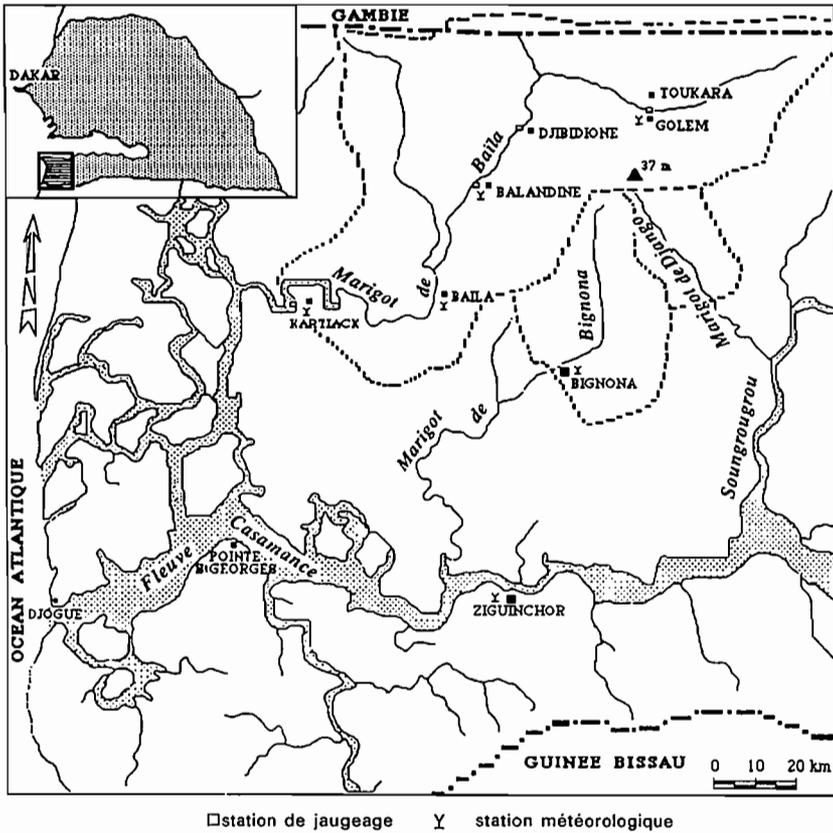


Figure 1. Localisation géographique du bassin versant du Marigot de Baïla.

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 glacis 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]).

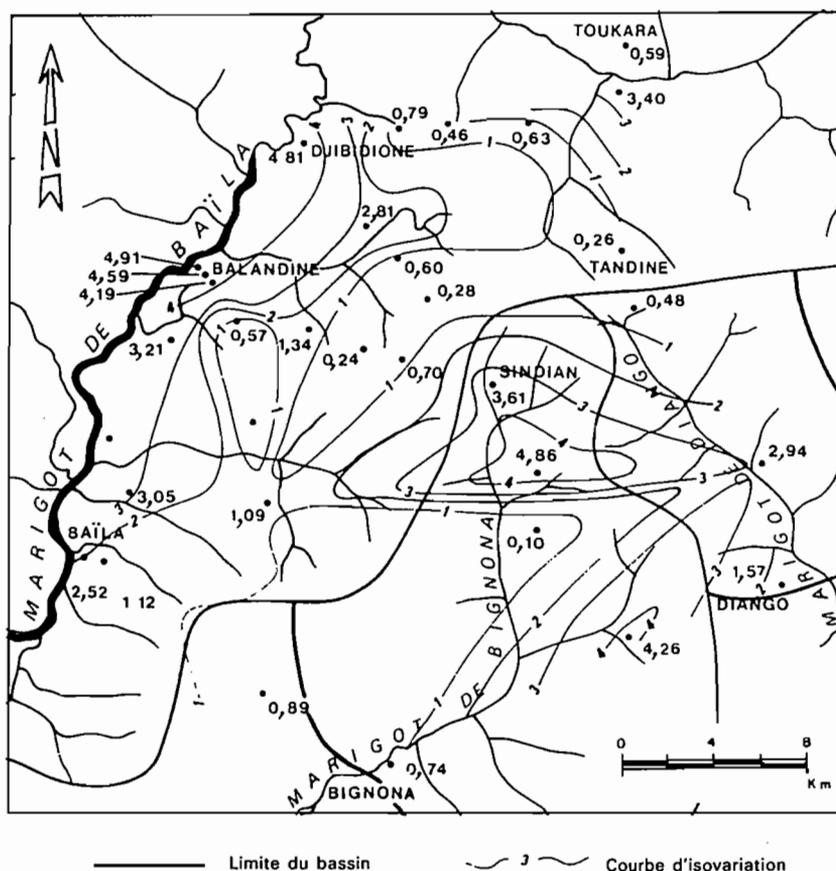


Figure 2. Carte d'isovariations piézométriques entre juillet et octobre 1988.

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

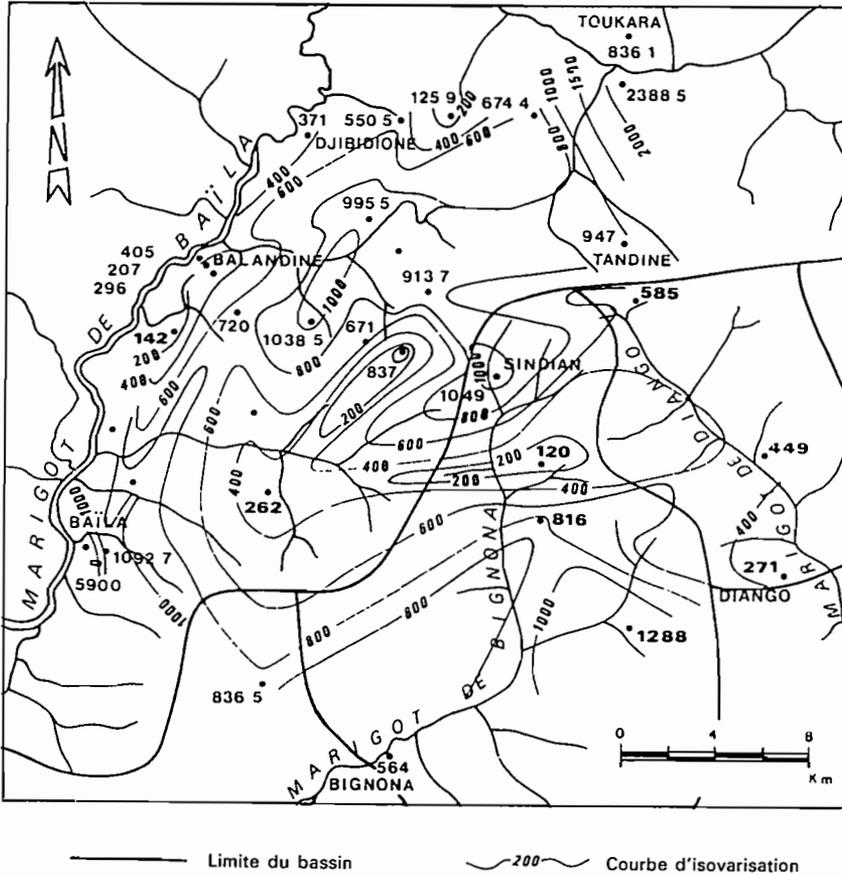


Figure 3. Carte d'isovariations conductimétriques entre juin et octobre 1988.

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 Baïla : 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.

$$3^{\text{e}} \text{ phase : } 0 \leq \text{R} < \text{Rs}$$

$$\begin{aligned} \text{ETR} < \text{ETP} &= \text{K} * \text{ETP} - \Delta \text{re} \\ \text{pc} &= 0 \end{aligned}$$

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 Baïla 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.

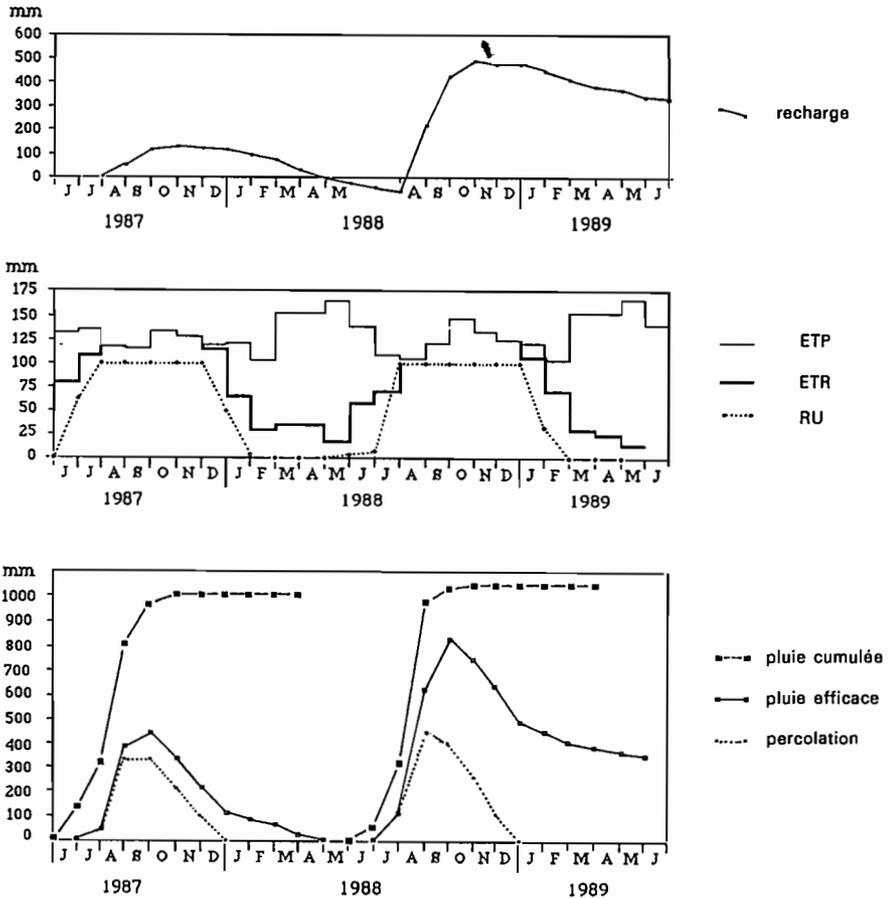


Figure 4. Bilan hydrique à la station de Golem.

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

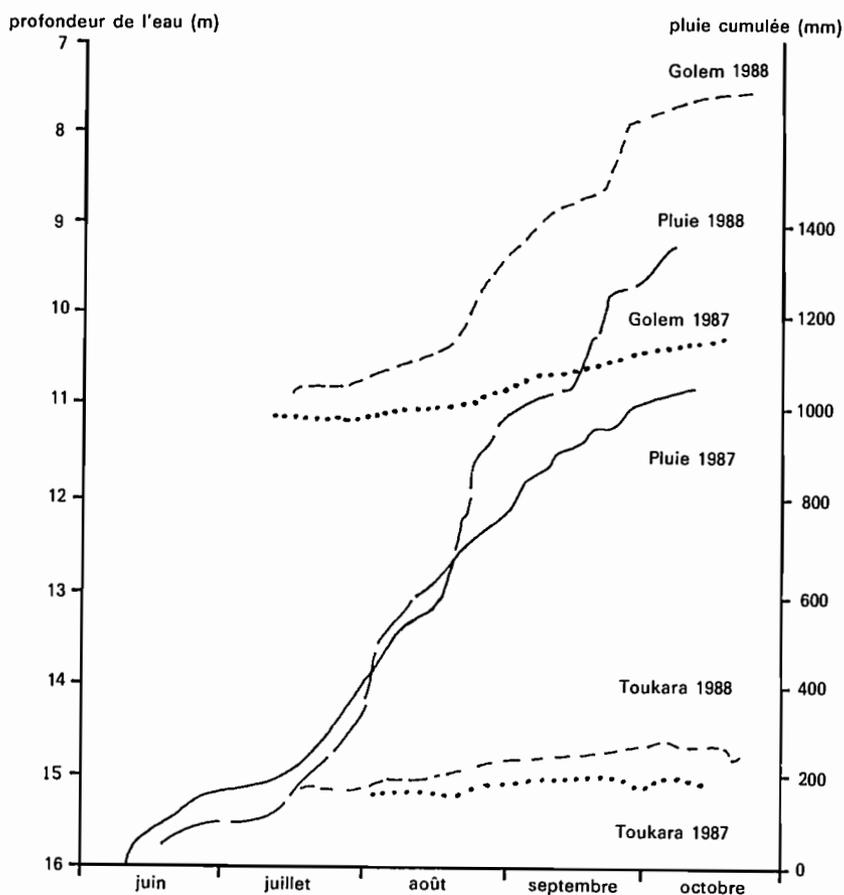


Figure 5. Comparaison des recharges 1987 et 1988 sur les puits de Golem et de Toukara (pluies cumulées et niveaux piézométriques).

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;

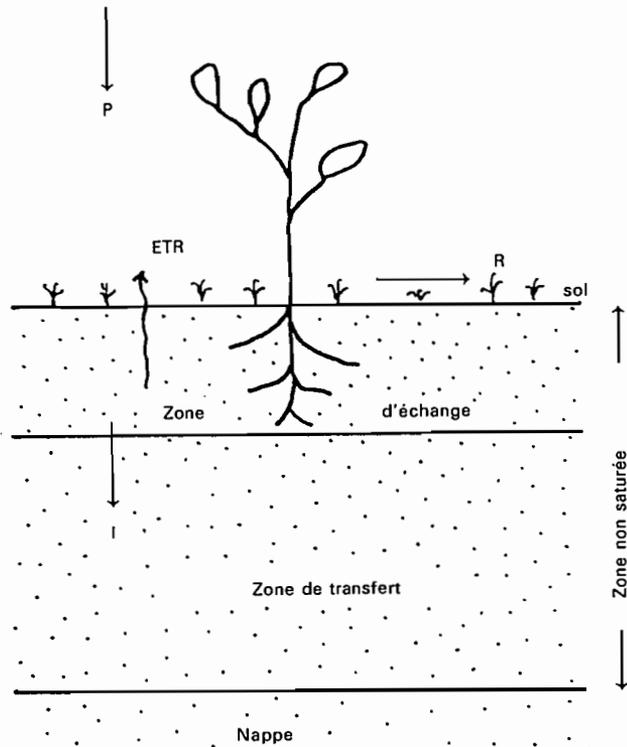


Figure 1. Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite.

— 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'emmagasinement, 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.

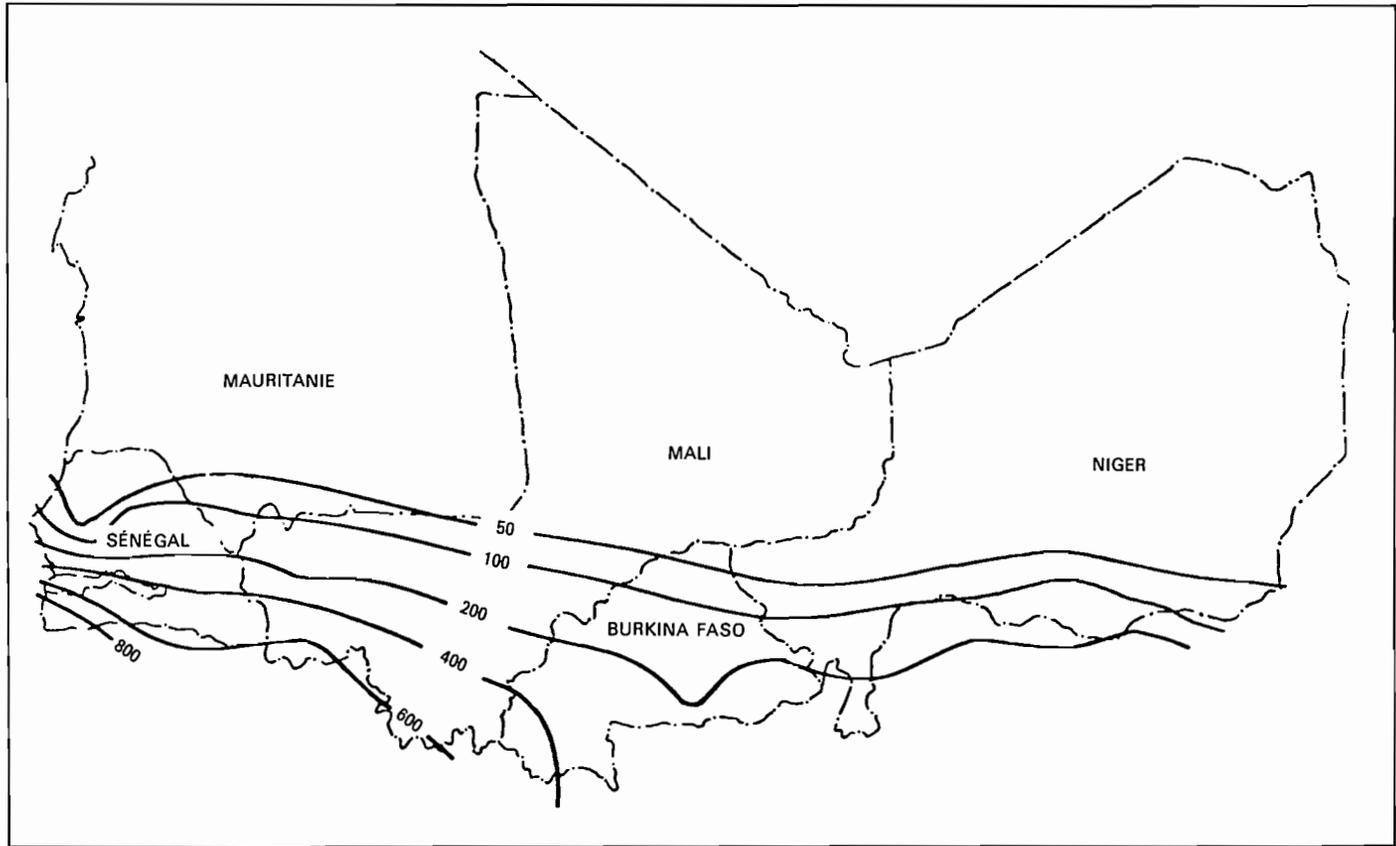


Figure 2. Courbe d'égale valeur de pluie efficace (d'après CIEH-BRGM, 1976).

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.

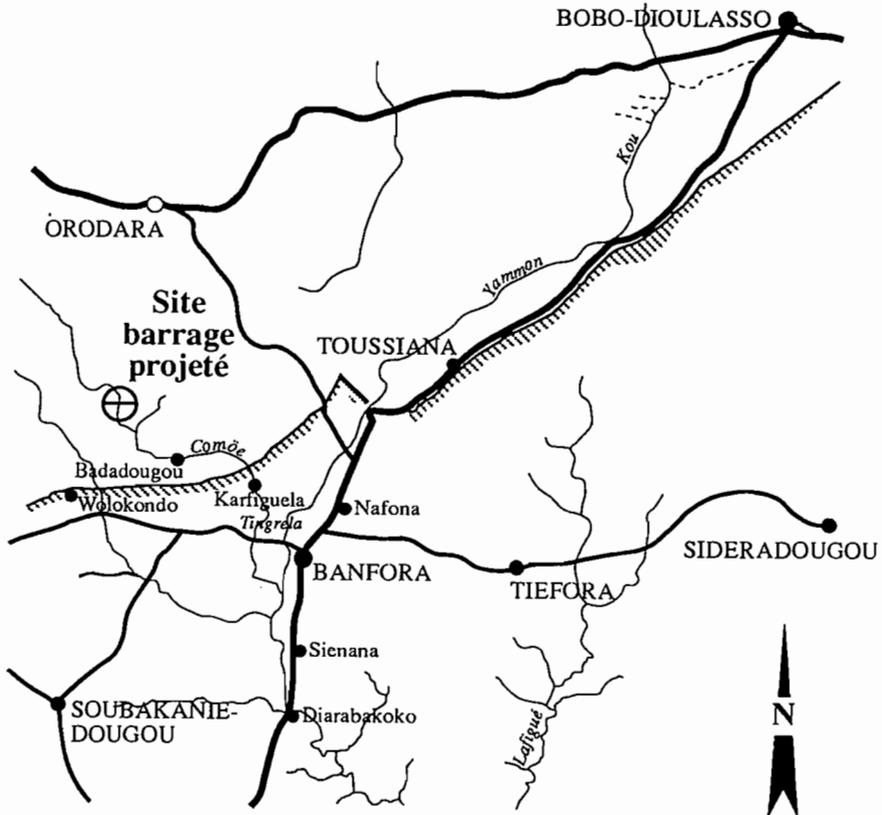


Figure 1. Plan de situation.

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.

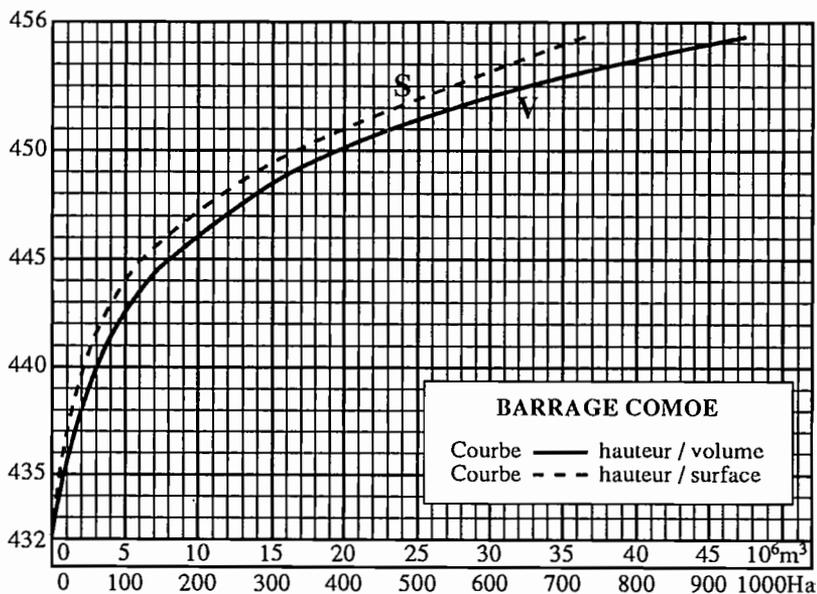


Figure 2. Courbes hauteurs/surfaces et hauteurs/volumes.

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

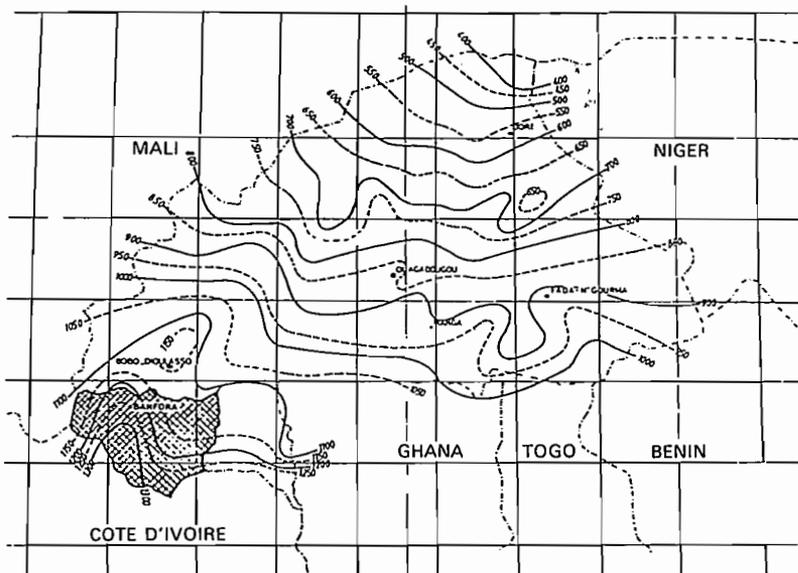


Figure 3. Courbes isohyètes.

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		

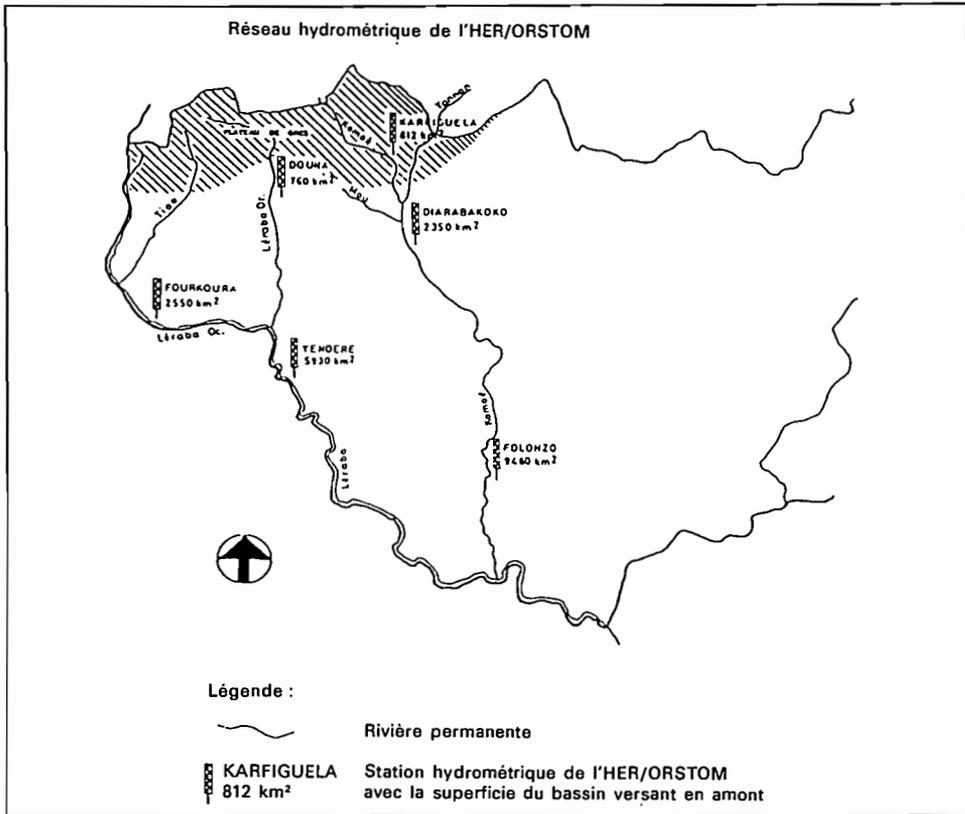


Figure 4. Réseau hydrographique de l'HER/ORSTOM.

— 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.

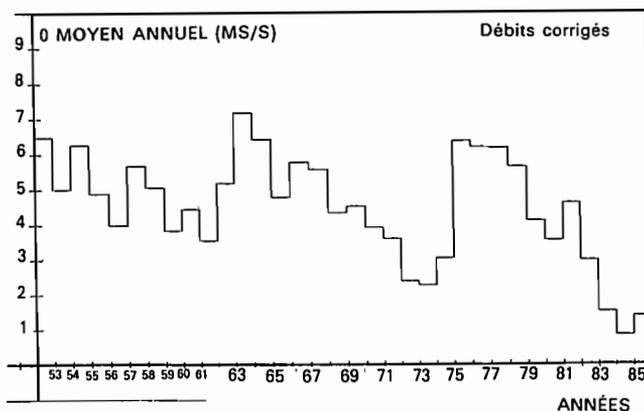


Figure 5. Débits moyens annuels « corrigés » au site du barrage (en m³/s).

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 maraichers 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.

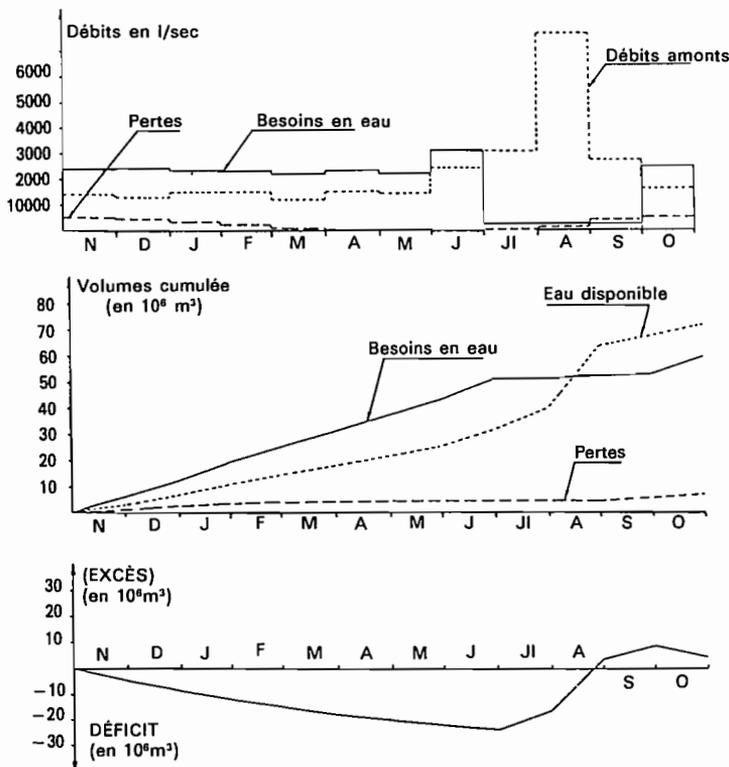


Figure 6. Apports, besoins et pertes en eau au cours d'une année.

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

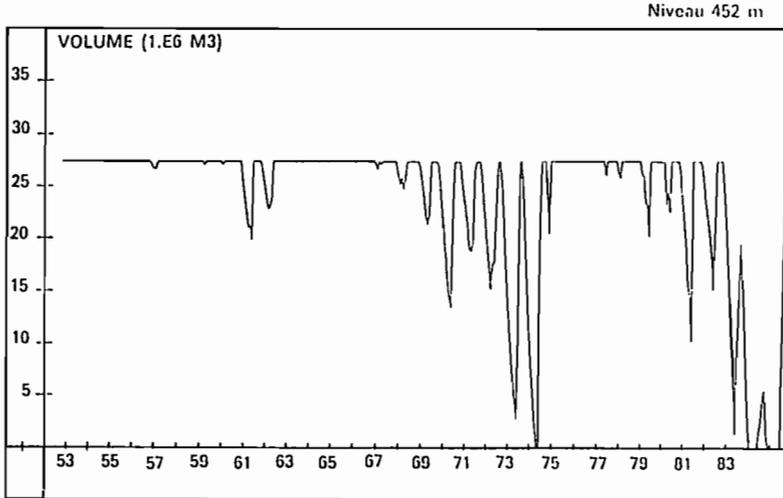


Figure 7a. Simulation. Niveau initial de la retenue : 452 m.

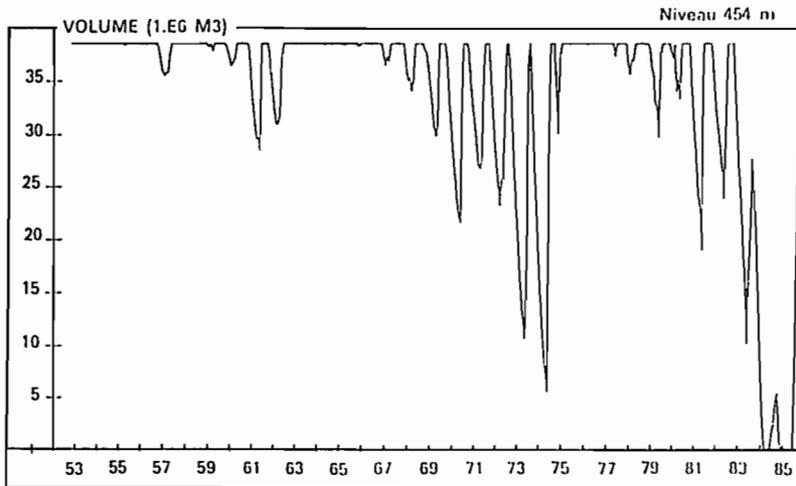


Figure 7b. Simulation. Niveau initial de la retenue : 454 m.

Bilan hydrique de la rivière Comoé

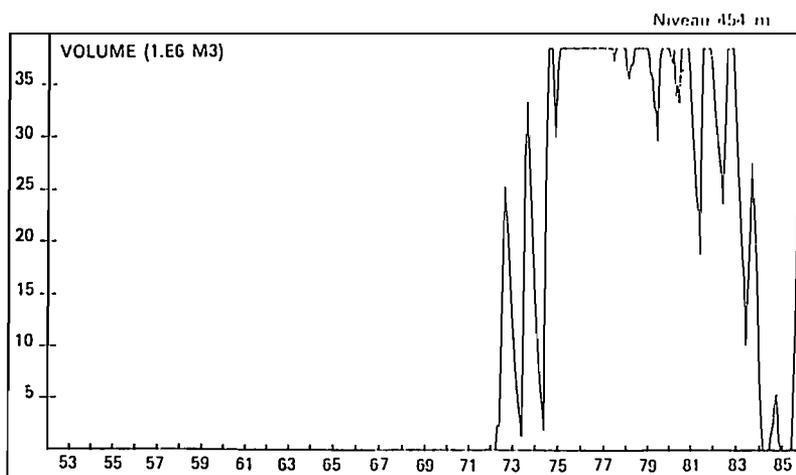


Figure 7c. Simulation. Niveau initial de la retenue : 0 m.

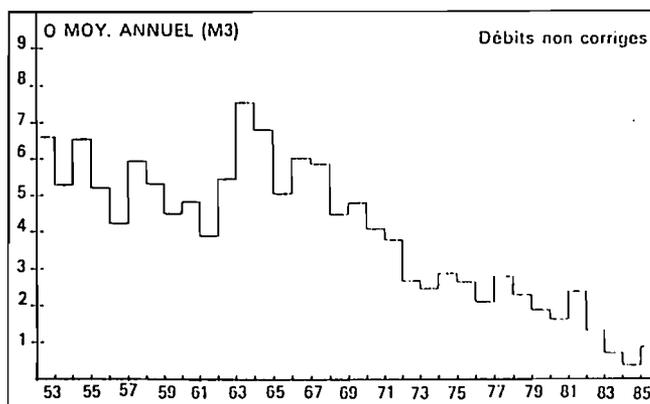


Figure 8. Débits moyens annuels au site du barrage (obtenus par corrélation avec le poste de Douna).

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.

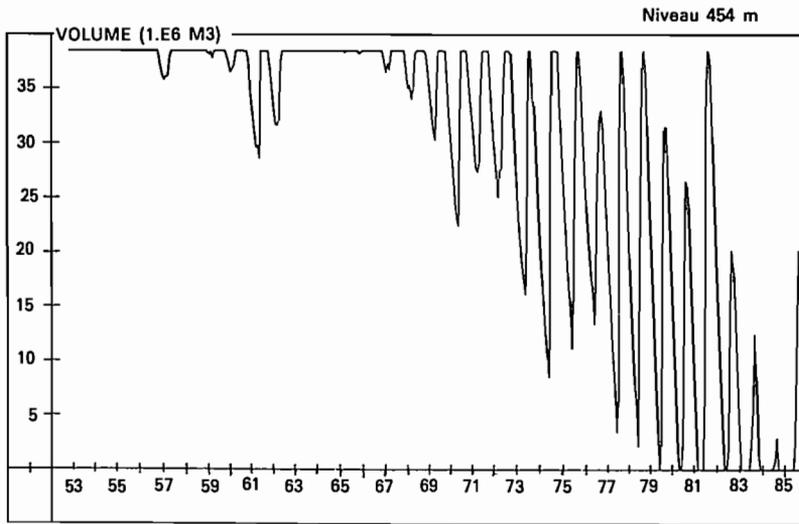


Figure 9a. Simulation. Niveau initial de la retenue : 454 m. (Débits estimés par corrélation avec le poste de Douna.)

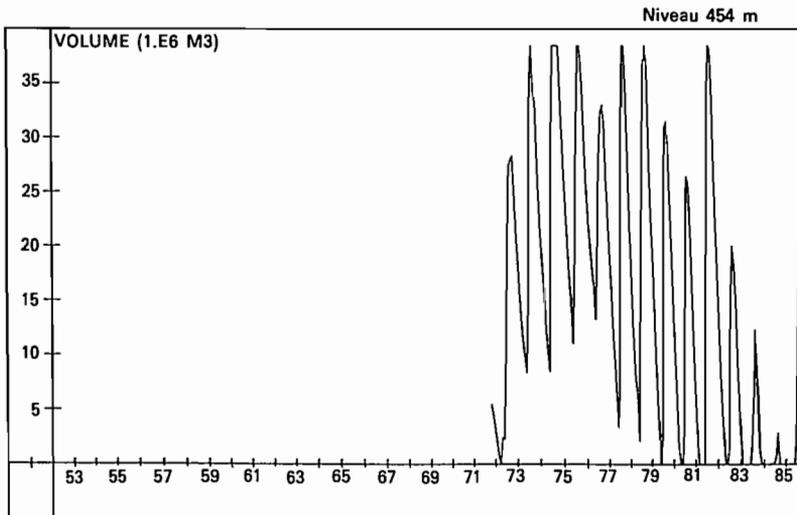


Figure 9b. Simulation. Niveau initial de la retenue : 0 m. (Débits estimés par corrélation avec le poste de Douna.)

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.

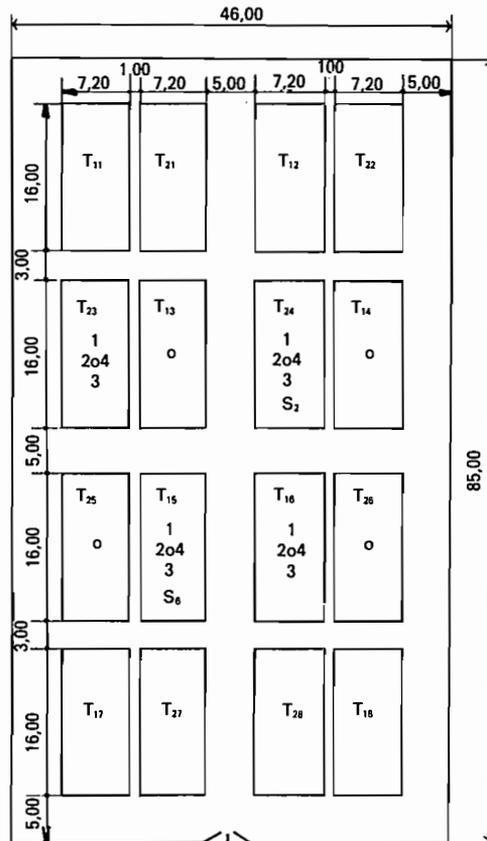


Figure 1. Plan de la parcelle expérimentale. T1 : Parcelle non labourée. T2 : Parcelle labourée à billons cloisonnés. o : Tubes sonde à neutrons. 1, 2, 3, 4 : Batterie de tensiomètres (20-40-60-100 cm). I : Entrée. Cotes en mètres.

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 racinaire 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

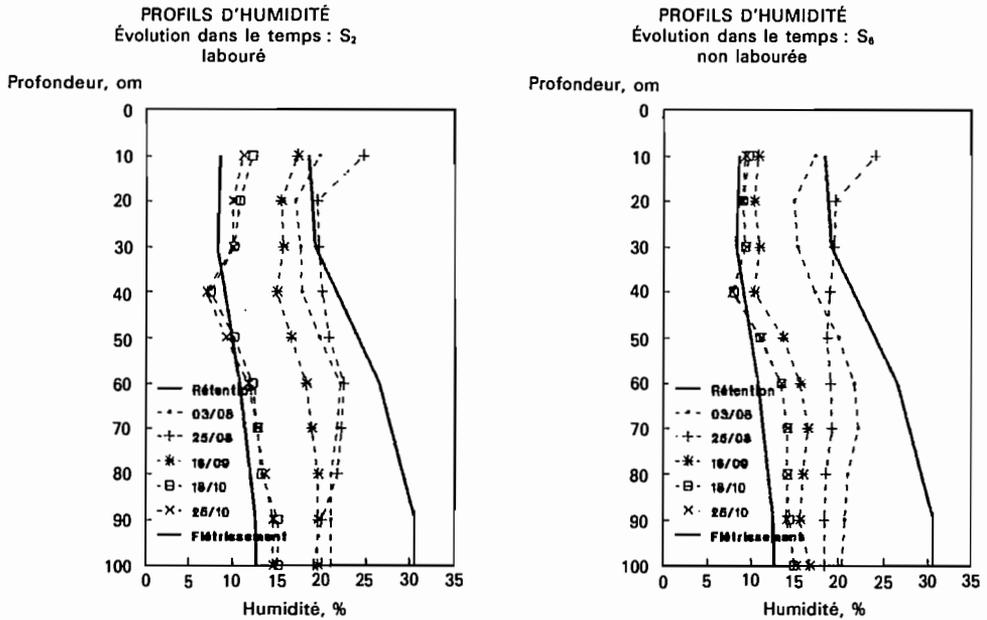


Figure 2. Profils d'humidité sur les parcelles labourées (S₂) et non labourées (S₆).

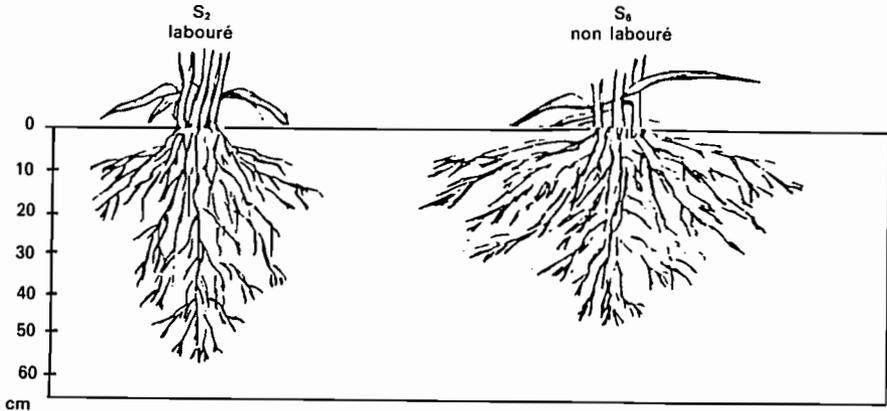


Figure 3. Profils racinaires sous sol labouré (S₂) et sous sol non labouré (S₆).

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

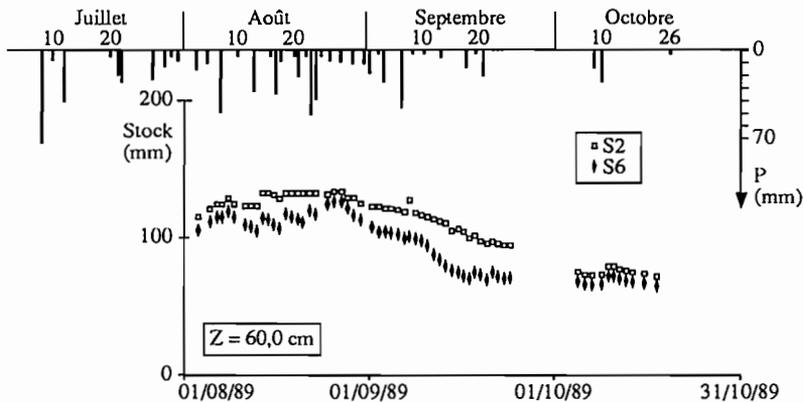


Figure 4. Pluviométrie et évolution des stocks d'eau dans le sol.

— 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 :

$$\Delta S = P - \text{ETR}$$

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 :

$$\text{ETM} = kc \cdot EP_{\text{Penman}} \quad \begin{array}{l} EP_{\text{Penman}} \text{ est l'Evaporation de Penman} \\ kc \quad \text{le coefficient cultural du sorgho} \end{array}$$

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.

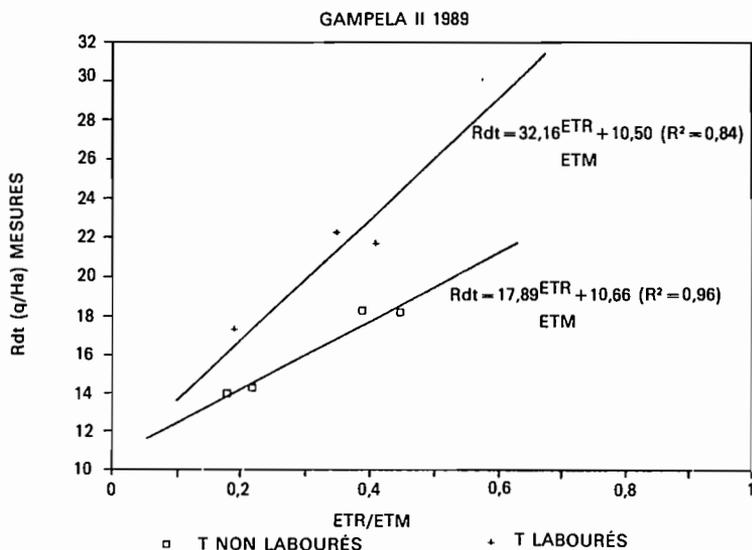


Figure 5. Droites de régression Rdt-ETR/ETM pour les quatre traitements labourés et les quatre non labourés sur la période 21 septembre/récolte.

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.

PARTIE III

Érosion et conservation des sols

14

Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province du Yatenga, région de Bidi

J.M. LAMACHÈRE, G. SERPANTIE

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

Au nord du 13^e parallèle, dans la province du Yatenga (figure 1), les années 1982, 1983 et 1984 ont été les plus sèches parmi les observations effectuées depuis 1920. A Ouahigouya, capitale du Yatenga, les moyennes pluviométriques interannuelles, calculées sur des périodes de 5 années consécutives, sont supérieures à 600 millimètres jusqu'en 1966, égales à 568 millimètres sur la période 1972-1976, à 424 millimètres sur la période 1982-1986.

Sans préjuger de l'évolution future des précipitations, les paysans de la province du Yatenga ont donc subi, depuis une vingtaine d'années, une longue période sèche sans équivalent dans la chronique des précipitations enregistrées. Pour faire face à la sécheresse, les paysans et les organisations qui continuent à miser sur l'agriculture pluviale, essentiellement sur la culture du mil, *Pennisetum typhoides*, ont fait appel, dans certaines régions, à des variétés plus nordiques à cycle court. Dans d'autres régions, comme le centre et le nord du Yatenga, les paysans préfèrent conserver des variétés souples, qui ont fait leurs preuves, et modifier la gestion habituelle de l'eau.

Par un essai interdisciplinaire, réalisé de 1985 à 1988 dans la région de Bidi, au nord du Yatenga, nous avons voulu préciser comment les trois pratiques de travail du sol avant semis, d'utilisation des eaux de ruissellement sous impluvium et de création d'obstacles filtrants modifiaient le milieu cultivé et la dynamique de l'eau et quelles étaient les conséquences de telles pratiques sur la conduite d'un champ de mil et l'élaboration des rendements.

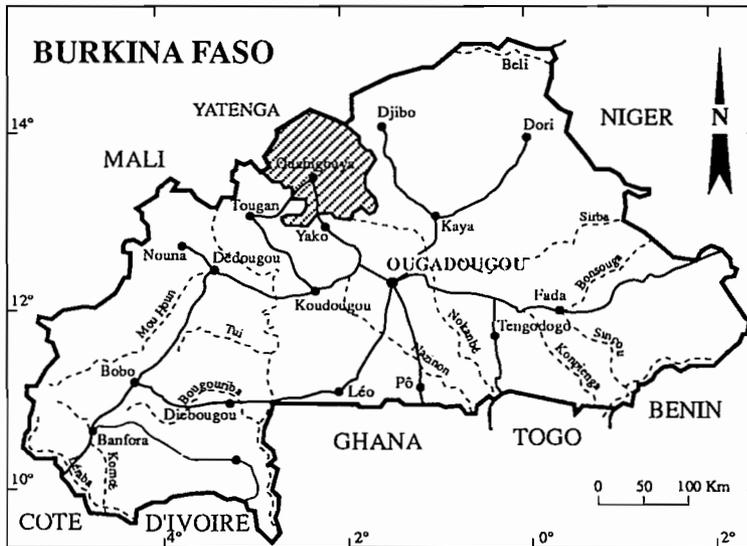


Figure 1. Carte du Burkina Faso.

Le dispositif expérimental

Les parcelles

Le dispositif expérimental des parcelles agronomiques de Bidi-Samniweogo est installé sur le versant nord-est d'une petite butte. Trois parcelles contiguës, orientées dans le sens de la plus grande pente (2,5 %), longues de 150 mètres, larges de 20 à 32 mètres, ont été implantées de telle sorte qu'elles recouvrent dans leur tiers supérieur un impluvium inculte où la cuirasse ferrugineuse est proche de la surface du sol. Les deux tiers inférieurs des parcelles couvrent un sol constitué de sables éoliens dont l'épaisseur croit de 0,25 mètre près de l'impluvium à 2,2 mètres en une quarantaine de mètres. Le sol filtrant, profond, est exploité par une monoculture de mil dont l'itinéraire technique suit le modèle de gestion paysanne des champs de brousse avec un semis direct en poquets et semences locales, des resemis éventuels, un premier sarclage tardif au début du mois d'août et un deuxième sarclage avant la floraison.

La parcelle la plus à gauche, quand on regarde vers l'amont du versant, est utilisée comme parcelle témoin. Elle est cultivée de manière traditionnelle. La parcelle médiane a subi un aménagement en cordons pierreux isohypses constitués d'une double rangée de blocs de cuirasse ferrugineuse (40 kg par mètre linéaire), espacés d'environ 20 mètres. Aucun cordon pierreux n'a été posé sur l'impluvium. La troisième parcelle, située à droite quand on regarde vers l'amont du versant, est identique à la parcelle médiane mais elle est labourée selon les courbes de niveau avec une charrue bovine attelée vers la fin du mois de juin.

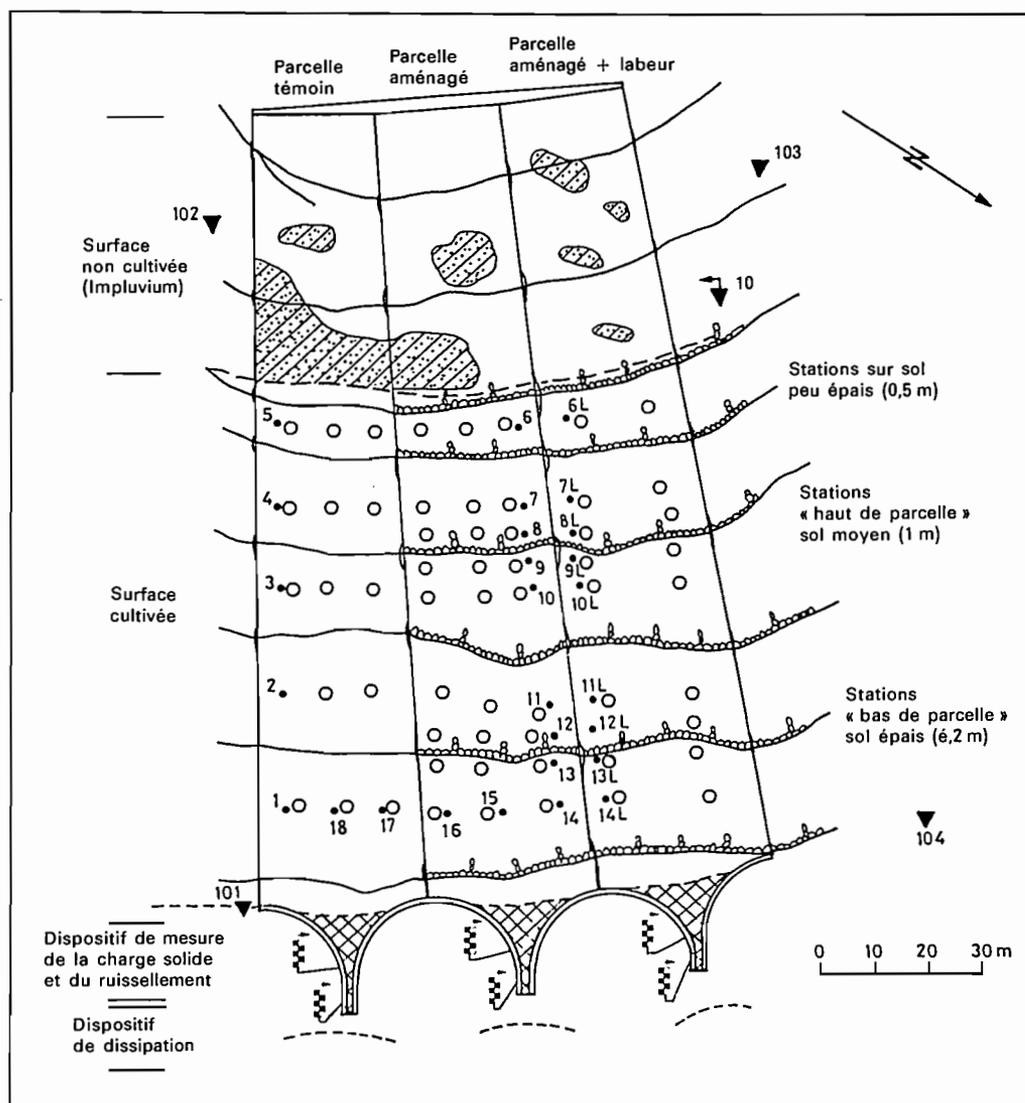
L'instrumentation

Chaque parcelle est limitée par des tôles galvanisées, fichées en terre sur une profondeur de 20 centimètres et dépassant de la surface du sol d'une vingtaine de centimètres. Les limites des parcelles ont été implantées avec beaucoup de soin, de telle sorte qu'elles suivent rigoureusement les lignes de plus grande pente, évitant ainsi le cheminement préférentiel des eaux le long des bordures artificielles. En aval de chaque parcelle, une surface bétonnée, limitée par un muret haut d'une trentaine de centimètres, collecte les eaux de ruissellement jusqu'au dispositif de mesure des niveaux d'eau et des débits. Ce dispositif comprend, de l'amont vers l'aval : un limnigraphe avec échelles limnimétriques, un canal jaugeur de section rectangulaire pour la mesure des forts débits (20 à 200 l/s), une fosse à sédiments équipée d'échelles limnimétriques et d'un limnigraphe, un déversoir triangulaire à mince paroi pour la mesure des faibles débits (0 à 30 l/s). Après l'étalonnage des canaux jaugeurs et des déversoirs, le double dispositif d'enregistrement des niveaux d'eau permet d'obtenir une précision de l'ordre de 20 % dans l'estimation des débits aux exutoires des parcelles. Pour les faibles débits, c'est la précision de la mesure des hauteurs d'eau qui détermine l'incertitude sur les débits. Pour les forts débits, c'est l'imprécision dans l'étalonnage du canal qui se révèle déterminante.

Le dispositif pluviométrique comprend 4 pluviomètres et un pluviographe, répartis à raison de 2 pluviomètres en amont et 2 pluviomètres en aval des parcelles. Le pluviographe a été installé successivement en amont puis en aval, près de la parcelle labourée.

Pour les mesures d'humidité du sol, 20 tubes de sonde à neutrons ont été implantés sur les parcelles, de manière à suivre l'évolution des profils hydriques de l'amont vers l'aval, à différentes distances des cordons pierreux.

Pour les mesures de peuplement végétal, les parcelles ont été subdivisées en trois zones : une bande supérieure, large de 20 mètres et bordant l'impluvium, une bande médiane large de 40 mètres appelée « haut de parcelle », une bande inférieure large de 40 mètres appelée « bas de parcelle ». Sur chaque bande, la croissance et le développement du mil sont suivis sur des stations échantillonnées de façon à représenter correctement les variations latérales et longitudinales du couvert végétal. A la récolte, les composantes du rendement sont mesurées sur des stations de 12 mètres carrés, répétées 4 à 12 fois sur chaque zone selon l'hétérogénéité du peuplement.



- (Pente générale 2,5%)
- | | | | |
|-----|---|-------|--|
| 3 • | Point de suivi du profil hydrique et phénologie | | Cordon pierreux (0,25 m) |
| ○ | Station de récolte | | Courbe de niveau (0,5 M) |
| | Microbuttes sableuses | 102 ▼ | Pluviomètre |
| | Tôles (0,2 m et 0,4 m) | 10 ▼ | Pluviographe |
| | Muret (0,2 m) | | Limnigraphe et échelles limnimétriques |
| | Exutoire en béton | | |

Figure 2. Plan d'Ensemble de l'essai sur parcelles agronomiques (Samniweogo 1985-1987).

Les observations pluviométriques

La comparaison des hauteurs pluviométriques observées en amont et en aval des parcelles permet de conclure à des différences faibles, inférieures à 5 %, non systématiquement excédentaires d'un côté ou d'un autre des parcelles.

Tableau I. Pluviométrie décadaire sur les parcelles agronomiques de Samniweogo, période 85-88.

année	juin			juillet			août			septembre		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1985	4,6	6,0	17,6	37,5	51,7	20,7	30,5	80,3	44,6	10,2	6,4	9,7
1986	3,3	33,8	18,2	42,1	74,9	40,3	38,0	15,0	64,5	43,8	19,4	31,2
1987	5,9	24,6	38,9	19,5	9,4	90,2	4,9	34,6	38,4	24,9	75,4	43,0
1988	0,1	22,4	6,2	24,3	36,4	44,9	86,6	125,2	84,5	16,6	11,6	4,2

Cycle végétatif : semis germination; montaison : floraison épiaison maturation.
Chiffre en italiques : décade sèche; chiffres en gras : décade très sèche.

La comparaison entre les hauteurs pluviométriques observées au pluviomètre dont la surface réceptrice est placée 1 mètre au-dessus du sol et celles observées au pluviomètre dont la surface réceptrice est placée au niveau du sol montre, dans certaines conditions d'exposition au vent, que le pluviomètre au sol, protégé des rejaillissements par un dispositif adéquat, reçoit des quantités d'eau de pluie systématiquement supérieures à celles reçues par le pluviomètre placé 1 mètre au-dessus du sol. Les écarts sont suffisamment importants pour qu'il en soit tenu compte dans les calculs du bilan hydrique sur les parcelles.

L'analyse de la répartition temporelle des précipitations montre des situations très contrastées. Les années 1985 et 1988 présentent deux périodes sèches de plus de 10 jours. La première période sèche se situe pendant la phase de croissance du mil pour l'année 1985, au début du cycle végétatif pour l'année 1988. La seconde période sèche, très longue et très intense, se situe dans les deux cas pendant la phase fructifère, entre le 30 août et le 1^{er} octobre. Cette seconde phase sèche a eu des conséquences néfastes sur la maturation des grains, d'autant plus néfastes que les périodes antérieures avaient été favorables au développement du mil.

L'année 1988 présente une bonne répartition des chutes de pluie pendant tout le cycle végétatif du mil avec deux petites périodes sèches courtes et peu intenses.

L'année 1987 se caractérise par une longue période sèche au début du cycle végétatif, un déficit pluviométrique pendant la phase de croissance et une pluviosité satisfaisante à la fin du cycle végétatif.

Le ruissellement sur les parcelles agronomiques

Le ruissellement annuel

L'analyse des ruissellements sur les parcelles agronomiques de Samniweogo met en évidence un fonctionnement extrêmement complexe des parcelles. A l'échelle annuelle, les résultats sont présentés sur le Tableau II.

Tableau II. Pluies et ruissellements annuels sur les parcelles agronomiques de Samniweogo.

Année	1986			1987			1988		
	Période			01/06 au 15/10			01/06 au 15/10		
Hauteurs d'eau en millimètres	Pu	LE	LR	Pu	LE	LR	Pu	LE	LR
Parcelle témoin	530	96	127	483	93	53	512	7	94
Parcelle aménagée	528	106	124	484	107	42	510	11	51
Parcelle labourée	—	—	—	486	100	17	509	15	67

Pu : pluie au sol; LE : lame d'eau entrée sur les parcelles par les impluviums; LR : lame ruisselée aux exutoires.

Sous impluvium (années 1986 et 1987), les deux parcelles cultivées de manière traditionnelle réagissent de façon presque identique. En l'absence d'impluvium (année 1988), le ruissellement observé sur la parcelle aménagée est presque deux fois plus faible que celui observé sur la parcelle témoin. L'impluvium joue donc un rôle très important dans le fonctionnement hydrique de la parcelle aménagée, un rôle beaucoup plus faible sur le fonctionnement hydrique de la parcelle témoin.

Les deux parcelles aménagées ont un fonctionnement hydrique identique en 1988 mais nettement différent pour l'année 1987, année pour laquelle le ruissellement annuel est 2,5 fois plus faible sur la parcelle labourée. Cette différence s'explique par l'occurrence de fortes pluies en juillet 1987 après les labours.

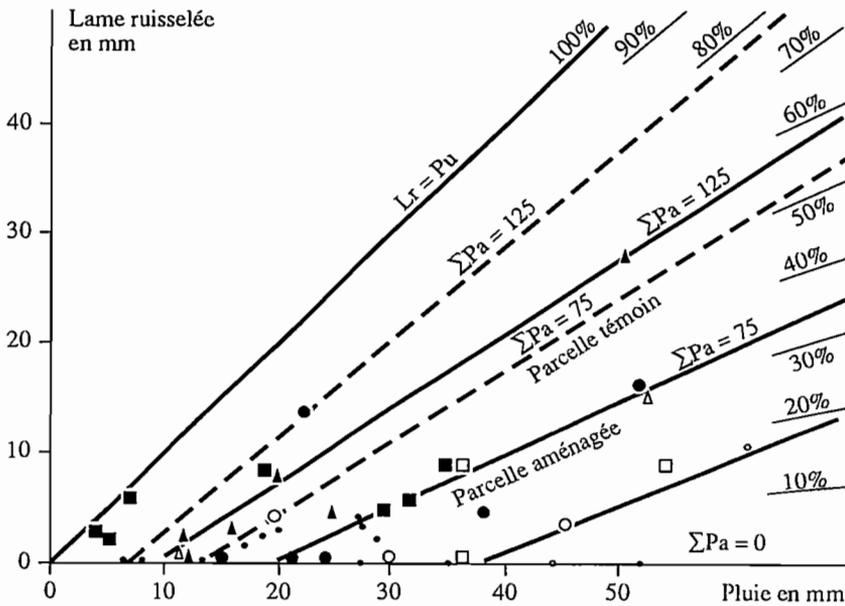
Les relations entre pluie et ruissellement

Afin de mieux analyser le comportement des parcelles au cours de la saison des pluies en fonction du calendrier cultural, nous avons calculé pour chaque averse un indice pluviométrique (ΣPa) égal à la somme des pluies antérieures tombées depuis le précédent sarclage. Les correspondances entre lames ruisselées et pluies au sol sont reportées, crue par crue, sur la figure 3 pour la parcelle aménagée.

Le figuré choisi pour représenter chaque classe des pluies antérieures permet de mettre en évidence une évolution de l'aptitude au ruissellement des sols sableux fins sarclés dans le sens d'un accroissement rapide avec la quantité de pluie tombée sur le sol depuis le dernier sarclage. Afin de préciser cette évolution nous avons réalisé des expériences de simulation de pluie sur le même type de sol, à proximité des parcelles agronomiques de Samniweogo, aux différents stades de son évolution après sarclage. Les résultats de cette expérimentation sont présentés au Tableau III où ils sont confrontés aux renseignements collectés sur les parcelles.

Tableau III. Evolution de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin sarclé.

Somme des pluies ant. en mm	Simulation de pluie 1988			Parcelle témoin 1986-1987			Parcelle aménagée 1986-1987			Parcelle aménagée 1988		
	a	Il	Lro	a	Il	Lro	a	Il	Lro	a	Il	Lro
0	0,54	37	16	0,67	40	25	0,40	40	35	0,40	40	37
75	0,64	18	13	0,80	20	15	0,48	20	20	0,48	20	37
125	0,70	10	8	0,92	10	7	0,68	10	10	0,54	10	25
200	0,84	6	4	—	—	—	0,90	—	2	—	—	—



ΣPa = somme des pluies antérieures depuis le sarclage

- $\Sigma Pa < 50$ mm
- $\Sigma Pa < 100$ mm
- $\Sigma Pa < 150$ mm
- $\Sigma Pa > 150$ mm
- ● ▲ ■ : années 1986-1987
- ◊ Δ □ : années 1988

Figure 3. Lames ruisselées sur la parcelle aménagée en fonction de la pluie au sol.

Les trois paramètres retenus pour représenter l'évolution d'un sol sarclé en fonction de la pluie antérieure sont :

— le différentiel de ruissellement, $a = \frac{\delta L_r}{\delta P} = \frac{R}{J - J_1}$

- l'intensité de pluie limite du ruissellement, I_l , exprimée en mm/h;
- la capacité de stockage superficiel du sol, L_{ro} , exprimée en mm.

La lame ruisselée peut alors être formulée par l'expression suivante en fonction de la pluie P et de sa durée $(t - t_0)$:

Si $I > I_l$, $L_r = a P - a I_l (t - t_0) - L_{ro}$
 I étant l'intensité de pluie.

Ainsi, pour une hauteur pluviométrique de 40 millimètres tombée en 1 heure la lame ruisselée varie-t-elle de 1,1 mm pour ΣPa égale à 75 mm, à 13 mm pour ΣPa égale à 125 mm, à 22,6 mm pour ΣPa égale à 200 mm. La progression de la capacité des sols sarclés au ruissellement est donc extrêmement rapide. Au-delà d'une somme des pluies antérieures tombées depuis le dernier sarclage égale à

100 millimètres, l'effet du sarclage sur l'infiltration des eaux de pluie s'atténue de manière considérable.

Le rôle de l'impluvium apparaît également très nettement sur le tableau III. L'impluvium renforce de manière très importante la capacité des parcelles au ruissellement dès que la somme des pluies antérieures dépasse 100 millimètres.

L'effet des cordons pierreux

Pour illustrer l'effet des cordons pierreux sur le ruissellement, nous avons dessiné sur la figure 4 les hydrogrammes des crues observées le 13 juillet 1986 aux exutoires de la parcelle témoin et de la parcelle aménagée sans labours. L'averse du 13 juillet 1986 est tombée sur un sol non sarclé ayant déjà reçu un total pluviométrique de 115 mm depuis le début de la saison des pluies.

L'intensité pluviométrique maximale sur une durée de 15 minutes était de 82 mm/h. Dans ces conditions, on observe un ruissellement nettement plus faible sur la parcelle aménagée : un débit maximum de 36 % plus faible, un volume ruisselé de 13 % plus faible et une quantité de matériaux exportés inférieure de 28 % à celle de la parcelle témoin.

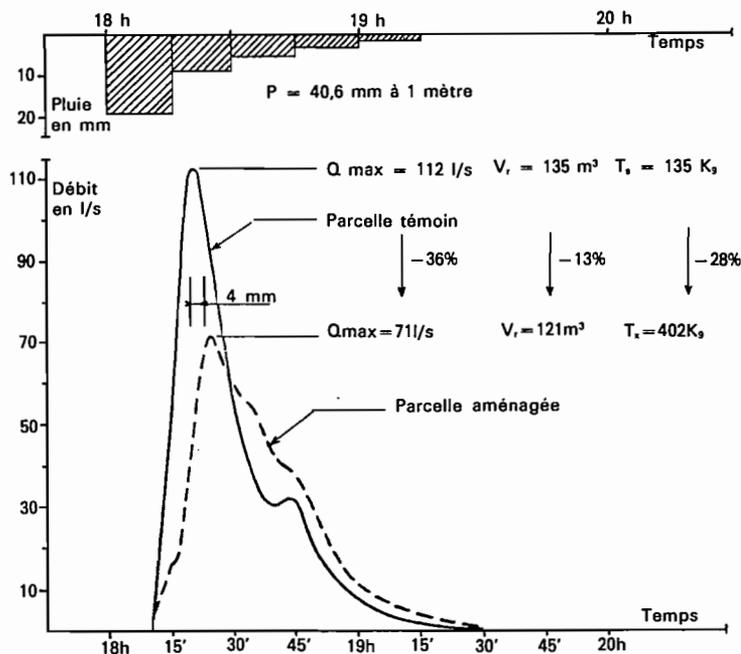


Figure 4. Crues du 13 juillet 1986 sur les parcelles agronomiques de Samniweogo.

Les transports solides sur les parcelles agronomiques

Les matériaux solides transportés par les eaux de ruissellement en aval des parcelles agronomiques de Samniweogo se présentent sous trois formes différentes : en suspension dans les eaux déversées sur le déversoir triangulaire, en dépôts fins dans la fosse à sédiments située en amont du déversoir, en dépôts plus grossiers sur l'aire de collecte des eaux située en amont du canal jaugeur.

Les résultats des mesures de transports solides sont consignés sur le Tableau IV.

Tableau IV. Transports solides mesurés sur les parcelles agronomiques de Samniweogo.

Année	1986		1987		1988		
	déversés V	déposés U	déversés V	déposés U	déversés V	déposés U	déposés aire
Parcelle témoin	1120	98	400	38	418	78	243
Parcelle aménagée	791	61	120	18	152	24	55
Parcelle labourée	—	—	82	26	291	26	114
Surface cultivée	3 100 m ²		3 100 m ²		3 100 m ²		
Surface impluvium	1 250 m ²		1 250 m ²		150 m ²		

Sur la parcelle témoin, le tonnage moyen annuel exporté est de 2,2 tonnes par hectare avec ou sans impluvium.

Sur la parcelle aménagée sans labours, le tonnage annuel moyen exporté est de 1,4 tonne de matériaux solides par hectare avec l'impluvium, de 0,7 tonne par hectare sans impluvium.

Sur la parcelle aménagée labourée, le tonnage annuel exporté en 1988, sans impluvium, était de 1,3 tonne par hectare. Il était de 0,4 tonne par hectare en 1987 avec l'impluvium.

Les variations des tonnages annuels en matériaux solides exportés hors des parcelles agronomiques de Samniweogo sont donc extrêmement fortes d'une année à l'autre, en relation directe avec celles des volumes ruisselés.

La figure 5 donne une bonne idée des concentrations respectives observées sur les trois parcelles agronomiques pour les matériaux solides transportés en suspension. Pour la crue du 15 août 1988, les concentrations moyennes sont égales à 1,75 g/l sur la parcelle témoin, à 0,98 g/l sur la parcelle aménagée, à 1,15 g/l sur la parcelle labourée.

Les observations hydro-pédologiques et agronomiques

Les bilans hydriques sur les parcelles

Les mesures hydrologiques de surface et les mesures de stock hydrique des sols apparaissent suffisamment précises pour permettre l'établissement des bilans hydriques sur les parcelles agronomiques de Samniweogo. Ces bilans doivent quantifier les pertes en eau subies par le volume de sol exploité par l'enracinement afin d'établir un diagnostic de la satisfaction des besoins en eau de cultures.

L'utilisation de l'équation du bilan hydrique, de la forme :

$$Re + Ps + Rs + Vs + ED = 0,$$

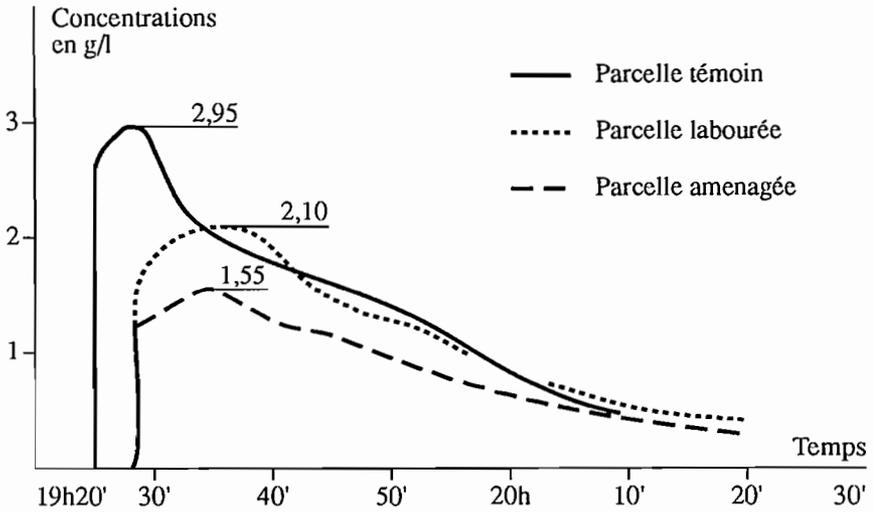


Figure 5. Turbidigrammes des crues du 15 août 1988 sur les parcelles agronomiques de Bidi, Samniweogo.

permet de calculer les pertes par évaporation et drainage (ED) lorsque les autres termes du bilan sont connus, c'est-à-dire : le ruissellement entrant (Re), la pluviométrie au sol (Ps), le ruissellement sortant (Rs) et la variation du stock hydrique des sols (VS). La précision sur l'estimation des ruissellements est de l'ordre de 20 %. Les pluies au sol sont connues avec une précision de l'ordre de 10 % et l'erreur commise sur l'évaluation du stock hydrique est estimée à 10 millimètres quelle que soit l'importance du stock qui varie entre 50 et 150 millimètres.

L'estimation des pertes par évapotranspiration sera d'autant plus précise que la période considérée sera longue et sèche. L'incertitude sur une décade est de l'ordre de 2 mm par jour en période humide, de 1 mm par jour en période sèche. La cohérence entre les mesures hydrologiques superficielles et les mesures hydropédologiques a été contrôlée en comparant les stocks hydriques des différentes parcelles avant et après une pluie forte. Les différences observées entre l'augmentation du stock hydrique et l'accroissement de la lame infiltrée rentrent dans le domaine d'incertitude sans biais systématique.

La figure 6 présente les résultats des calculs pour l'année 1987.

Les observations agronomiques

Le Tableau VI résume les observations effectuées sur le développement et la croissance du mil.

Les années 1985 et 1987 se caractérisent par des périodes sèches en début de cycle, moins longues en 1987, en pleine phase de croissance et de développement du mil, alors que la pluviométrie est bien distribuée sur toute l'année 1986. Il en résulte des retards de croissance importants en 1985, moins importants en 1987. Sur la parcelle aménagée, la croissance du mil est légèrement plus rapide que sur

Tableau V. Etat du mil après les semis.

Paramètres mesurés	Hauteurs en cm			Stade foliaire (équivalent feuille)		
	1985	1986	1987	1985	1986	1987
Année	1985	1986	1987	1985	1986	1987
Nombre de jours après les semis	44 j	34 j	45 j	44 j	34 j	45 j
Parcelle témoin	27,6	31,5	37	10,2	9,8	9,3
Parcelle aménagée	32,4	35,8	40	10,6	10,1	9,8
Parcelle labourée	—	48,1	74	—	11,1	10,8

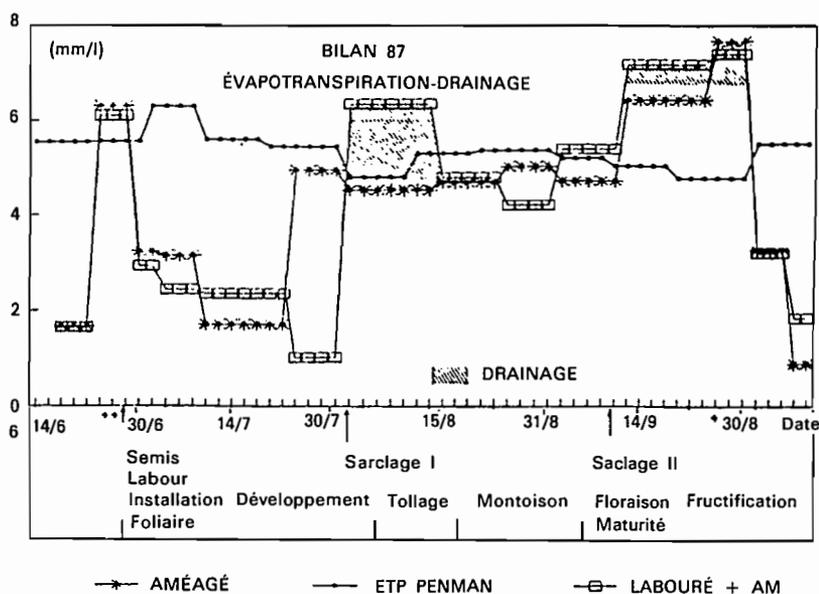


Figure 6. Evapotranspiration et drainage de l'année 1987 sur les parcelles aménagées.

la parcelle témoin (écart de 8 à 18 %) et le développement foliaire y est plus avancé (écart de 3 à 5 %). Dans tous les cas, la parcelle labourée présente une avance de croissance très forte (30 à 80 %) et une avance de développement foliaire (10 %) sur la parcelle non labourée. L'état d'enracinement, mesuré à la floraison, confirme la qualité de l'enracinement dans la parcelle labourée et l'influence, dans la parcelle aménagée, des conditions d'humectation sur la mise en place des racines.

La figure 7 présente les productions en matière sèche et en grain par mètre carré de champ cultivé. Les relations entre la production de matière sèche et la production en grains sont bonnes, à l'exception du haut de la parcelle aménagée pour l'année 1985, année pour laquelle le mil a subi un échaudage radical en fin de cycle. Le haut des parcelles apparaît systématiquement favorisé tant pour la production de matière sèche que pour la production en grains. L'aménagement en cordons pierreux, si l'on excepte l'année 1985, permet d'augmenter de 10 à 20 % la production de matières sèche et de 30 à 60 % la production en grain en haut

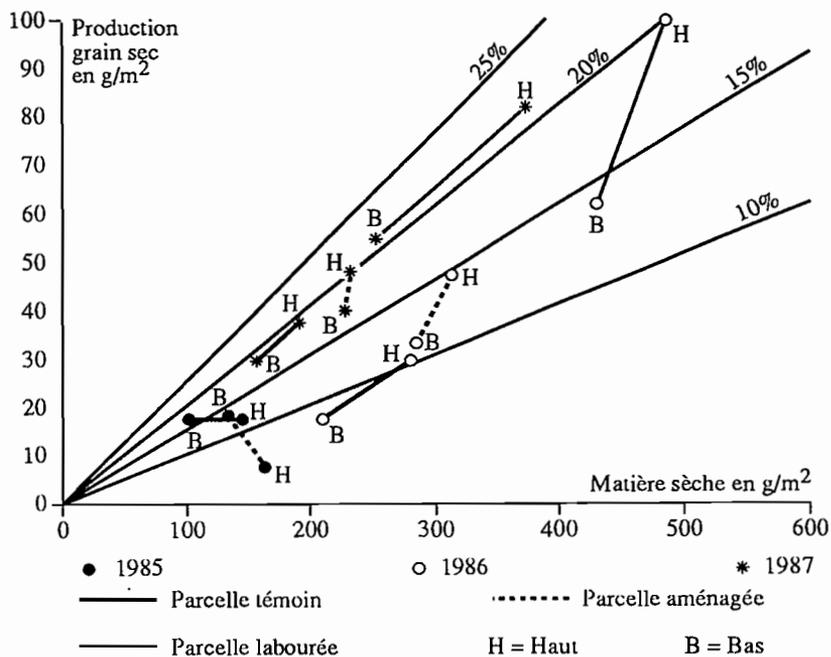


Figure 7. Matière sèche et grain sec par m².

des parcelles, de 30 à 60 % la production de matière sèche et de 30 à 90 % la production en grains en bas de parcelles.

En année normale, à pluviométrie bien répartie (1986), les labours permettent d'accroître de 55 % la production de matière sèche et de doubler la production en grains. En année plus sèche (1987), l'accroissement de la production en grains reste importante (60 à 70 %) en haut de parcelle, plus faible en bas de parcelle (40 %).

Conclusions

Le travail du sol, labour ou sarclage, d'un sol sableux fin à sablo-argileux permet une infiltration optimale des pluies et des ruissellements entrant dans les parcelles cultivées sur une tranche pluviométrique d'environ 100 millimètres. Au-delà, la transformation de l'état de surface des sols par aplanissement de microrelief et formation de pellicules superficielles favorise le ruissellement dont l'importance croît avec l'intensité de la pluie et l'état d'humectation des sols.

Compte tenu de la faible capacité de rétention spécifique des sols sur les parcelles agronomiques de Samniweogo, l'excès d'infiltration provoque rapidement un drainage profond dont l'effet se révèle néfaste s'il se produit pendant le pic de minéralisation comme ce fut le cas en 1987 sur la parcelle labourée.

Un aménagement en cordons pierreux isohypses cloisonnés, à l'occasion de fortes pluies, modifie les paramètres d'une crue par écrêtage et déphasage. Il réduit ainsi la puissance érosive des crues et accroît la lame infiltrée. Compte tenu des fréquents déficits en début et en fin de saison des pluies, l'aménagement permet une meilleure installation du peuplement, un meilleur enracinement et une meilleure fructification, augmentant ainsi en 1986 et 1987 le poids en grains par épis et la production de matière sèche sur la parcelle aménagée. Dans les zones basses des parcelles, le gain sur la production de grains est de 11 % en 1985, 81 % en 1986, 31 % en 1987 au profit de la parcelle aménagée, ce qui souligne la variabilité de l'effet et permet de prévoir un effet négatif de l'aménagement si les pluies sont peu intenses et rares en fin de cycle.

L'impluvium agit tout au long du cycle végétatif du mil en augmentant la valeur des lames infiltrées lorsque les sols sont suffisamment absorbants. Son rôle est surtout sensible dans les zones hautes des parcelles pour les faibles pluies; il favorise l'enracinement, améliore la production de matière sèche, le nombre d'organes fructifères et le poids des épis si la capacité de rétention des sols est suffisante.

Plus que le lourd travail du sol par labour, l'aménagement en cordons pierreux isohypses cloisonnés apparaît bien approprié à une conduite extensive des cultures en améliorant sans excès l'alimentation hydrique des sols. Les labours et le billonnage paraissent plus adaptés à des champs qui ne bénéficient pas des effets d'un impluvium en amont des parcelles.

L'amélioration de l'alimentation hydrique des cultures pose à plus ou moins long terme le problème du renouvellement de la fertilité des sols, l'accroissement de la production végétale non restituée allant de pair avec un appauvrissement plus rapide des sols; elle ne constitue donc qu'un des maillons de la chaîne d'un itinéraire technique agricole mieux adapté à une situation nouvelle de déficit pluviométrique et de saturation de l'espace cultivable.

Références

1. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Thèse de doctorat de l'université Paris 6.
2. Casenave A. (1982). Le mini-simulateur de pluie : condition d'utilisation et principes de l'interprétation. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX (4), 207-227.
3. Chevallier P., Lapetite J.M. (1986). Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standard et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Hydro. Conti. (2), 111-119.
4. Martinelli B., Serpantie G. (1987). Deux points de vue sur la confrontation des paysans aux aménageurs. Les Cahiers de la Recherche-Développement, 1 (15), 29-52.
5. Milleville P. (1980). Etude d'un système de production agropastoral de Haute-Volta. Le système de culture. ORSTOM/Ouagadougou, 66 p.
6. Poss R. (1984). La précision du comptage neutronique avec l'humidimètre SOLO 25. Définition des protocoles de mesure. Bulletin VGFHN, 16, 109-122.
7. Siband P. (1981). Croissance et production du Mil. Essai d'analyse du fonctionnement du Mil en zone sahélienne. Thèse de doctorat, académie de Montpellier, 302 p.

15

Quantification de l'érosion à l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride

A. DEMMAK, M. OUAAR, A. GUEDJTAL

Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Clairbois, Avenue Mohammedi Bir Mourad Rais, Alger, Algérie

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone semi-aride, touchant particulièrement les pays d'Afrique du Nord dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

Dans le cadre d'un projet régional PNUD consacré à l'« Etude des ressources en eau dans les pays d'Afrique du Nord » (projet RAB 80/011), une étude sur l'« érosion et les transports solides en zone semi-aride » a été entreprise en Algérie sur le bassin versant de l'oued Isser.

Objectifs et méthodologie

En se basant sur le micro-bassin représentatif et expérimental comme outil d'analyse et de quantification, et sur la cartographie géomorphologique comme outil d'extrapolation et de synthèse, cette étude a été entreprise dans le but d'améliorer les connaissances acquises sur les causes et mécanisme de l'érosion en zone semi-aride. L'étude visait en particulier 4 objectifs :

- quantifier les principales formes d'érosion qui se développent dans le bassin étudié;
- mettre au point des relations précipitation-érosion-transport solide à l'échelle de micro-bassins représentatifs d'une forme d'érosion donnée;
- élaborer une méthode d'évaluation des apports solides à l'exutoire d'un grand bassin à partir des résultats obtenus sur micro-bassins;

— mesurer l'efficacité de différents traitements anti-érosifs et contribuer à la définition d'une stratégie de lutte anti-érosive.

Les hypothèses de bases admises peuvent être formulées comme suit :

— à chaque forme d'érosion peut être associée une charge solide des écoulements;

— la concentration moyenne à l'exutoire d'un bassin est la somme pondérée par la superficie des charges solides partielles de chaque forme d'érosion individualisée.

L'apport solide spécifique à l'exutoire d'un bassin pourra être ainsi déterminé sur la base d'une cartographie des formes d'érosion préalablement quantifiées, moyennant une bonne connaissance des relations pluie-débit.

Le terrain d'étude

Le bassin versant de l'oued Isser (figure 1) limité à la station de Lakhdaria a été choisi pour servir de base à cette étude en raison de ses caractéristiques physico-climatiques représentatives de la zone Tellienne semi-aride, de l'intensité et de la diversité des phénomènes de l'érosion qui s'y développent ainsi que de la qualité des mesures hydropluviométriques qui y ont été effectuées. Par ailleurs, ce bassin fait actuellement l'objet d'un vaste programme d'aménagement hydraulique.

Entravé dans les contreforts de l'Atlas Tellien, le bassin de l'Isser est situé à environ 70 km au Sud-Est d'Alger; il présente sensiblement la forme d'un quadrilatère d'orientation Sud-Ouest/Nord-Est et s'étend sur 3 600 km² à la station de Lakhdaria.

Le cadre géographique dans lequel se développe le bassin est constitué essentiellement de l'Atlas Tellien Algérois au Nord qui culmine à 1 130 m au Djebel Tamesguida et de la chaîne des Bibans au Sud qui culmine à 1 700 m au Djebel Dirra. Ces deux chaînes étant séparées par la plaine des Aribes d'altitude 550 m.

Du point de vue géologique, les affleurements en place, ou charriés du Crétacé supérieur et du Miocène sont prédominants et se traduisent sur le plan lithologique par la présence de marnes schisteuses et de marnes calcaires dans la zone Nord Tellienne.

Dans la zone Sud Tellienne de Souagui, au Sud de la chaîne quartzitique des Bibans, on retrouve les mêmes faciès de marnes schisteuses avec bancs calcaires du Crétacé supérieur.

D'importants affleurements du Miocène continental post-nappe prennent en écharpe le bassin au Nord de la plaine des Aribes et au Sud de la chaîne des Bibans.

Le régime climatique du bassin est marqué par une tendance semi-aride avec une diminution des précipitations du Nord au Sud passant de 700 mm dans la zone Nord Tellienne à 300 mm dans la région de Souagui.

Une étude cartographique de l'érosion dans ce bassin, effectuée au 1/50 000 fait ressortir une corrélation vraisemblable entre la lithologie et l'intensité de l'érosion.

Les formes d'érosion les plus graves sont localisées sur les affleurements argilo-sableux du Miocène continental post-nappe et les formations marno-schisteuses et marno-calcaires du Crétacé supérieur.

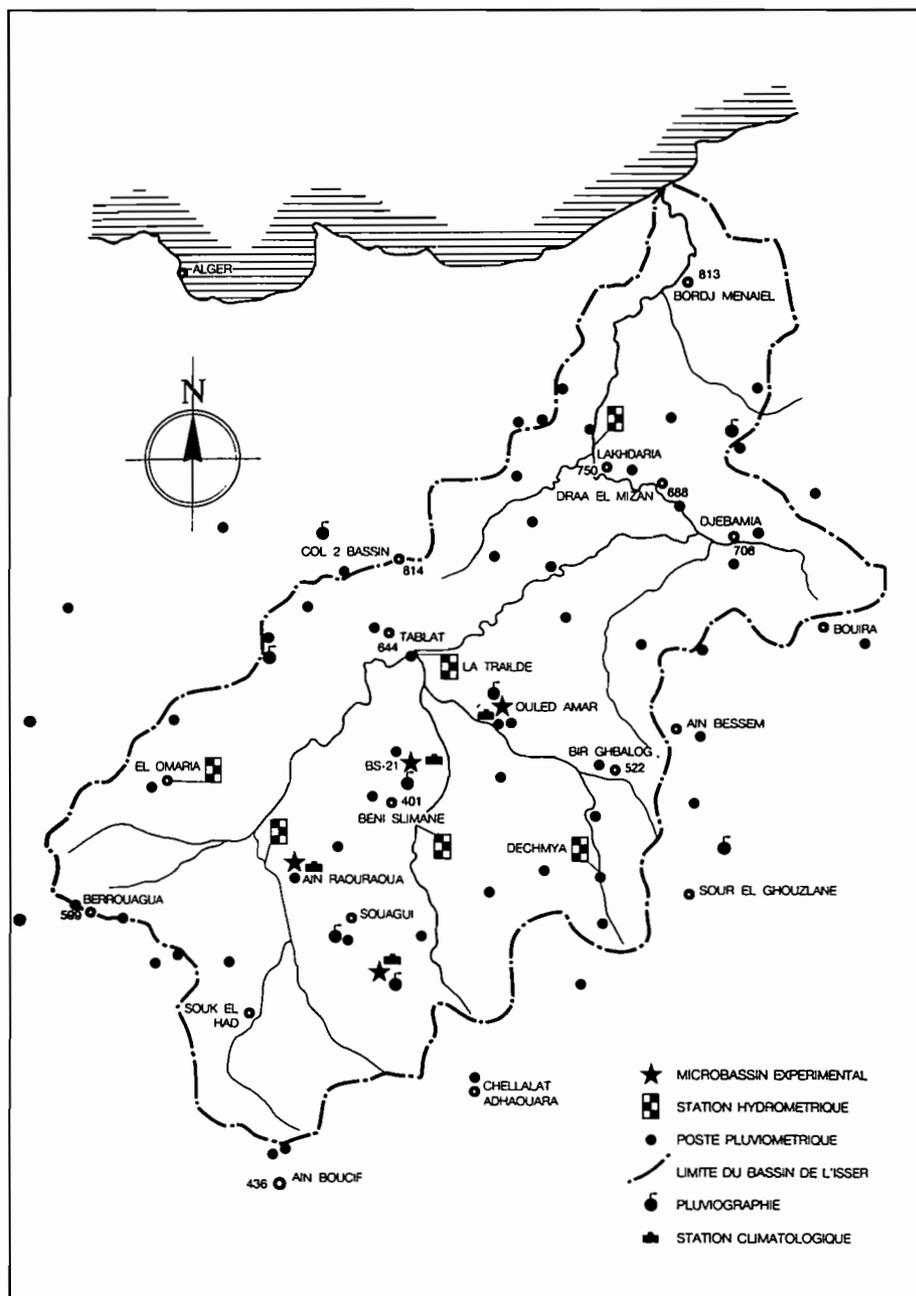


Figure 1. Carte d'implantation des microbassins expérimentaux.

Les études physico-climatiques font apparaître deux grandes zones physico-climatiques distinctes de part et d'autre de la station de La Traille.

A l'aval de cette station, le bassin est soumis à un climat sub-humide et se distingue du point de vue morphodynamique par des entailles linéaires très longues et peu hiérarchisées affectant des versants instables modelés par la solifluxion lente et les mouvements de masse généralisés. En amont de la station de La Traille, le climat est de type semi-aride et l'érosion est tout aussi importante, mais se traduit essentiellement par des ravinements extrêmement hiérarchisés et par des mouvements de masse localisés.

L'essentiel des travaux de recherche a été concentré dans la partie amont semi-aride du bassin.

Les micro-bassins

Sur la base des différentes études physico-climatiques et morpho-dynamiques réalisées, quatre couples de micro-bassins représentatifs, ont été sélectionnés et équipés dans la zone d'étude.

Ces micro-bassins ont été installés par couples dans le but d'appliquer ultérieurement un traitement anti-érosif sur un des bassins du couple, le deuxième étant maintenu vierge en guise de bassin témoin.

La sélection a été effectuée en se basant sur différents critères (superficie; représentativité; homogénéité; accessibilité) permettant une représentation exhaustive des principales formes qui se développent sur le bassin.

Caractéristiques physiques

Bassin	Superficie (ha)	Altitude (m) Hmin - Hmax	Lithologie	Occupation du sol	Erosion
Ain Raouraoua	18	720 - 757	Alluvions quaternaires	Céréale - culture	En nappe
Souagui 1	27	1 002 - 1 123	Marnes calcaires	Céréale - culture	Glissement (planche)
Souagui 2	"	" "	Marnes pyriteuses paléocènes	Friche	entailles ravine indiv.
BS 21 - 1	169	680 - 844	Argiles sableuses	Céréales	Ravinement + mouvements
BS 21 - 2	84	" "	Miocène post-nappe	Friche Boisement	de masses ponctucls
Ouled Amar 1	8	454 - 590	Argiles sableuses	Nulle	Bad-land
Ouled Amar 2	18	" "	Miocène		

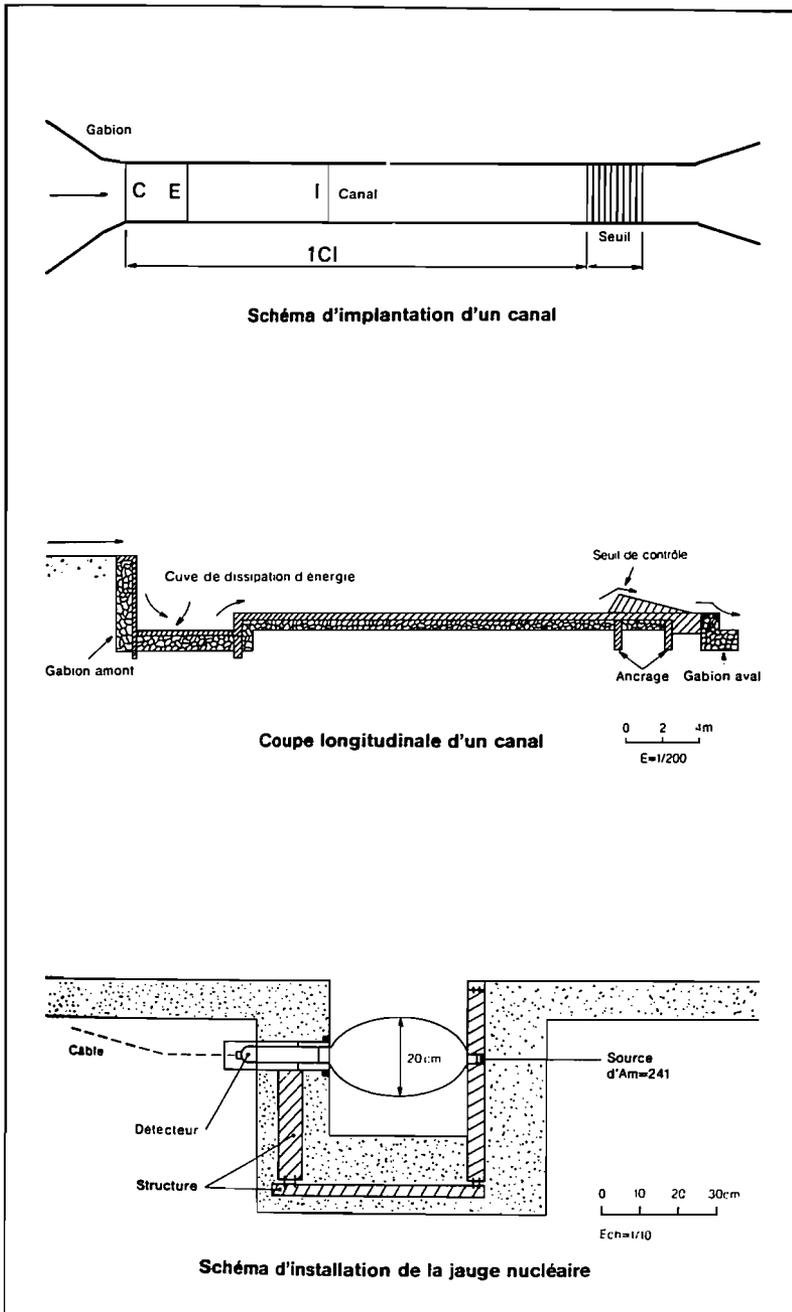


Figure 2. Dispositif de mesure type sur microbassin.

Dispositifs de mesure

Etant donné le caractère fugace et imprévisible des écoulements sur ces micro-bassins, ceux-ci ont été équipés de jaugeurs précalibrés à seuil épais munis de batteries d'échelles et de limnigraphes pneumatiques (figure 2).

Des fosses de dissipation d'énergie ont été aménagées en amont du canal d'amenée de chaque jaugeur afin de régulariser les écoulements et piéger les charriages de fond. Deux pluviographes ont été installés sur chaque bassin et une station climatologique sur chaque couple. La mesure des transports en suspension est effectuée à partir des prélèvements d'échantillons.

En outre des techniques de mesures automatiques ont été expérimentées sur quelques micro-bassins (préleveurs automatiques type Manning - jauges nucléaires à l'Am 241).

Les premiers résultats

Quantification de l'érosion

Les 2 premières années d'observation des paramètres hydro-climatologiques sur les micro-bassins étudiés ont présenté une hydraulité plutôt faible.

Le micro-bassin de Ain Raouraoua n'a pas donné lieu à un ruissellement quantifiable.

Par contre 76 événements ont été observés sur les 3 autres couples de micro-bassin et ont conduit aux résultats suivants :

Souagui

Situé dans la zone la plus aride du bassin de l'Isser, ce micro-bassin présente une faible aptitude au ruissellement liée à la présence de vertisols profonds, et à la faible pluviométrie annuelle (300 mm).

Par contre, les intensités d'averse peuvent être très fortes (150 mm/h en un quart d'heure).

Le ravinement qui caractérise la dynamique érosive de ces bassins s'est avéré particulièrement agressif et producteur de sédiments : taux d'abrasion (TA) : 4 900 t/km²/an; concentration moyenne annuelle (\bar{C}) : 300 g/l.

B.S. 21

Constitués d'argiles sableuses du miocène post-nappe sous 400 mm de précipitation, ces micro-bassins présentent une dynamique érosive complexe combinant le ravinement avec différents types de mouvements de masse ponctuels (Figure 3).

$$\begin{aligned}\overline{TA} &= 400 \text{ t/km}^2/\text{an} \\ \bar{C} &= 50 \text{ g/l}\end{aligned}$$

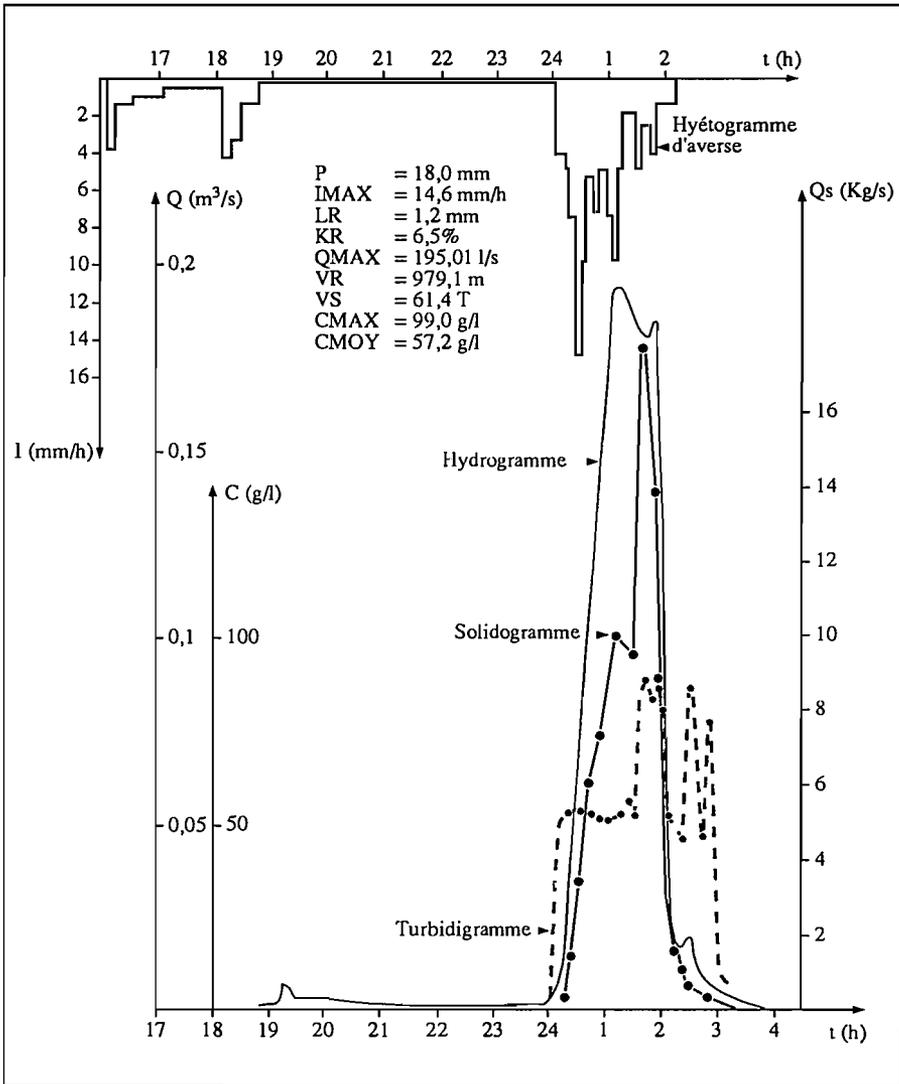


Figure 3. Bassin versant expérimental BS 21 II : crue des 3 et 4 avril 1984.

Ouled Amar

Forte aptitude au ruissellement liée à une lithologie argileuse imperméable dépourvue de sol et de végétation associée à de fortes pentes et à une pluviométrie relativement importante (500 mm).

Les transports solides spécifiques sont là aussi considérables en liaison avec l'intensité de l'érosion (Bad Land) :

$$\overline{TA} = 4\,000 \text{ t/km}^2/\text{an}$$
$$\overline{C} = 50 \text{ g/l}$$

Relations précipitation-ruissellement-érosion à l'échelle de l'événement

Une analyse globale en corrélation multiple appliquée aux différents paramètres de ruissellement et d'érosion observés durant 2 ans a donné les résultats suivants :

B.S. 21

$$RP = 37 P^{1.5} - 349 \text{ SAI} - 321$$
$$Q_{\max} = 2,28 RP^{1,886} (TB/0,35)^{-0,61}$$
$$C = 17 + 0,12 Q_{\max}$$

Souagui

$$RP = 58 P^{1.5} - 1370 \text{ SAI} - 281$$
$$Q_{\max} = 6,48 RP^{0,886} (TB/0,21)^{-0,67}$$
$$C = 168$$

Ouled Amar

$$RP = 105 P^{1.5} + 775 \text{ TPL} - 3340 \text{ SAI} - 1976$$
$$Q_{\max} = 7,86 RP^{0,886} (TB/0,12)^{-0,67}$$
$$C = 38 + 0,01 Q_{\max}$$

RP : Ruissellement (m^3/km^2)

P : Précipitation (mm)

TPL : Durée de la pluie > 2 mm/h (heure)

SAI : Indice saisonnier lié au cycle annuel des températures

SAI : Sin (30 AM - 135°) AM variant de 1 (15/01) à 12 (15/12)

Q_{max} : Débit maxima ($\text{l/s}/\text{km}^2$)

TB : Temps de base de crue (heures)

C : Concentration solide (g/l).

Il s'agit là de résultats provisoires. Les observations se poursuivent actuellement sur l'ensemble de ces micro-bassins et donneront lieu à une analyse plus exhaustive permettant une meilleure connaissance du phénomène de l'érosion en zone semi-aride.

Références

1. Projet RAB 80/011. Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. 1^{er} séminaire technique du projet, Alger, septembre 1983.
2. Projet RAB 80/011. Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. 2^e séminaire technique du projet, Alger, avril 1985.
3. Normand D. Modélisation des transports solides dans le bassin versant de l'oued Isser. Projet RAB 80/011, août 1986.
4. PNUD/OPE. Algérie-Tunisie-Maroc. Ressources en eau dans les pays d'Afrique du Nord. Rapports techniques, vol. 1, mai 1987.

PARTIE IV

Gestion de l'eau pour l'agriculture et autres utilisations

16

Les eaux de surface : leur place dans l'alimentation en eau des centres urbains

F. LO, G. ESCOURROU

Université de Paris-Sorbonne, France

Cet article expose les résultats partiels d'un travail portant sur les conditions d'alimentation en eau de trois villes soudano-sahéliennes : Saint-Louis au Sénégal, Bamako au Mali et Ouagadougou au Burkina Faso.

L'environnement géologique et hydrogéologique de ces villes est tel, que les potentialités des ressources en eaux souterraines sont faibles et imposent le recours aux eaux de surface. Si l'alimentation en eau de Saint-Louis et Bamako se fait à partir de cours d'eau pérennes (le Gorom-Lampsar, défluent du fleuve Sénégal et le fleuve Niger), à Ouagadougou en revanche, l'absence de tels écoulements conduit au stockage des eaux de ruissellement dans des barrages réservoirs.

C'est le cas de cette dernière ville que nous nous proposons d'étudier ici. Son alimentation en eau est assurée par quatre retenues (figure 1) :

- une série de trois barrages (Ouaga 1, 2, 3) sur le bassin-versant même de la ville;
- le barrage de Loumbila, situé à une vingtaine de km au Nord-Est, en zone rurale.

Nous essaierons, à partir de ce dispositif :

- de quantifier par séquences pluviométriques les volumes d'eau écoulés dans les retenues;

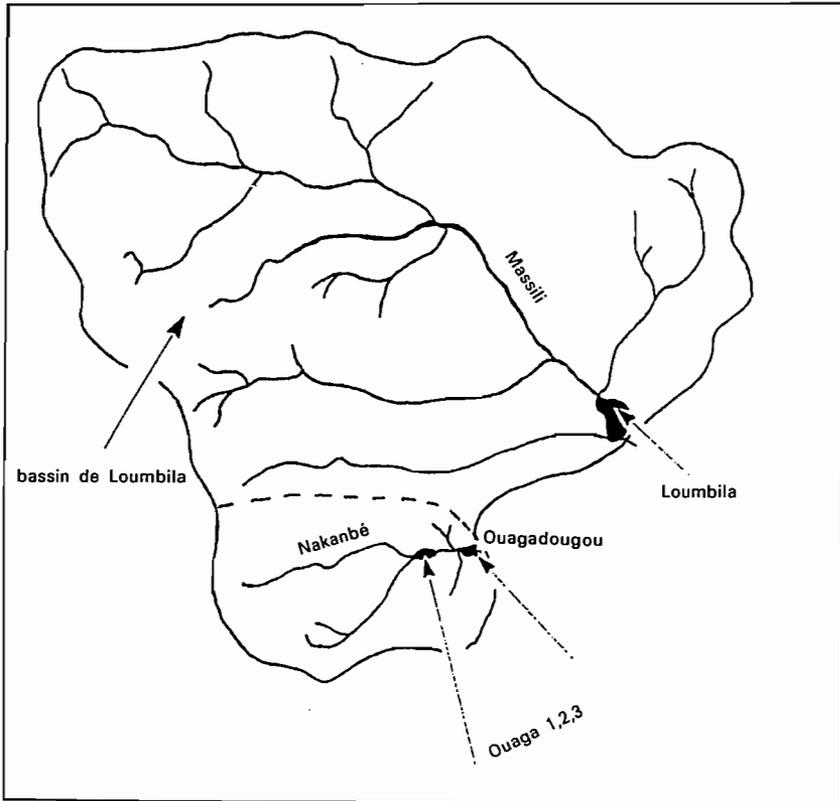


Figure 1. Sites des barrages de Ouagadougou.

- de dégager quelques spécificités des processus de ruissellement en milieux urbain et rural;
- d'évaluer l'efficacité des retenues compte tenu de leur morphologie et de l'importance de la reprise par évaporation des volumes d'eau stockés.

Quelques paramètres descriptifs de la ville de Ouagadougou

Présentation

La ville de Ouagadougou appartient au plateau Mossi, qui couvre tout le centre du Burkina Faso. Elle occupe une partie du bassin-versant du Nabaouli, affluent du Massili, lui-même affluent de rive droite de la Nakanbé. La superficie urbaine est de 110 km² dont à peine 40 % sont équipés et lotis.

Les eaux de surface

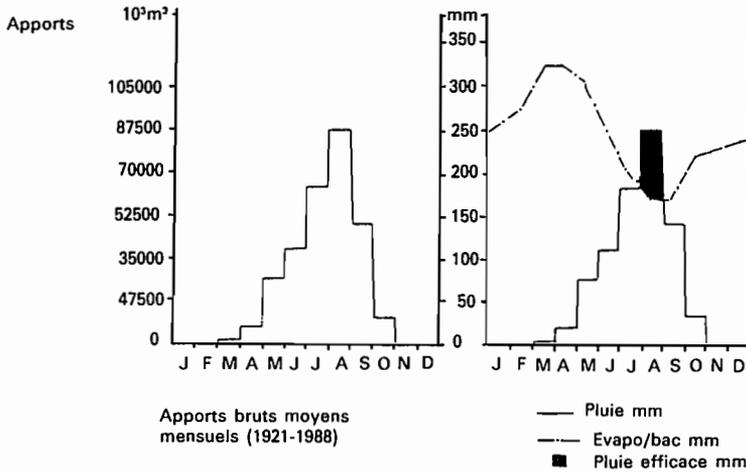


Figure 2. Apports bruts moyens mensuels et bilan des apports.

Elle connaît une urbanisation accélérée et une démographie galopante qui entraînent une intensification des activités consommatrices d'eau. En effet, la population a connu une croissance quasi exponentielle, passant de 59 126 habitants en 1961 à 236 000 en 1980. Aujourd'hui, elle s'accroît à un rythme de près de 9 % par an et dépassera le cap, du million en l'an 2000. Corrélativement, les besoins en eau augmentent plus rapidement : de 1 102 160 m³ en 1961, ils sont passés à 7 754 400 en 1980, et sont estimés à 50 000 000 à l'an 2000.

Le contexte hydroclimatique de la ville est-il propice à la satisfaction de tels besoins ?

Les ressources en eaux souterraines

Ouagadougou se trouve sur un socle granito-gneissique précambrien recouvert d'une épaisse couche d'altération latéritico-argileuse. Cette structure géologique ne comporte pas d'importantes nappes aquifères; seules les fractures ouvertes du substratum et la couche d'altération peuvent contenir de modestes réserves. Selon les études faites par Lahmayer International et Iwaco, le volume exploitable de cet ensemble est de 1 834 125 m³ par an. Compte tenu de cette modicité, elles ne peuvent constituer qu'un appoint (15 % environ, essentiellement destinés aux zones périphériques) dans le système d'approvisionnement en eau de la ville.

Les eaux superficielles

Elles constituent des apports bruts (figure 2) et sont représentées par les précipitations. Sur un bassin-versant de 350 km², la ville reçoit en moyenne 841,6 mm d'eau, répartis entre les mois de mai et octobre, le reste de l'année constituant la

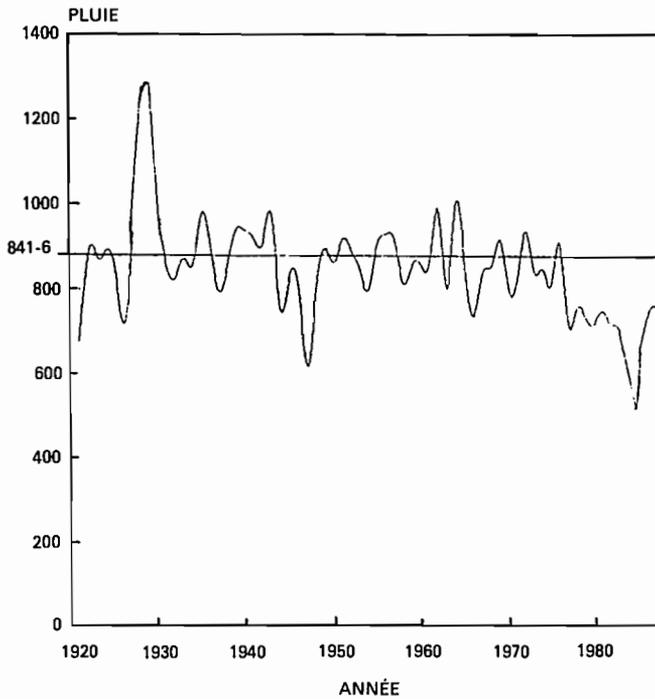


Figure 3. Évolution interannuelle de la pluviométrie à Ouagadougou.

saison sèche sans apports pluviométriques substantiels. Ainsi, le volume d'eau théoriquement disponible serait de 294 106 m³ par an. Cependant, cet apport connaît une grande variabilité interannuelle, avec un maximum maximum de 1 308 mm en 1928, et un minimum minimum de 560,5 mm en 1984. On constate par ailleurs, que de 1968 à 1985, les pluies déficitaires l'emportent largement (figure 3).

Le bilan des apports

L'efficacité des précipitations est réduite par le rôle inhibiteur de l'évapotranspiration. Celle-ci représente une lame d'eau de 3 006 mm avec un maximum de 333 mm en mars et un minimum de 173,5 mm en août. La sollicitation climatique évaporatoire est largement supérieure à l'apport brut (3 006 contre 841,6 mm). Le bilan climatique est globalement déficitaire :

- en année moyenne, sur un total précipité de 841,6 mm, le surplus hydrologique représente 28 175 000 m³ (soit, 80,5 mm);
- en année décennale humide (comme en 1972), la période d'excédent se déroule sur trois mois et les précipitations efficaces représentent 104 300 000 m³;
- en année décennale sèche, le surplus hydrologique représente 13 335 000 m³.

Cependant, les chiffres ci-dessus énoncés ne sont que des résultats de calcul à partir d'un schéma conceptuel moyen. En réalité, les phénomènes de ruissellement peuvent être plus importants tant en intensité qu'en durée, compte tenu de la physionomie des précipitations.

Les surplus ainsi dégagés, aussi bien en année faste que déficitaire, sont en mesure de satisfaire totalement ou en partie les besoins en eau de la ville. Cependant, leur étalement sur toute l'année conduit, en raison de la concentration de l'écoulement sur deux ou trois mois, à une pénurie structurelle que seul un stockage des eaux de ruissellement peut résorber.

Cadre des actions d'aménagement des ressources en eau

Les barrages de Ouaga et de Loumbila

Le champ spatial auquel se réfèrent les actions d'aménagement est constitué, pour le bassin-versant de la ville, par le marigot temporaire du Nabaouli. Sur le lit de ce dernier, sont construits les barrages de Ouaga 1, 2 et 3, qui constituent le réceptacle d'une partie des eaux pluviales. L'urbanisation de la ville a pour effet d'augmenter les superficies imperméables entraînant un accroissement du ruissellement au détriment de l'infiltration. Les coefficients d'imperméabilisation varient de 0,35 dans les zones non loties, à 0,5-0,8 dans les zones loties et équipées (figure 4).

Quant au barrage de Loumbila, il est construit à l'aval du bassin-versant du Massili qui comporte une soixantaine de petites retenues. Le bassin-versant est très allongé; son périmètre est de 188 km, et son coefficient de compacité de 1,15. Il est peu accidenté; l'altitude maximale est de 320 m. La pente du Massili est de 1 ‰, et l'indice de drainage de 0,289. Le coefficient de perméabilité varie entre 4 et 5. Les sols ferrugineux lessivés de même que la discontinuité du couvert végétal sont favorables au ruissellement des eaux météoriques, mais celles-ci sont mal drainées.

Caractéristiques des barrages

Des quatre retenues, c'est le barrage de Ouaga 3 qui offre les possibilités de stockage les plus intéressantes (Tableau 1) : la superficie de son plan d'eau change peu par rapport au niveau d'eau, ce qui amoindrit les pertes par évaporation.

Tableau I. Caractéristiques des barrages de Ouagadougou

	Ouaga 1	Ouaga 2	Ouaga 3	Loumbila
Surface B.V. (km ²)	285	65	65	2 120
Surf. plan d'eau (m ²)	7 000 000	1 950 000	850 000	16 900 000
Volume (m ³)	750 000	2 590 000	2 770 000	35 500 000
Prof. moyenne (m)	0,95	1,34	3,30	6,40

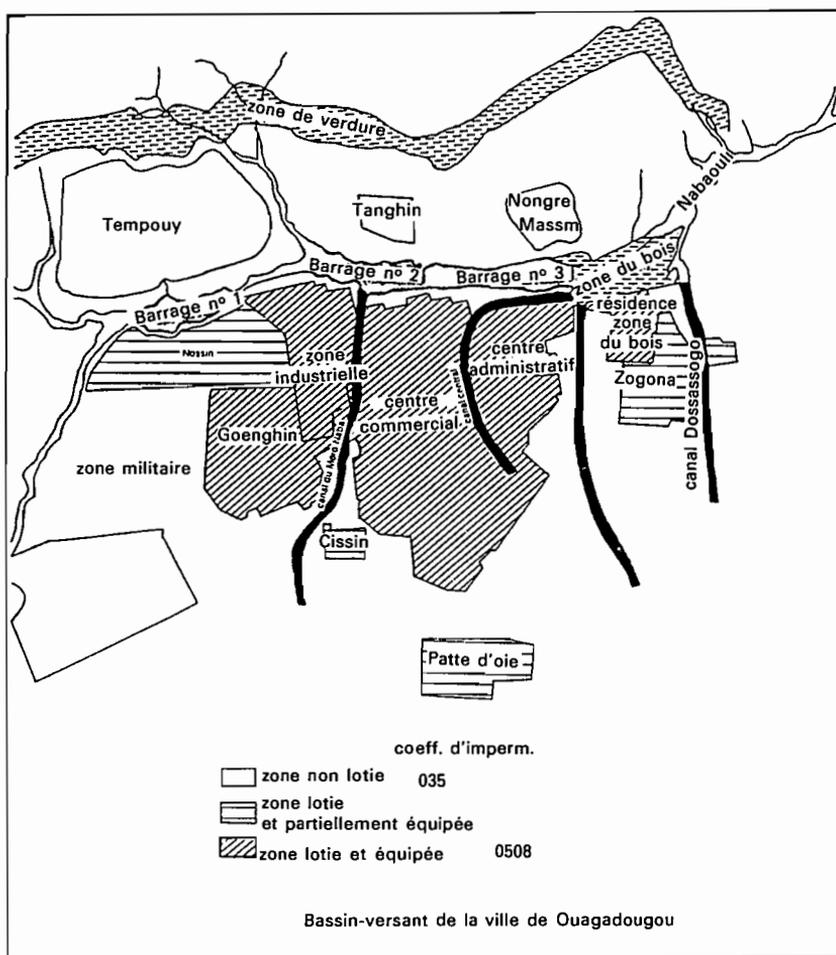


Figure 4. Bassin-versant de la ville de Ouagadougou.

Fonctionnement hydraulique

La vanne de fond reliant la retenue médiane au barrage amont étant ensevelie, ce dernier n'est plus en exploitation. Le remplissage de la retenue aval s'effectue par l'intermédiaire de la vanne de fond la reliant à Ouaga 2, d'une part, et par l'évacuateur de crue de cette dernière, d'autre part (figure 5). La retenue médiane est essentiellement alimentée par le canal du Moro Naba qui, avec une longueur de 3 400 m, draine un bassin-versant moyennement urbanisé de 65 km².

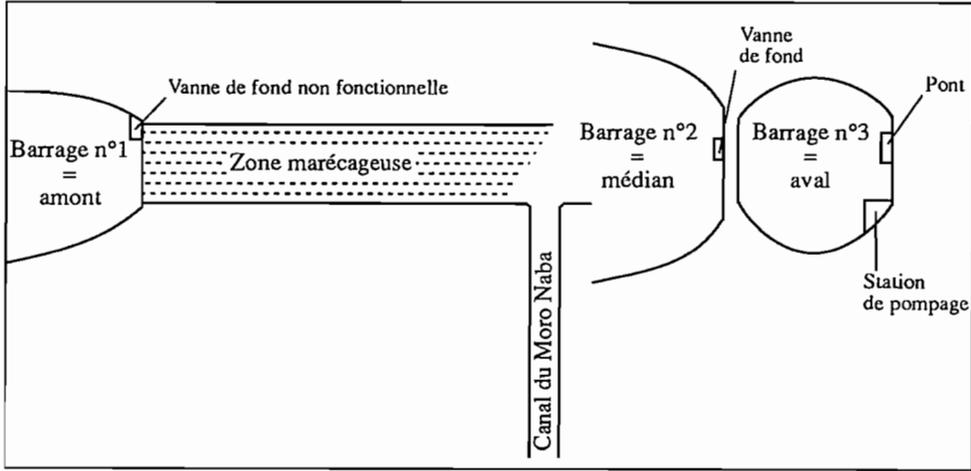


Figure 5. Les barrages de Ouaga 1, 2 et 3.

Les volumes d'eau stockés dans les retenues de Ouaga 2 et 3 étant faibles et sans commune mesure avec les besoins de la ville, le recours au barrage de Loumbila s'est avéré nécessaire. Les rapports hauteur-volume-surface de cette retenue, sont, à l'instar des barrages de Ouaga, défavorables (Tableau I).

Les apports d'eau dans les retenues. Relations entre la pluviométrie et le volume ruisselé

Méthodologie

La reconstitution des apports se fait à partir des relevés limnimétriques afférents aux retenues, en tenant compte des prélèvements anthropiques et évaporatoires. La prise en compte d'un pas de temps relativement fin permettant de serrer de près la réalité, les calculs sont faits en partant du niveau minimal du plan d'eau h_0 et des variations positives Δh du plan d'eau. L'apport théorique en fin de séquence est la somme des Δh positives à laquelle correspond un volume d'eau. L'évaluation s'arrête lorsqu'il n'y a plus d'apport et que les variations Δh commencent à être négatives, ou lorsque les retenues commencent à déverser. Par ailleurs, les volumes d'eau ruisselés à Ouaga 2 et 3 ne correspondent qu'à la fraction de l'écoulement drainé par le bassin-versant de la retenue médiane (65 km²).

Le Tableau II donne un exemple de cette méthodologie de calcul pour l'année 1984.

Tableau II. Relations entre la pluviométrie et le remplissage des barrages en 1984

Ouaga 2 + 3			
Dates	ΔH cm	Vol. Ruis. m ³	Pluie mm
<i>mai</i>			
du 8 au 9	12	50 000	17,7
du 18 au 28	22	331 181	34,4
du 30 au 1	9	93 182	9,7
<i>juin</i>			
du 12 au 15	12	142 167	15,0
<i>juillet</i>			
du 3 au 7	64	454 172	66,0
du 13 au 20	20	374 605	32,0
du 24 au 26	26	250 000	59,0
du 31 au 1	17	356 768	34,5
<i>août</i>			
du 24 au 29	9	116 667	30,0
<i>septembre</i>			
du 31 au 4	25	183 333	35,3
du 10 au 13	30	350 000	39,0

Loumbila			
<i>juin</i>			
du 1 au 9	14	1 109 064	20,0
du 12 au 15	4	352 199	12,5
du 16 au 17	1	131 433	2,0
<i>juillet</i>			
du 6 au 15	28	1 942 448	41,0
du 18 au 20	4	510 277	7,5
du 23 au 30	24	1 840 971	14,5
<i>août</i>			
du 1 au 3	10	750 916	24,0
du 10 au 13	11	926 374	33,0
du 14 au 19	3	377 290	12,0
du 27 au 31	7	677 832	31,0
<i>septembre</i>			
du 1 au 23	94	9 169 603	112,0

Résultats

Les apports séquentiels sont reconstitués sur notre période d'étude (1980-1987).

Nous présentons ici les résultats de quelques années caractéristiques.

— *Une année déficitaire : 1984* (figure 6)

Les montées de plan d'eau et les volumes ruisselés sont modestes comme l'indique le Tableau ci-dessous :

	Ouaga 2 + 3	Loumbila
P (mm)	560,5	491
Déficit (%)*	33	35
P. avant montée (mm)	35,5	76
P. utile (mm)	416,7	309,5
Vol. ruisselé (mm ³)	3,45	17,8
Lame ruisselée (mm)	53	8,4
Coef. ruisselé (%)	12,7	2,7

Les conditions de remplissage des retenues, similaires à celles observées en 1982, sont déficientes en raison de la physionomie défavorable des pluies, marquées par la rareté des averses ruisselantes. Leur occurrence passe de 33 % en juillet à 9 % en août à Ouagadougou. A Loumbila, les fréquences sont de 12 et 14 %. C'est la troisième année consécutive que la retenue ne déverse pas. Ces conditions d'alimentation en eau défavorables se traduisent par des pentes d'hydrogramme des crues très atténuées, et une multiplicité des séquences de montée d'eau.

— *Une année satisfaisante, 1985* (figure 7), caractérisée par :

- un niveau initial très bas des retenues, compte tenu des mauvaises conditions de remplissage précédentes. A Ouaga, on a dû procéder au transfert par pompage des eaux de la retenue médiane vers celle de l'aval;

- une pluviométrie annuelle déficitaire (552 mm à Ouaga et 620 mm à Loumbila), mais qui a pu assurer un remplissage satisfaisant des retenues, comme l'indique le Tableau III.

Tableau III. Relations entre la pluviométrie et le remplissage des retenues en 1985

	Ouaga 2 + 3	Loumbila
P (mm)	552	620
Déficit (%)*	34,5	35
P. avant montée (mm)	5	55
P. utile (mm)	317,6	241,5
Vol. ruisselé (mm ³)	4,7	39
Lame ruisselée (mm)	72 6	18,4
Coef. ruisselé (%)	23	7,6

* Écart relatif (en %) entre la pluie annuelle et la moyenne interannuelle des précipitations.

La montée des eaux commence dès la première décade de mai à Ouaga, alors qu'elle n'a lieu à Loumbila qu'à partir de la dernière décade (juin). Ceci se comprend aisément; la répartition pluviométrique témoigne d'une grande hétérogénéité spatiale due à :

- l'étendue du bassin-versant qui induit un lissage des intensités pluviométriques moyennes;
- le caractère localisé des averses isolées qui intéressent la zone soudano-sahélienne en début d'hivernage.

Le déversement précoce des retenues traduit le dynamisme des averses, malgré une installation tardive de l'hivernage. On note par ailleurs une plus grande sensibilité du bassin de Loumbila aux fortes averses, ce qui s'expliquerait par la place de celles-ci dans le déroulement de la saison pluvieuse. Les conditions d'alimentation en eau des retenues sont caractéristiques d'un scénario presque idéal de remplissage :

- efficacité des averses de mai, notamment à Ouaga;
- répit pluviométrique en juin, mais qui est contrebalancé par le dynamisme des précipitations de juillet (intensités maximales 37 mm à Ouaga et 42 mm à Loumbila);
- plus grande occurrence des jours pluvieux en août, malgré une moindre intensité des averses, ce qui permet le maintien du plan d'eau à un niveau relativement élevé;
- importance de l'averse du 2 septembre (50 mm) qui assure aux réservoirs des conditions de fin de remplissage optimales. Ces différents facteurs se traduisent par des pentes d'hydrogrammes de crue plus soutenues.

Entre les deux années ci-dessus étudiées, il existe des situations extrêmes, comme celles de 1983, année durant laquelle les retenues de Ouaga, malgré un niveau initial très bas (– 55 cm), ont connu un déversement précoce et concomitant (figure 8) dès la troisième décade de juin. Les hauteurs d'eau précipitées mises en jeu sont modestes (101 mm), mais la vitesse de l'écoulement (pente d'hydrogramme quasi verticale qui traduit la croissance rapide des plans d'eau) témoigne du dynamisme des averses et des particularités des processus de ruissellement en milieu urbain. Le coefficient de ruissellement observé (74 %) est le plus fort de toute la série. La retenue de Loumbila, bien qu'ayant enregistré des montées sensibles, n'a cependant pas atteint sa cote de déversement.

Essai de comparaison du ruissellement urbain et rural

Référence faite aux paramètres précédemment étudiés, la comparaison se fait à partir des caractéristiques de l'écoulement que sont les apports spécifiques et le coefficient de ruissellement. Dans le cas de Loumbila, les apports concernent les volumes d'eau stockés dans les réservoirs en tête de bassin cumulés à ceux retenus dans le barrage de Loumbila et ceux jaugés à la station de Gonsé.

Résultats :

Les apports spécifiques représentent : 1 l/s/km² à Loumbila et 2,5 à Ouagadougou. Pour des hauteurs d'eau moyennes annuelles de 644 et 688 mm, nous

Les eaux de surface

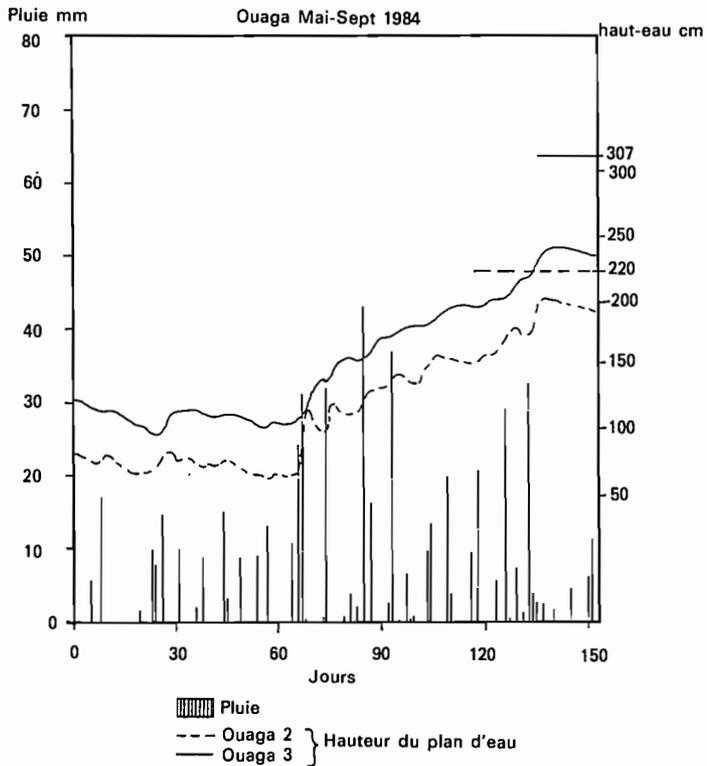
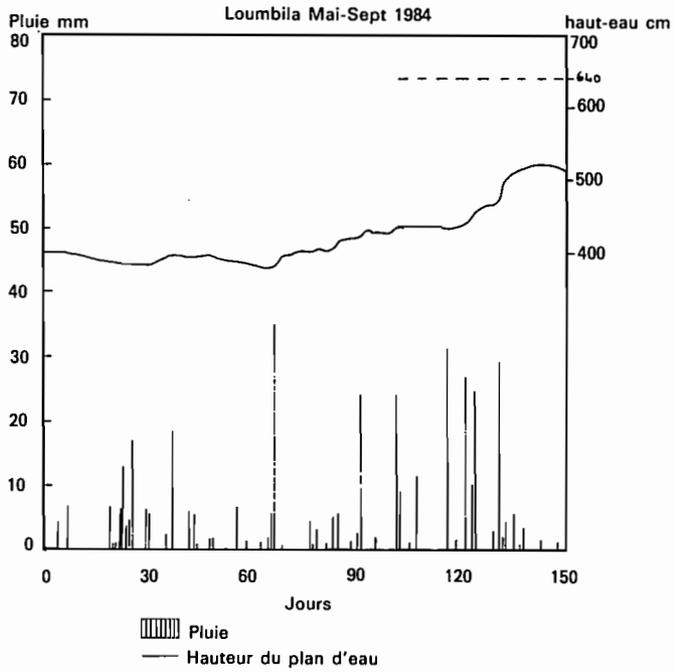


Figure 6. Relations entre la pluviométrie et le remplissage des barrages (1984).

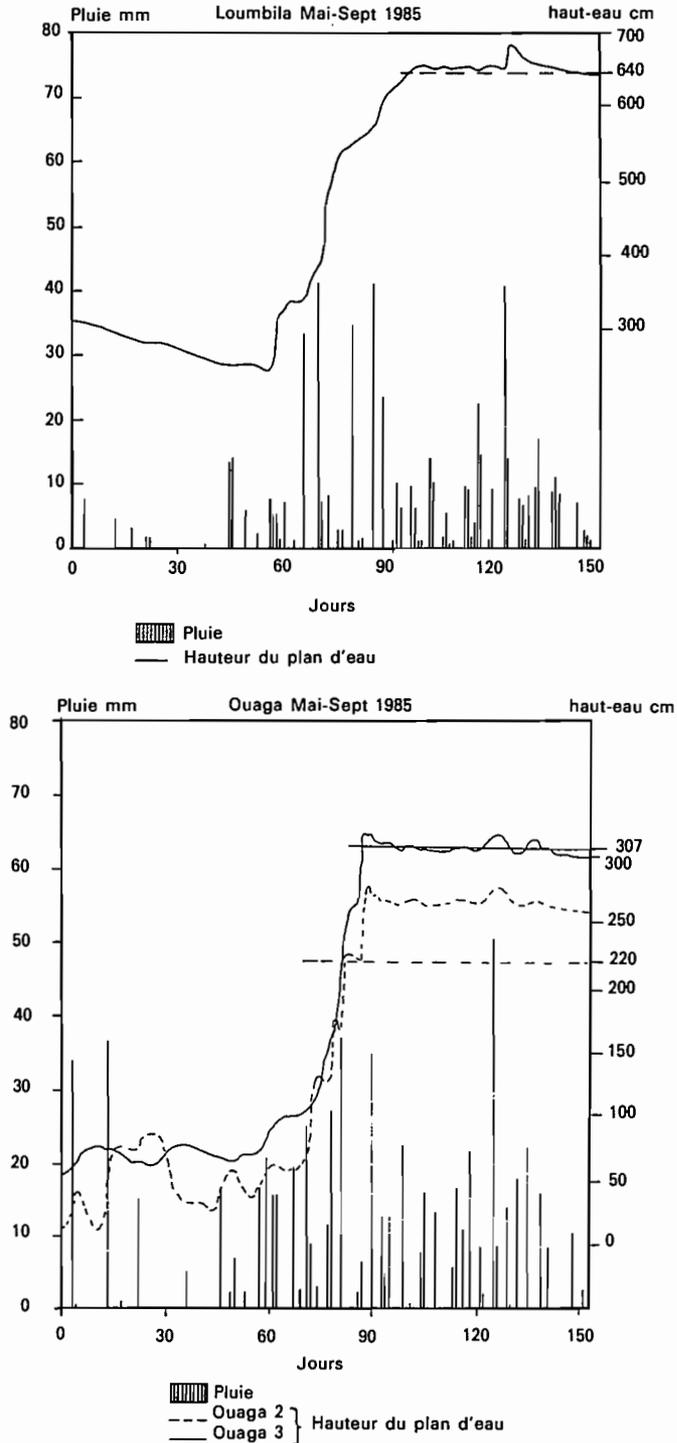


Figure 7. Relation entre la pluviométrie et le remplissage des barrages (1985).

Les eaux de surface

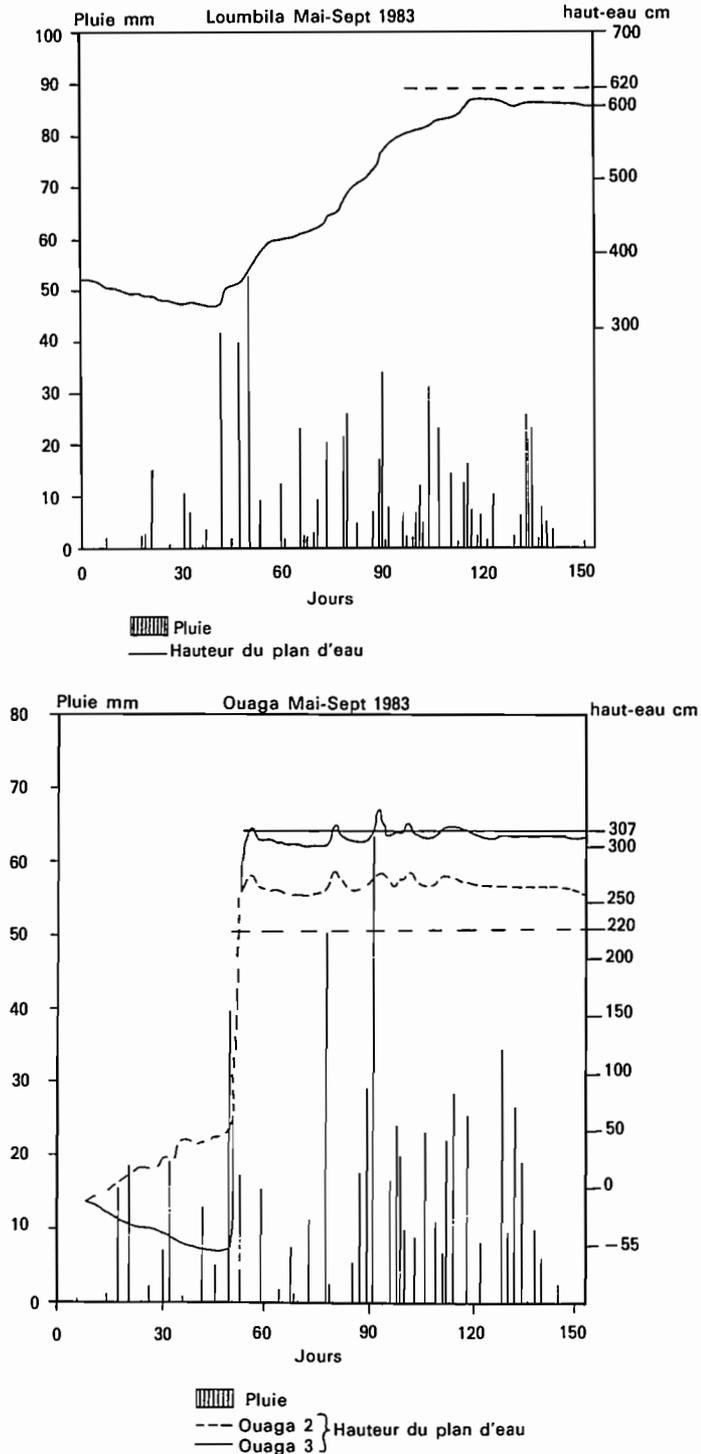


Figure 8. Relations entre la pluviométrie et le remplissage des barrages (1983).

aboutissons à des coefficients de ruissellement de 5 et 12 %. Le coefficient de ruissellement de Ouagadougou est modeste en raison de la présence de zones non urbanisées dans le nord du bassin.

À Loumbila, le faible coefficient résulte du caractère rural du bassin-versant. Le revêtement du substratum est tel, que l'écoulement dépend de l'état initial du bassin-versant et de la teneur en eau du sol. Les années prises en compte nous permettent de fixer le seuil de ruissellement entre 50 et 70 mm. A Ouaga, en revanche, celui-ci se situerait entre 5 et 30 mm. A ces différences, s'ajoute l'inertie du bassin de Loumbila; le faible développement du réseau hydrographique du Massili et la présence de larges zones d'épandage constituent autant d'éléments défavorables à l'écoulement des eaux. À Ouaga, par contre, la nature du revêtement du bassin induit une vélocité de l'écoulement telle, que la montée des plans d'eau est presque synchrone à l'événement pluvieux.

Étude de l'efficacité des retenues

Une bonne partie des eaux stockées est perdue par évaporation. Le volume d'eau ainsi prélevé est de loin supérieur à celui afférent à l'alimentation en eau humaine. Aussi, avons-nous essayé d'estimer l'efficacité des retenues en faisant un bilan qui débute le 30 septembre, car on estime qu'à partir de cette date, les apports susceptibles de faire varier le stock sont faibles et aléatoires. Il se termine en avril ou mai : c'est un bilan en régime non influencé (figure 9).

Résultats :

En se référant à l'année 1980-1981, les rendements des retenues sont de 30 % à Ouaga et 24 % à Loumbila. La période de pointe des prélèvements anthropiques est atteinte en mars à Loumbila et en avril à Ouaga. Les prélèvements par évaporation, variables en fonction de la superficie des plans d'eau, atteignent leurs valeurs maximales en octobre. Quelle que soit l'année prise en compte, cette tendance demeure la même. Une valeur moyenne de rendement de 37 % à Loumbila et 47 % à Ouaga semble être un maximum. Le faible rendement enregistré à Loumbila, malgré l'importance des volumes d'eau anthropiques qui y sont prélevés montre que ce barrage fonctionne comme un réservoir évaporatoire et que les retenues de Ouaga (surtout celle de l'aval conviennent le mieux d'un point de vue géométrique à une gestion optimale des ressources en eau, et ce d'autant plus que les conditions pluviométriques actuelles sont marquées du sceau d'une certaine précarité.

Conclusion

Cette étude nous permet de saisir les interrelations complexes entre la pluie, l'écoulement, et le milieu naturel et urbain. L'intensité, la succession des pluies et le mois de l'année où elles tombent constituent les clés de voûte des disponibilités hydriques à Ouagadougou. De ce point de vue, les pluies de juillet et août revêtent,

Les eaux de surface

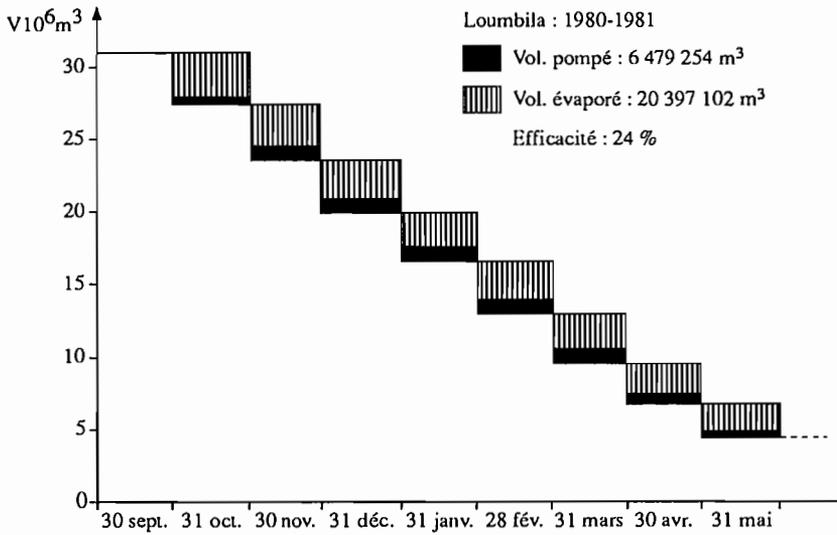
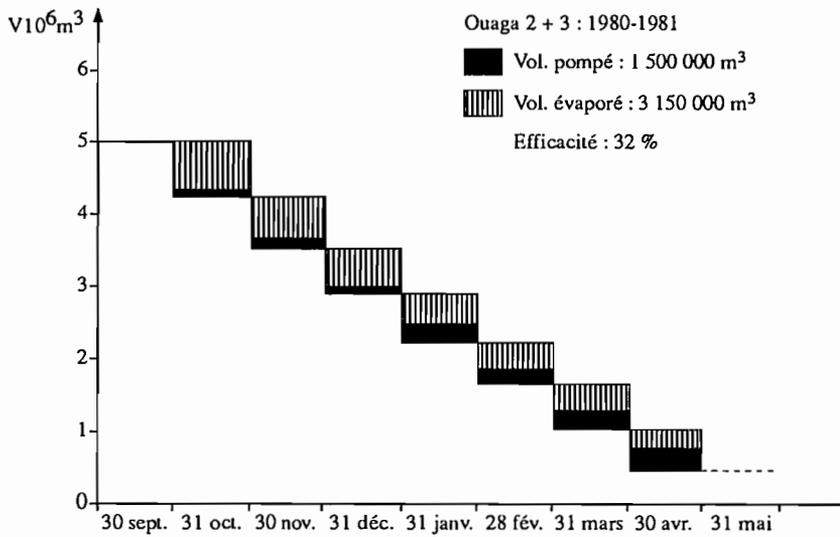


Figure 9. Bilan des retenues de Ouagadougou en 1980-81.

notamment à Loumbila, une importance capitale : les premières, en permettant la recharge de la réserve en eau du sol, assurent de bonnes conditions de ruissellement aux secondes. En revanche de longues pauses pluviométriques en plein hivernage, induisent des déficits d'écoulement et, partant, la précarité du remplissage des retenues. À Ouaga, la prédominance d'un mois sur l'autre est moins nette.

Par ailleurs, l'emprise de l'évaporation sur les volumes d'eau stockés est telle que, en année de mauvais remplissage, les retenues sont exploitées en dessous de leur capacité minimale acceptable, ce qui se traduit à l'aval par une consommation d'eau de qualité douteuse. De plus, la création de retenues pour les besoins agricoles en amont du bassin d'alimentation de Loumbila est préjudiciable en année de mauvais remplissage. On comprend dans un tel contexte que la recherche d'autres sources d'alimentation en eau pour la ville s'avère nécessaire.

17

Utilisation combinée de l'eau pour la Consommation et l'Énergie dans les cas de débits non pérennés

Y. ZECH et B. HUBERLANT

*Université Catholique de Louvain, Unité de Génie Civil,
Place du Levant, 11348 Louvain-la-Neuve, Belgique*

Le plus souvent, les régions les moins denses des pays sahéliens et subsahéliens de l'Afrique ont à faire face à un double défi concernant leur développement.

En effet, au problème évident de *manque d'eau* vient s'ajouter celui d'une *pénurie en ressources énergétiques*. Les villes et villages isolés sont en dehors des grandes lignes de transport électriques et sont souvent privés de voies de communication suffisantes pour un approvisionnement bon marché en combustible. De plus, leurs ressources ligneuses ont disparu dans le processus de désertification, rendant problématique l'approvisionnement local en énergie.

Cependant, dans les zones semi-arides, il n'est pas rare que le volume annuel d'eau soit globalement suffisant, mais mal réparti sur l'année. Dans ce cas, il est possible de créer des réservoirs de stockage de l'eau de la saison des pluies, pour pallier à l'insuffisance de la saison sèche.

Toutefois, l'infrastructure liée à ce type de projet est souvent tellement coûteuse que les moyens financiers locaux ne sont pas à même de répondre à cette demande. De plus, la situation d'isolement des régions concernées maintient celles-ci en dehors des plans internationaux d'aide au financement. Il importe donc de considérer tout ce qui peut contribuer à minimiser les coûts de ces infrastructures ou à en rentabiliser l'exploitation.

Précisément, dans le cas de ces régions isolées, il n'est pas rare que le volume d'eau se présentant en quelques semaines de saison des pluies dépasse de loin la consommation totale annuelle, du moins les années où l'hydraulicité est normale.

Dans ce cas, on peut penser à rationaliser l'utilisation de cette *eau excédentaire pour la production d'énergie hydroélectrique*. Cette voie a été peu explorée à ce jour, car les producteurs d'électricité répugnent à installer des moyens de production qui ne seraient pas permanentes, ou du moins disponibles de manière permanente. On peut cependant montrer qu'une microcentrale hydroélectrique, installée sur un site de barrage préexistant ou projeté à des fins de retenue d'eau de consommation, présente une *source importante d'économies, même pour un fonctionnement effectif de quelques semaines par an*.

La présente communication se propose de montrer un exemple de substitution partielle de production d'énergie Diesel coûteuse par une production hydroélectrique saisonnière, à un coût marginal extrêmement intéressant.

Cet exemple concerne Parakou, deuxième ville de la République Populaire du Bénin, dans la partie Centre-Nord du pays, où les rivières présentent des débits intéressants quatre ou cinq mois par an pour s'annuler pratiquement durant la saison sèche.

Structure de la production et de la distribution de l'énergie électrique au Bénin

Le Bénin (figure 1) est un pays dont la population avoisine les quatre millions d'habitants. Le produit national brut est de l'ordre de 250 à 300 US \$ par habitant, et la consommation électrique était évaluée en 1982 à 32 kWh par habitant et par an, avec une tendance à l'augmentation pouvant atteindre 4 % l'an. Cette croissance est en fait très irrégulière : l'électricité, qui ne représente d'ailleurs que 20 % de l'énergie totale consommée dans le pays, est utilisée principalement par les

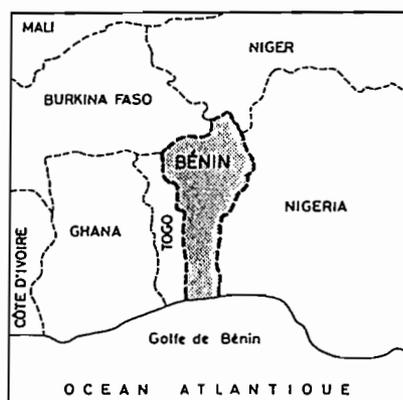


Figure 1. Le Bénin.

industries : cimenteries, sucreries, etc., la consommation domestique ne représentant qu'une part relativement faible du total. Or, l'activité industrielle est soumise à des aléas politiques importants, dépendant entre autre des relations du Bénin avec le Nigéria, qui constitue un de ses marchés principaux.

L'énergie d'origine locale est peu importante; les champs pétrolifères de Sémé, au large du Bénin, mis en service en 1982, ne produisent que du pétrole brut dans une proportion insuffisante pour assurer la consommation du pays.

En 1982, la population béninoise se voyait offrir l'accès à l'électricité seulement pour 21 % de sa population urbaine, soit 8 % de la population totale.

La structure de production est divisée en deux grands secteurs géographiques et repose sur deux sources principales d'énergie. L'*hydroélectricité* est prépondérante en puissance, mais surtout en productibilité, où elle représente plus de 95 % du total. Cette hydroélectricité est en réalité importée du barrage d'Akosombo au Ghana par l'intermédiaire de la Communauté Électrique du Bénin (CEB, société mixte bénino-togolaise) et du barrage de Nangbeto situé au Togo mais exploité en commun par le Bénin et le Togo. S'ajoutent à cette production hydroélectrique qui dessert principalement la région sud du pays (provinces du Mono, de l'Atlantique, de l'Ouémé et une partie de la province du Zou), des productions locales de type *Diesel*. Celles-ci constituent un appoint pour la région sud, et sont l'unique source d'énergie pour le centre et le nord du pays (partie nord de la province du Zou et les provinces de l'Atakora et du Borgou) (figure 2).

Le Tableau I présente schématiquement la situation de la distribution électrique pour la région sud [1].

Tableau I. présente schématiquement la situation de la distribution électrique pour la région sud [1].

Lieu de consommation	Puissance installée	Mai-juin 1984		
		Puissance utilisée		Consommation
		Maxi kW	Mini kW	
	kVA			MWh
Cotonou + Ouidah + Abomey + Calavi	20 410	20 410	1 000	10 315
Allada	280	55	35	6,93
Ketou	280	90	45	8,9
Lokossa	480	122	0	100,05
Bohicon	3 300	990	320	385,55

La production et la consommation peuvent être assez différentes. Par exemple, à Cotonou, la ville principale du Bénin, la demande moyenne en 1984 était de 10 315 MWh, couverte seulement à raison de 4 345 MWh par la production locale, le reste étant donc importé du Ghana ou du Togo.

Dans des statistiques de 1984, concernant la *partie centrale et la partie nord* du pays [1], seules ont été recensées les capacités de quelques grandes villes (Tableau II).

Tableau II.

Lieu de production	Puissance totale installée (kVA)	Groupes (kVA)
Parakou	3 375	3 × 1 125
Natitingou	1 080	3 × 300 + 2 × 90
Djougou	280	2 × 140
Kandi	280	2 × 140

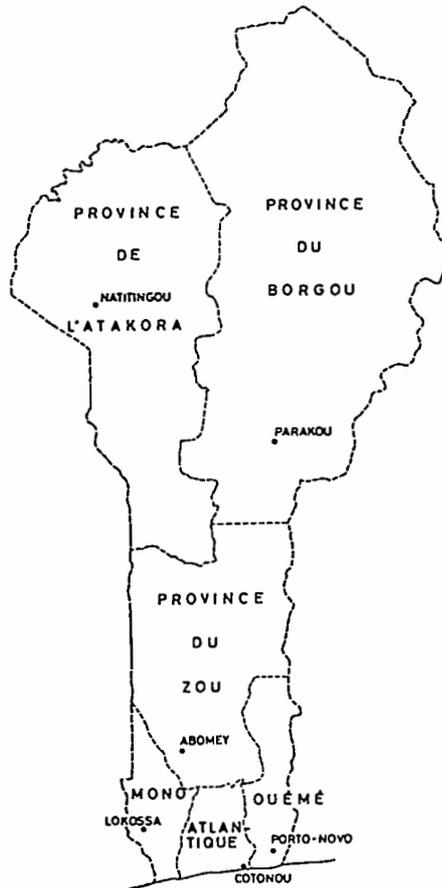


Figure 2. Province du Zou (partie Nord) et provinces de l'Atakora et du Borgou.

Les statistiques [1] de consommation portent seulement sur les villes de Parakou et Natitingou, les seules à assurer une distribution réelle à des particuliers depuis un certain nombre d'années (Tableau III).

Tableau III.

Lieu de consommation	Puissance installée	Mai-juin 1984		
		Puissance utilisée		Consommation
		Maxi kW	Mini MWh	
	kVA			
Parakou	3 375	1 600	250	668,2
Natitingou	1 080	308	75	113,2

Cette production est entièrement d'origine Diesel et est extrêmement *coûteuse*. Le Tableau IV [2] présente, pour les trois provinces concernées, le nombre de kWh produits, le coût de production et la consommation spécifique en gas-oil pour un kWh.

Tableau IV.

Avril-juin 1985	Production	Coût total	Coût unitaire	Consommation spécifique
	10 ³ kWh	10 ³ FCFA	FCFA/kWh	λ gas-oil/kWh
Prov. Zou	1 322	77 679	58,75	0,397
Prov. Borgou	2 043	107 205	52,46	0,280
Prov. Atakora	323	26 544	82,06	0,456

Si l'on considère que au-delà de 40 francs CFA par kWh, le coût de production unitaire est prohibitif, on peut constater que les conditions de production ne sont satisfaisantes dans aucune des trois provinces. Une des raisons, comme on peut le voir, en est la consommation spécifique très élevée des groupes, probablement due à des défauts de réglage et à une mauvaise structure de la consommation, qui conduit à une sous-utilisation systématique de la puissance installée.

Tableau V.

Demande prévue	1982		1988		1998	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Réseau côtier	151	92	258	92	595	88
Villes intérieures	14	8	23	8	84	12
Total	165	100	281	100	679	100

Évolution de la consommation électrique

La consommation future du pays avait été évaluée par l'Organisation des Nations Unies comme indiqué dans le Tableau V [3].

On constate que l'augmentation de la consommation dans les villes intérieures est importante et nécessite de revoir complètement la politique énergétique future du Bénin.

Il est hors de questions pour le moment d'envisager une interconnexion des différents centres de consommation dans cette région, ceux-ci étant fort dispersés et l'interconnexion étant à rejeter d'un point de vue économique.

Par contre, la production locale est actuellement mal structurée, puisque, comme on l'a vu plus haut, les consommations spécifiques en gas-oil sont élevées. De plus, les prix du combustible sont très importants puisque celui-ci est en majeure partie importé et que les conditions de son transport ne sont pas excellentes.

Possibilité de production locale hydroélectrique

La carte de la figure 3 présente les villes des provinces Centre du Nord du Bénin qui répondent aux critères suivants :

1. L'électrification, soit existe, soit est programmée dans les prochaines années, en principe à partir d'une production Diesel.

Tableau VI.

Villes	Population		Charge basse tension (MWh)				Énergie à produire (MWh)				Puissance de pointe (kW)			
	1979	2000	1985	1990	1995	2000	1985	1990	1995	2000	1985	1990	1995	2000
Province du Borgou														
Banikoara	13 644	20 496	—	99	327	720	—	149	404	842	—	43	115	241
Kandi	17 086	25 629	141	465	769	1 129	207	562	901	1 304	59	161	257	373
Karimana*	8 885	13 328	—	—	91	300	—	—	129	362	—	—	37	103
Malanville	16 614	24 921	—	184	608	1 339	—	417	888	1 698	—	119	254	485
Parakou*	60 797	283 100	4 713	9 271	16 517	29 624	7 489	16 248	29 059	51 836	1 664	3 611	6 458	11 519
Tchaourou*	8 757	13 186	—	278	460	675	—	332	534	774	—	95	153	221
Province d'Atakora														
Boukouabe	13 863	17 144	—	195	646	1 422	—	256	755	1 614	—	73	216	461
Djougou	28 777	150 598	314	1 397	3 108	6 145	472	1 868	3 829	7 289	135	534	1 094	2 083
Kérou*	14 203	21 305	—	279	461	677	—	349	553	796	—	100	158	227
Natitingou	13 348	50 000	1 321	3 079	6 544	12 090	1 955	5 036	11 598	21 274	559	1 439	3 314	6 078
Tanguéta	9 086	13 629	—	96	316	695	—	132	377	797	—	38	108	228
Province du Zou														
Ouèssé*	5 062	7 593	—	—	77	255	—	—	101	298	—	—	29	85
Savalou*	16 689	25 034	—	199	657	1 447	—	268	777	1 652	—	77	222	472
Savé*	18 389	27 584	—	205	676	1 490	—	279	804	1 705	—	80	230	487

2. Ces villes se trouvent suffisamment *près d'une rivière* pour qu'on puisse y envisager la construction de mini-centrales hydroélectriques.

Le Tableau VI présente plus en détails l'évolution de la population et de la consommation électrique de quelques villes de ces provinces, pour lesquelles l'électrification existe, est en voie de réalisation ou à l'étude.

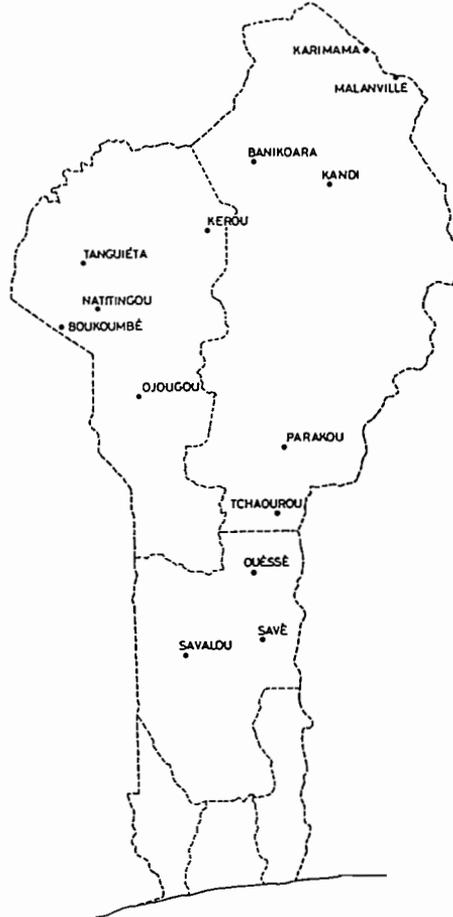


Figure 3. Provinces Centre et Nord du Bénin.

Situation hydrographique et hydrologique du Bénin par rapport à l'hydroélectricité

A priori, le Bénin ne semble pas un paradis pour l'hydroélectricité. Il y a peu de rivières importantes, et ces rivières ne présentent pas de chutes considérables; seuls quelques sommets culminent à 600 ou 700 mètres dans la partie Nord-Est du pays

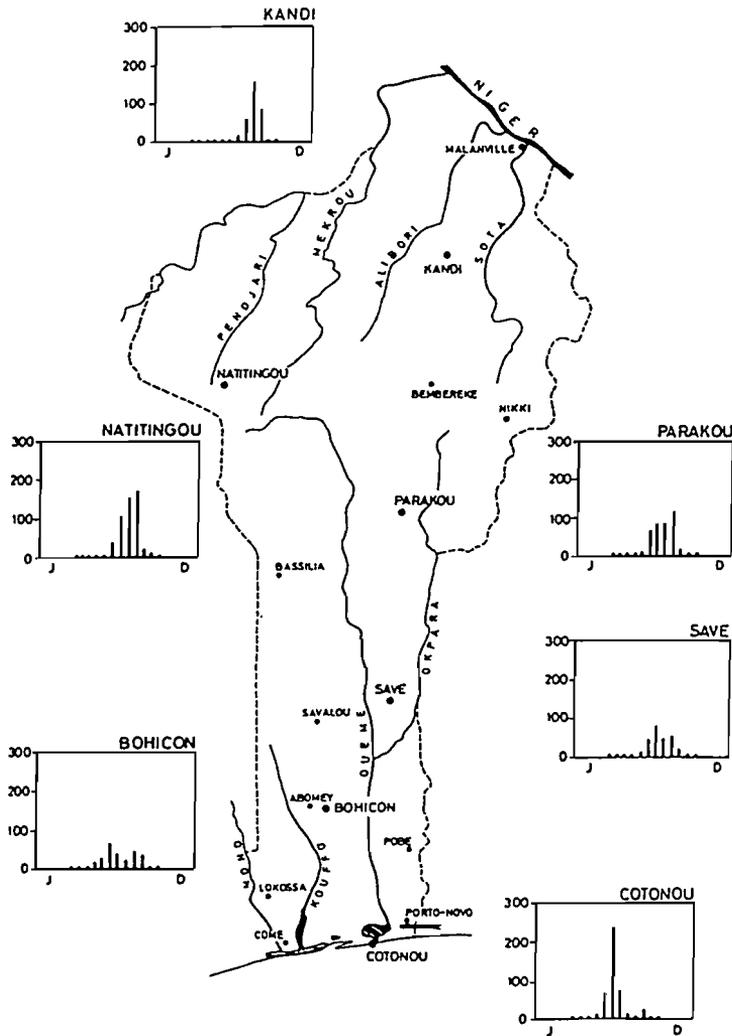


Figure 4. Précipitation mensuelle nette (mm).

et, surtout, la pluviosité relativement abondante en période de pluies est nulle pendant quasi toute la saison sèche. La figure 4 présente les hyétogrammes nets de certains lieux caractéristiques du pays. On comprend que ceux-ci ont pu décourager les concepteurs, qui ne trouvent pas de sites au Bénin pour construire les grandes retenues de régularisation annuelle qui leur permettraient d'utiliser les schémas de production hydroélectrique classique.

Par contre, si l'on se place du point de vue du *développement intégré* des ressources hydriques, certains sites, qui n'offrent pas a priori un potentiel hydroélectrique suffisant pour justifier leur aménagement, deviennent rentables si on combine

l'exploitation énergétique avec d'autres utilisations. Ainsi, des problèmes d'approvisionnement en eau existent pour les cités qui sont indiquées avec un astérisque dans le tableau VII. Pour celles-ci, c'est l'eau de surface qui constitue ou constituera l'apport principal pour la consommation d'eau dans les années à venir.

Dans ces villes, des projets de barrages et de réservoirs existent ou sont planifiés, et il est possible de combiner éventuellement le problème de production d'eau et de production d'énergie en détournant pour l'énergie électrique une part du volume d'eau retenu.

En effet, le plus souvent en saison des pluies, l'eau nécessaire pour la consommation annuelle de la ville à desservir ne constitue qu'un pourcentage limité du volume total qui se présente durant cette saison. On peut donc imaginer que l'opération de stockage de l'eau pour la consommation, qui représente par le fait même une élévation de cette eau et la création d'une *chute* artificielle, puisse être combinée avec l'exploitation de la chute ainsi créée et avec l'utilisation des *débites excédentaires* pour la production de l'énergie.

De plus, souvent ces réservoirs d'eau potable possèdent des installations de pompage qui ont nécessité la création d'une ligne de distribution électrique depuis la ville où se trouvent les centres de production Diesel. On pourrait imaginer que l'installation d'une centrale sur les lieux du réservoirs puisse utiliser les mêmes lignes dans l'autre sens pour l'acheminement de la production locale hydroélectrique vers la ville proche.

Nous allons illustrer ce propos par un projet d'utilisation combinée d'un réservoir pour la distribution d'eau et pour la production d'hydroélectrique à Parakou, au centre du Bénin.

Exemple d'utilisation rationnelle combinée de l'eau pour la consommation et l'énergie à Parakou [4]

Parakou est la seconde ville du Bénin, avec une population d'environ 100 000 habitants en rapide croissance (60 000 habitants en 1979). Près de Parakou, à environ 15 km, un barrage avait été construit sur la rivière Okpara pour la production d'eau.

Le bassin versant, à cet endroit, est d'environ 2 067 km² avec une altitude moyenne de 295 mètres. Le tableau VII nous donne les valeurs des précipitations totales annuelles et des débits annuels pour les années 1953 à 59 et 1961 à 69. On constate que la précipitation moyenne annuelle, de l'ordre de 1 000 mm par an, n'est pas négligeable. Bien sûr, l'évaporation est très importante, et la précipitation nette correspond à une hauteur d'eau de 355 mm par an avec une concentration très importante sur 6 mois de l'année.

La longueur de la saison sèche est évaluée à partir du nombre de jours pendant lesquels le débit sur la rivière Okpara est inférieur à 0,4 m³/s, qui est la valeur de la consommation en eau de la ville de Parakou compte tenu des pertes par évaporation dans le réservoir.

Tableau VII.

Année	Précipitation annuelle mm/an	Débit annuel 10 ⁶ m ³ /an
1953	1 420	560
1954	1 149	383
1955	1 462	651
1956	1 048	202
1957	1 330	685
1958	823	42
1961	1 119	193
1962	1 607	659
1963	1 501	628
1964	1 061	112
1965	1 132	252
1966	1 145	199
1967	1 292	447
1968	1 460	666
1969	1 281	414

Le tableau VIII nous montre une évaluation de la longueur de la saison sèche à partir de deux types de distribution statistique. Durant cette période, la production hydroélectrique ne serait possible que à partir de l'utilisation de l'eau stockée dans le réservoir, utilisation qui menacerait l'approvisionnement en eau de consommation durant la saison sèche. On peut donc estimer que seuls les jours où le débit naturel dépasse 0,4 m³/s peuvent être envisagés a priori pour la production d'hydroélectricité.

Tableau VIII.

Nombre de jours secs	Distribution lognormale	Distribution Gumbel
Q = 0 m ³ /s		
Durée moyenne	162	162
Durée médiane	158	156
Durée maxi 50 ans	257	253
Q < 0,4 m ³ /s		
Durée moyenne	202	202
Durée médiane	200	197
Durée maxi 50 ans	270	278

La figure 5 nous donne un schéma du réservoir existant et du barrage en terre qui a constitué ce réservoir. Les caractéristiques de celui-ci sont les suivantes :

- la largeur au couronnement du barrage est de l'ordre de 14 m;
- le niveau maximum du réservoir est de 12 à 12,50 m;
- le volume maximum stocké dans celui-ci est de 9,5 10⁶ m³;

- il y a deux évacuateurs de crues dont les crêtes, réglées par des vannes, sont situées respectivement à 11 et à 9 m;
 - le lit de la rivière, à l'aval, a une altitude évaluée à 4 m.
- Pour l'étude de faisabilité et de production hydroélectrique, les hypothèses suivantes ont été adoptées :
- Les débits ont été évalués à partir de ceux qui ont été mesurés en 1961 et 1962, deux années pour lesquelles les mesures ont été complètes et dont l'une correspond à une année plutôt sèche et l'autre à une année plutôt humide.
 - Le niveau de l'eau au-dessus du lit de la rivière à l'aval du barrage a été supposé égal à 1 m pour des débits jusqu'à 20 m³/s, et à 2 m jusqu'à 60 m³/s. Cette hypothèse est nécessaire parce que, jusqu'à présent, aucune campagne topographique précise n'a été effectuée pour déterminer les profils en travers de la rivière à l'aval du barrage et calculer les axes hydrauliques au sein de celle-ci.

Moyennant ces hypothèses, il est possible de simuler la productibilité d'une centrale qui serait installée sur le site. Le Tableau IX résume le calcul d'une telle productibilité pour le cas d'une année fictive moyenne, comprise entre 1961, année sèche et 1962, année humide.

Tableau IX.

				Productibilité MWh/an (Chute H = 7,50 m, rendement $\eta = 0,68$)							
Débits m ³ /s	Nombre de jours où le débit est dépassé			P = 100 kW	200 kW	100 kW x 2	300 kW	150 kW x 2	400 kW	200 kW x 2	500 kW
	1961	1962	Valeur moyenne	Q = 2 m ³ /s	4 m ³ /s	2 m ³ /s x 2	6 m ³ /s	3 m ³ /s x 2	8 m ³ /s	4 m ³ /s x 2	10 m ³ /s
0	169	194	181,5								
1	152	194	173								
2	142	191	166,5	400		400					
3	135	186	160,5					578			
4	121	171	146		701	351				701	
6	104	150	127				915	457			
8	73	125	99						951	476	
10	52	107	79,5								955
15	38	98	68								
20	29	82	55,5								
				400	701	751	915	1 035	951	1 177	955

Par exemple, supposons qu'un groupe turbo-alternateur de 100 kW soit installé sur le site. Cette puissance correspondrait à un débit de 2 m³/s, ce qui veut dire que, pendant 142 jours par an pour une année sèche, 191 jours par an pour une année humide, en moyenne 166 jours par an, il serait possible de turbiner ces

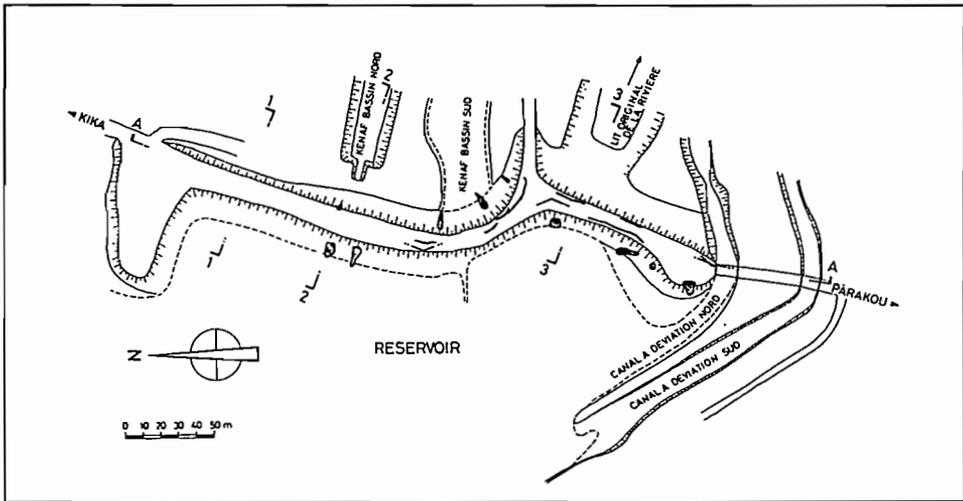


Figure 5.

2 m³/s. Pour la chute supposée de 7,5 m et le rendement global de 68 % qui a été adopté, une productivité de 400 MWh/an pourrait être attendue.

Diverses hypothèses de combinaisons de groupes turbo-alternateurs conduisent à des productibilités variant de 400 à près de 1 200 MW par an.

Le Tableau X présente une simulation économique d'un tel projet, dans l'hypothèse de deux turbo-alternateurs de 200 kW chacun, tandis que le tableau II établit le coût du kWh produit en tenant compte de l'amortissement.

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Le coût de réparation et d'adaptation du *barrage* existant est de 40 000 kFCFA. L'amortissement du barrage se compte sur 50 années.
- Le coût des *groupes* et des auxiliaires électriques et mécaniques est évalué à 120 000 kFCFA, et celui du génie civil de la *centrale* à 15 000 kFCFA. Ces deux postes sont amortis sur 30 années.
- On prévoit une adaptation des *lignes* de 15 kV à concurrence de 10 000 kFCFA. L'amortissement est de 30 ans.
- Le poste « *aménagement* » comprend, outre le génie civil et l'électromécanique, 10 % du total pour frais d'administration, 6 % du total pour frais d'études sur le site, et enfin 10 % à titre d'imprévus.
- Les frais d'*entretien annuel* sont évalués à 1,5 % des postes barrage et aménagement et à 1 % du poste lignes.
- La réparation du barrage, la construction de la centrale et l'installation des groupes se réalisent en deux ans. L'adaptation des lignes se fait la deuxième année.
- Les emprunts sont contractés à un taux d'intérêt de 9 %. Le calcul de rentabilité économique porte sur 15 années d'exploitation à compter de la fin des travaux.

Eau, consommation et énergie

Tableau X.

Aménagement de Nanon-Parakou		1 177		Taux d'intérêt : 9 %						
Cons. spéc. gas-oil (λ /kWh)		0,280		Ratio bénéfice-coût :				1,550		
Prix unitaire gas-oil (FCFA/ λ)		131		Taux de rentabilité du capital :				0,190		
Gain en entretien (FCFA/kWh)		2		Taux de rentabilité interne :				0,158		

Année	Taux	Investissement		Fonctionnement		Dépense totale		Recette totale		Résultat kFCFA
		Nominal kFCFA	Actual. kFCFA	Nominal kFCFA	Actual. kFCFA	Nominale kFCFA	Actual. kFCFA	Nominale kFCFA	Actual. kFCFA	
1	0,917	111 550	102 339		0	111 550	102 339		0	-102 339
2	0,842	121 550	102 306		0	121 550	102 306		0	-102 306
3	0,772		0	3 447	2 661	3 447	2 661	45 526	35 155	32 493
4	0,708		0	3 447	2 442	3 447	2 442	45 526	32 252	29 810
5	0,650		0	3 447	2 240	3 447	2 240	45 526	29 589	27 349
6	0,596		0	3 447	2 055	3 447	2 055	45 526	27 146	25 091
7	0,547		0	3 447	1 885	3 447	1 885	45 526	24 904	23 019
8	0,502		0	3 447	1 730	3 447	1 730	45 526	22 848	21 118
9	0,460		0	3 447	1 587	3 447	1 587	45 526	20 962	19 375
10	0,422		0	3 447	1 456	3 447	1 456	45 526	19 231	17 775
11	0,388		0	3 447	1 336	3 447	1 336	45 526	17 643	16 307
12	0,356		0	3 447	1 225	3 447	1 225	45 526	16 186	14 961
13	0,326		0	3 447	1 124	3 447	1 124	45 526	14 850	13 726
14	0,299		0	3 447	1 031	3 447	1 031	45 526	13 624	12 592
15	0,275		0	3 447	946	3 447	946	45 526	12 499	11 599
16	0,252		0	3 447	868	3 447	868	45 526	11 467	10 599
17	0,231	-124 550	-28 780	3 447	796	-121 104	-27 984	45 526	10 520	38 504
Total	8,544	108 550	175 865	51 698	23 383	160 248	199 248	682 895	308 875	109 626

Tableau XI.

Amortissement annuel	Années	Somme kFCFA	Annuités	PR marginal	
				Prix kFCFA	Prix/kWh FCFA/kWh
Barrage	50	40 000	0,0912	3 649	
Aménagement	30	183 100	0,0973	17 822	
Postes + lignes	30	10 000	0,0973	973	
Frais d'entretien				3 447	
Total		233 100		25 891	22,00

On constate que le *coût marginal du kWh* est extrêmement intéressant (22 FCFA) par rapport au coût offert actuellement par l'énergie Diesel (52,46 FCFA en moyenne pour la province du Borgou). D'autre part, la *rentabilité* de l'ensemble peut être assurée en quelques années : le taux de rentabilité interne atteint 15,8 %, ce qui signifie que le projet est rentable pour tout taux d'intérêt inférieur à cette valeur. L'investissement qui serait consenti à Parakou pourrait très rapidement générer de nouveaux moyens financiers permettant de répéter l'opération ailleurs.

D'autre part, puisque l'énergie Diesel existe de toute façon à Parakou, la production mixte hydraulique/Diesel ne doit plus prendre en compte les coûts des installations qui existent déjà. D'autre part, la production Diesel soulagée par l'apport hydroélectrique pourrait être arrêtée pendant une partie de l'année, suivant une rotation à programmer, ce qui en permettrait l'entretien et conduirait probablement à une diminution spectaculaire de la consommation spécifique des groupes Diesel.

Conclusions

L'exemple de Parakou est extrêmement représentatif des possibilités d'utilisation rationnelle combinée de l'eau pour la consommation et pour l'énergie.

Dans la mesure où un site existe pour la *stockage de l'eau* à des fins domestiques ou agro-pastorales, à une distance raisonnable d'une ville, il y a lieu de vérifier qu'une *exploitation hydroélectrique même non permanente* ne pourrait pas se révéler intéressante. Le plus souvent, dans ce cas, les lignes de transmission électriques existent ou existeront dans le cadre du projet ne fût-ce que pour la station de pompage qui accompagne normalement l'exploitation de l'eau à des fins de distribution.

Le surcoût nécessité par la production d'hydroélectricité est en général relativement raisonnable par rapport au retour économique de cette solution.

Il est seulement nécessaire de vaincre une certaine inertie administrative ou technique qui décourage a priori une production mixte basée en partie sur l'énergie Diesel en période sèche, ou même partiellement en période humide, et pour une autre partie par l'appoint de l'énergie hydroélectrique. Il y a lieu de considérer froidement que la rentabilité en est tellement importante que la complication de cette double exploitation est largement compensée par les possibilités nouvelles offertes pour l'avenir.

Il nous semble que l'exemple présenté ci-dessus peut trouver de multiples applications dans des régions arides, mais surtout semi-arides, où le volume total annuel de l'eau n'est pas insuffisant mais où c'est sa distribution dans l'année qui laisse à désirer.

Références

1. Ministère des Finances et de l'Économie du Bénin, SBEE, Statistiques d'électricité et eau, mai-juin 1984.
2. Tractonel Electobel Engineering, « Étude d'identification des sites potentiels pour petites centrales hydroélectriques au Bénin et au Togo : Bénin », Banque Ouest Africaine de Développement, Lomé, 1985.
3. PNUD/Banque Mondiale, « Étude d'inventaire des ressources hydroélectriques potentielles du Togo et du Bénin et plan directeur du développement de la production et du transport, Rapport B : Étude du marché de l'énergie », Vol. 3 : Bénin, mars 1984.
4. Zech Y., « Microcentrales hydrauliques en République Populaire du Bénin. Étude exploratoire ». Mission SPPS, Programme National R/D Énergie, 1985.

18

Aspects climatologiques liés aux possibilités d'alimentation en eau potable par collecte des eaux pluviales dans le Nord-Cameroun

M.A. MOREL⁽¹⁾, J.-P. LABORDE⁽²⁾

⁽¹⁾ *Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal*

⁽²⁾ *Université de Nice, Faculté de géographie, Nice, France*

La collecte des eaux pluviales pour la satisfaction des besoins en eau potable est une technique utilisée depuis la plus haute antiquité. Dans le monde des pays développés son utilisation est tombée en désuétude, mais pour les pays en développement c'est encore souvent un moyen sûr, peu coûteux et autonome pour alimenter en eau des populations à l'habitat dispersé.

Plusieurs solutions sont envisageables selon la climatologie, l'hydrogéologie et l'hydrologie.

— L'utilisation individuelle des eaux de surface ne nécessite pas d'investissement mais se heurte à des problèmes d'hygiène difficilement surmontables. La pérennité de la ressource est par ailleurs assez aléatoire.

— Le captage de sources est bien sûr une solution quasi-idéale puisque de faible coût et de qualité hygiénique généralement acceptable. Malheureusement toutes les régions ne disposent pas d'aquifère donnant des sources pérennes et même si c'est le cas, on se heurte souvent à un problème de transport entre la source et le lieu de consommation.

— En l'absence de sources mais en présence de nappes phréatiques, il est bien sûr possible de procéder à des forages, mais leur coût est tel qu'ils ne peuvent être économiquement envisagés que pour des villages.

— La collecte des eaux pluviales à partir des toitures ou d'impluvium, et leur stockage temporaire dans des réservoirs, est une technique simple et peu coûteuse. Chaque famille peut construire un tel système et l'entretenir sans intervention

extérieure importante. Il ne faut donc pas s'étonner si la Banque Mondiale et d'autres organismes d'aide au développement préconisent cette technologie qui mérite bien le qualificatif d'"adaptée".

Cette solution n'est cependant pas la panacée. Elle connaît ses limites, qui sont principalement de deux ordres.

Le premier est celui du maintien de la qualité de l'eau. Ceci nécessite une information des populations qui doivent bien comprendre les précautions élémentaires à prendre au moment de la collecte des eaux (nettoyage des toitures), de leur stockage (hygiène des réservoirs) et de leur consommation (moyen de puisage). Le problème de la qualité ne sera qu'effleuré ici. Cependant, les règles d'hygiène à suivre sont simples, quasiment les mêmes dans tous pays et ce problème est surmontable puisqu'il l'est en Asie du Sud-Est, par exemple.

Le deuxième aspect auquel nous nous attacherons ici est essentiellement climatologique et quantitatif :

— l'abondance des précipitations est-elle suffisante pour satisfaire, au moins partiellement, les besoins en eau d'une famille à partir de la surface de toiture dont elle dispose ?

— la durée de la période sèche est-elle compatible avec un stockage de l'eau dans un réservoir de dimensions raisonnables ?

Les réponses à ces deux questions sont essentielles à l'étude de faisabilité d'un tel système d'alimentation. En effet, économiquement il est difficile d'envisager de faire des toitures supplémentaires, et la construction du réservoir est à la fois la plus coûteuse et techniquement la plus difficile.

La zone étudiée et les données utilisées

La zone Nord Cameroun est une région où malgré les progrès récents, le problème de l'eau en habitat dispersé est loin d'être réglé. Comme l'indique la figure 1 ci-dessous, cette zone s'étend sur le territoire de la république du Cameroun entre 7° et 12° de latitude nord. Elle est limitée à l'ouest par le Nigéria et à l'est par le Tchad.

Sur cette zone, nous disposons des relevés jusqu'en 1985 de 19 pluviomètres pour des durées de 14 à 40 ans. Ces pluviomètres sont gérés par la SODECOTON, organisme d'Etat s'occupant de la culture et de l'exploitation du coton. Compte tenu de l'utilisation faite par la SODECOTON de l'information pluie, il est possible que des cumuls sur plusieurs jours n'aient pas été signalés, aussi avons-nous préféré ne travailler que sur les totaux mensuels, beaucoup plus fiables. Cependant, une étude critique des données pluviométriques menée par l'ORSTOM et le CIEH nous donnait également des données journalières fiables sur la station de Guider, de 1948 à 1971. Cette dernière série nous a permis d'évaluer les écarts entre les études aux pas mensuels et journaliers (figure 2).

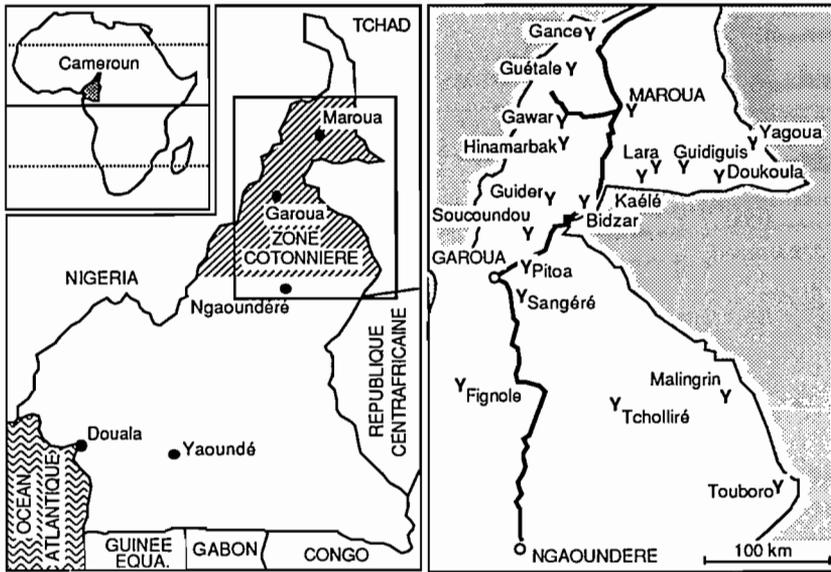


Figure 1. La zone d'étude et les postes pluviométriques utilisés.

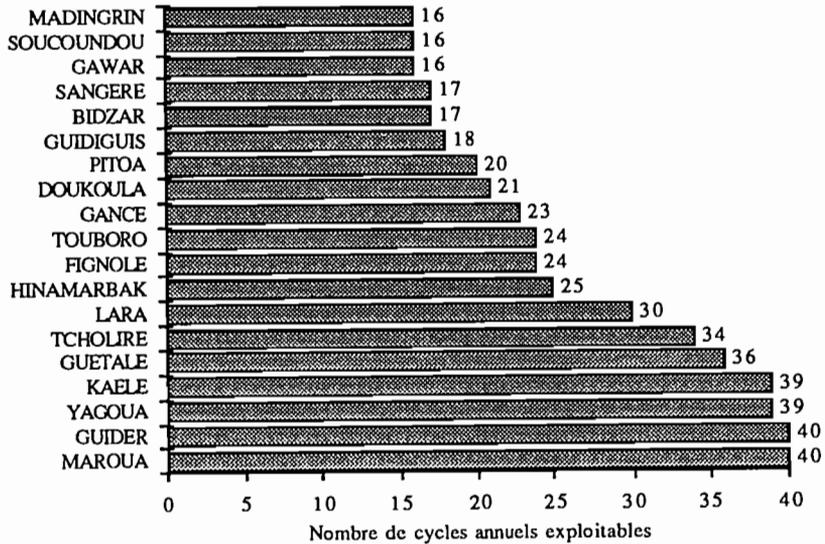


Figure 2. Nombre de cycles annuels exploitables.

Etude à l'échelle mensuelle

Dans un premier temps, nous allons considérer que l'intensité des précipitations est constante pendant un mois et égale à la hauteur de pluie mensuelle divisée par la durée du mois (Tableau I).

Tableau I. Exemple d'un cycle annuel de précipitations.

Mois	pluie du mois en mm	pluie cumulée en mm
Janvier 55	0,0	0,0
Février 55	0,0	0,0
Mars 55	0,5	0,5
Avril 55	22,4	22,9
Mai 55	66,5	89,4
Juin 55	213,2	302,6
Juillet 55	270,9	573,5
Août 55	260,9	834,4
Septembre 55	274,6	1109,0
Octobre 55	53,9	1162,9
Novembre 55	0,0	1162,9
Décembre 55	0,0	1162,9
Janvier 56	0,0	1162,9
Février 56	0,0	1162,9
Mars 56	1,9	1164,8
Avril 56	16,1	1180,9
Mai 56	31,9	1212,8
Juin 56	130,9	1343,7

Réservoir de stockage non limitant

Ce tableau s'exploite comme le montre la figure 3; nous avons reporté de janvier 1955 à juin 1956 les pluies cumulées à Kaélé. On a ainsi des successions de segments de droites dont la pente est égale à l'intensité des précipitations. On y voit clairement que pendant cette période, les pluies sont faibles ou nulles, puis fortes et enfin à nouveau faibles ou nulles. Si maintenant on cherche à appuyer une droite sur les « limites inférieures » de cette courbe, on obtient celle figurée par une flèche oblique. Cette droite tangente est la courbe des pluies cumulées le 01/06/1955 avec une hauteur de pluies cumulées de 89,4 mm, et le 01/06/1956 avec un cumul de 1212,8 mm.

Ceci s'interprète ainsi : du 1/6/55 au 1/6/56 il est tombé 1123,4 mm de pluie, soit en moyenne $1123,4/365 = 3,08$ mm/j. Par ailleurs, la distance verticale entre la droite de pente 3,08 mm/j et la courbe des pluies cumulées donne à chaque date l'excédent de la pluie qu'il faut stocker par rapport à l'intensité moyenne. Cette distance maximale figurée par une flèche verticale est atteinte au 1^{er} octobre 1955 avec une valeur de 640 mm environ.

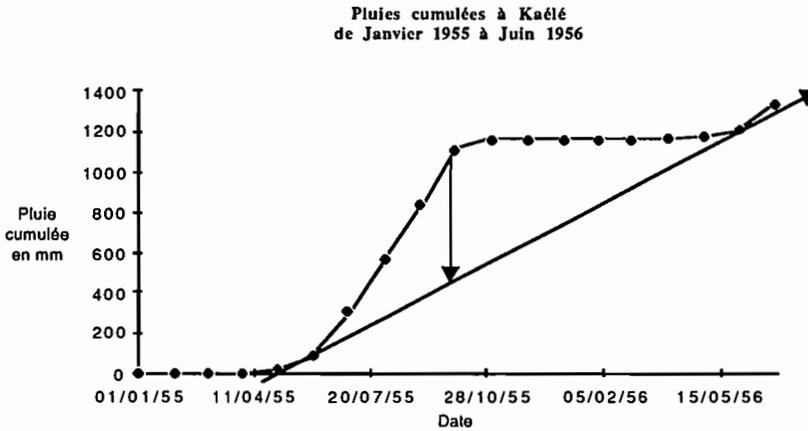


Figure 3. Détermination d'un volume de réservoir minimal pour une consommation potentielle maximale.

Dans le premier exemple, nous ne nous sommes pas donné a priori le volume du réservoir. Supposons que nous ayons eu un réservoir de capacité supérieure à 640 litres, nous aurions pu y prélever 3,08 l/j mais le réservoir ne se serait pas rempli au-delà de 640 l/m².

Si le volume du réservoir n'est pas un facteur limitant, 3,08 l/h/m² est la consommation maximale possible pour l'année hydrologique 1955-1956.

Dimensions du réservoir limitées

Supposons maintenant que pour chaque mètre carré de toiture, supposée ruisseler à 100 %, nous installons un réservoir de 200 l/m².

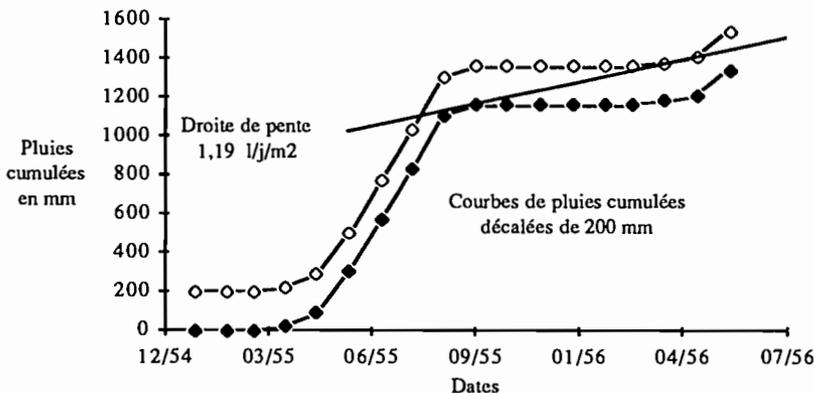


Figure 4. Détermination de la consommation potentielle pour un réservoir de stockage de 200 l/m².

La droite de consommation n'aurait plus une pente de $3,08 \text{ l/j/m}^2$, mais une pente inférieure telle que le réservoir soit vide en fin de saison sèche (courbe des pluies cumulées tangente à la droite de consommation), et qu'il ait pu néanmoins se remplir durant la saison des pluies. Pour évaluer la consommation maximale possible avec un réservoir de 200 l/m^2 en 1955-1956, il suffit de tracer comme précédemment la courbe des pluies cumulées, puis une seconde décalée verticalement de 200 mm. La pente de la droite tangente en début de saison humide à la courbe des pluies cumulées et tangente en fin de saison sèche à celle des pluies cumulées décalée de 200 mm, donne cette consommation. La figure 4 illustre cette méthode.

On constate alors qu'avec un réservoir de 200 l/m^2 on pourrait assurer une consommation de $1,19 \text{ l/j/m}^2$ du 10 septembre 1955 au 1^{er} mai 1956 et que le réservoir aurait été rempli le 1^{er} novembre 1955.

Ce travail a été fait pour des capacités de réservoir de 100, 200, 300, 400 et 500 l/m^2 (ou mm). Pour la station de Kaélé et l'année hydrologique 1955-1956 on obtient les résultats suivants (Tableau II).

Tableau II. Exemple de l'évolution de la consommation potentielle en fonction du volume du réservoir.

Capacité du réservoir en l/m^2	100	200	300	400	500	non limité
Consommation potentielle en l/j/m^2	0,64	1,19	1,64	2,11	2,48	3,08

Etude statistique des consommations potentielles

Nous avons recommencé ce travail pour toutes les années disponibles. Ainsi, pour Kaélé, 37 années hydrologiques complètes permettent de retrouver 37 consommations pour ces différentes capacités de réservoir; on constate que ces consommations potentielles sont distribuées sensiblement comme des lois de Gauss. La figure 5 présente l'ajustement à une loi de Gauss des consommations potentielles à Kaélé pour un réservoir de 200 l/m^2 .

La moyenne est de $1,156 \text{ l/j/m}^2$ et l'écart-type de $0,139 \text{ l/j/m}^2$. On peut donc admettre que dans 90 % des cas (période de retour de 10 ans) la consommation potentielle sera supérieure à :

$$1,156 - 1,28 \times 0,139 = 0,978 \text{ l/j/m}^2$$

On peut bien sûr faire un travail identique pour d'autres périodes de retour et les autres capacités. Les résultats obtenus pour Kaélé sont précisés sur la figure 6.

Si l'on examine la variation de la consommation potentielle décennale en fonction du volume du réservoir pour la station de Guider (elle nous servira de terme de référence plus loin), on conçoit aisément que pour des volumes faibles de réservoir c'est essentiellement ce volume qui détermine la consommation potentielle. En appelant x la consommation et v le volume du réservoir, la courbe $x(t)$ est linéaire de pente m pour les valeurs faibles de v ; cette courbe doit d'ailleurs passer par $x = 0, v = 0$. Lorsqu'au contraire le volume devient très grand, la consommation potentielle ne dépend plus de ce volume du réservoir mais des

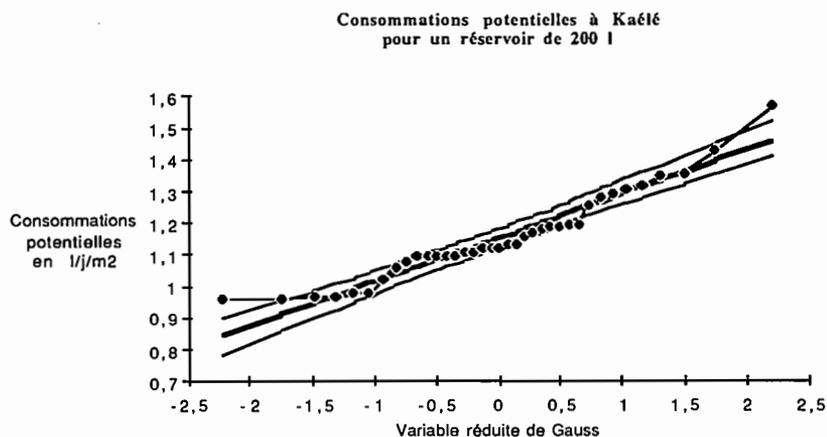


Figure 5. Ajustement à une loi de Gauss des consommations potentielles à Kaélé pour un réservoir de 200 l/m².

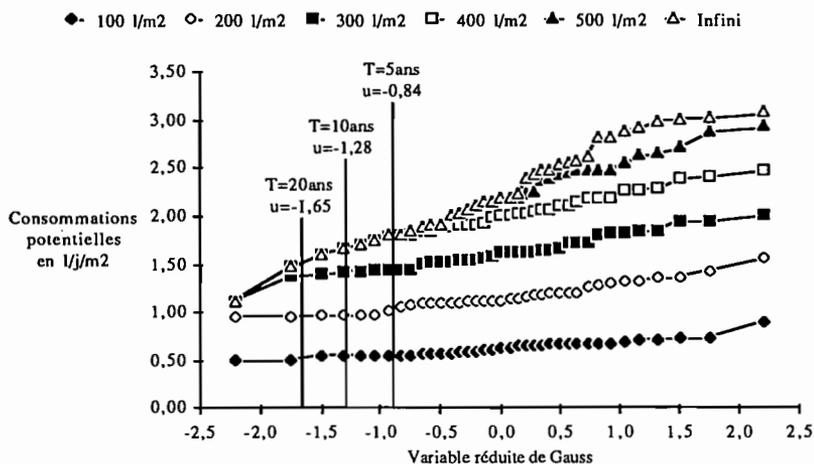


Figure 6. Ensemble des ajustements à des lois de Gauss des consommations potentielles à Kaélé.

N.B. Il aurait été plus judicieux d'imposer à cette courbe de se raccorder tangentiellement à l'asymptote horizontale, car la première méthode minimise le volume du réservoir. Parmi les courbes simples susceptibles de répondre à ces contraintes, nous avons choisi une cubique à trois paramètres calés par ajustement graphique aux points expérimentaux, puis une horizontale (travail en cours).

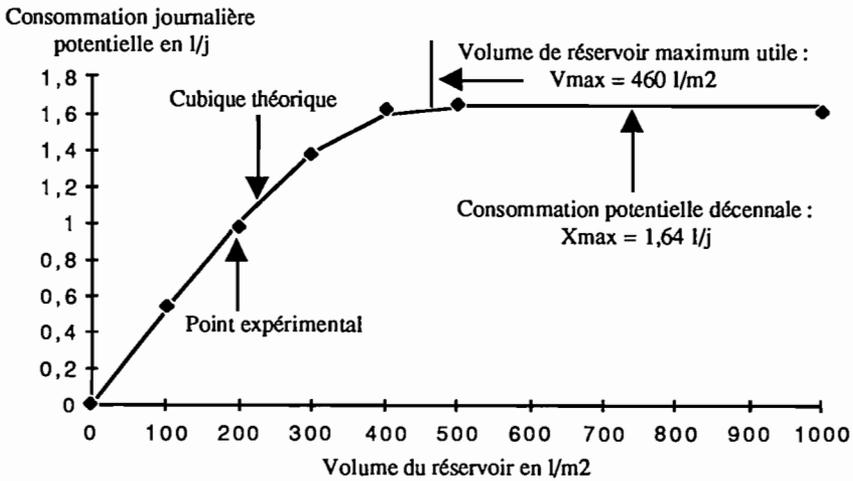


Figure 7. Ajustement d'un modèle théorique « consommation-volume » pour la station de Kaélé dans des conditions décennales.

précipitations disponibles. On peut donc préjuger que la courbe $x(t)$ est constante et égale à une consommation potentielle maximale X_{max} à partir d'un volume maxima utile V_{max} .

Notre idée fut d'assimiler la courbe oblique à une droite (calculée à l'aide des deux derniers points) et de trouver son intersection avec la droite horizontale $x = X_{max}$. Les résultats présentés ici ont été obtenus avec cette méthode.

Ce travail a donc été réalisé pour les 19 stations disponibles et les trois périodes de retour : 5 ans, 10 ans et 20 ans.

Les résultats obtenus montrent l'existence de corrélations linéaires étroites entre les différentes variables.

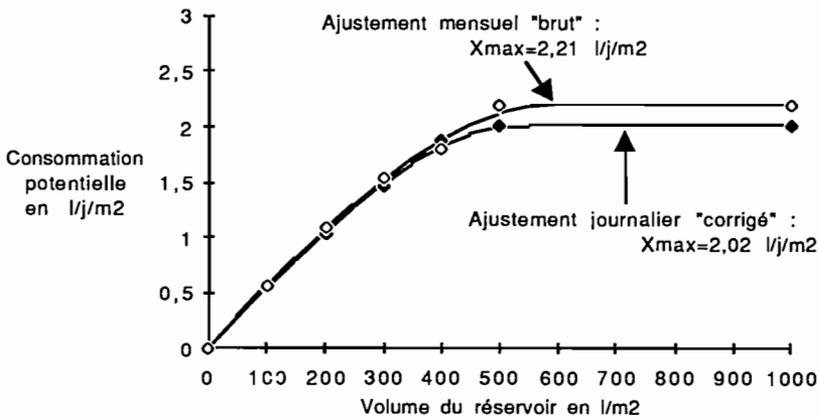


Figure 8. Ecart entre traitements mensuel et journalier pour une période de retour de 10 ans à la station de Guider pour la période 1948-1972.

Etude corrigée à l'échelle journalière

Les relevés journaliers n'étaient facilement disponibles et fiables que pour la station de Guider, qui disposait d'ailleurs d'une longue période d'observation (40 ans). Ces données nous ont permis de fixer les ordres de grandeur des coefficients de correction.

Le coefficient de ruissellement

Plusieurs auteurs ont donné des coefficients de ruissellement des toitures en fonction de leur nature. En effet, une partie des précipitations rebondit et tombe à l'extérieur (effet de bord), une autre partie fuit. Si on appelle K_r le coefficient de ruissellement, P. Martin et W. Weyns [24] proposent pour des tôles un K_r de 0,95; Frazier [14] penche pour une valeur plus faible $K_r = 0,88$.

En fait, le coefficient K_r se comporte comme un coefficient multiplicateur s'appliquant aux précipitations. Chacun pourra donc adapter la valeur de K_r à la nature de l'impluvium envisagé. Dans le cas du Cameroun, les toitures modernes sont faites en tôles d'aluminium pour lesquelles on adoptera par la suite un K_r moyen de 0,91.

L'évaporation de la première partie de la pluie

Dans la littérature, et en particulier dans l'ouvrage de P. Martin et W. Weyns [24], on trouve des ordres de grandeur cohérents sur la partie de la pluie qui s'évapore en début d'averse. Sur des tôles chaudes, on admet qu'environ 0,4 mm de pluie sont soustraits par évaporation en début d'averse. Au milieu de la saison des pluies, le ciel étant voilé, les tôles chauffent moins et nous admettrons une évaporation plus faible de seulement 0,2 mm en début d'averse.

Le nettoyage de la toiture

S'il n'a pas plu durant plusieurs jours, la toiture s'encrasse de poussières de latérites, de fientes d'oiseaux... On peut admettre qu'il faut de l'ordre de 2,5 litres d'eau pour nettoyer 1 m² de toiture. Par contre, s'il pleut chaque jour, un nettoyage plus sommaire de l'ordre de 0,5 litre par m² paraît suffisant.

Evaluation des consommations potentielles à l'échelle journalière

Nous avons donc procédé à une nouvelle simulation selon le principe décrit précédemment, mais en travaillant à l'échelle des pluies journalières diminuées de 2,9 mm (0,4 + 2,5), s'il n'a pas plu depuis 5 jours, ou diminuées de 0,7 mm (0,2 + 0,5), s'il a déjà plu la veille. Tout calcul fait on aboutit à la courbe des consommations potentielles décennales en fonction du volume stocké et en tenant compte de l'évaporation et du nettoyage.

On constate ici que la prise en compte des pertes réduit la consommation potentielle dans un rapport moyen de 0,91. (0,90 pour T = 5 ans, 0,91 pour T = 10 ans et 0,92 pour T = 20 ans).

Règles de correction

Pour obtenir les consommations potentielles journalières en tenant compte du ruissellement et du nettoyage de l'impluvium, il suffit de multiplier les consommations potentielles obtenues à l'échelle mensuelle par 0,91 Kr.

En ce qui concerne la correction du volume des réservoirs, il nous suffit de porter dans la relation linéaire trouvée précédemment entre X_{max} et V_{max} la consommation corrigée.

Résultats

Tableau III. Relations linéaires reliant les différentes grandeurs.

Période de retour	Relations	Coef. corrélation	Erreur type
T = 5 ans	$X_m = 0,0021 P - 0,1130$ $V_m = 134,14 X_m + 164,21$	0,9868 0,9492	0,057 19,0
T = 10 ans	$X_m = 0,0019 P - 0,1012$ $V_m = 154,69 X_m + 115,67$	0,9733 0,9022	0,076 29,6
T = 20 ans	$X_m = 0,0018 P - 0,0814$ $V_m = 211,43 X_m + 4,85$	0,9611 0,8778	0,086 43,5

X_m en l/j/m²; V_m en l/m².

Courbes d'égales consommations et d'équi-réservoirs

Comme nous arrivons à des relations linéaires simples, de bonne précision, il nous est possible à partir des isohyètes, c'est-à-dire des courbes d'égales pluviométries de tracer des courbes d'égales consommations, de volumes de réservoir égaux (figure 9).

Exemple de réalisation type

Réalisation type

Jusqu'à 22 m³, la citerne en ferrociment nous semble être la plus solide et la plus simple à construire par les maçons du village. On creuse un trou circulaire dans

Alimentation en eau potable et eaux pluviales

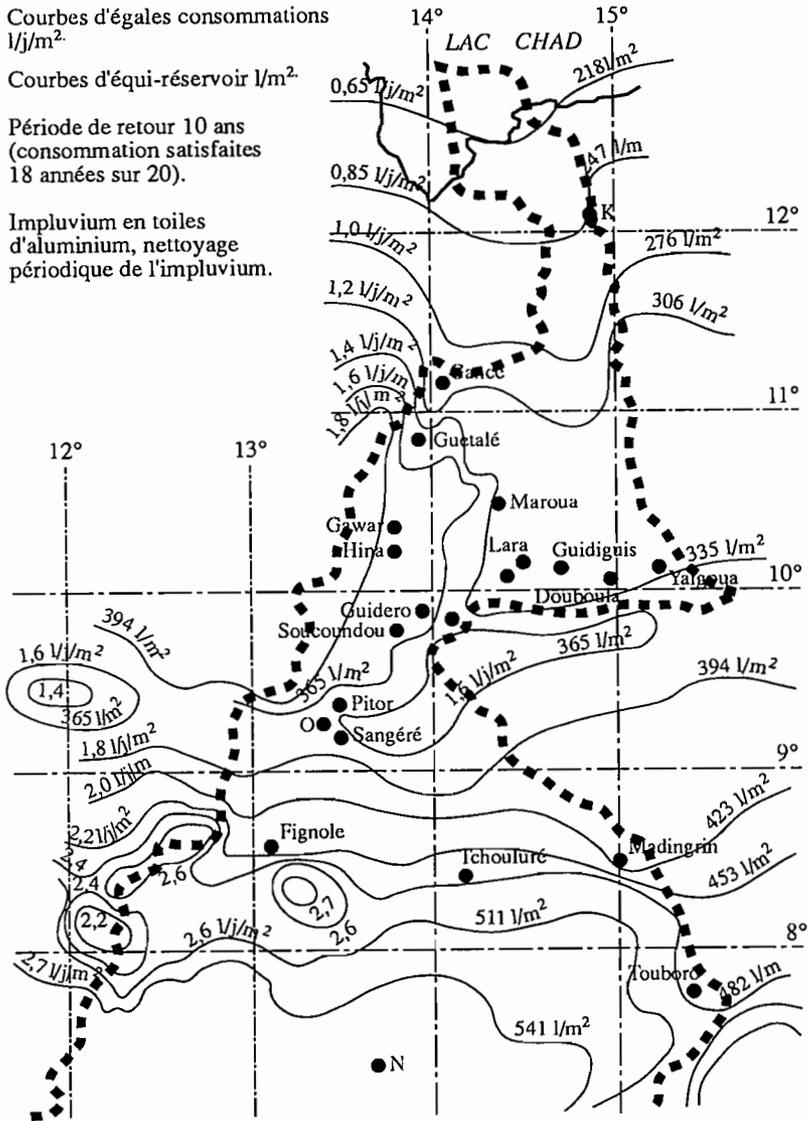


Figure 9. Courbes d'égales consommations et d'équi-réservoirs.

le sol qui servira de coffrage au ciment. L'armature est du grillage de poulailler; le ciment est projeté sur le grillage jusqu'à le recouvrir. On lisse ensuite le ciment pour l'étanchéité. Nous renvoyons les personnes qui voudraient plus de détails pour une telle construction aux publications citées, et notamment celles du CIEPAC [11] du GRET [15] et de HEGRON [16].

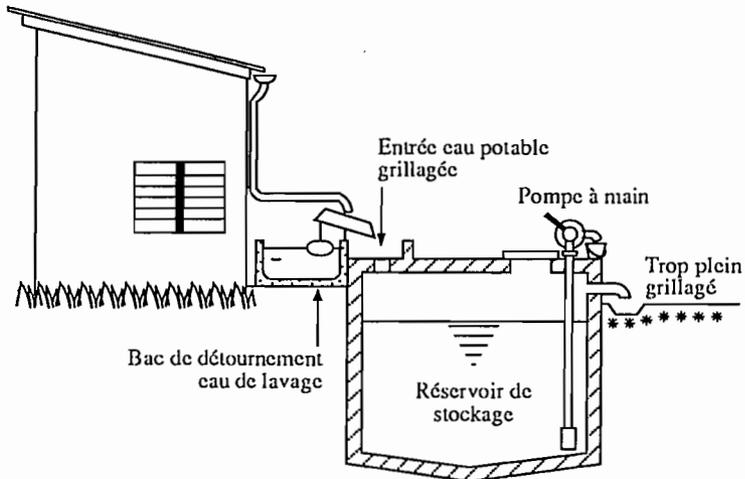


Figure 10. Récupération des eaux de pluie sur la toiture d'une maison et stockage dans un réservoir ferrociment enterré.

Matériaux nécessaires

Les quantités sont des ordres de grandeur établis d'après les bibliographies. Les prix sont ceux de 1988 en Francs Français (Tableau IV).

Tableau IV.

Matériaux	Quantité	Prix Unitaire (FF)	Prix Total (FF)
Tôles alu 2 m ² (2*1)	40	38,00	1520,00
Pointes à tôles	3 boîtes	88,00	264,00
Chéneau PVC de 4 m	2	238,00	476,00
Tube PVC Ø 60	3 m	11,00	33,00
Ciment sac 50 kg	13	57,00	741,00
Fer béton 8 mm	60 m	3,90	234,00
Fer béton 6 mm	2 m	2,30	4,60
Grillage poulailler 150 cm de large	15 m	28,00	420,00
Fil de fer galvanisé (fin et gros)	2,2 kg	19,60	43,10
Sable	1,2 m ³	200,00	240,00
Gravier	0,25 m ³	2000,00	500,00
Grillage moustiquaire galvanisé	1 m ²	59,60	59,60
Bois blanc de coffrage de 35 mm	10 m ²	48,00	480,00
Contreplaqué de 5 mm	1 m ²	20,00	20,00
Pointes 60 mm	3 kg	16,00	48,00
Bascule à flotteur	1	200,00	200,00
Robinet	2	90,00	180,00
Tube PVC Ø 30	3 m	5,50	16,50
Crépine clapet de pied	1	180,00	180,00
Pompe à main « japy »	1	695,00	695,00
Totaux :			6354,80

Nous pouvons donc conclure que le surcoût d'aménagement pour récupérer les eaux de pluie coûtera environ 4 600 FF auxquels il faudra ajouter 1 800 FF pour la toiture.

Conclusion

Cette étude permet de montrer que la collecte et le stockage des eaux de pluie dans la zone du Nord Cameroun permettrait un appoint non négligeable en eau potable pour l'habitat dispersé. En ce qui concerne l'aspect sanitaire et les précautions élémentaires à prendre, on pourra consulter les directives de l'OMS.

D'un point de vue financier, l'investissement est modeste mais malheureusement pas encore à la portée des populations rurales. Cette solution économique ne peut donc être mise en œuvre qu'avec une forme d'aide à déterminer.

Dans la pratique, les résultats que nous donnons permettent aisément de dimensionner les ouvrages de collecte et de stockage pour une consommation souhaitée et un certain risque de défaillance accepté.

Enfin, nous pouvons préciser que la démarche est applicable à bien d'autres pays où l'alimentation en eau potable est notoirement insuffisante, spécialement en zone d'habitat dispersé.

Références

1. Al Azharia J.S., Omar A.H. (1985). Improved traditional day water jars waterlines, 1985; 4 (n° 1) : 25-27.
2. Ativon K.L. (1979). Recherches sur l'amélioration des techniques de collecte et de stockage de l'eau de pluie. Ouagadougou : CIEH, 1979 : 30.
3. Appan A. (1984). Harnessing of rainwater, the underutilised source in developing countries. In 10th WEDC conf, Singapour, 1984 : 32-36.
4. Barneaud J.C., Martin P. (1977). Recueil et stockage de l'eau de pluie. Bassin type « Botswana ». Paris : IRFED, 1977 : 21.
5. Barneaud J.C. (1978). Recueil et stockage de l'eau de pluie - sac à eau. Paris : IRFED, 1978 : 10.
6. Bernus E. (1964). Un type d'habitat ancien en Côte d'Ivoire : la maison annulaire à impluvium des Dida Mimini. Les cahiers d'outre-mer, 1964, 65 : 81-94.
7. Bichet E., Martin P. (1976). Collecte, stockage, utilisation des eaux pluviales dans les pays du Sahel - utilisation des techniques au niveau des villages. Bibliographie sélective et analytique. Paris : IRFED, 1976 : 104.
8. Boum J.P. (1977). Synthèse sur les lois de distribution des pluies au Cameroun. DEA.
9. Bilodeau G. (1974). Sirikukubé : case annulaire à impluvium des Dida Gagou, Gaus et certains Baoulé. Bulletin de liaison du Centre Universitaire de Recherches et Développement, Abidjan.
10. CIEH/ORSTOM (1972). Précipitations journalières de l'origine des stations à 1972. République du Cameroun.

11. CIEPAC (1983). Fabrication d'une citerne enterrée en ferrociment. Lyon/Dakar, 42.
12. Demassieux L. Documents de la Banque Mondiale sur la récupération et le stockage des eaux de pluie. Traduction et adaptation.
13. Edgars D. (1986). Systèmes de captage d'eau de pluie. Session de formation internationale, CEFIGRE.
14. Frasier G.W., Myers L.E. (1983). Handbook of water harvesting. Washington : US Dept. Agric, 47.
15. Gret (1984). Le point sur la construction des citernes : recueil et stockage des eaux de pluie. Paris : Cepaze : 102.
16. Hegron. Réalisation d'une citerne type PIKRO en ferrociment. Dakar : ENDA ed.
17. Huisman L., Azevedo Netto J.M., Sundaresan B.B. (1983). Récupération de l'eau de pluie dans « Alimentation en eau des petites collectivités ». Rijswijk, CIR : 53-64.
18. IRA-CRA-SODECOTON MAROUA. Zone cotonnière du Nord Cameroun. Pluviométrie de l'origine des stations à 1985.
19. Laborde J.P. (1979). Programmes de calculs sur Apple II.
20. Laborde J.P. (1985). Collecte, stockage et conservation des eaux pluviales. Session de formation International, CEFIGRE.
21. Maikano G.J., Nyberg L. (1980). Collecte des eaux pluviales au Botswana, in « Approvisionnement en eau dans les régions rurales des pays en voie de développement », symp. Zomba : Malawi, 13-16.
22. Martin P. (1975). Note technique. Mesure du ruissellement sur différents types d'impluvium. Langomak, Sénégal.
23. Martin P. (1976). Les cases annulaires à impluvium et approvisionnement en eau. Paris : IRFED.
24. Martin P., Weyns W. Collecte et stockage des eaux pluviales (besoins familiaux). Manuel pédagogique. Paris : CIEPAC, 67.
25. Morel M. (1988). Possibilité d'alimentation en eau potable par collecte des eaux pluviales au Nord Cameroun.
26. Olivry J.C. (1986). Fleuves et rivières du Cameroun, 733.
27. Suchel J.B. (1972). La répartition et les régimes pluviométriques au Cameroun. Travaux et documents de géographie tropicale n° 5. CEGET-CNRS, Bordeaux.
28. Weyns W. (1984). Collecte et stockage des eaux pluviales. Captage et traitements simples des eaux de surface. Captage des sources - Hygiène de l'eau, in cours CEFIGRE, « Hydraulique villageoise », Sophia-Antipolis/Bamako, 46.
29. Anonyme (1986). La citerne en ferrociment, une contribution à la résolution des problèmes d'AEP en milieu rural, 13^e Cons. des Ministres du CIEH. Brazzaville, 18/02-26/02. Thèmes : J. Tech., 2, 9.

19

Comparaison d'algorithmes de prévision des crues sur le fleuve Sénégal

C. THIRRIOT⁽¹⁾, S. SAMBOU⁽²⁾, J.P. LAMAGAT⁽³⁾

⁽¹⁾ *ENSHEIET, Toulouse, France*

⁽²⁾ *Faculté des Sciences, Dakar, Sénégal*

⁽³⁾ *ORSTOM, Dakar, Sénégal*

Modèles de prévision

La subdivision classique distingue deux types de modèles :

— modèles déterministes, basés sur les équations de Saint-Venant, dont la résolution, essentiellement par voie numérique, s'effectue soit par la méthode des différences finies à l'aide de schémas explicites ou implicites, soit par la théorie des caractéristiques;

— modèles stochastiques pour lesquels on considère la réalisation d'un débit comme un phénomène aléatoire.

La distinction entre ces deux méthodes n'est pas nette, les méthodes déterministes présentant un caractère stochastique par la détermination des coefficients.

Sur le bief Bakel-Matam, nous avons distingué les modèles de prévision en une station et les modèles de prévision entre deux stations.

Prévision en une station

A partir d'observations antérieures à la date t_0 , à la station donnée, nous avons construit par interpolation puis par lissage des polynômes que nous avons utilisé pour faire de la prévision à la date $t_0 + Dt$.

Polynôme d'interpolation

Nous partons du fait que pour un polynôme de degré $p-1$, la différence à l'ordre p est nulle.

En utilisant les propriétés des opérateurs d'avancement et de différence arrière, qui s'expriment respectivement par :

$$EQ_k = Q_{k+d} \quad \text{et} \quad DQ_k = Q_k - Q_{k-d}$$

nous montrons que la différence à l'ordre p s'écrit, en utilisant la formule du binôme :

$$D^p Q_k = \sum_{i=0}^p C_i^p (-E^{-1})^{p-i} Q_k \quad (1)$$

Si nous utilisons un polynôme de degré $p-1$, cette expression devient nulle, ce qui donne suivant les valeurs de p les algorithmes pour l'extrapolation linéaire, parabolique, et avec un polynôme de degré 3.

Polynôme de lissage

Nous ajustons à n couples (i, Q) , $i \in [n - t_0, t_0]$, des fonctions d'expression connue, en utilisant la technique des moindres carrés. Nous extrapolons ces fonctions à la date $t_0 + Dt$ pour la prévision.

Suivant les fonctions choisies, nous aurons, en posant :

$$V_{n-i} = Q_i \quad U_i = \frac{n-i}{Dt}$$

— lissage linéaire :

$$V_{n-i} = a_0 + a_1 U_i + \epsilon_i \quad (2)$$

— lissage parabolique :

$$V_{n-i} = a'_0 + a'_1 U_i^2 + a'_2 U_i^3 + \epsilon_i \quad (3)$$

Les coefficients sont déterminés par la méthode des moindres carrés et nous en avons déduit les algorithmes de prévision suivant le nombre de couples utilisés.

Prévision entre deux stations

Nous utilisons l'information collectée en deux ou plusieurs stations et antérieure à la date t_0 pour faire la prévision à la date $t_0 + Dt$. Nous avons étudié deux types de modèles :

- modèles déterministes dérivés des équations simplifiées de Saint-Venant;
- modèles stochastiques, basés sur les processus ARMA.

Prévision par Muskingum avec extrapolation amont

A partir de l'équation de continuité en présence d'apports intermédiaires mise sous la forme :

$$\frac{dV}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t) + \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} q(x,t) dx dt$$

nous intégrons par la méthode des trapèzes en faisant les hypothèses suivantes :

- absence d'apports intermédiaires;
- courbe de tarage univoque;
- loi section mouillée-débit de la forme : $S(Q) = a Q$;
- volume stocké dans le bief : $V = (\theta S_1(t) + (2 - \theta) S_2(t)) D_x$.

Nous obtenons l'algorithme aux différences finies ci-dessous :

$$Q_s(t + Dt) = C_0 Q_m(t) + C_1 Q_m(t + Dt) + C_2 Q_s(t)$$

où Q_s et Q_m respectivement débits entrant et sortant du bief étudié, C_0 , C_1 et C_2 coefficients dépendant des caractéristiques du bief.

En temps réel, cet algorithme ne permet pas de faire de la prévision des crues, d'où un recours à l'extrapolation. Par ailleurs, si nous ajoutons un terme d'innovation ϵ_i , nous obtenons un algorithme analogue à ceux décrivant les processus stochastiques, ce qui justifie l'utilisation de la méthode des moindres carrés pour la détermination des coefficients C_i . D'où l'équation utilisée pour la prévision en temps réel (figure 3) :

$$Q_s(t + Dt) = C_0 Q_m(t) + C_1 (2 Q_m(t) - Q_m(t - Dt)) + C_2 Q_s(t) + \epsilon_i \quad (4)$$

Prévision par analyse des temps de propagation

En toute rigueur, le temps de propagation dépend du débit. Cette relation, négligeable pour les faibles crues, compte tenu de l'échelle de temps choisi (un jour), ne peut plus être ignorée pour les fortes crues. La prévision ne peut alors plus être faite avec un délai constant quel que soit le débit. Nous allons construire une méthode de prévision basée sur l'évolution du temps de propagation avec le débit.

Partant du système d'équations de dispersion parabolique :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{\delta S}{\delta t} &= q \\ \frac{\delta H}{\delta x} &= I - J \end{aligned} \right\}$$

si nous supposons : $\frac{\delta H}{\delta x} \approx 0$

$$S = S_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^m$$

et si nous prenons une loi de perte de charge de la forme :

$$J = \frac{Q^2}{C^2 R S^2}$$

nous obtenons pour le débit une expression de la forme :

$$Q = Q_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^{m/2}$$

Le système se réduit alors à une seule équation :

$$\frac{\delta H}{\delta t} + V_0 \frac{n}{2 m} \frac{\delta H}{\delta x} = \frac{q}{f(H)} \quad (5)$$

avec $f(H) = H^{m-1} \frac{m}{2} \frac{Q_0}{H_0}$

or $H = H(x, t)$, d'où

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{dx}{dt} \frac{\delta H}{\delta x} = \frac{dH}{dt} \quad (6)$$

En identifiant les expressions (5) et (6) terme à terme, il vient en définitive :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{n}{2 m} V_0 \quad (7)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{q}{f(H)} \quad (8)$$

La propagation de la crue entre les deux stations peut être décrite par les deux fonctions :

— $\tau(H1)$ qui à une hauteur (resp. débit) amont fait correspondre son temps de propagation;

— $H2(H1)$ qui à une hauteur (resp. débit) amont associe une hauteur (resp. débit) à l'aval au bout d'un temps égal au temps de propagation $\tau(H1)$ de l'onde d'amplitude $H1$.

Nous verrons au cours des essais, qu'en pratique, ces modèles présentent un caractère stochastique très poussé, de sorte qu'on pourrait les construire a priori,

en faisant fi de toute tentative de justification physique, ce qui va nous conduire aux modèles ARMA.

Modèles ARMA

Les séries temporelles des débits moyens journaliers se caractérisent par une dépendance marquée entre observations successives. Les modèles ARMA, par leur conception, permettent de les modéliser.

Ces modèles expriment la quantité à prévoir comme une combinaison linéaire des n_0 observations antérieures, avec un terme aléatoire qui représente l'erreur de prévision. Les paramètres de ces modèles sont déterminés à partir des techniques d'estimation.

En pratique, pour des prévisions entre deux stations situées sur les emplacements x et $x + Dx$, l'algorithme peut se mettre sous la forme :

$$Q(x + Dx, t + Dt) = \sum_{j=1}^{n_0} a_j Q_v(x + Dx, t - j * Dt) + \sum_{k=1}^{n_1} a_k Q_m(x, t - k * Dt) + \epsilon(t)$$

où a_j et a_k sont des coefficients constants, Q_m et Q_v respectivement les débits à l'amont et à l'aval du bief considéré.

Les valeurs de j et k doivent être aussi faibles que possible pour éviter l'instabilité du schéma.

Application au bief Bakel-Matam

Le cadre physique

Les modèles ont été appliqués sur le bief Bakel-Matam, long de 172 km, sur un échantillon de crues couvrant la période de 1960 à 1982.

Le sous-bassin étudié se situe dans la zone climatique de type sahélien, avec une pluviométrie moyenne de 495 mm/an à Bakel.

Le relief est pratiquement plat, en dehors de quelques buttes, mais par contre, la microtopographie est très complexe. Le fleuve coule entre deux hautes levées entaillées de brèches qui communiquent avec les parties basses du lit majeur. Lors des fortes crues, l'écoulement latéral par ces brèches provoque l'inondation du lit majeur (figure 1).

Cette morphologie du bassin met en évidence deux types de crues. Les crues faibles qui se propagent essentiellement dans le lit avec un temps de propagation de l'ordre de 2 à 3 jours entre Bakel et Matam et les crues fortes, qui du fait du débordement sont amorties, ralenties et lissées à Matam. Leur temps de propagation déterminé par l'analyse des corrélogrammes est de l'ordre de 8 à 10 jours (figure 2).

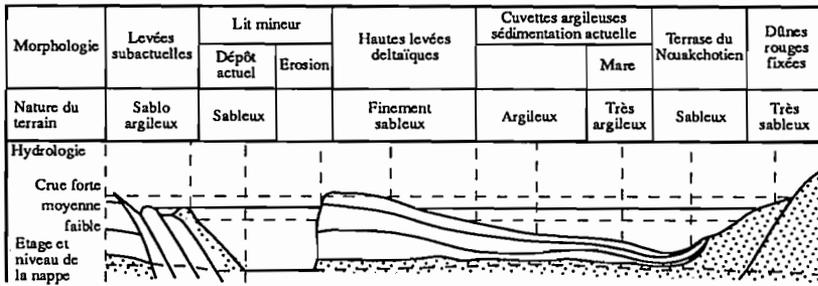


Figure 1. Coupe schématique de la basse vallée du Sénégal. Levées et cuvettes (traits noirs continus). Dépôts sableux : zones pointillées (d'après P. Michel).

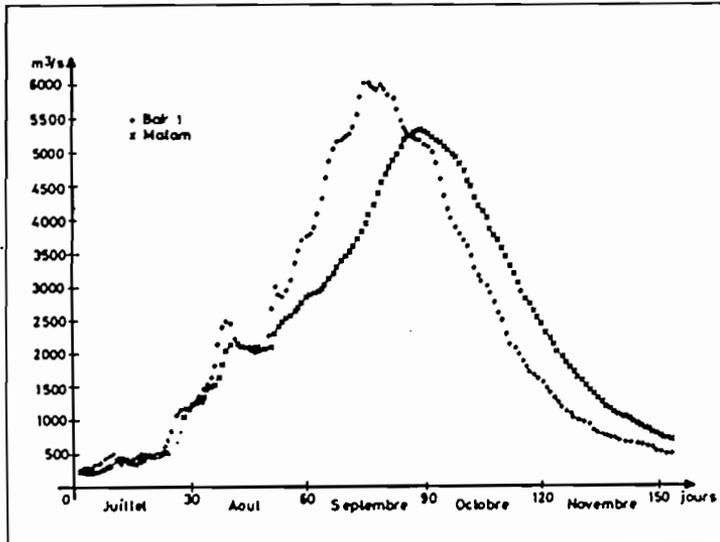


Figure 2. Bakel-Matam (1967). Hydrogrammes observés.

Analyse des essais. Critères de qualité

Pour étudier et comparer les différents modèles entre eux, nous utiliserons parmi tous les moyens existant, les critères graphiques (graphes calculés-observés) et les fonctions de répartition des critères statistiques ci-dessous :

- l'écart quadratique moyen ramené au débit maximum qui permet de comparer les hydrogrammes calculé-observé dans leur globalité;

- l'erreur relative de pointe qui, ponctuellement, va tester la prévision du maximum.

Simulation des prévisions : calage

Nous avons testé les différents modèles sur le bief Bakel-Matam, sur une série de 20 crues, de 1961 à 1982.

Prévision en une station extrapolation-lissage

Les critères se dégradant au fur et à mesure que le délai de prévision augmente, nous nous sommes limités à 2 jours.

L'augmentation du degré du polynôme (extrapolation : figures 3a, 3b) ou du nombre de points de base (lissage : figures 4a, 4b) n'améliore pas la prévision, par suite de l'instabilité due à l'alternance de signes + et -.

Ces méthodes conviennent donc pour des délais faibles, lorsque les hydrogrammes ne sont pas très irréguliers.

Prévision entre deux stations

Muskingum avec extrapolation amont. Régression linéaire

Ces deux méthodes, dans leur version définitive, peuvent être considérées comme des cas particuliers des processus ARMA, avec en différence l'importance accordée à l'influence des débits provenant des stations amont.

Les essais de prévision à délais constants et égaux au temps de propagation ont mis en évidence deux comportements différents :

- pour les crues faibles, les résultats sont généralement satisfaisants (figure 5);
- pour les crues fortes ou très fortes, il apparaît un décalage entre hydrogrammes calculés et observés, qui se résorbe ensuite au voisinage du maximum (figure 6).

Ce dernier comportement s'explique par l'évolution du temps de propagation en fonction du débit, l'écoulement latéral par les brèches ayant pour effet de ralentir les crues.

Dans ce cas, en utilisant les coefficients différents suivant le temps de propagation, nous avons amélioré, de façon notable, les simulations (figure 7).

Les mêmes phénomènes ont été observés en utilisant la méthode de régression linéaire.

Les essais ont mis en évidence, dans les deux cas, la nécessité, pour les crues fortes, de tenir compte de l'évolution du temps de propagation avec le débit.

Analyse des temps de propagation entre deux stations

Nous avons travaillé avec les débits, bien qu'en toute rigueur les stations de tarage ne soient pas univoques.

Cette méthode généralise la prise en compte de l'adéquation temps de propagation-délai de prévision.

Nous l'avons utilisée sur le bief Bakel-Matam.

Nous avons effectué deux calages différents suivant l'importance des crues :

- 1975-1978 pour les années sèches (écoulement uniquement dans le lit mineur) (figures 8a, 8b);

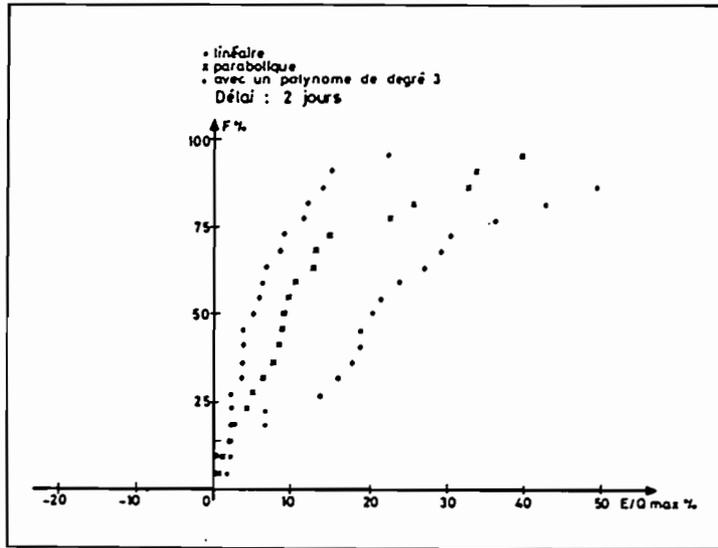


Figure 3a. Station de Matam. Prédiction par extrapolation. Fonction de répartition de l'erreur relative de pointe E/Q_{max} .

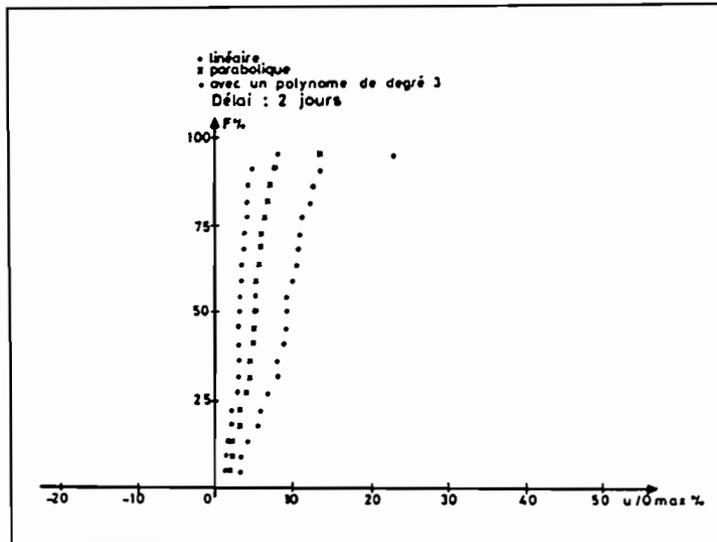


Figure 3b. Station de Matam. Prédiction par extrapolation. Fonction de répartition de l'écart-type des écarts u/Q_{max} .

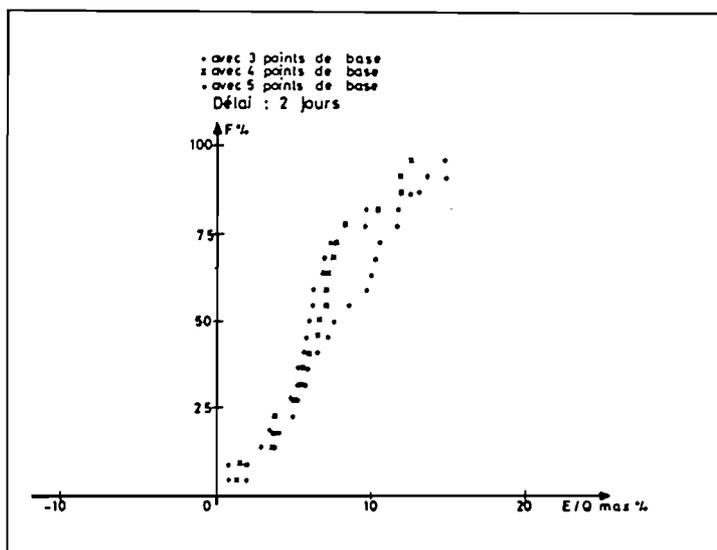


Figure 4a. Station de Matam. Prévision par lissage linéaire. Fonction de répartition de l'erreur relative de pointe E/Q_{max} .

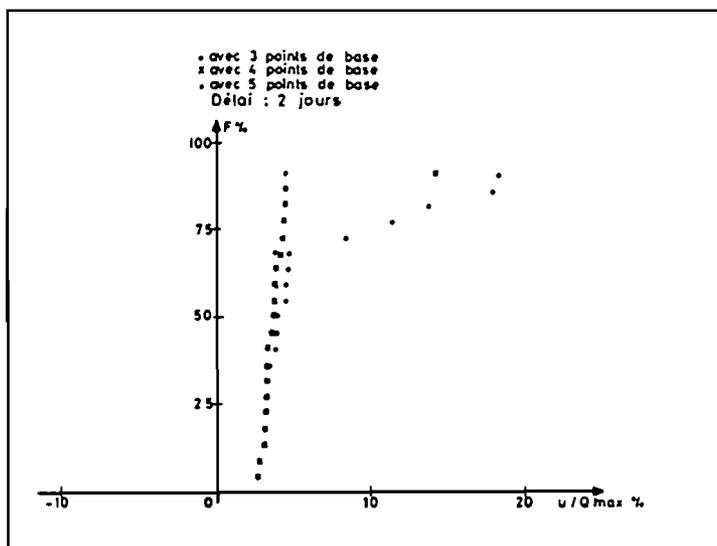


Figure 4b. Station de Matam. Prévision par lissage linéaire. Fonction de répartition de l'écart-type des écarts u/Q_{max} .

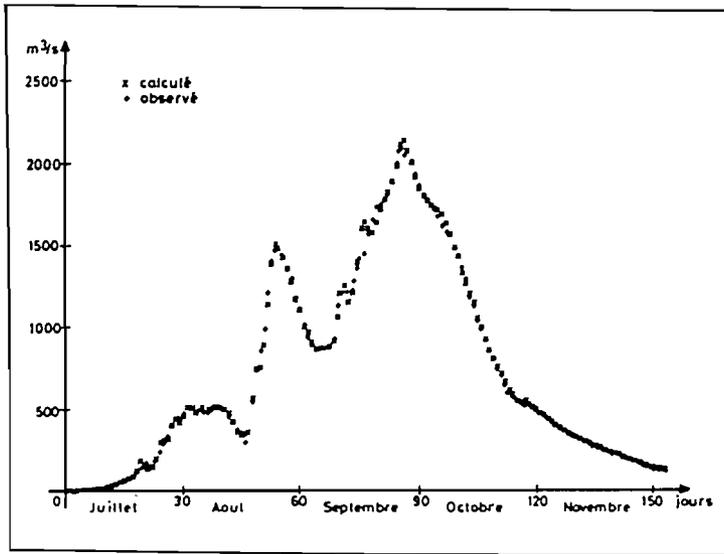


Figure 5. Bakel-Matam (1977). Muskingum avec coefficients constants. Délai 2 jours.

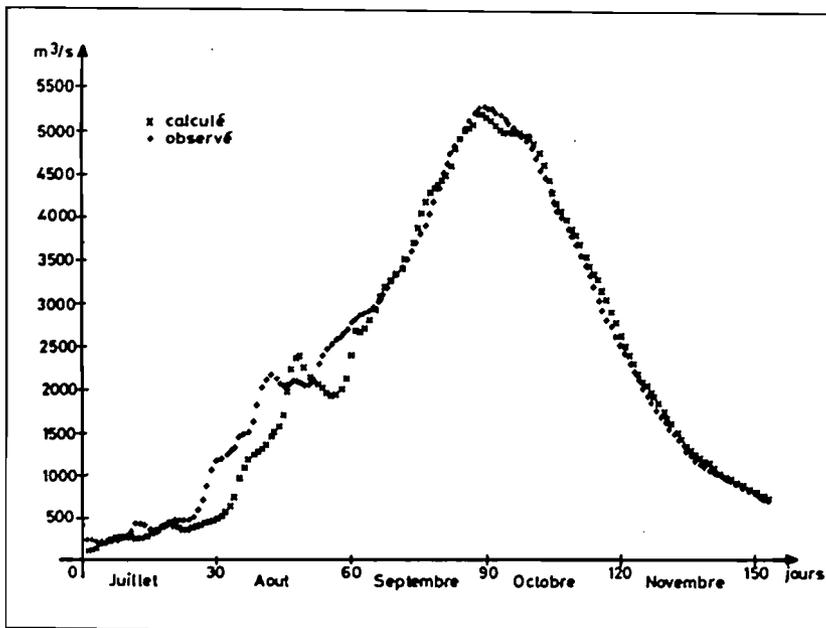


Figure 6. Bakel-Matam (1967). Muskingum avec coefficients constants. Délai 8 jours.

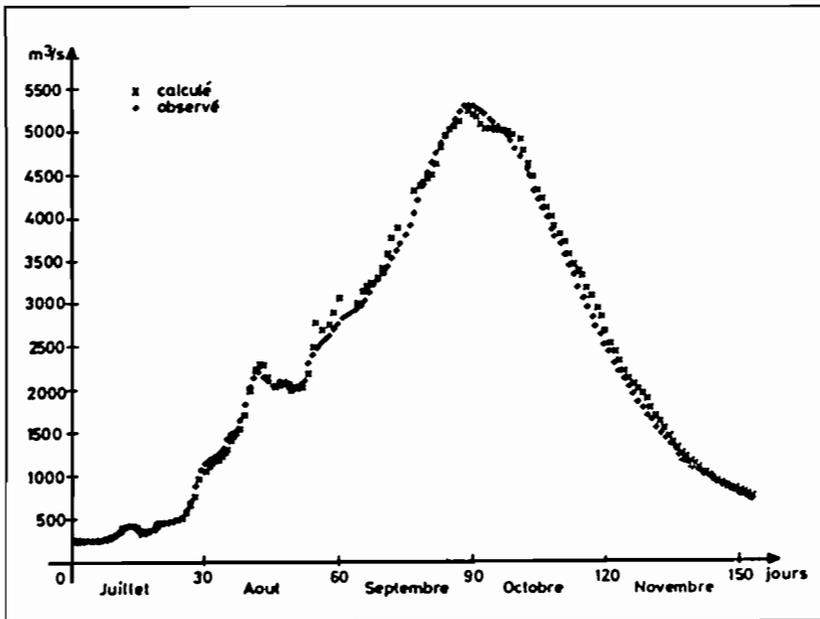


Figure 7. Bakel-Matam (1967). Muskingum avec coefficients variables. Délai 8 jours.

— 1961-1964 pour les années humides (écoulement dans le lit majeur) (figures 9a, 9b).

Entre les deux périodes de calage, sur le bief Bakel-Matam, nous avons constaté une évolution différente, suivant l'importance de la crue, des lois $t(Q)$ et $Q_2(Q_1)$, que nous attribuons à l'influence de la nappe alluviale, qui pourrait, selon les cas, alimenter le fleuve ou être alimenté par l'écoulement fluvial. Ceci, pour être confirmé, nécessiterait une étude approfondie du mécanisme d'échanges fleuve-nappe.

Les essais sont plus satisfaisants sur les périodes sèches (figure 10) que sur les périodes humides (conformément à l'hypothèse faite d'un écoulement unidimensionnel) (figure 11). Il serait intéressant d'étendre ce modèle à un écoulement bidimensionnel.

Comparaison des modèles

Nous avons utilisé les critères statistiques (locaux et globaux) pour comparer les modèles entre eux (Tableaux I, II et III).

Tableau I. Bief Bakel-Matam. Compétition entre méthodes : comparaison entre écarts-types des écarts.

Année	MSKC	REGRC	MSKV	REGR	ANLTP
1962	0.054	0.052	0.025	0.031	0.052
1964	0.062	0.062	0.041	0.041	0.047
1966	0.062	0.064	0.087	0.033	0.059
1967	0.044	0.045	0.048	0.019	0.040
*1976	0.028	0.030			0.031
*1977	0.016	0.017			0.033
*1978	0.015	0.020			0.039
*1980	0.012	0.016			0.038
*1981	0.017	0.029			0.043
*1982	0.019	0.024			0.036

Tableau II. Comparaisons des écarts relatifs de pointe.

Année	MSKC	REGRC	MSKV	REGRV	ANLT
1962	0.048	0.033	0.005	0.037	0.164
1964	0.000	-0.026	-0.002	-0.034	-0.014
1966	0.086	-0.024	0.069	0.039	0.043
1967	-0.022	-0.005	-0.017	-0.004	-0.118
*1976	-0.005	0.033			0.050
*1977	0.029	0.040			0.061
*1978	0.020	0.052			0.011
*1980	0.023	0.046			-0.002
*1981	0.052	0.009			-0.122
*1982	0.050	0.083			

Nous avons tenu compte de l'évolution des conditions naturelles d'écoulement en utilisant deux périodes d'essais différents. Nous attirons l'attention sur le fait que pour la méthode d'analyse des temps de propagation, les conditions d'application qui sont faites ne sont pas les meilleures.

L'influence du lit majeur intervient sur la performance des différents modèles.

Lorsque les crues sont faibles (1976-1982), la méthode Muskingum est la plus robuste, comme l'indiquent les deuxièmes colonnes des Tableaux I, II et III. En

Tableau III. Comparaison des coefficients d'Aitken.

Année	MSKC	REGRC	MSKV	REGRV	ANLTP
1962	0.996	0.996	0.997	0.998	0.985
1964	0.981	0.982	0.987	0.992	0.985
1966	0.975	0.969	0.934	0.992	0.971
1967	0.997	0.998	0.979	0.999	0.989
*1976	0.996	0.996			0.916
*1977	0.999	0.999			0.978
*1978	0.999	0.998			0.945
*1980	1.000	0.999			0.951
*1981	1.000	0.999			0.976
*1982	1.000	1.000			0.985

MSKC : Méthode Muskingum avec extrapolation amont avec coefficients constants; REGRC : Méthode de régression linéaire avec coefficients constants; MSKV : Méthode Muskingum avec coefficients variables; MSKC : Méthode régression linéaire avec coefficients variables; ANLTP : Méthode de prévision par analyse des temps de propagation; * : essai à coefficients constants uniquement (crue faible).

effet, dans ce cas, les crues se déplacent comme une onde de translation, et on a là pratiquement un modèle de propagation pure, sans débordement.

Pour les crues fortes, il est nécessaire de tenir compte de l'évolution du temps de propagation. La méthode basée sur les équations de Saint-Venant simplifiées fournit les meilleurs écarts-types grâce à la prise en compte de l'évolution des temps de propagation en fonction du temps. Cette amélioration n'est cependant pas obtenue pour ce qui concerne le débit maximum, compte tenu de l'instabilité de la courbe de correspondance amont aval pour les débits élevés.

Conclusion

Les modèles présentés se caractérisent par leur simplicité et leur facilité de mise en œuvre, mais aussi par leur caractère stochastique assez poussé, de sorte qu'ils ne nécessitent pas, de façon explicite, un nombre important d'informations sur le bassin versant. Dans les régions tropicales, où la collecte de l'information, pour des questions de moyens, n'est pas souvent faite avec une attention en accord avec son importance, les modèles étudiés peuvent répondre, une fois étendus aux caractéristiques liées aux régimes des cours d'eau et à leurs conditions d'écoulement, aux multiples problèmes faisant intervenir la prévision des crues.

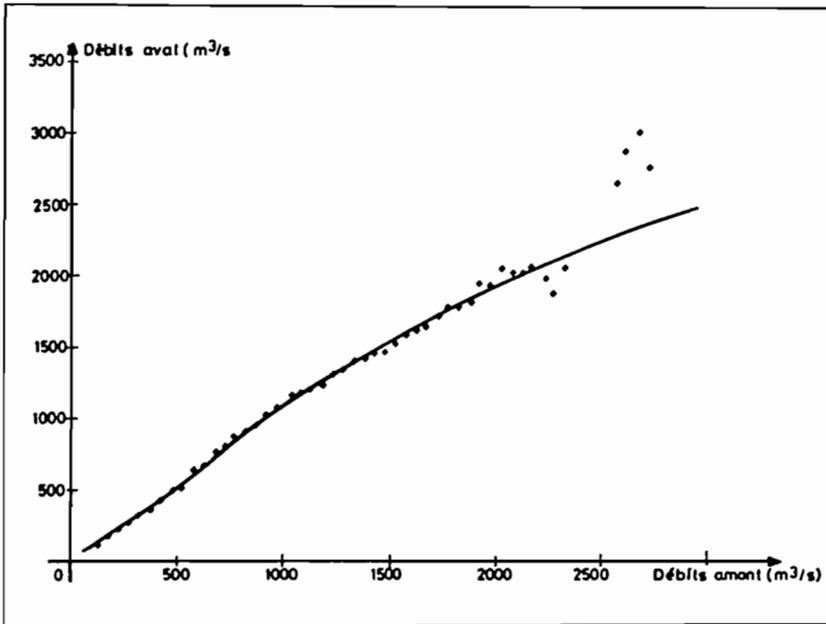


Figure 8a. Bakel-Matam (1975-1978). Correspondance amont-aval.

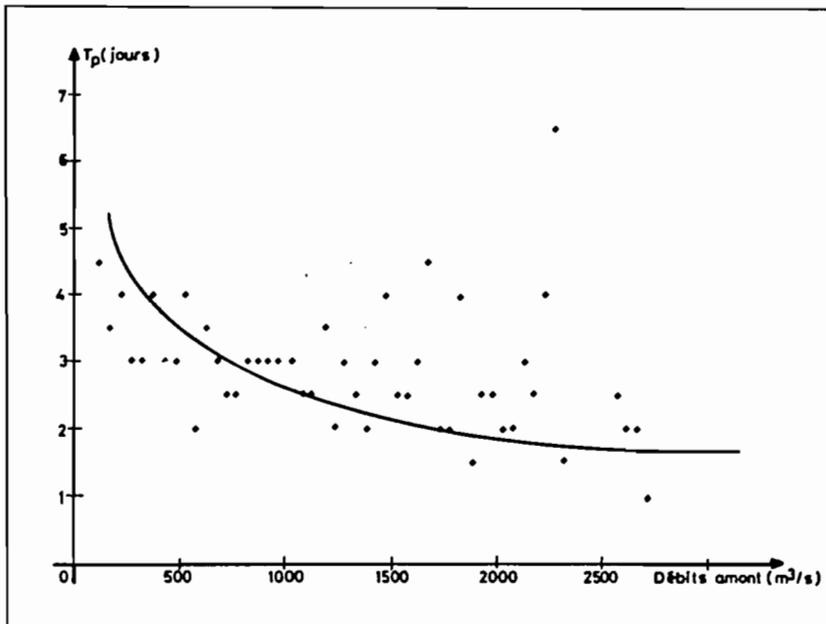


Figure 8b. Bakel-Matam (1975-1978). Evolution des temps de propagation avec le débit.

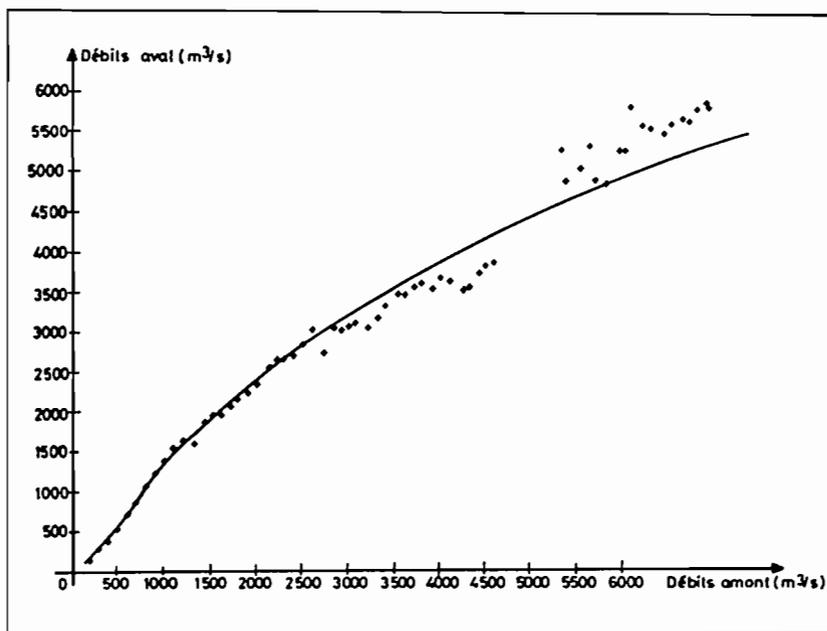


Figure 9a. Bakel-Matam (1961-1964). Correspondance amont-aval.

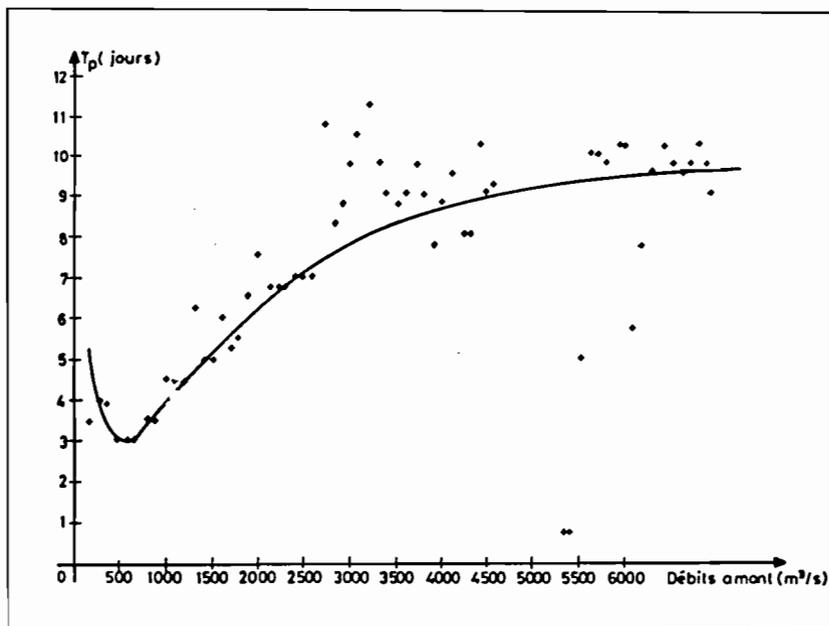


Figure 9b. Bakel-Matam (1961-1964). Evolution des temps de propagation avec le débit.

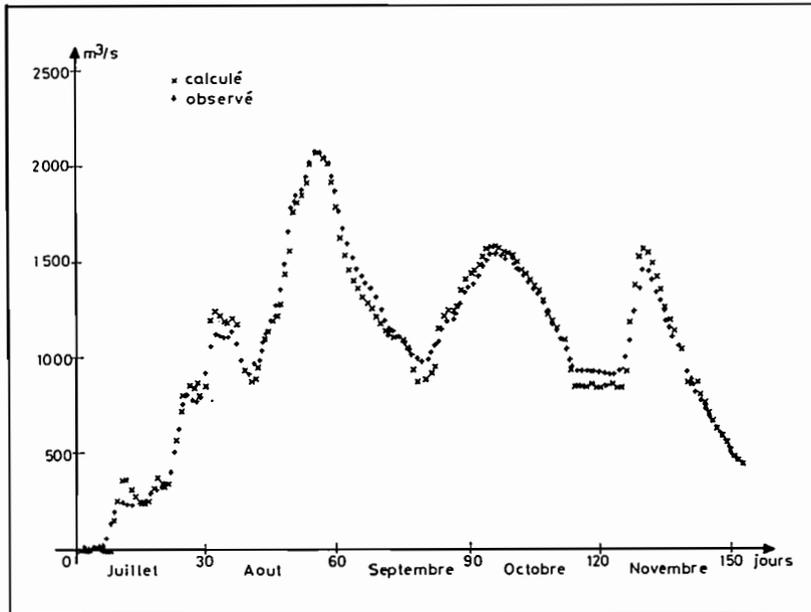


Figure 10. Bakel-Matam (1976). Prévision par analyse des temps de propagation.

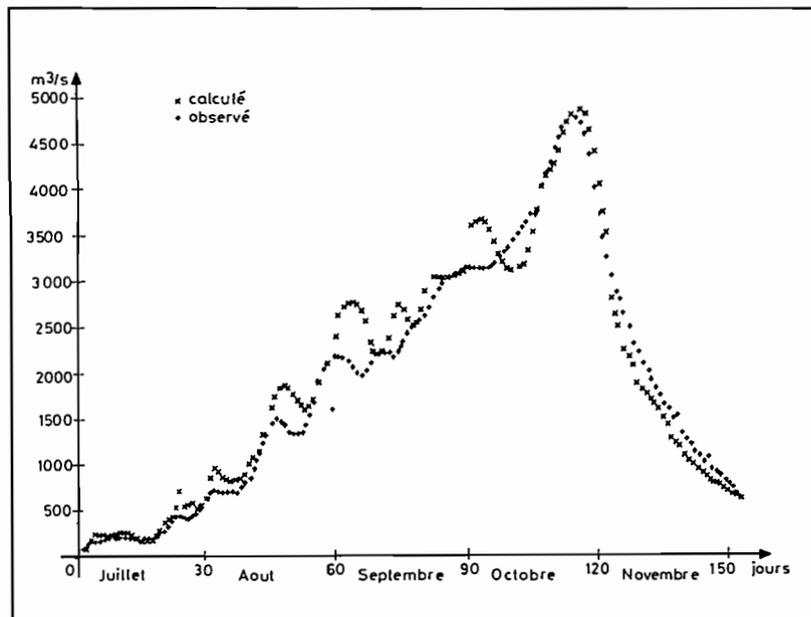


Figure 11. Bakel-Matam (1966). Prévision par analyse des temps de propagation.

Références

- Habaieb H. (1987). Contribution à l'étude d'algorithmes de prévision de crues en temps réel. Exemples de l'Aveyron et de la Médjerdah. Thèse de Doctorat de l'INPT.
- Lamagat J.P. (1985). Analyse des temps de propagation. Rapport interne ORSTOM.
- Lamagat J.P. (1987). Modèle de propagation des crues du Niger entre Koulikoro et Macina. Ouvrage publié avec le concours de la CEE, ORSTOM.
- Sambou S. (1989). Etude des régimes du fleuve Sénégal en vue de la prévision des crues. Thèse de Doctorat de 3^e cycle.
- Thirriot C. (1984a). Extrapolation par lissage aux moindres carrés. Rapport interne IMFT.
- Thirriot C. (1984b). Point de vue de la méthode Muskingum pour le suivi de la propagation des crues.
- Thirriot C. (1984d). Les méthodes de propagation dans la prévision des crues. Rapport interne IMFT, CT 635.
- Thirriot C., Habaieb H. (1986). Application comparée de certaines méthodes de prévision des crues en temps réel. Rapport interne IMFT, CT 676.
- Tucci *et al.* (1987). Comparaison entre modèles de prévision des crues. Hydrologie continentale. Vol. 1, p. 57-70.

20

Avantages et techniques du barrage de régulation

P. J. MARTIN

EIER, Ouagadougou, Burkina Faso

Le barrage de régulation, conçu et réalisé en tant que tel, est pratiquement inexistant dans la panoplie des ouvrages mis en œuvre pour maîtriser et gérer les ressources en eau des petits bassins versants en zone aride. C'est pourtant un type d'ouvrage auquel on a recours très fréquemment par ailleurs, pour la protection contre les crues, par exemple.

Pourquoi n'est-il pas davantage utilisé, alors que ses caractéristiques en font un ouvrage performant et économique, dans certaines configurations de site particulières ?

Caractéristiques et fonctionnement hydraulique d'un barrage de régulation

L'objectif premier d'un tel barrage est d'écrêter les crues et de laisser s'écouler, en aval, un débit aussi régulier que possible. Le barrage de régulation est donc conçu pour développer au maximum l'effet de laminage des crues.

Cet effet de laminage est fonction essentiellement de la capacité de stockage de la cuvette, au moment où la crue arrive.

Or, pour les barrages conventionnels, la crue est réputée survenir alors que le barrage est plein, c'est-à-dire alors que le plan d'eau affleure la crête du déversoir : PEN. Le stockage disponible pour le laminage correspond dans ce cas au volume

déterminé par la lame d'eau maximum admissible au-dessus du déversoir, multipliée par la surface correspondante du plan d'eau.

En général, comme on évite les lames d'eau importantes, pour économiser le volume utile de la retenue, l'effet de laminage est faible : au Burkina Faso les valeurs les plus couramment observées vont de 80 à 90 %. En d'autres termes, le débit maximum, à l'évacuateur, atteint encore 80 à 90 % du débit maximum d'entrée (figure 1).

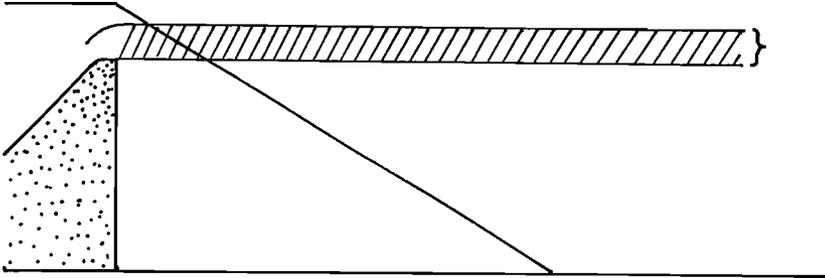


Figure 1. Volume tampon disponible pour le laminage. Evacuateur de surface.

Le barrage de régulation, quant à lui, est conçu pour recevoir les crues alors qu'il est vide : c'est donc la totalité du volume de la retenue qui est mise à contribution pour amortir les pointes des hydrogrammes (figure 2).

L'écoulement des eaux s'effectue donc par un pertuis de fond.

Le fonctionnement hydraulique d'un pertuis est par ailleurs peu sensible à la charge d'eau, comparativement à un déversoir : les débits sont respectivement fonction des puissances $1/2$ et $3/2$ de la charge.

Cette dernière caractéristique contribue encore à augmenter la régularité du débit à l'aval.

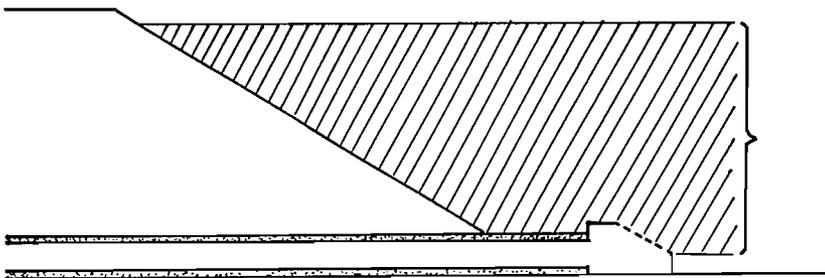


Figure 2. Volume tampon disponible pour le laminage. Pertuis de fond.

Le fonctionnement hydraulique d'un barrage de régulation est donc simple : « Il est soit vide, soit en train de se vider » pourrait-on dire, puisqu'il est percé !

On comprend dès lors son peu de succès auprès des aménageurs des zones arides qui s'évertuent en principe à conserver l'eau.

Intérêts d'un barrage de régulation

Régulation des crues

Malgré la taille réputée réduite des bassins versants auxquels on s'intéresse présentement, les conditions climatiques et géomorphologiques des zones arides sont susceptibles de provoquer localement des écoulements très violents, avec les nuisances que l'on connaît : érosions, transports, cultures des bas-fonds dévastées...

Avec la persistance des sécheresses, ces deux dernières décennies, les paysans ont pris l'habitude de cultiver davantage et toujours plus bas, dans les bas fonds, ce qui accroît d'autant les dommages en cas de crue violente.

La régulation des crues d'un marigot apporte donc une sécurité à ce niveau et contribue à la mise en valeur de surfaces cultivables particulièrement propices.

Solution économique pour l'évacuation des crues

L'évacuateur de crues est toujours l'organe le plus sensible d'un barrage en zones arides, que ce soit par son coût (couramment de 30 % à 50 % du prix du barrage), ou par la fragilité de ses organes vis-à-vis des phénomènes d'érosion.

En cas de débits de pointes très importants, le coût du traitement correct, avec un niveau de sécurité acceptable, de tous les organes d'évacuation : déversoir, bassin de dissipation, éventuellement coursier, chenal, digue de protection, est souvent rédhibitoire. Cette situation est encore plus sensible lorsque le volume des écoulements annuels est très supérieur au volume de la retenue.

On connaît bien maintenant, par ailleurs, ce qu'il advient de la solution prétendue économique d'un déversoir latéral implanté sur un site qui ne s'y prête pas naturellement.

L'évacuation des crues par un pertuis de fond apparaît alors comme une solution particulièrement économique, puisque les organes qui le composent sont tous dimensionnés pour une fraction faible du débit maximum des crues, de l'ordre de 20 à 30 % pour fixer les idées.

La restitution des eaux se fait dans des conditions de débit et d'énergie parfaitement contrôlées, directement dans le lit du marigot.

Il convient de mentionner ici un inconvénient de l'évacuateur vanné de fond, par rapport à l'évacuateur de surface : son fonctionnement peut être altéré par des embâcles lors de fortes crues.

Pour y parer, il suffit de concevoir une protection accrue du bassin de réception amont.

Possibilités d'associer les fonctions régulation et stockage d'eau

L'idée de transformer un barrage de régulation en barrage de retenue par une simple manœuvre d'obstruction du pertuis de fond est bien sûr tentante :

- en période de crue, le pertuis reste ouvert et assure la régulation du débit par effet de remplissage et de vidange de la retenue;
- en fin d'hivernage, le pertuis de fond est fermé, afin de conserver l'eau dans la retenue. L'idéal serait de pouvoir le fermer au bon moment pour que les dernières pluies de la saison remplissent juste la retenue.

Difficulté majeure d'un tel dispositif

Les hydrologues sauront-ils déterminer le moment précis auquel il convient de fermer le pertuis, pour que la retenue se remplisse, ni trop, ni trop peu ?

Un remplissage insuffisant constitue un sous-emploi de la capacité de stockage de la retenue; à l'inverse, en cas de remplissage excessif, le risque d'un déversement par dessus la crête de la digue n'est pas acceptable non plus.

On serait donc conduit :

- soit à concevoir un évacuateur secondaire en position haute de la retenue, dont la fonction est d'évacuer les crues tardives qui surviendraient alors que la retenue est déjà pleine. Cet ouvrage supplémentaire annule les avantages économiques du système proposé;
- soit à concevoir une manœuvre ponctuelle de la vanne du pertuis de fond pour évacuer au bon moment les volumes d'eau excédentaires, qu'ils arrivent sous forme d'écoulements moyens ou de crues.

Solution à l'évacuation des trop-pleins

Les ouvrages importants, à l'image du barrage de la Kompienga au Burkina Faso, par exemple, sont dotés d'automatismes électriques et hydrauliques qui manœuvrent les vannes en cas de crue, sans intervention humaine. Ces systèmes sophistiqués, qui comportent plusieurs dispositifs de sécurité en cascade, nécessitent un entretien de haute technicité, et surtout une source d'énergie. Ces contraintes sont incompatibles avec les aménagements envisagés ici.

Laisser la manœuvre des vannes à l'appréciation d'un gardien ou d'un préposé n'est pas concevable non plus : l'enjeu est trop important au regard du risque de non-exécution de la manœuvre en temps utile.

Reste la solution purement mécanique, qui offre à notre sens, avec la maîtrise actuelle des matériaux et des techniques, une solution à la fois rustique et fiable.

La vanne de fond est couplée à un flotteur de dimensions suffisantes pour développer la force nécessaire à la manœuvre de la vanne, en cas de montée excessive des eaux (figure 3).

Les techniques de l'hydraulique agricole nous ont suffisamment habitués aux régulateurs et autres ouvrages automatiques pour que la fiabilité d'une telle solution ne soit pas prise en défaut.

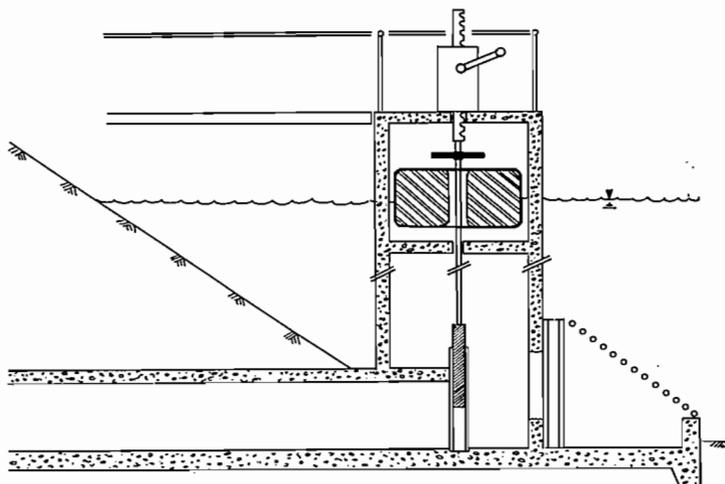


Figure 3. Schéma d'une vanne commandée par flotteur.

Section du pertuis, revanche et durée de retour de la crue considérée, seront adaptées aux exigences de sécurité requises. Un niveau supérieur de protection pourra également être obtenu en doublant les équipements.

Applications préférentielles du barrage de régulation

L'ouvrage proposé rend en fait les mêmes services qu'un barrage de retenue, tel qu'on le conçoit habituellement : il est capable de mettre pleinement à profit le volume utile de sa retenue pour stocker l'eau.

Ses avantages spécifiques résident :

— dans la fonction supplémentaire qu'il assure, de réguler le cours d'eau pendant l'hivernage. En cas de volume important de la retenue, il est possible de programmer des « lâchers » qui maintiendront des apports d'eau dans le marigot en saison sèche, selon les besoins en aval, et suivant un plan de gestion qui aura été défini;

— dans la solution particulièrement économique qu'il offre pour l'évacuation des crues, en cas de gros débits et d'écoulements annuels importants.

Cette solution est d'autant plus avantageuse que le barrage est haut et que le site ne se prête pas à l'implantation économique d'un évacuateur latéral; c'est le cas des vallées bien marquées, à pentes transversales fortes, constituées de sols érodables.

Les caractéristiques d'un site pour lequel ce type de barrage est le plus performant peuvent être résumées ainsi :

- débits de crue importants, hydrogrammes pointus;
- écoulements annuels importants, en comparaison du volume de la retenue;
- configuration du site rendant particulièrement onéreux les déversoirs centraux ou latéraux;
- possibilités de mise en valeur des bas fonds en aval du site.

Etude des organes hydrauliques

Importance particulière de l'étude hydrologique

En raison de ses fonctions mêmes et de ses particularités de fonctionnement, les études d'un tel ouvrage nécessitent une connaissance particulièrement approfondie de l'hydrologie locale. Les paramètres suivants doivent être connus :

- débits moyens journaliers pour apprécier la future gestion du réservoir;
- hydrogrammes des crues pour réaliser des simulations de laminage;
- répartition statistique des écoulements et des crues pendant la durée de l'hivernage pour optimiser le choix du moment où l'on fermera le pertuis;
- estimation des crues exceptionnelles pour doter l'ouvrage d'un niveau de sécurité adapté.

Si le déversoir vanné proposé dans cette étude offre les avantages certains déjà énumérés, il présente aussi un autre inconvénient par rapport à l'évacuateur de surface : il laisse peu de sécurité vis-à-vis d'une éventuelle sous-estimation des débits de pointe.

La précision requise pour la connaissance du régime des crues n'est alors pas compatible avec une méthode de détermination basée uniquement sur l'exploitation des données pluviométriques.

Il est indispensable, à notre sens, pour une telle étude, de disposer de données hydrométriques du marigot, ne serait-ce que celles résultant de l'observation du site pendant un hivernage. Il sera alors possible de recouper les valeurs théoriques calculées avec les valeurs réelles observées.

Détermination de la section du pertuis

La détermination de la section optimale du pertuis s'obtient en procédant à plusieurs séries de simulations. Ces simulations tiennent compte des paramètres imposés suivants :

- le débit maximum souhaité à l'évacuation. Le choix de ce débit peut découler par exemple d'une condition de non-débordement du lit du marigot sur une certaine distance en aval du barrage;

Avantages et techniques du barrage de régulation

— la cote maximum atteinte par le plan d'eau, dans la retenue.

Les paramètres que l'on pourra faire varier dans les simulations sont les suivants :

- plusieurs sections du pertuis;
- plusieurs épisodes de crues ($T = 5, 10, 50, 100$ ans);
- divers niveaux d'eau initiaux dans la retenue, y compris celui qui correspond au scénario d'une crue qui survient en fin d'hivernage, alors que la retenue est pleine.

Il apparaît que pour un débit aval et une cote du plan d'eau maximum donnés, la section du pertuis de fond peut être déterminée.

Protection contre les crues extrêmes

Les méthodes usuelles (celle de GRADEX, par exemple) peuvent être utilisées pour déterminer le débit de crue extrême contre lequel on souhaite protéger l'ouvrage.

On pourra prendre alors diverses hypothèses pour le calcul des paramètres hydrauliques du projet :

- évacuation du débit de pointe de la crue de projet avec l'ensemble des vannes ouvertes, sous le niveau des PHE;
- évacuation du débit de pointe de la crue de projet en supposant une vanne bloquée en position fermée, avec une revanche minimale sous la crête de la digue;
- évacuation du débit de pointe de la crue extrême, toutes vannes ouvertes, avec une revanche minimale sous la crête de la digue.

Utilisation d'un logiciel de simulation

Les nombreux cycles de simulation, nécessaires à l'optimisation des paramètres hydrauliques d'un tel ouvrage, ainsi qu'à la prise en compte des nombreuses configurations de crues, imposent pratiquement le recours au calcul informatique.

Nous utilisons actuellement un logiciel mis au point par le CEMAGREF d'Aix-en-Provence : CERES. Ce logiciel, écrit en quick-basic, résoud l'équation différentielle du laminage par la méthode de Runge-Kutta.

Les saisies sont les suivantes :

- courbe hauteur-surface de la retenue;
- hydrogramme de la crue à laminier;
- données relatives aux évacuateurs (ce logiciel en accepte jusqu'à 6 différents);
- paramètres de la simulation.

Le logiciel fournit les éléments suivants, qui peuvent être stockés sur un fichier et reproduits graphiquement :

- la simulation d'un cycle de laminage avec, pour chaque pas de calcul, les indications suivantes : temps, débit d'entrée, cote du plan d'eau, débit de chacun des évacuateurs;
- le dessin des hydrogrammes, entrée et sorties;

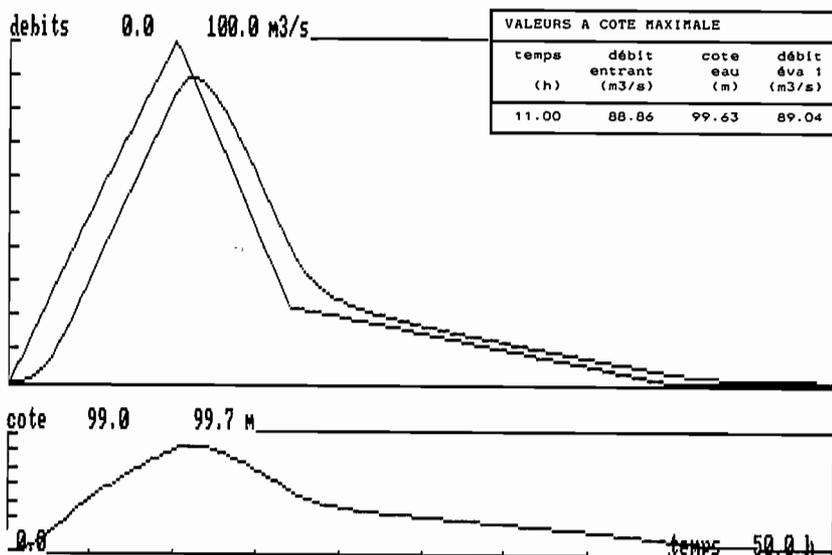


Figure 4. Laminage d'une crue par un évacuateur de surface calé à la cote 99.00 (longueur du déversoir : 100 m).

- le dessin de la courbe : cote du plan d'eau/temps;
- un tableau récapitulatif de la simulation.

Le logiciel est par ailleurs conçu pour que les paramètres d'entrée soient facilement modifiés et qu'un nouveau cycle de simulations permette de vérifier rapidement les répercussions des corrections apportées.

On trouvera en annexe une application de ce logiciel montrant pour un même site le comportement hydraulique de deux ouvrages : l'un équipé d'un évacuateur de surface, l'autre équipé d'un puits de fond (figures 4 et 5).

Conclusion

Le barrage de régulation, complété par une fonction d'ouvrage de retenue, apparaît finalement bien séduisant, par les multiples avantages qu'il offre :

- régulation du marigot pendant l'hivernage;
- coût sensiblement réduit de l'ouvrage évacuateur de crues et des ouvrages annexes;
- pleine utilisation de la capacité de stockage de la retenue.

La contre-partie de ces avantages se trouve sans doute dans la nécessité d'une maîtrise particulière de l'hydrologie locale avec l'obtention de réponses à des questions que les hydrologues ne se sont peut-être pas encore posées : quelle probabilité d'avoir une crue exceptionnelle à partir d'une date donnée ?

Avantages et techniques du barrage de régulation

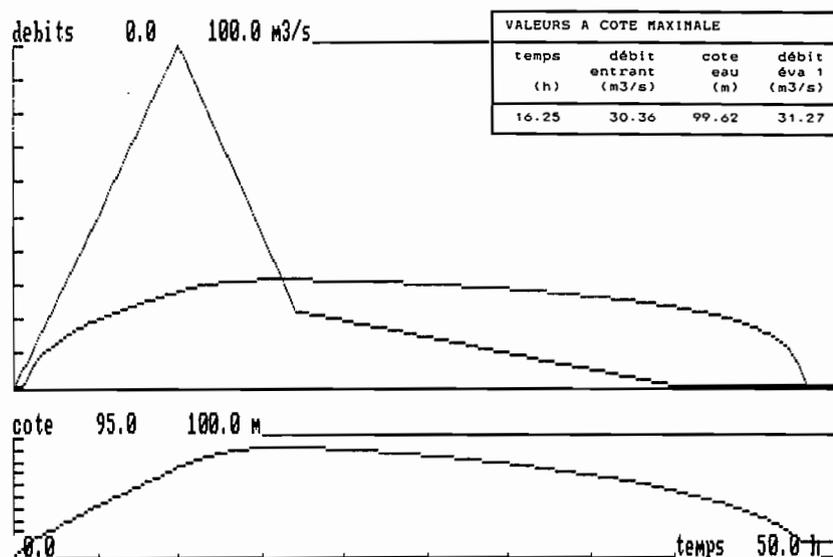


Figure 5a. Laminage de la même crue par un pertuis de fond de cale à la cote 95.50. Section du pertuis : 5,8 m². Cote initiale du plan d'eau : 95.00.

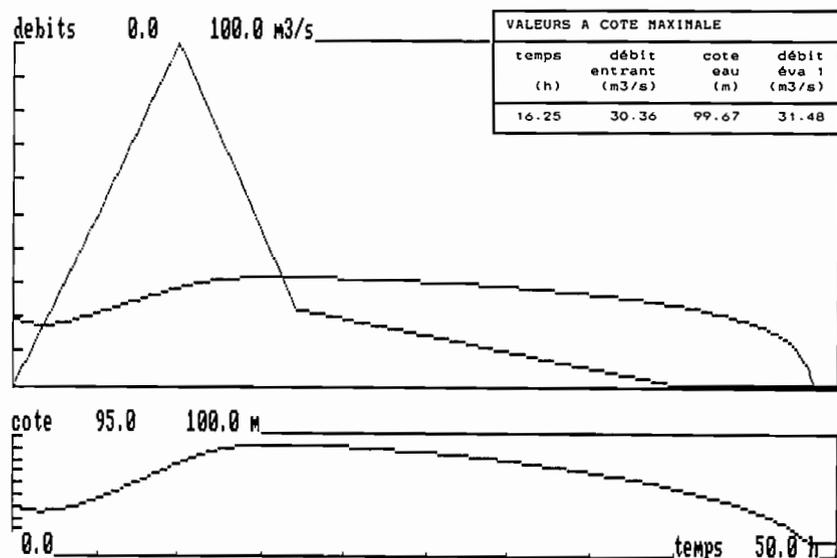


Figure 5b. Simulation de laminage de la même crue par le même ouvrage, pertuis calé à 95.50. Niveau initial de l'eau : 97.00.

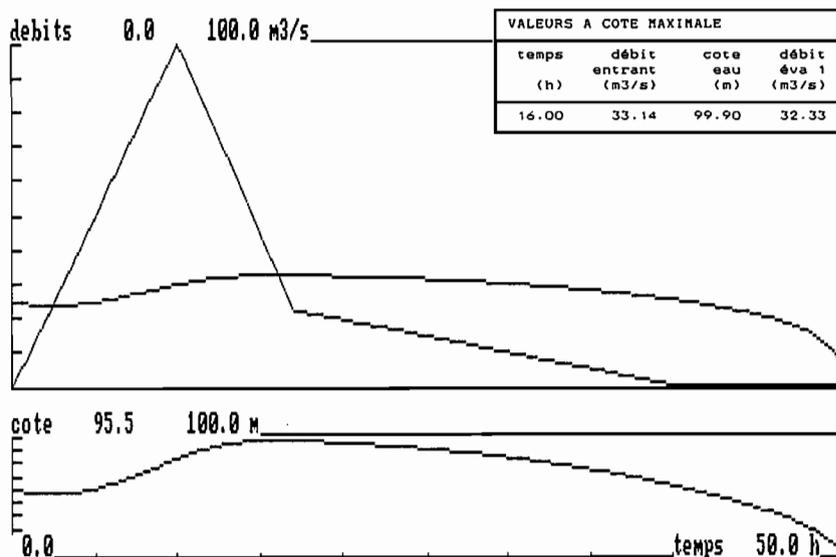


Figure 5c. Simulation de laminage de la même crue par le même ouvrage, pertuis calé à 95.50, cote initiale de l'eau : 98.00.

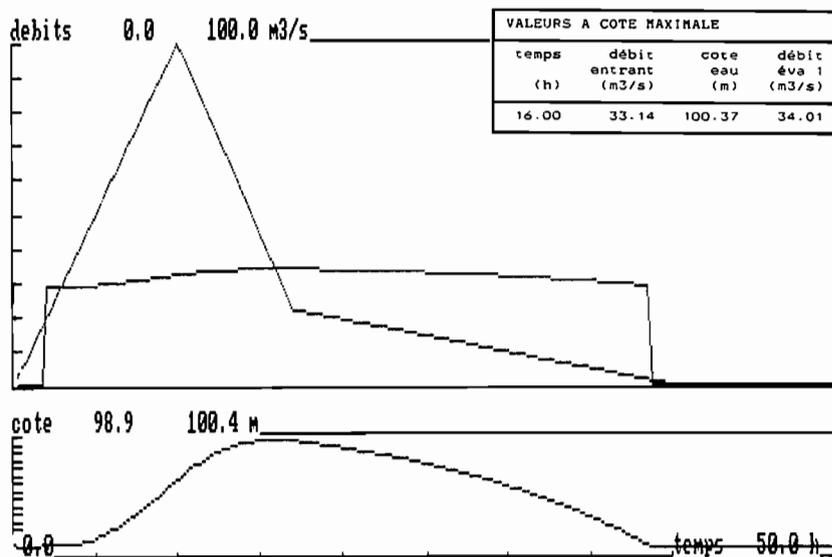


Figure 5d. Simulation de laminage de la même crue par le même ouvrage. Retenue pleine. Cote initiale du plan d'eau : 99.00.

Avantages et techniques du barrage de régulation

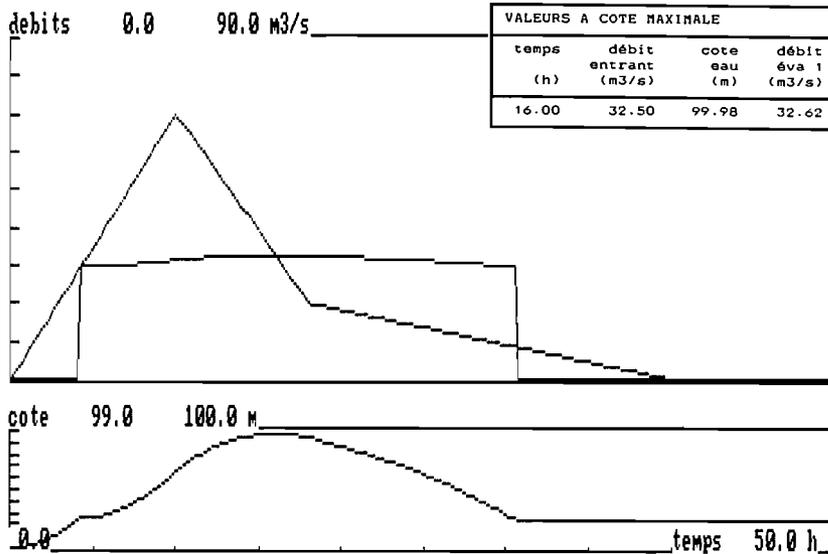


Figure 5e. Simulation de laminage d'une crue de 70 m³/s par le même ouvrage. Cote initiale de l'eau : 99.00. Cote d'ouverture : 99.25.

Ce type d'ouvrage ne trouvera en fait son réel intérêt que pour les sites qui s'y prêtent : loin d'être un ouvrage passe-partout, il nécessite au contraire une étude d'adaptation assez élaborée. Mais si le site est favorable, il est permis d'espérer des résultats intéressants de cette solution. Encore faut-il l'avoir présente à l'esprit.

Par ailleurs, le mécanisme de fonctionnement du pertuis, d'une certaine technicité, impose à plusieurs reprises pendant l'année une intervention humaine : pour l'entretien et pour les manœuvres saisonnières d'ouverture ou de fermeture des vannes.

La mise sur pied d'un tel projet suppose par conséquent un degré d'intégration avancé avec les futurs usagers, par opposition à un barrage équipé d'un déversoir qui peut fonctionner pendant des années sans que personne n'y prête attention.

Mais n'est-ce pas là l'évolution souhaitée ?

21

Influence du seuil d'épandage sur la végétation naturelle et les perspectives d'utilisation pour la production végétale (vallée de Tamazalak, Aïr, Niger)

H. BENDER⁽¹⁾, J. BOZZA⁽²⁾, I. OUSSEINI⁽³⁾

⁽¹⁾ EPFZ, IGB ETH-Honggerberg, CH-8093 Zürich, Suisse.

⁽²⁾ IRAT-EPFZ, BP 195, Agadez, Niger.

⁽³⁾ Université de Niamey, BP 418, Niamey, Niger.

Le programme « Conservation et gestion des eaux et des sols au Niger » initié en 1986 par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (Suisse) collabore sur le plan scientifique avec les départements des Sciences du Sol (Faculté d'Agronomie) et de Géographie (Faculté des Lettres et Sciences Humaines) de l'Université de Niamey depuis 1987. Il est conçu comme un appui technique et scientifique aux organismes aménageant des terroirs. Son financement est assuré par la Coopération Suisse.

Présentation du programme de recherche-développement

L'essentiel des activités du programme présenté ici reste circonscrit à la région montagneuse de l'Aïr en zone aride (50-150 mm de pluie), au Centre-Nord de la république du Niger (latitude 18° Nord) (figure 1).

Dans cette région, l'érosion hydrique a imprimé dans le paysage des réseaux hydrographiques denses constituant de vastes bassins versants. Ces bassins, dont les pentes induisent de forts coefficients de ruissellement, concentrent ces faibles précipitations dans des vallées étroites bien alluvionnées en sédiments limoneux et sableux. A titre d'exemple, la vallée de Tamazalak où intervient le projet, s'étend sur 10 km² pour un impluvium de 1 000 km² ! Ces vallées s'ouvrent sur de vastes plaines limono-argileuses situées en bordures immédiates de la montagne.

Deux économies de subsistance tirent parti de ces écoulements :

- l'agriculture oasienne dans les vallées met à profit la nappe stockée dans les sédiments;
- le pastoralisme dans les plaines exploite une végétation naturelle de steppe discontinue, tributaire des écoulements diffus au gré des micro-reliefs.

Problématique

Depuis la dernière décennie, la dégradation des espaces pastoraux et la sédentarisation des nomades ont conduit la quasi totalité de la population à se concentrer dans les vallées. Ces dernières zones refuges de l'Air sont menacées à leur tour par :

- la surexploitation du couvert végétal (coupes du bois pour l'approvisionnement local ou des centres urbains d'Arlit et d'Agadez; coupe des jeunes palmiers doums pour la vannerie...),
- les surpâturages,
- l'extension des jardins oasiens.

Or, étant donné la forte instabilité des sols (prépondérance des limons et sables fins par rapport aux argiles représentant souvent moins de 3 % du stock sédimentaire), le maintien de l'écosystème dépend essentiellement de l'importance de la végétation naturelle, tributaire des régimes hydriques :

- dans les vallées, le méandrement et l'épandage de crue assurent la recharge de la nappe, mais plus encore la réalimentation des horizons de subsurface dont dépend la végétation naturelle pour plus de 90 %,
- dans les plaines, les écoulements en nappe entretiennent une végétation diffuse.

Aussi toute dégradation du couvert végétal par les sécheresses et la pression anthropique, en ne faisant plus obstacle aux écoulements préférentiels, engendre des manifestations d'érosions hydriques irréversibles : encaissement du lit mineur limitant les épandages sur le lit majeur aux plus grandes crues, formation de ravines, puis de ravins dans les plaines avec rabattement des nappes d'eau souterraines et dépérissement de la végétation.

Le seuil d'épandage par l'étalement des écoulements diminue le premier facteur d'érosion : le débit par mètre linéaire. Bien localisé dans le paysage, l'ouvrage doit permettre le retour à l'état d'équilibre avec arrêt de l'érosion d'une part, et d'autre part, la réimplantation de la végétation naturelle après rétablissement des régimes hydriques antérieurs.

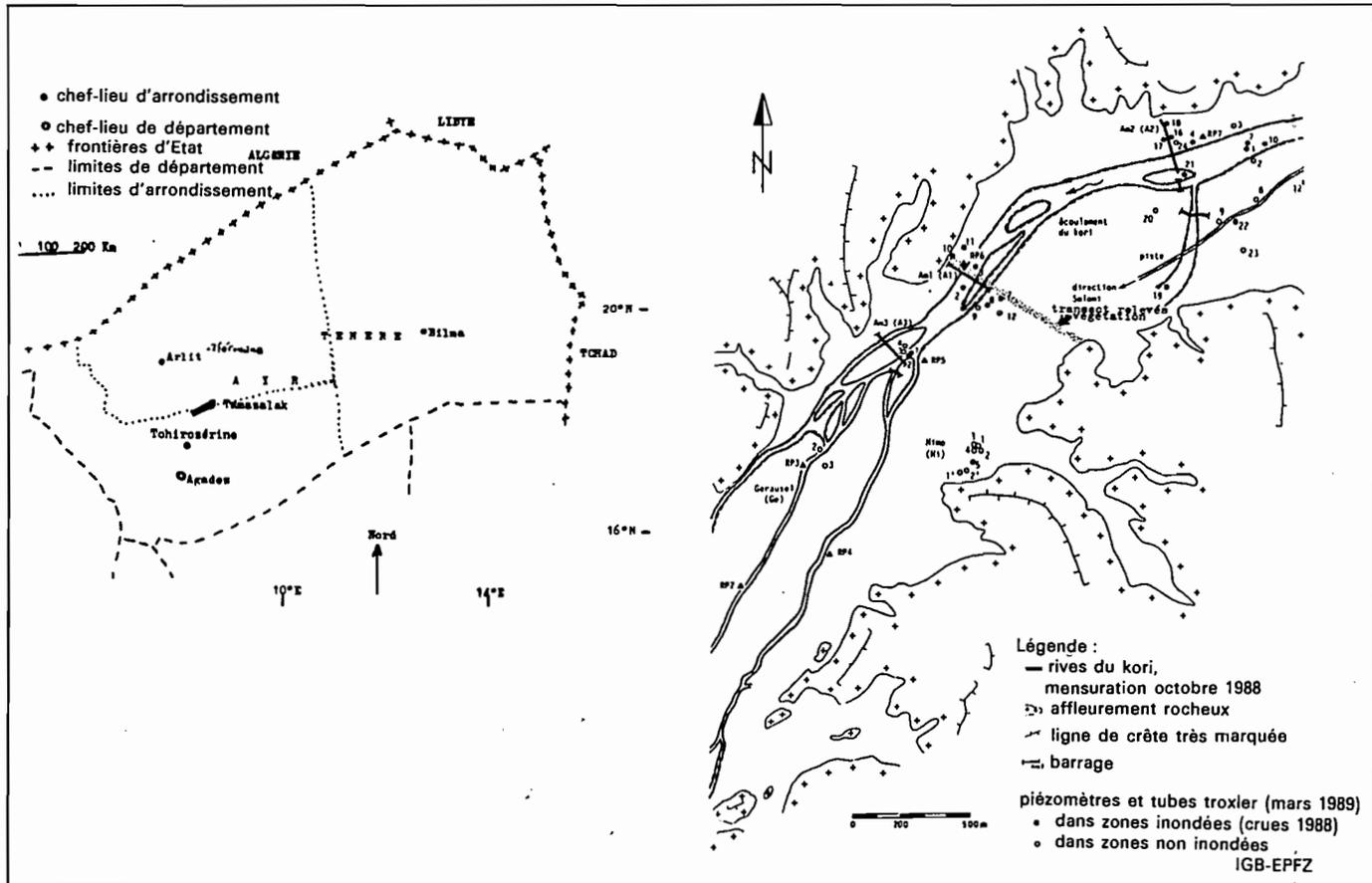


Figure 1. Localisation de la vallée de Tamazalak.

Les résultats

Les investigations ont porté d'une part sur la maîtrise de seuils d'épandage adaptés aux conditions locales et d'autre part sur les effets concernant le bilan de l'eau et la régénération de la végétation naturelle.

De la maîtrise des seuils d'épandage

(a) Concernant les techniques de construction sur sols instables, l'utilisation d'un écran étanche (briques en banco ou tôles métalliques récupérées à partir de fûts) et la limitation de la hauteur de l'ouvrage à un maximum de 0,50 m, ont résolu les problèmes d'érosion interne particulièrement sensibles dans ces sols. Le prolongement des seuils par des ailes sur le lit majeur semble avoir résolu dans nos conditions le problème du contournement des contreforts. (Dans les cas d'un abaissement important du lit mineur, comme dans la plaine d'Etaghas à l'ouest d'Iférouane, une digue étanche rehaussée pour empêcher tout débordement et prévenir des affouillements en aval, est en cours de réalisation).

Enfin, une protection végétale est recherchée grâce à des espèces locales exploitables : *Calotropis procera*, *Hyphanea thebaïca*, *Acacia* spp...

(b) La localisation de l'ouvrage dans le paysage doit stopper l'abaissement du niveau du lit mineur et des ravines latérales avec sédimentation et reprofilage du niveau de base. Il doit être implanté dans un endroit relativement large où le lit mineur est peu encaissé : on recherche ici l'étalement maximum sur les ailes et la limitation de la hauteur de l'ouvrage dans le lit mineur (exemple, figure 2).

(c) L'appropriation des techniques par les populations locales est recherchée grâce à des constructions simples et fiables.

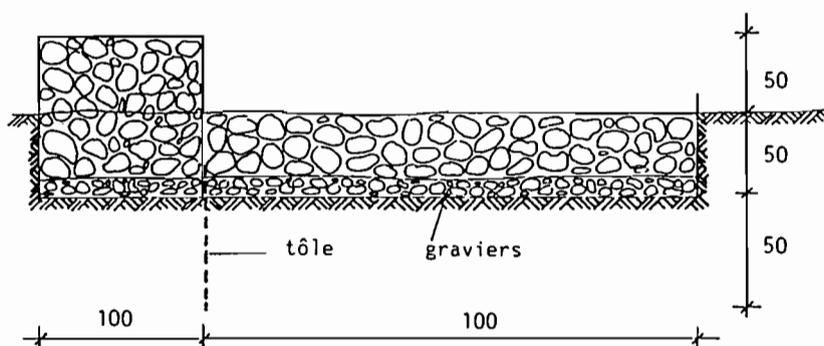


Figure 2. Coupe d'un seuil dans le lit mineur avec écran étanche pour réduire les risques d'érosion interne et de renardage.

Des effets sur le bilan de l'eau

Dans les vallées, au niveau des seuils d'épandage, l'effet positif de ceux-ci sur la restauration du milieu est visible. Le rétablissement de l'épandage de crue a été possible sur près des 3/4 de la largeur du fond de vallée. Des suivis de l'évolution des profils hydriques des sols sur des saisons des pluies montrent que la submersion est indispensable pour la réalimentation des couches de subsurface. Le tableau I présente les teneurs en eau pour des zones non submergées, submergées pendant deux saisons et plus de deux saisons de pluies; il indique également la possibilité de report de stock interannuel avec des réserves de 100 l/m³ en mars comme observé sous une végétation naturelle arbustive (*Calotropis* p.).

Tableau I. Teneur en eau moyenne dans la couche de subsurface de 0,25 à 2,0 mètres de profondeur pour des zones d'inondations différentes.

Zone	Teneur en eau moyenne de 0,25 à 2,0 mètres de profondeur en kg/m ³	
	Février/mars 88	Février 89
Zone non inondée par les crues	20 cm (10-30)	20 cm (10-30)
Zone inondée depuis 1988	35 cm (20-50)	35 cm (20-50)
Zone inondée déjà avant 1988	80 cm (60-110)	90 cm (60-150)

Ainsi, outre la recharge de la nappe, le rétablissement de l'épandage de crue assure la réalimentation des horizons de subsurface (0 - 3 m) dont dépend la végétation herbacée et le resemis naturel des espèces ligneuses.

Des effets sur la régénération de la végétation naturelle

Les Photos 1 et 2 montrent le développement de la végétation naturelle autour du seuil Amaksoz 2 en mars 1988 (au cours de l'édification) puis en octobre 1989 (après un an de fonctionnement). Les relevés de la végétation autour du seuil Amaksoz 1 (édifié en juin 1987), effectués en février 1988 puis en décembre 1989 permettent de préciser de façon quantifiée l'évolution de cette biomasse végétale par géofaciès (figure 3).

La zone inondée régulièrement avant 1988

Elle se limite à l'aire de divagation du lit mineur. C'est à l'origine un géofaciès — G1 — totalement dénudé à l'exception de très rares petits bancs de sable partiellement fixés par *Calotropis procera*. Dès la première année, la sédimentation à l'aval du seuil a permis par la multiplication des bancs de sable, d'y faire venir des densités moyennes à l'are de 2 à 50 (figure 3a). Ces densités sont moins disparates (8 à 31) la troisième année. La réitération très active assure après trois saisons de pluies des taux de recouvrement au sol de plus de 20 % (figure 3b). Le

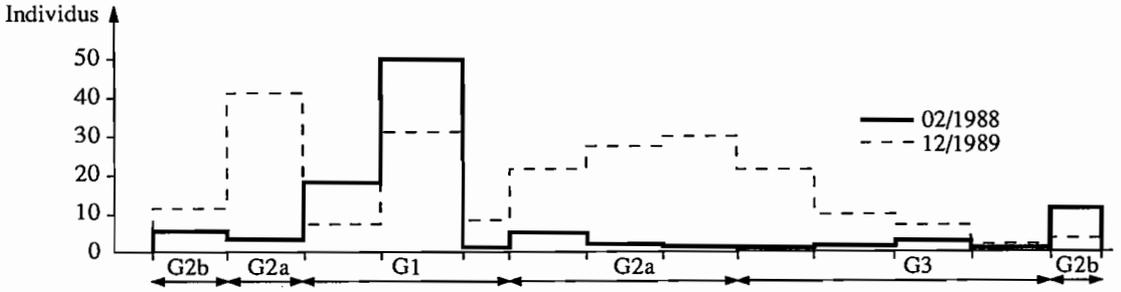


Figure 3a. Seuil d'épandage Amaksoz 1. Densités moyennes des ligneux à l'are (toutes strates confondues).

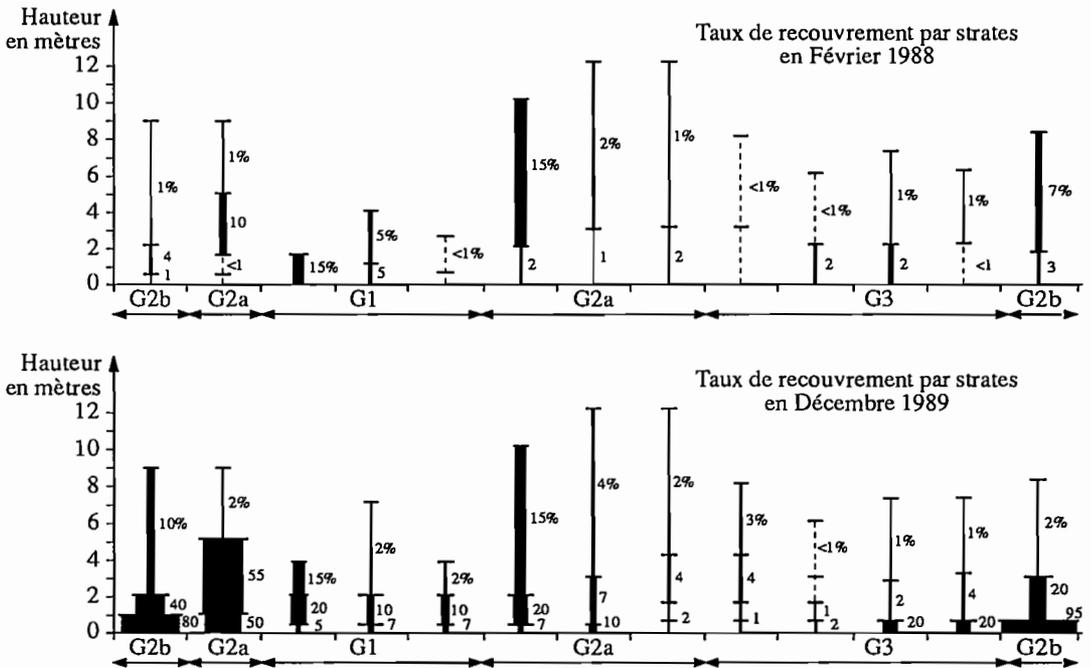


Figure 3b. Seuil d'épandage Amaksoz 1. (A) Taux de recouvrement par strates en février 1988. (B) Taux de recouvrement par strates en décembre 1989.

profil de la végétation devient plus complexe. Cette végétation est certes assez monospécifique (*Calotropis p.*) mais elle stabilise davantage les sols et bonifie leurs caractères par le piégeage des débris végétaux alluvionnés.

Les zones d'extension de crues régulières depuis l'édification du seuil

Elles étaient auparavant épisodiquement inondées. On y distingue deux géofaciès : G2a et G2b. Les unités G2a situées en bordures de G1 correspondent à des secteurs

Seuil d'épandage et végétation naturelle



Photo 1. Seuil d'épandage Amaksoz 2/Tamazalak, avril 1988.



Photo 2. Seuil d'épandage Amaksoz 2/Tamazalak, octobre 1989.

d'épandages maintenant fréquents à vitesses d'eau moyennes à fortes. La végétation ligneuse y présente le meilleur potentiel de croissance (strate arborescente jusqu'à 12 m), la structure la plus complexe et les densités initiales les plus fortes (1 à 15/are). L'effet du seuil est visible par une régénération atteignant des densités de 21 à 41/are en 1989 (figure 3a) accompagnée d'un enrichissement du spectre spécifique : *Calotropis p.*, *Acacia spp.*, *Boscia s.*, *Hyphanea t.*, *Panicum t.*, etc.

Les unités G2b situées en bordures extrêmes de la vallée sont des secteurs où les vitesses des crues sont les plus faibles. Cette dynamique permet le maintien des semis naturels d'herbacées. Les plages discontinues d'herbacées observées en 1988 se sont étendues en un tapis continu en 1989 avec des taux de recouvrement au sol de 80 à 85 % (figure 3b). Ce nouveau potentiel fourrager est cependant encore dominé surtout par *Aristida spp.* de palatabilité médiocre en dehors de la saison pluvieuse.

La zone non inondée

Elle correspond aux aires — G3 — légèrement exhaussées par les petites accumulations éoliennes de sables. Au terme des trois ans de fonctionnement du seuil, l'influence de celui-ci reste encore peu perceptible. Les densités sont très aérées : 1 à 2 par are. La mortalité y est toujours élevée : 59 %. Le recru herbacé rare (*Tribulus t.*, *Zornia g.*) semble lié surtout aux maigres précipitations locales.

Conclusion et perspectives pour une production végétale

L'aménagement par les seuils d'épandage, tout en assurant une lutte anti-érosive efficace dans ces vallées de l'Air, permet d'une part de restaurer les équilibres écologiques rompus et d'autre part, autorise des innovations valorisant les ressources en eau de subsurface (capillaire) par des systèmes mixtes agro-sylvo-pastoraux.

L'extension des jardins oasiens par la technique de protection des berges contre les débordements de crues s'oppose en partie à l'approche du seuil d'épandage — surtout en années à faibles écoulements. En effet, ces mesures de protection induisent des effets pervers sur l'environnement : canalisation des écoulements, limitation de la recharge des nappes et impossibilité de réalimenter les horizons de surface.

La technique du seuil d'épandage accroît les possibilités d'aménagement des terroirs par les populations locales et offre une complémentarité au système d'exploitation actuel par le jardin oasien.

A titre d'exemple, selon l'importance des épandages et des réserves en eau, il est possible de proposer :

(1) sur le lit majeur, des cultures vivrières avec complémentation d'irrigation en fin de cycle, si nécessaire, ou bien des rotations vivriers-jachère pour reconstitution du stock d'eau;

(2) sur le lit mineur, des cultures de décrue pour lesquelles des tests sur niébé, tournesol, maïs et blé (avec complément d'irrigation : 2 arrosages en fin de cycle) ont donné des résultats encourageants.

22

Gestion d'un barrage anti-sel en Basse Casamance (Sénégal)

J. ALBERGEL, D. BRUNET, G. DUBÉE, J.P. MONTOROI,
P. ZANTE

*Département Eaux Continentales de l'ORSTOM, ORSTOM, BP 1386,
DAKAR, Sénégal*

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

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

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

Le site de Djiguinoum

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

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

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

Le premier ensemble occupe la zone basse, qui était, avant la construction du barrage, soumise au balancement des marées à partir d'un marigot central. Actuellement, cette zone est ennoyée pendant l'hivernage par les eaux météoriques. Les sols sont très salés, ainsi que la nappe phréatique. Cette salure est surtout chlorurée sodique. Le pH est faiblement acide (4,5 et 5,5) et la texture est surtout argileuse.

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

— une zone de terrasses et d'anciens lits de marigot comblés par colluvionnement. Cette zone n'était pas atteinte par les marées. Les sols et la nappe sont peu salés mais très acide ; pH de 4 en surface à 3,5 en profondeur pouvant descendre à 2,5 localement. La nappe est riche en aluminium dissous. En lisière de la palmeraie, apparaissent des précipitations de sulfate d'aluminium, en particulier de tamarugite (Le Brusq *et al.*, 1987). Les sols sont argileux et sableux ;

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

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

En 1988, le dispositif d'ouverture a été modifié pour permettre la vidange par le fond des eaux de remplissage du barrage. Il s'agit d'une porte pleine actionnée verticalement par une crémaillère. Ce système a l'avantage d'être fonctionnel pendant tout l'hivernage et simple d'utilisation. De plus, il rest peu onéreux. En 1989, les deux autres ouvertures du barrage ont été également équipées, afin d'accroître la capacité de vidange. L'ensemble du système d'ouverture fait une largeur de 15 m. En même temps, un dispositif d'observation des bilans hydrologi-

ques et hydrochimiques a été mis en place et un essai rizicole est pratiqué dans une zone où les contraintes « sel et acidité » sont des plus fortes.

Dispositif et protocole expérimentaux

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

Le dispositif hydrologique et hydrochimique

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

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

La seconde règle a été dictée par la nécessité de pouvoir étalonner des débits sortant au barrage en fonction des hauteurs lues à l'échelle amont de celui-ci. Un ensemble de jaugeages, réalisé début juillet a montré qu'il était nécessaire d'avoir une différence de cote de 3 cm entre les échelles amont et aval.

La durée du flot et du jusant étant pratiquement constante pendant la saison des pluies, le temps de vidange est donc fonction du niveau de remplissage amont (figure 2).

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

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

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

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

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

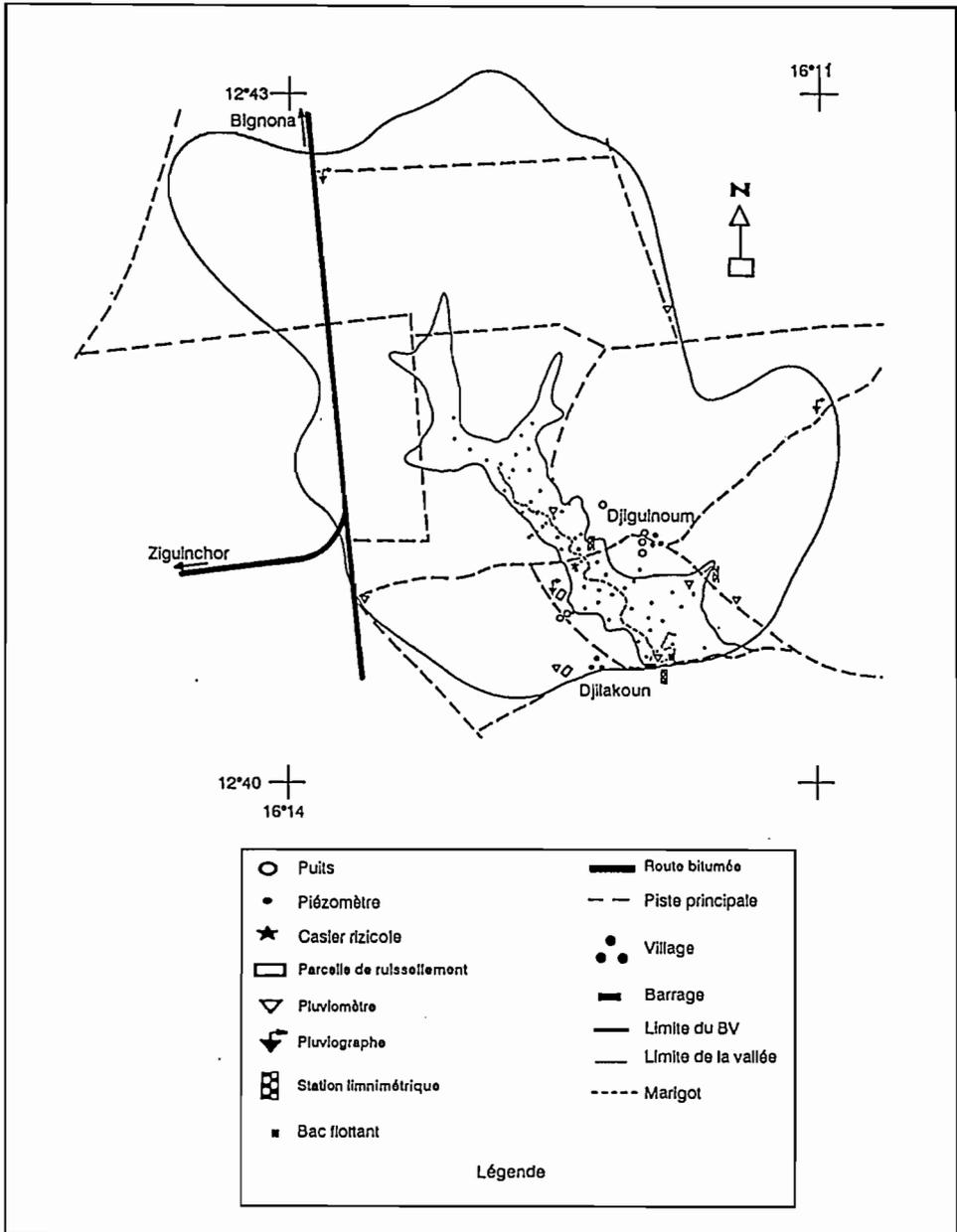


Figure 1. Le site expérimental de Djigounoum.

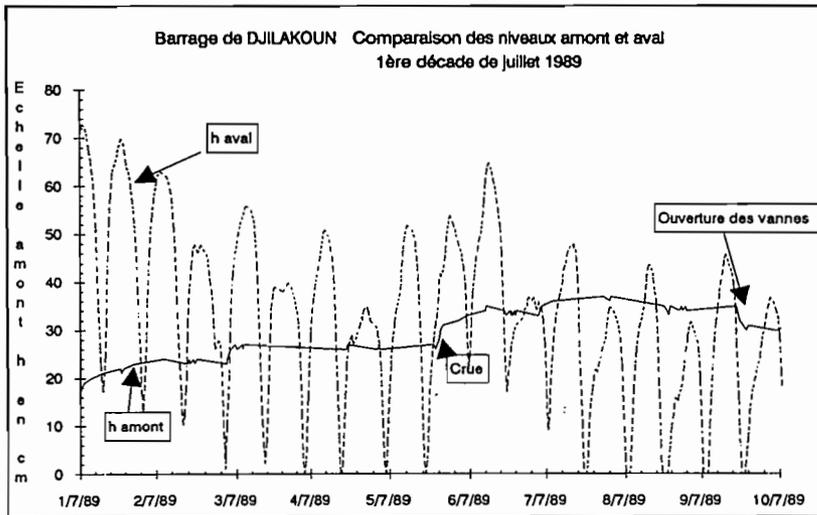


Figure 2. Barrage de Djilakoun. Comparaison des niveaux amont et aval, 1^{re} décennie de juillet 1989.

L'essai agronomique

L'ensemble de l'aménagement occupe une aire de 2 500 m². Les travaux culturaux ont été réalisés suivant les techniques traditionnelles de la riziculture en basse Casamance. Trois variétés connues pour leur tolérance au sel ont été employées. Le calendrier cultural a comporté les phases suivantes ;

- désherbage et billonnage dans la dernière décennie de juillet;
- mise en place d'une pépinière sur les sols de plateau du 11 au 22 juillet;
- repiquage le 6/9 pour les variétés Rock 5 et Étouhal, et le 16/9 pour la variété DJ684D;
- récolte du 8 au 12/12.

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

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

Résultats en 1989

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

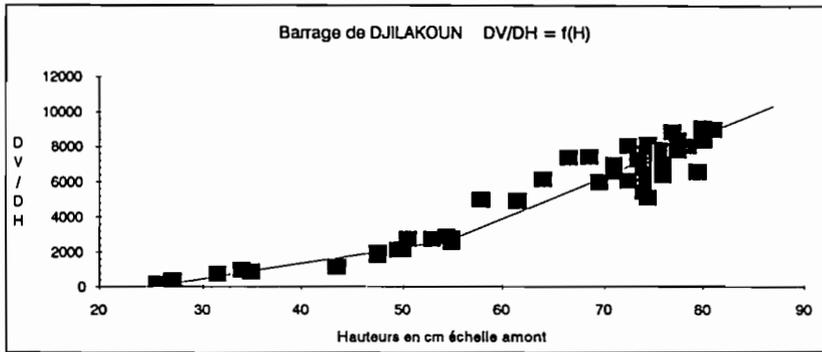


Figure 3. Barrage de Djilakoun. $DV/DH = f(H)$.

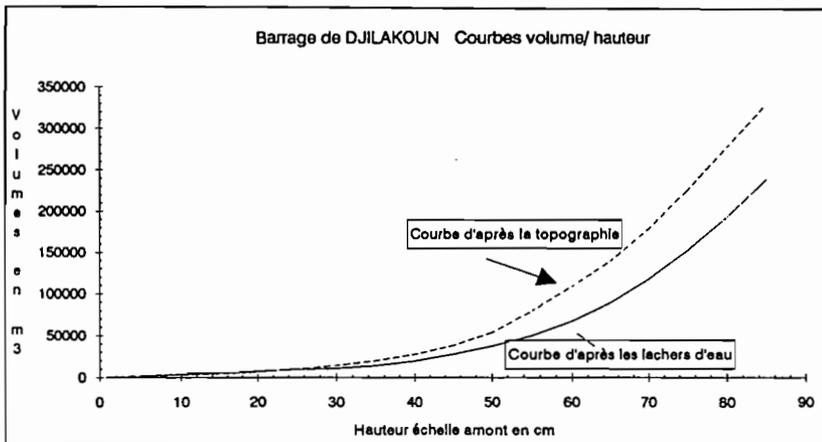


Figure 4. Barrage de Djilakoun. Courbes volume/hauteur.

Bilan hydrologique et hydrochimique

La pluviométrie enregistrée cette année reste déficitaire (1 200 mm). Sa répartition dans le temps a été bonne, excepté deux périodes de sécheresse (du 3 au 10 août, et du 17 au 22 août).

En suivant les règles de gestion préétablies, 55 lâchers ont été réalisés, dont le plus important est celui du 22/09, avec 50 280 m³. Le volume total évacué pendant tout l'hivernage a atteint 1,025 millions de m³.

La figure 3 présente le volume de chaque lâcher, rapporté à la différence de cote entre le début et la fin du lâcher, en fonction de la cote au début du lâcher (dV/dH)

Barrage anti-sel en basse Casamance

= $f(H)$). La primitive de cette fonction donne la courbe des volumes d'eau disponibles dans la retenue en fonction de la cote à l'échelle. Cette courbe est différente de celle obtenue à partir de la topographie de la vallée (figure 4). En effet, des volumes importants sont stockés par des digues latérales dans la partie aval de la vallée. Ce résultat se retrouve dans l'étude des transects piézométriques.

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

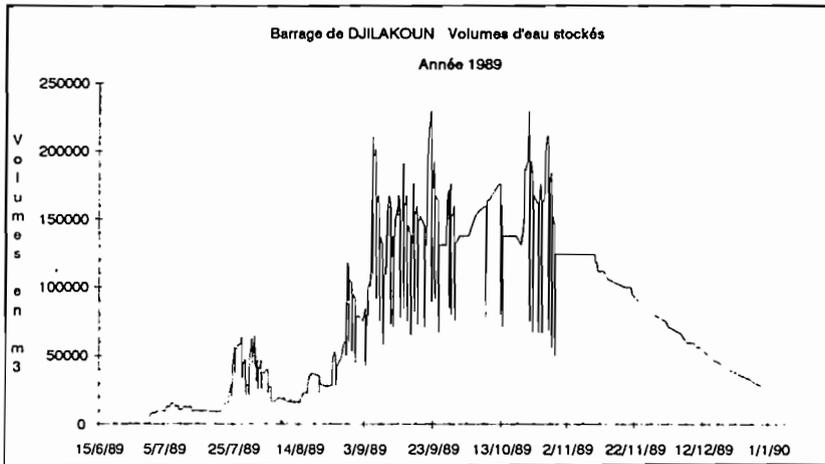


Figure 5. Barrage de Djilakoun. Volumes d'eau stockés. Année 1989.

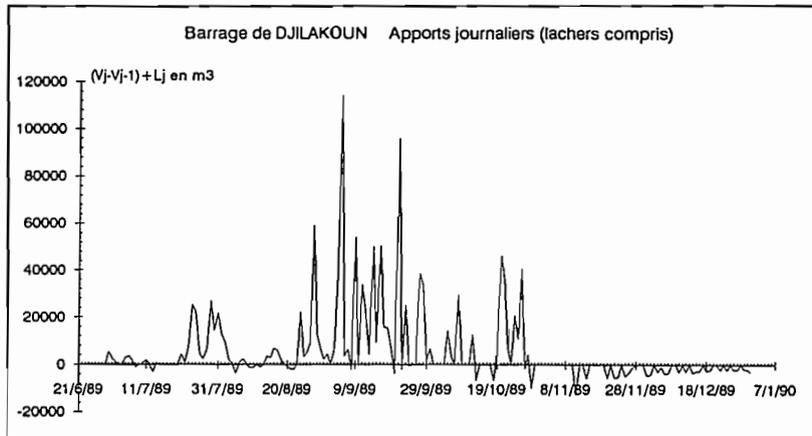


Figure 6. Barrage de Djilakoun. Apports journaliers (lâchers compris).

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

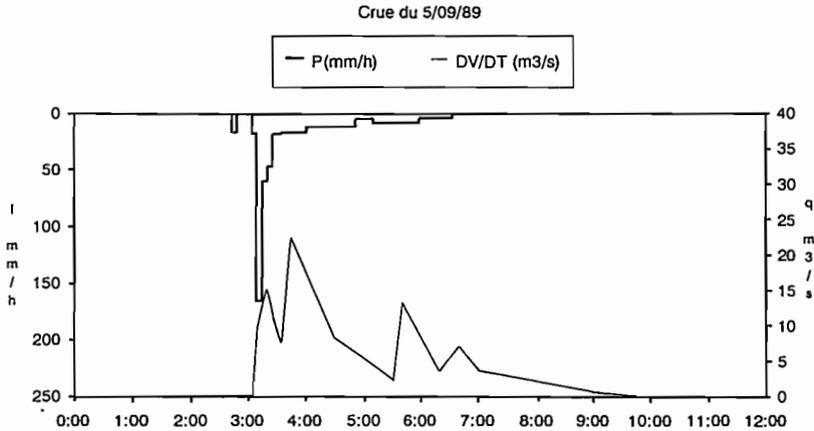


Figure 7. Crue du 5/09/89 (— P(mm/h) (— DV/DT (m³/s).

L'échantillonnage des eaux évacuées indique une baisse significative de la salinité qui passe de 20 à 2 m S/cm en fin d'hivernage. Une remontée importante a été enregistrée durant la période sèche du mois d'août (figure 8). La quantité de sel exporté est estimée à 2 250 T, ce qui correspondrait à une évacuation de 15 T/ha, la salinisation est cependant loin d'être uniforme.

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

Barrage anti-sel en basse Casamance

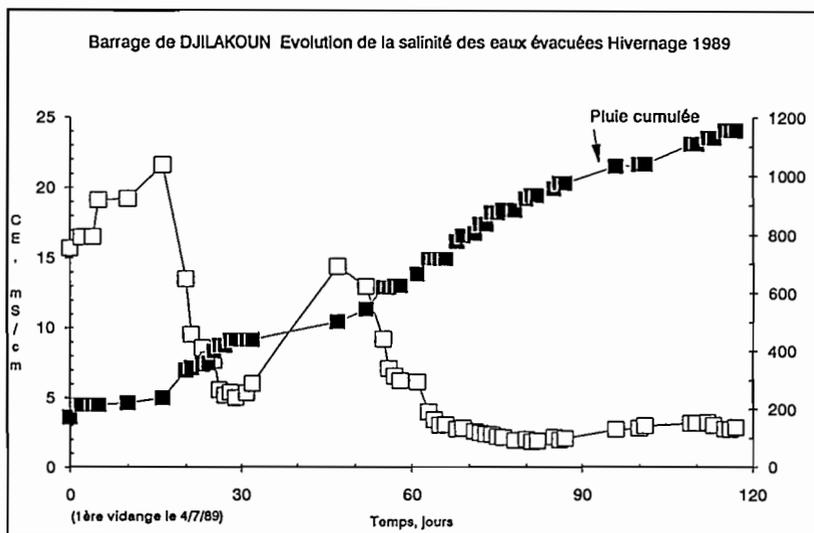


Figure 8. Barrage de Djilakoun. Évolution de la salinité des eaux évacuées. Hivernage 1989.

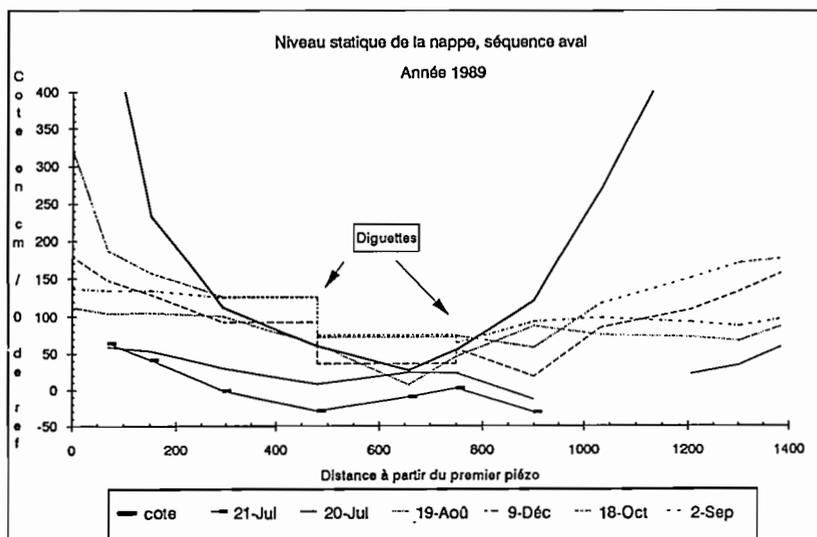


Figure 9. Niveau statique de la nappe, séquence aval. Année 1989.

L'essai agronomique

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

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

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

Le rendement moyen en riz paddy est de 2 732 kg/ha (calcul fait sur la totalité de la récolte, le taux d'humidité moyen est de 6%). Le Tableau I donne la répartition des rendements selon les variétés et la situation topographique.

Tableau I. Rendements de l'essai rizicole.

Variété	Parcelle	Rendement kg/ha	Observation
DJ 684 D	2	2 886	
DJ 684 D	5	3 572	Fort dessalement
DJ 684 D	8	1 300	Parcelle la plus haute
ROCK 5	1	2 136	
ROCK 5	4	2 450	
ROCK 5	6	3 936	Fort dessalement
ETOUHAL	3	2 690	
ETOUHAL	7	2 886	

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

Conclusion

Après une première année de gestion rationnelle du barrage anti-sel et une première bonne récolte, les paysans de la vallée de Djiguinoum, ainsi que ceux des vallées environnantes, ont retrouvé l'espoir de cultiver leurs rizières. Si cet espoir n'est manifestement pas vain, il se doit de ne pas être déçu. Les résultats de l'essai agronomique ont démontré que la culture traditionnelle du riz est possible dans

ces vallées à sols sulfatés acides, moyennant un aménagement sommaire et le respect de règles de gestion simples. Il reste à vérifier par la modélisation hydrologique que la gestion préconisée peut se faire en année plus sèche.

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

Références

1. Barry B. (1986). *Situation des aménagements hydro-agricoles des terres salées de Basse Casamance*. 3^e séminaire sur les aménagements hydro-agricoles et systèmes de production, 16-19 décembre 1986, Montpellier.
2. Barry B., Boivin P., Brunet D., Montoroi J.P., Mougnot B., Touma J., Zante P. (1988). *Évolution des stratégies d'aménagement hydro-agricoles des sols salés en basse Casamance*. Deuxièmes journées de l'eau au Sénégal, UCAD, Dakar.
3. Boivin P., Brunet D. (1990). *Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivimétrie électromagnétique et krigeage*. Rapport de campagne. Multigr., ORSTOM/Dakar-Bondy, 12 p.
4. Brunet D. (1988). *Étude pédologique de la vallée de Djiginoun (basse Casamance)*. Multigr., ORSTOM/Dakar, 28 p. + 2 cartes + annexes.
5. Brunet D. (1989). *Dessalement des terres dans la vallée de Djiginoun*. Bilan hydrique et salin de l'hivernage 88, ORSTOM/Dakar.
6. Dacosta H. (1989). *Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance*. Thèse 3^e cycle, Univ. CAD, Dakar.
7. ISRA/CRODT (1986). Actes du séminaire « L'estuaire de la Casamance : environnement, pêche, socio-économie ». 19-24 juin 1986, Ziguinchor.
8. Kalck (1978). *Évolution des zones à mangroves du Sénégal au Quaternaire récent*. Études géologique et géochimiques. Thèse 3^e cycle, ULP Strasbourg, 117 p.
9. Le Brusq J.Y., Loyer J.Y., Mougnot B., Carn M. (1987). *Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et de leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal*. Science du Sol, 25 (3), 173-184.
10. Montoroi J.P., Zante P. (1989). *La mise en valeur des terres dégradées par la salinisation en basse Casamance (Sénégal)*. Séminaire « Estudio de las relaciones agua-suelo-vegetacion y ganado en la zona arida del norte de Mexico. Orientado a la utilizacion racional de estos recursos », 23-27 octobre 1989, Mexico.
11. USAID/SOMIVAC/ISRA (1985). Actes de la 2^e Table Ronde sur les barrages anti-sel, 12-15 juin 1985, Ziguinchor.

23

Dégradation des vertisols dans le Nord-Cameroun : modification du régime hydrique des terres et tentative de réhabilitation

L. SEINY BOUKAR⁽¹⁾, Ch. FLORET⁽²⁾, H. MOUKOURI KUOH⁽³⁾,
R. PONTANIER⁽⁴⁾

⁽¹⁾ IRA/CNS, Maroua, Cameroun.

⁽²⁾ CEPE/CNRS, Montpellier, France.

⁽³⁾ IRA/CNS, Yaoundé, Cameroun.

⁽⁴⁾ ORSTOM, Tunis, Tunisie.

Dans la zone soudano-sahélienne du Cameroun qui s'étend du 9^e au 13^e parallèle Nord, l'agriculture est particulièrement du type pluvial avec pratique de jachère, de brûlis et abandon des terres dégradées. La surexploitation des ligneux pour le bois de chauffe et l'élevage extensif avec pratique de feux de brousse ajoutent à la dégradation générale des ressources renouvelables. L'importance de cette dégradation varie selon les types de sol, le mode d'exploitation et la dynamique de population (croissance annuelle pouvant atteindre 1,5 %, migrations des populations des montagnes vers les plaines plus attractives).

Le climat est caractérisé par des pluies relativement abondantes (500 à 1 000 mm/an) mais dont les averses individuelles particulièrement violentes (jusqu'à 140 mm/h en 10 mm) et irrégulières rendent la production agricole incertaine dans cette région où, par ailleurs, l'évaporation est intense (ETP Penman supérieure à 1 800 mm).

La diversité pédologique se traduit par des comportements hydrodynamiques très différents : infiltration et capacité de stockage de l'eau des sols très variables,

redistribution très inégale de l'eau aux plantes selon les sols, érosion différentielle, etc.

L'objet de cet article concerne les conséquences de la dégradation des sols de la série vertisolique sur leur régime hydrique. Ce travail a été effectué par le Centre National des Sols (IRA Cameroun) et a été financé par la Communauté Européenne. Il comprenait l'étude du fonctionnement hydrique des sols du Nord-Cameroun et de la végétation des savanes qui leur correspondent. Nous ne parlerons pas ici en détail des mesures qui ont concerné la dynamique superficielle de l'eau (infiltration) et l'érosivité des sols, pour insister sur la question de la redistribution temporelle de cette eau infiltrée et de sa disponibilité pour les végétaux et les cultures. Les résultats complets de ce travail sont présentés par ailleurs (Seiny Boukar, à paraître).

Matériel et méthodes

Trois sites de mesure correspondant respectivement au vertisol modal (VM), au vertisol dégradé (VD) et au « hardé » (HV), ont été caractérisés morphologiquement et suivis durant trois années consécutives. L'étude de la dynamique interne de l'eau a été faite sur la base des profils hydriques (distribution verticale) et des courbes de l'évolution temporelle des réserves d'eau stockée. Les mesures neutroniques ont été faites durant ces trois années (1985, 1986 et 1987) au cours desquelles les précipitations totales respectives ont été de 907, 745 et 488 mm.

L'accent a été mis sur les différenciations texturales des horizons et sur la densité apparente. Des regroupements correspondant à des niveaux d'étalonnage ont été faits. Les fonctions de production de la lame ruisselée ont été établies (Thèbe, 1987; rapport CEE, 1988) par le moyen de la simulation des pluies et/ou en conditions naturelles sur parcelles de 1 m². Elles ont permis de déterminer les pluies efficaces (Pe) lors de nos mesures et par conséquent de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR).

Résultats et discussions

Caractérisation de la séquence de dégradation des vertisols

Dans le sens d'une dégradation croissante à partir des « vertisols modaux », on rencontre les « vertisols dégradés », et les « hardé ».

Les vertisols modaux (VM)

Les vertisols modaux ou vertisols en bon état se caractérisent par une teneur en argile variant de 40 à 45 %, constante dans tout le profil.

L'argile est essentiellement de type montmorillonitique et smectitique (45 %), ce qui explique la variation saisonnière de leur état de surface : larges fentes de retrait

(2-3 cm) disposées en réseau polygonal allant jusqu'à 1 mètre de profondeur pendant la période sèche; gonflement et relief gilgai (micro-relief bosselé) pendant la période pluvieuse. Ces fentes constituent la macroporosité du sol et délimitent des unités structurales prismatiques grossières, à faible porosité (micropores), compactes à l'état sec et à densité apparente élevée (1,75). Le ruissellement est, par conséquent, moyen ou fort selon que le sol est saturé en surface ou non. L'érosion y est faible.

La profondeur de ces sols (plus de 160 cm) et la dominance d'argiles gonflantes leur confèrent une capacité d'absorption et de rétention d'eau élevée : la réserve en eau utile (RU) est de l'ordre de 180 mm pour 80 cm d'épaisseur.

La dégradation de ces sols est essentiellement superficielle et physique, et se traduit par une perte de structure avec développement de la battance et par une baisse des propriétés hydrodynamiques.

Les vertisols dégradés (VD)

Les signes de dégradation sont perceptibles dès la surface, par la faible expression des caractères vertisoliques : micro-relief plat, rares fentes de retrait, battance développée. L'horizon superficiel est plus finement structuré : la croûte de battance de nature argilo-sableuse recouvre des polyèdres fins à pores interstitiels remplis de sables fins. Dans l'horizon superficiel (5 à 10 cm) l'appauvrissement en argile (11,5 %) entraîne une diminution de la CEC (20 à 25 méq./100 g de terre), et une acidification (pH = 5,5). La pellicule de battance est épaisse dans ces sols. La conséquence immédiate est un ruissellement plus fort que sur les vertisols modaux dépassant fréquemment 50 %, ce qui entraîne une érosion par décapage et ségrégation des particules fines et grossières (enrichissement en sables). Selon l'importance du phénomène, la réserve utile (RU) peut être diminuée ou non (78 mm/40 cm contre 87 mm/40 cm pour les vertisols modaux). En profondeur, les caractères du vertisol modal sont pratiquement conservés.

Les sols « hardé » hérités des vertisols (HV, HN)

Nous empruntons à Vaillat (1970) la définition du terme « hardé » en langue fulfuldé (langue peulh du Nord-Cameroun). Il désigne « tout terrain », généralement à faible végétation arbustive et graminéenne, à très forte compacité et très peu perméable, et duquel l'agriculteur sait qu'il ne tirera qu'une très médiocre récolte.

On relève dans cette définition synthétique les critères de sol, végétation et d'occupation des terres pour caractériser ces milieux. On retiendra que cette appellation traduit beaucoup plus un état de surface qu'un type pédologique donné : surface nue présentant localement quelques touffes d'herbes antérieures ou postérieures à une accumulation de sable éolien, ou s'installant à la faveur des dépôts alluviaux vertiques dans les microdépressions (cas de *Setaria pumila*). La pellicule de battance sous laquelle s'observent de nombreux pores vésiculaires est épaisse de quelques millimètres. La profondeur atteinte par la dégradation dépasse parfois 20 cm de sol, caractérisés par une structure détruite (structure massive), sans pores, ni activité biologique. Quelques fentes verticales et discrètes semblent

délimiter parfois dans cet horizon superficiel des unités structurales qui pourraient devenir des colonnettes, car elles sont souvent coiffées de sables fins.

Ces sols sont le siège d'une érosion en nappe. L'infiltration des eaux pluviales est également faible (20 à 50 % de la pluie), tout comme la réserve en eau utile (RU = 60 mm/40 cm). Il convient de préciser que le niveau argileux vertique apparaît dès 15-20 cm de profondeur. Ceci explique que RU soit de 60 mm/40 cm, car elle n'est que de 7,5 mm sur les 10 premiers centimètres.

A un stade de dégradation encore plus avancé, l'érosion tronque le sol jusqu'à l'horizon à nodules calcaires et conduit à un relief présentant des ravines (faciès HN ou « Bad-lands »).

Comportement hydrique de la séquence de dégradation des vertisols

Sur la figure 1, ont été représentées les évolutions comparées des réserves en eau et des profils hydriques des différents faciès de la séquence.

Vertisols modaux

Malgré les différences de pluviométrie durant ces trois années, il se dégage un comportement global caractéristique pour le vertisol modal. Seule la tranche superficielle (0-40 cm) réagit de façon nette aux précipitations. En dessous, l'humidité ne varie presque pas au cours de l'année.

Les vertisols modaux ont une forte capacité d'absorption et de rétention d'eau, favorisée par l'existence des fentes de retrait. La réserve d'eau disponible se reconstitue assez tôt dans la saison en surface et se maintient environ pendant 7 mois. La profondeur humectée est moyenne (60-70 cm) mais en dessous, bien que le stock d'eau soit peu affecté par les précipitations, la réserve en eau est disponible toute l'année. L'absence de remontée capillaire due aux conditions physiques du sol est aussi favorisée par le self-mulching du dessèchement rapide de la surface et aussi par le mulch d'herbacées denses et sèches sur pied. La vie végétale, surtout pour les espèces à enracinement profond ou étagé est donc possible sur ces sols toute l'année.

Vertisols dégradés

En ce qui concerne les vertisols dégradés (VD), il nous faut rappeler que dans ces sols, les fentes de retrait, quand elles existent encore, sont peu nettes et peu profondes, et que la pellicule de battance est bien développée. Dans ce cas, le stock de la couche 40-80 cm varie peu au cours de l'année. La réserve d'eau disponible pour les végétaux n'y est pas maintenue toute l'année. L'humectation du sol est peu profonde (50-60 cm) et ne dépasse guère 25 % d'eau en valeur volumique.

Ces sols, qui ont pourtant une structure fine en surface, s'humectent difficilement en raison de la pellicule de battance qui cède néanmoins quand les pluies deviennent abondantes et régulières. L'installation tardive de la végétation herbacée en résulte. C'est aussi cette végétation qui accélère l'épuisement des réserves d'eau du sol avant même l'arrêt des dernières pluies qui ne compensent pas leurs besoins. Seules les espèces végétales dont les racines atteignent les couches profondes pourront survivre et aller jusqu'à maturité.

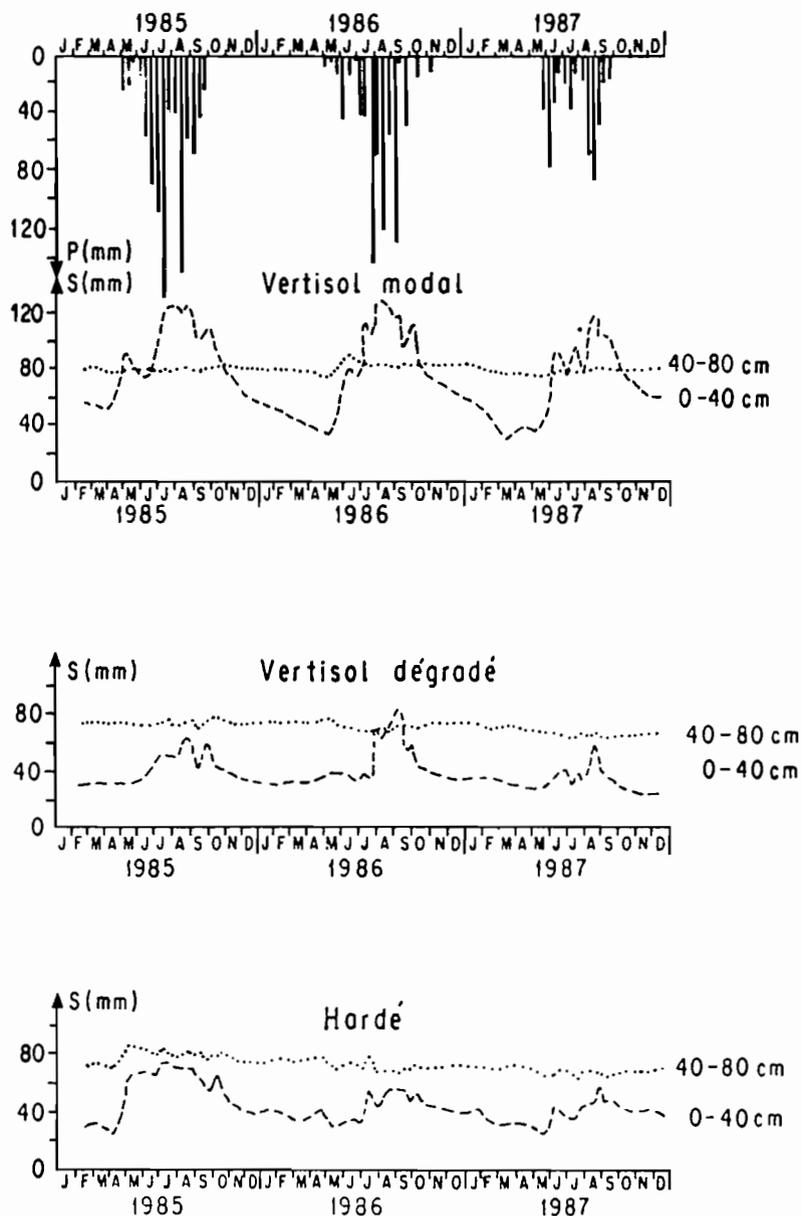


Figure 1. Comparaison de l'évolution annuelle des réserves en eau totale du sol (Smm) des faciès de dégradation d'une séquence vertisolique du Nord-Cameroun (3 années d'observation).

Sols hardés

Enfin, nous ne pourrions discuter du comportement hydrique global des sols « hardé » (HV) sans nous référer aux cas précédents, notamment les vertisols dégradés avec lesquels des similitudes de redistribution relative de l'eau dans les différentes couches apparaissent (figure 1).

Ces sols se distinguent par une mauvaise efficacité des précipitations dans la recharge de leur réserve hydrique. Ce fait est certes lié à l'absence de structure et de porosité, mais est surtout dû à la présence d'une pellicule de battance continue en surface qui limite l'infiltration de l'eau. Il en résulte une réserve d'eau disponible insignifiante ou nulle toute l'année qui explique que ces sols soient dépourvus de végétations; les ligneux eux-mêmes ne pouvant trouver de l'eau en profondeur que lors de certaines années à pluviométrie exceptionnelle. Les espèces adaptées, telles que *Lannea humilis*, survivent grâce à leurs organes de réserves d'eau et à leur système racinaire superficiel développé (rapport CEE, 1988), qui leur permet de profiter des courtes périodes de disponibilité de l'eau. La végétation herbacée se développe en touffes discontinues sur des taches d'accumulation de sable éolien ou dans des microdépressions qui offrent un régime hydrique favorable.

La dégradation dans la famille vertisolique a eu en définitif pour effet d'accentuer l'aridité édaphique (Floret et Pontanier, 1984). Celle-ci se traduit par une diminution de la réserve utile du sol et de la profondeur maximale humectée; une baisse de l'efficacité des précipitations dans la recharge des réserves hydriques du sol, et par conséquent une diminution de la réserve d'eau disponible pour les végétaux (Tableau I).

Tableau I. Comparaison des comportements hydriques globaux des faciès de dégradation d'une séquence vertisolique au Nord-Cameroun.

	Réserve utile sur 80 cm - RU (mm)	Profondeur maximale humectée (cm)	Coefficient d'efficacité moyenne des pluies Ke %	Durée moyenne des disponibilités en eau pour la végétation (en mois)	
				0-40 (cm)	40-80 (cm)
Vertisol modal VM ..	170/190	60-70	75 à 85	7	12
Vertisol dégradé VD	150/170	50-60	50 à 60	3	7
Hardé HV	130/150	40/50	30 à 40	2	4

Un exemple d'aménagement traditionnel : les casiers à diguettes de la plaine

Le sorgho de contre-saison est repiqué, à la fin de la saison des pluies sur les vertisols qui ont, entre-temps reconstitué une importante réserve d'eau durant la saison pluvieuse. Ces terres argileuses appelées localement « karal » peuvent être, soit en position de bas-fond engorgé, à drainage externe nul, soit en position de pente faible (1 à 2 %) et aménagées en certains endroits en casiers à diguettes.

Par ces aménagements, l'objectif des paysans est de stocker le maximum d'eau durant la saison des pluies en vue du report de cette eau en saison sèche jusqu'à

la fin du cycle du sorgho (février). Nous avons montré qu'après fermeture des fentes de retrait, l'efficacité des précipitations dans ces sols baisse considérablement ($k_e < 60\%$ à l'échelle de l'année). Sur les faciès plus ou moins dégradés, les quantités d'eau ruisselées sont encore plus importantes.

Les casiers de forme rectangulaire, et d'une superficie variant de 50 à 200 m² suivant les positions topographiques, sont délimités par des diguettes de 20 à 30 cm de hauteur, confectionnées manuellement à la daba. En général, sauf cas d'événements pluvieux exceptionnels, de cumul de charges d'eau ou de destruction de diguettes, ces aménagements retiennent toute l'eau précipitée.

Nous avons cherché à comparer une zone aménagée et une zone voisine non aménagée.

Malgré la courte durée de l'expérimentation, la tendance évolutive des réserves en eau totale est assez révélatrice de l'efficacité de ce type d'aménagement. Le Tableau et la figure 2 présentent les résultats globaux pour la période allant du 20/4 au 18/6/87. Alors qu'il était déjà tombé 146 mm dans la zone de Maroua à la date du 18/6/87, on observe les faits suivants :

— le traitement de la zone avec diguettes permet d'augmenter entre le 24/5/86 (date de la première pluie) et le 18/6/87, de près de 45 % environ le stockage de l'eau par rapport à la zone non traitée;

— dans la zone traitée le front d'humectation atteint 80 cm et difficilement 50 cm dans la zone sans diguettes;

— l'ETR dans la zone traitée a été entre le 24/5 et le 18/6/87 de 67,7 mm, ce qui correspond à une évapotranspiration moyenne journalière de 2,7 mm dans l'hypothèse où toute l'eau précipitée s'est infiltrée.

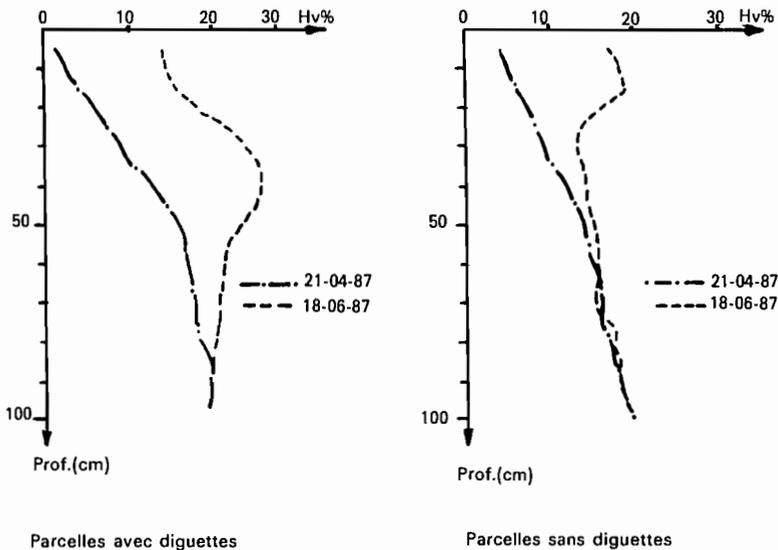


Figure 2. Profils hydriques à Doyang.

Tableau II. Evolution des réserves en eau totale à Doyang.

	Réserve en eau (mm) 0-120 cm		Accroissement des réserves en eau (mm)
	21-4-87	18-6-87	
Parcelle traitée en diguette.....	167,1	245,4	78,3
Parcelle non traitée	162,5	207,8	46,3

Conclusions

Selon Gavaud (1971), la dégradation des vertisols, d'abord d'origine anthropique, est relayée par l'érosion hydrique dont les décapages successifs aboutissent à l'affleurement des horizons profonds à nodules calcaires. L'action de l'homme a pour effet de transformer progressivement la structure prismatique grossière des horizons supérieurs, en une structure polyédrique fine, puis en structure massive avec baisse concomitante des taux de matières organiques, appauvrissement et lessivage en argile, et susceptibilité à la battance et à l'érosion. La thèse de filiation entre les faciès de la séquence de dégradation des vertisols, caractérisés dans cette étude, est confortée par la continuité du niveau à nodules calcaires et du niveau basal argileux défini par une teneur en argile (40 à 50 %) et une composition minéralogique (environ 45 % d'argile 2/1 : montmorillonite et smectite).

Nous avons précisé les principaux effets de cette dégradation des sols sur le fonctionnement des systèmes écologiques correspondants, et en particulier l'accentuation des contraintes hydriques pour la végétation.

Face à cette situation, l'homme choisit souvent la voie de l'abandon des cultures, réduisant ainsi de plus en plus ses superficies cultivables, sans pour autant arrêter sa pression sur ces milieux dégradés (coupe de bois, surpâturage), accélérant le processus de « l'hardéisation » qui aboutit à des sols stériles, à ruissellement intensif et irréversible. La végétation naturelle répond par des adaptations, à la fois morphologiques et phénologiques variées, qui sont en cours d'étude.

Sur la base des résultats ci-dessus, nous avons entrepris un programme de recherche visant à réhabiliter les sols dégradés de cette séquence vertisolique. L'aménagement en casiers a été appliqué à des vertisols dégradés en vue de leur récupération pour la culture de mouskouari. Billons, microcatchments, et/ou labours périodiques, protection totale, etc., sont aussi expérimentés pour tenter d'abaisser le front d'humectation dans le sol. Ces pratiques permettent en outre d'augmenter à nouveau les réserves en eau disponible sur des sols abandonnés depuis de longues années. Des résultats fiables concernant la remontée biologique de ces systèmes ne pourront être obtenus qu'après plusieurs années d'observations.

24

Introduction d'un système d'irrigation adapté aux conditions sahéliennes

W. KLEMM

Institut des Constructions Hydrauliques et du Génie Rural (IWK), Université de Karlsruhe, Allemagne

La croissance démographique dans une région écologiquement instable comme la zone sahélienne exerce une pression significative sur les sols exploités traditionnellement par culture pluviale. Le compactage des sols et la formation de croûtes dues au surpâturage, conduisent à l'accroissement du ruissellement et à la perte de sols fertiles et arables le long des principaux réseaux d'écoulement.

En conséquence le processus d'érosion est accéléré et le déficit en eau du sol conduit à une régression de la production agricole. Phénomènes accrus par la grande variabilité temporelle et spatiale des précipitations, particulièrement en années sèches.

Afin d'amoindrir ces impacts négatifs sur la production agricole, l'irrigation par les eaux de ruissellement a été proposée comme solution adaptée à certains contextes.

L'irrigation par les eaux de ruissellement ("Runoff Farming") est basée sur le principe de collecte des eaux de ruissellement ("Rain Water Harvesting"). Les écoulements issus des bassins versants sont dérivés vers les champs, où ils s'épandent et peuvent être utilisés pour les besoins en eau des plantes.

Cette méthode simple d'irrigation est d'autant plus efficace qu'elle n'accroît pas les risques. Dans le cas d'écoulement engendré par des précipitations, les champs cultivés sont irrigués et l'eau emmagasinée dans le sol est disponible pour les plantes après l'arrêt des pluies, par contre en absence de précipitations, l'insuffi-

sance en eau sera malgré tout à l'origine d'une réduction significative des récoltes. C'est en effet l'incertitude d'occurrence des précipitations génératrices d'écoulement qui est à l'origine des difficultés de conceptions précises et économiques des systèmes d'irrigation par les eaux de ruissellement.

L'origine précise — dans le temps et l'espace — de l'application de l'irrigation par les eaux de ruissellement reste encore inconnue. Des fouilles exécutées en Jordanie en 1977 laissent à penser que la pratique de ce type d'irrigation avait vu déjà le jour il y a 5 000 ans. Les fouilles archéologiques effectuées à Jawa ont montré que, pour irriguer leurs champs, ces peuples utilisaient les eaux de surface dérivées des oueds aussi bien que les eaux de ruissellement collectées aux pieds des collines.

D'autres preuves de l'ancienneté d'application de ce système d'irrigation ont été mises en évidence dans de larges secteurs du Sinaï, au Hijaz, à Hadramout ainsi qu'en Syrie.

L'exemple le plus remarquable, est la déviation, il y a 2 700 ans des eaux de crue de Wadi Dahan par le barrage de Marib au Yémen pour l'irrigation d'une surface estimée à 20 000 hectares. Le but du barrage n'était pas le stockage des eaux mais l'élévation du niveau du plan d'eau de l'oued, permettant ainsi la distribution des eaux d'irrigation à l'aide de chenaux et d'ouvrages assez sophistiqués.

Au Maghreb, des explorateurs français ont découvert des traces de périmètres d'irrigation par les eaux de ruissellement. Au Sud de l'Algérie a été mis en évidence un fossé construit par les Romains (*fossatum africae*) qui correspondait à une tranchée autour des forteresses et comprenait des systèmes de dérivations, des citernes et des champs terrasses.

La reprise de la technique d'irrigation par les eaux de ruissellement, fort appréciée autrefois, ne doit pas être considérée uniquement comme un palliatif au manque d'eau, mais surtout comme un système d'exploitation des ressources en eaux et en sols préservant l'équilibre écologique. Cela veut dire : conservation de l'eau pour améliorer les récoltes, et conservation des sols afin de limiter l'érosion.

La faisabilité économique de l'irrigation par les eaux de ruissellement est justifiée par non seulement l'accroissement du rendement de la production agricole, mais aussi par une valorisation monétaire du sol protégé contre l'érosion.

Le projet

Données géographiques

L'aire du projet est localisée, figure 1, dans la région de Kayes au Mali. Son climat est caractérisé par une saison pluvieuse de juin à octobre, avec des précipitations annuelles moyennes de 500 mm, et une saison sèche de novembre à mai avec des températures pouvant atteindre jusqu'à 50 °C au mois de mai.

Les types de sols dominants sont des gleysols, fluvisols et régosols avec une rétention des eaux du sol disponible pour les plantes allant de 15 à 25 %. Les sols sont plutôt fertiles du fait d'affleurements basaltiques sur le bassin versant apportant des concentrations moyennes en phosphore et en potassium; alors que l'azote est partiellement déficitaire.

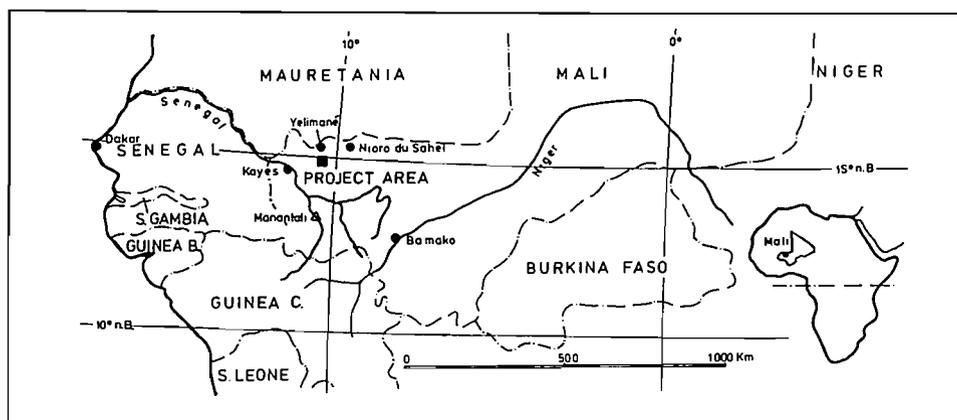


Figure 1. Situation de l'aire du projet.

Objectif du projet

Le projet a pour but de prouver la faisabilité de la méthode d'irrigation par les eaux de ruissellement, tenant compte :

- du potentiel de collecte d'eau;
- de la construction de systèmes d'irrigation utilisant le matériel et la main d'œuvre locale disponibles;
- de l'acceptation de cette méthode d'irrigation par les paysans;
- de la possibilité d'assurer au moins une récolte annuelle de sorgho.

Avec l'aide financière de l'Agence Allemande de Coopération Technique (GTZ), de la Communauté Economique Européenne (CEE) et de l'Institut des Constructions Hydrauliques et du Génie Rural (IWK) de l'Université de Karlsruhe, le projet a envisagé d'atteindre les objectifs ci-dessous mentionnés en trois phases (Tableau I).

Phase 1

Pendant la première phase, des périmètres pilotes ont été construits à proximité du village de Kanguessanou, situé à environ 100 km au Nord-Est de Kayes. Ces périmètres ont été expérimentés pendant trois ans. En parallèle, tous les paramètres physiques ayant trait à la conception des systèmes d'irrigation ont été contrôlés.

Phase 2

Au cours de la deuxième phase, on a procédé à l'extrapolation des données journalières de précipitations et d'évapotranspiration couvrant une période d'observation de trois années. L'attention était aussi dirigée vers l'établissement d'une banque de données relatives aux sols et aux plantes, et nécessaires au modèle d'irrigation par les eaux de ruissellement (MIER). Cette procédure a permis de

Tableau I. Schéma du projet.

Phase I	Phase II	Phase III
Choix de la zone du projet	Extrapolation des données disponibles	Application du modèle d'irrigation par les eaux de pluie
Sensibilisation du groupe-cible		
Installation du campement du projet	Modification du modèle SWATRE	
Installation du réseau des mesures météo. et hydro.		Paramètres de conception des systèmes d'irrigation par les eaux de pluie
Conception, construction et test des périmètres d'irrigation	Calibrage du modèle d'irrigation par les eaux de pluie	

faire des simulations du bilan hydrique dans le sol durant les 68 dernières années en comparant l'eau du sol disponible pour les cultures traditionnelles et irriguées.

Pour cette raison, le modèle SWATRE a été modifié, complété et étalonné, de telle sorte que l'optimisation des dates de semis et l'évaluation de la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation permettent la détermination du rapport entre la surface cultivée et celle du bassin versant.

Phase 3

La troisième phase a été finalement consacrée à l'élaboration des critères de conception dans le but de faciliter et d'étendre l'application du modèle d'irrigation proposé à toute région du Sahel ayant des caractéristiques similaires à la zone étudiée.

Cette note présente les résultats de l'application du modèle d'irrigation et son extension possible à d'autres régions semi-arides. Elle met aussi en relief la faisabilité du projet qui allie recherches appliquées, aide à la population et contribution de celle-ci au projet.

Les systèmes d'irrigation par les eaux de ruissellement

La population du village de Kanguessanou appartient à l'ethnie des Soninké, qui fait partie du groupe Mande Songhai. En 1987, le village de Kanguessanou comprenait 36 familles totalisant 717 personnes ayant des activités essentiellement

agricoles. Les cultures dominantes sont celles du sorgho et du maïs cependant des cultures secondaires : arachide, niébé, gombo, calebasse et coton sont aussi présentes. Le régime foncier est basé sur des coutumes d'usage des terrains agricoles : tous les champs sont cultivés par les propriétaires et leur famille. Les systèmes d'agriculture communautaires ne sont pas connus; les hommes et les femmes cultivent individuellement leurs propres champs. Avec l'élevage, l'agriculture pluviale prédomine. C'est uniquement dans les dépressions naturelles, tout au long des drains principaux des vallées alluviales, que la « culture de décrue » est pratiquée. Cette culture est une méthode traditionnelle d'irrigation par les eaux de crues sans aucun ouvrage hydraulique aménagé.

Les deux périmètres d'irrigation par les eaux de ruissellement sont localisés dans la vallée de Donkoutou aux environs du village de Kanguessanou. Les terrains utilisés couvrent une superficie d'environ 3,9 ha. Leurs bassins versants respectifs sont de 12,5 ha et 69 ha.

Pendant les saisons sèches des années 1986 et 1987, les deux systèmes ont été construits avec l'aide de 30 à 50 paysans sous la supervision de deux ingénieurs hydrauliciens.

A l'exception du ciment, de quelques barres de fer et de planches importées de Kayes, on a utilisé uniquement le matériau local disponible tel que : pierres, gravier, argiles et terre. Ces matériaux ont été utilisés dans la construction de talus, de terrasses et d'ouvrages de régulation des deux systèmes.

Pendant l'hivernage de 1986, la mise en opération des périmètres a été suivie par un agronome avec la participation de tous les habitants du village. A partir de l'année 1987 les deux périmètres ont été mis à la disposition des paysans assistés par un ingénieur hydraulicien pour la distribution des eaux d'irrigation.

Périmètre d'Irrigation A

Ce périmètre comprend cinq terrasses ayant une surface cultivée de 1,34 ha (figure 2), et un bassin versant de 69 ha. Tout le terrain appartenant à une seule famille, on a évité ainsi l'utilisation du périmètre par des propriétaires différents.

Le volume d'eau d'irrigation disponible est régularisé par une vanne simple installée à la sortie du bassin de distribution (avec possibilité d'évacuation), et jouant le rôle de prise d'eau. Le système de distribution d'eau du périmètre A est prévu de telle sorte que l'irrigation des champs terrassés peut s'effectuer soit sans intervention du paysan soit avec une régulation manuelle en donnant priorité aux terrasses individuelles.

En l'absence de l'agriculteur, les terrasses sont successivement irriguées par submersion et débordement d'une terrasse à l'autre. Le choix de la terrasse à irriguer en priorité peut être obtenu grâce à une prise d'eau installée dans le canal de distribution latéral.

En présence de l'agriculteur, les terrasses peuvent être irriguées successivement via les ouvrages de chute (= déversoir), ou individuellement à partir du canal de distribution.

La hauteur moyenne de submersion est limitée à 15 cm, contrôlée par le seuil de chute à chaque terrasse. Comme prévu, il y a eu suffisamment d'eau pour l'irrigation en raison du rapport élevé entre la surface irriguée et celle du bassin versant (1 : 50). Cependant, les murs de terrasses ont été endommagés par les crues

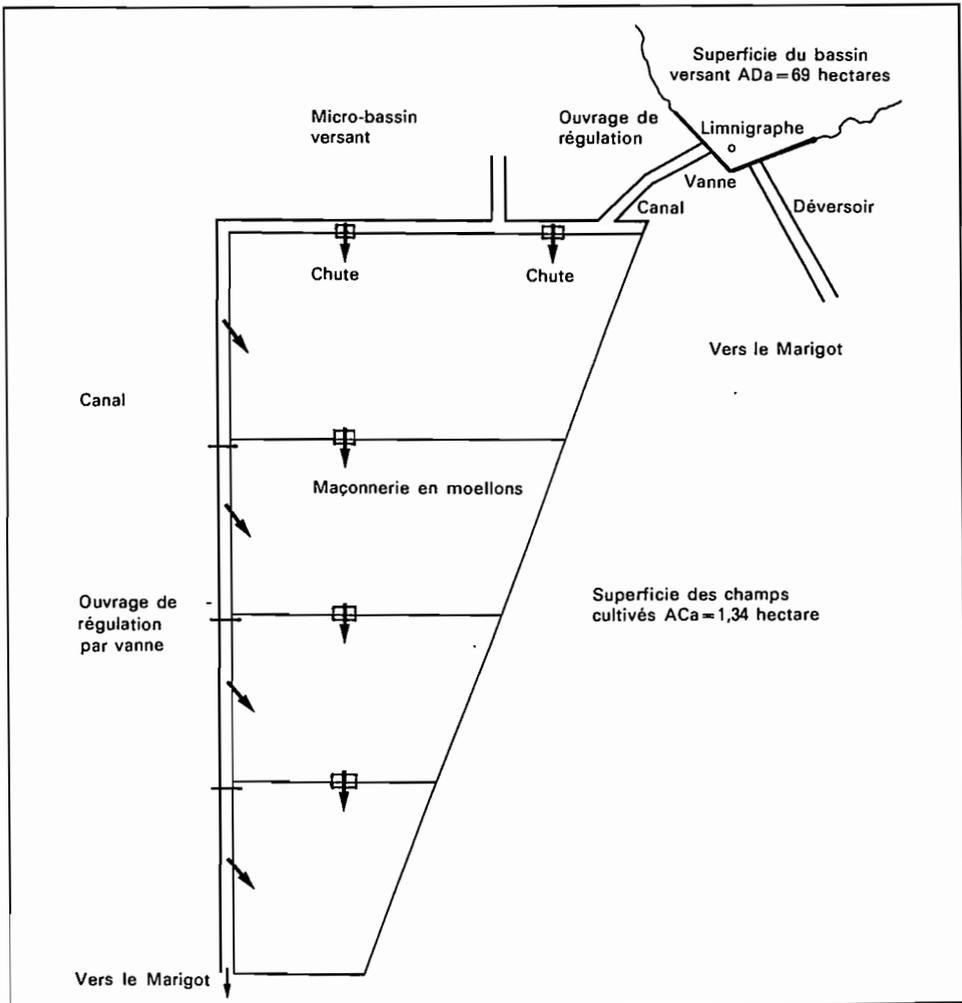


Figure 2. Système de distribution du périmètre A.

lors des premières précipitations de l'hivernage 1986 d'intensité supérieure à 100 mm/h pendant 10 minutes.

Durant les quatre années suivant son installation, le périmètre A a été bien entretenu par son propriétaire. Il a obtenu une récolte de sorgho supérieure à trois tonnes par hectare, soit six fois la récolte en année normale.

Périmètre d'Irrigation B

La surface cultivée du périmètre B (1,92 ha) est alimentée par les eaux de ruissellement drainées par un bassin versant de 12,5 ha.

Systeme d'irrigation au Sahel

Ce périmètre est subdivisé en trois blocs dont chacun reçoit de l'eau d'irrigation via une conduite provenant du bassin de distribution (figure 3).

Le bloc I est subdivisé en 12 parcelles irriguées à l'aide de partiteurs fixes sans possibilité de régulation supplémentaire.

Le bloc II comprend 18 parcelles dont 10 sont munies de vannes simples en bois pour une régulation manuelle. L'aménagement des 8 parcelles restantes permet la régulation manuelle de l'eau d'irrigation pour 2 groupes de 3 parcelles et un groupe de deux parcelles aménagées en terrasses selon le système du périmètre A, mais sans canal de distribution.

Le bloc III est d'une moindre importance puisqu'il sert uniquement à l'utilisation du surplus d'eau non utilisé dans les blocs I et II en année normale ou humide.

Résultats

Les résultats expérimentaux des différents essais de culture sur ce périmètre (sorghom bicolor, zea mays, oryza sativa, arachis hypogaea, citrullus vulgaris, vigna unguiculata ssp. unguiculata) ne peuvent être détaillés dans cette note. Les meilleurs rendements, 3,5 t à l'hectare, ont été obtenus avec du sorgho. Par contre, le riz n'a donné aucune récolte, il ne convient donc pas à ce type d'irrigation du fait d'un manque d'eau à la fin du cycle végétatif.

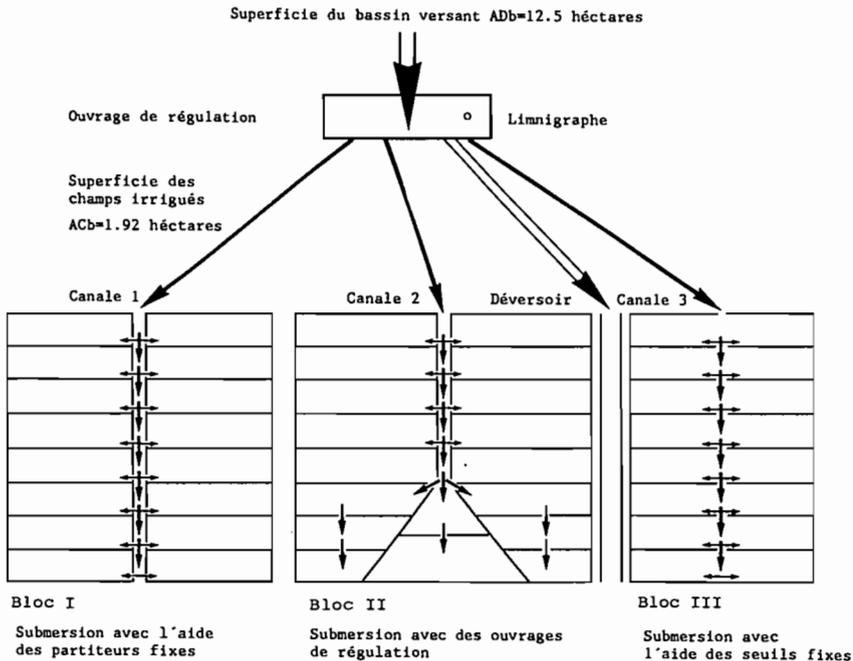


Figure 3. Systeme de distribution d'eau du périmètre B.

Les années 1986 et 1987 ont été des années sèches, de fréquence presque décennale, l'eau d'irrigation disponible a été suffisante pour les blocs I et II; donnant un rapport surface cultivée/surface du bassin versant de 1 à 9.

L'exploitation et la maintenance de ce périmètre a été délicate. Les paysans n'ayant jamais travaillé des champs communs comme le périmètre B, où chaque famille s'est vu attribuer une parcelle, mais où toutes les parcelles dépendaient d'une même source d'irrigation.

Le problème de la gestion des eaux reste encore sans solution, même après quatre années d'exploitation. Ceci nécessite soit une formation plus intensive des utilisateurs ou encore une simplification accrue du système de distribution.

Le modèle d'irrigation par les eaux de ruissellement (MIER)

Les difficultés de conception des périmètres irrigués par les eaux de ruissellement peuvent être subdivisées en deux domaines caractérisés l'un et l'autre par un manque de données.

Le premier concerne le bassin versant à l'amont du périmètre. La disponibilité des eaux dépend de l'occurrence des pluies, et le volume d'eau collectée est fonction des paramètres géomorphologiques et climatologiques du bassin versant qui déterminent la fonction de ruissellement. En dépit de quatre années de mesure des précipitations et des ruissellements, les données actuellement disponibles n'ont pas permis l'élaboration d'un modèle déterministe détaillé.

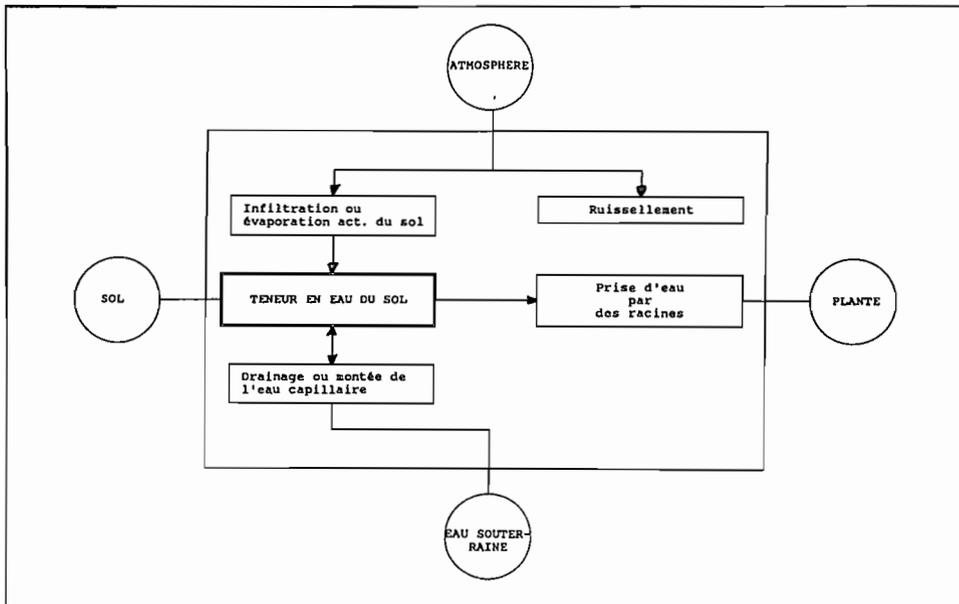


Figure 4. Schéma principal du modèle SWATRE (modifié selon Feddes, Kowalik et Zaradny, 1978).

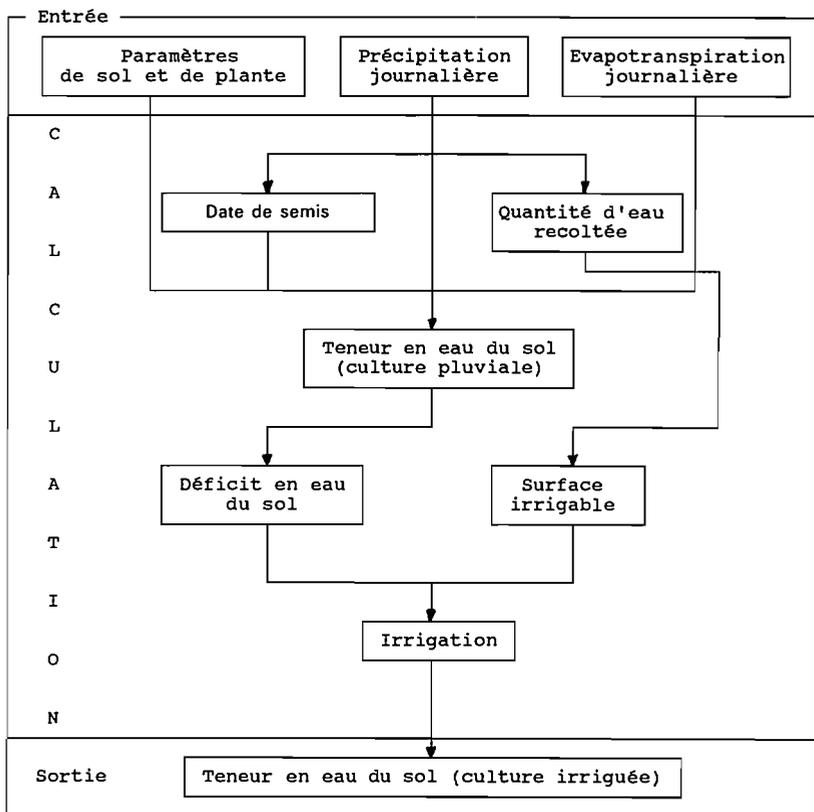


Figure 5. Schéma du modèle MIER.

Le second est relatif à la surface cultivée et à la disponibilité de l'eau du sol pour les plantes. Cette disponibilité est fonction des conditions atmosphériques ainsi que des caractéristiques des sols et des plantes. En adoptant les valeurs de la littérature pour quelques paramètres comme l'indice de surface foliaire et celui de la couverture du sol — que l'on ne pouvait mesurer sur le terrain par manque de personnel et de moyens — on a utilisé le modèle SWATRE, déjà mis en œuvre pour le calcul du bilan hydrique dans un sol cultivé (figure 4). En outre, plusieurs modules ont été déterminés, par exemple la date optimale de semis ou le déficit en eau du sol pendant l'année de référence (année sèche d'un temps de retour de 10 années).

Le schéma du modèle complet est présenté sur la figure 5. Le modèle MIER a été calibré en 1987 à l'aide de mesures de l'humidité du sol effectuées sur trois différents types de champs de sorghum bicolor :

- champs de culture traditionnelle (culture pluviale);
- champs endigués (endiguement en terre);
- champs irrigués (eaux de ruissellement).

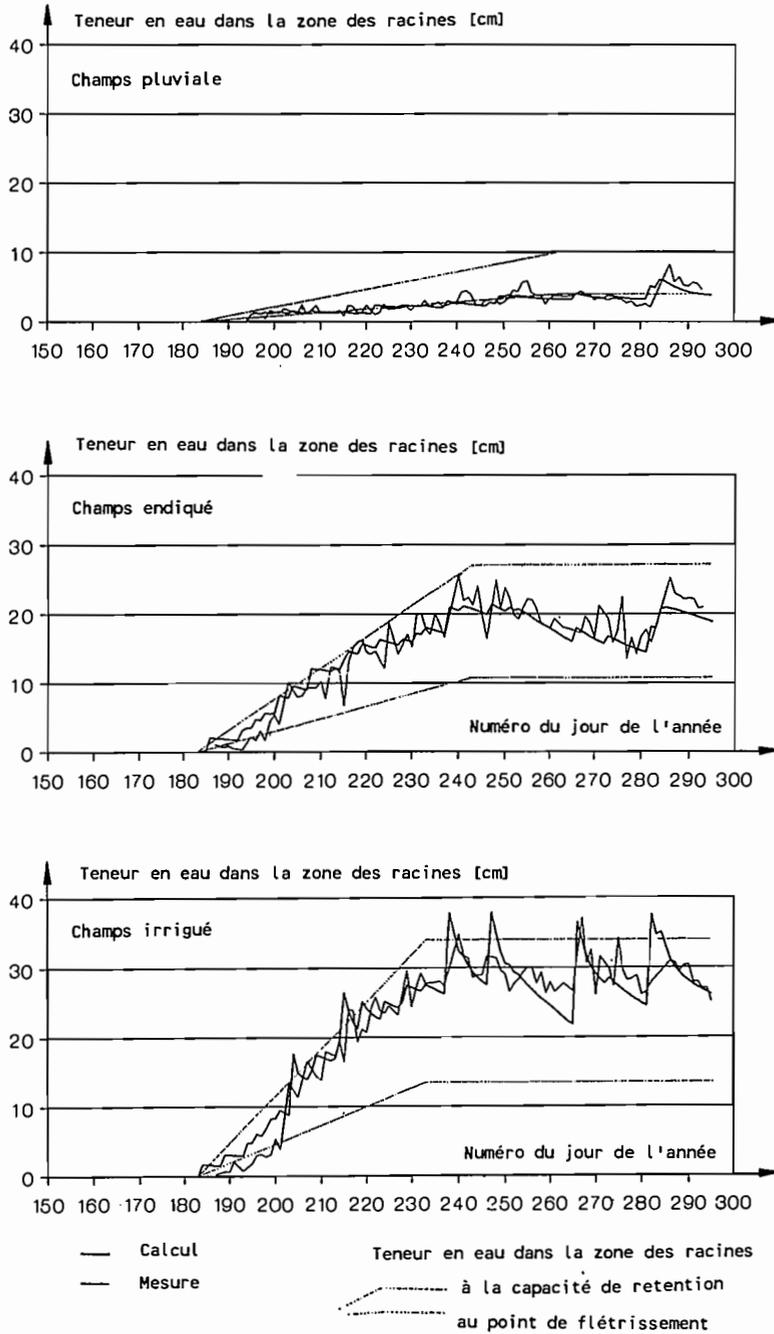


Figure 6. Comparaison de la teneur en eau dans la zone des racines pour les champs en culture pluviale, endigués et irrigués.

La figure 6 donne une comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de l'humidité du sol dans les trois champs différents.

Il est évident que l'humidité du sol disponible n'est pas suffisante pendant la première moitié du cycle végétatif, dans les champs non-irrigués. Seule une irrigation complémentaire au cours de la 2^e phase du cycle végétatif peut garantir une bonne récolte, à condition que l'humidité du sol soit maintenue supérieure à la limite de stress, soit 30 % de la capacité de rétention utilisable par les plantes. On observe une différence significative entre les humidités des sols dans les trois types de champs. Par ailleurs, même sans recours à la simulation de la production de biomasse — qui dépend directement de l'humidité du sol disponible pour les plantes —, la méthode d'irrigation par les eaux de ruissellement prouve sa très bonne capacité à accroître le rendement de la production agricole, et en même temps, à réduire le ruissellement de surface dans les champs cultivables, et par conséquent à réduire l'érosion en nappe.

Le modèle présenté permet la conception et le calcul des périmètres irrigués par les eaux de ruissellement dans d'autres régions Sahéliennes, à condition que le coefficient de ruissellement du bassin versant choisi et les paramètres hydrodynamiques des sols à cultiver soit déjà connu, ou raisonnablement estimé ou encore déterminé par des essais de terrains et des tests de laboratoire.

Conclusion

En général, les cultivateurs comprennent le principe de l'irrigation par les eaux de ruissellement, mais il est évident que leur capacité à la gestion des eaux est d'autant meilleure que le système est plus simple.

En conclusion, on retient les points suivants :

1. Les systèmes d'irrigation par les eaux de ruissellement dans la zone Sahélienne sont économiquement faisables, parce qu'ils pallient aux périodes sèches en cours d'hivernage, qui sont la cause des faibles récoltes dans les champs de cultures traditionnelles.

2. Les fortes intensités de pluies dépassant le taux d'infiltration et la capacité de rétention en eau du sol, sont les conditions préférables pour le fonctionnement du système d'irrigation par les eaux de ruissellement.

3. Les critères suivants sont considérés comme optimum pour la localité de Kangessanou :

— le semis du sorghum bicolor doit se faire un jour après une précipitation d'au moins 10 mm au cours de la période comprise entre le 16 juin et le 20 juillet;

— concernant le sorghom bicolore, le déficit en eau du sol, le plus fréquent pendant la deuxième moitié du cycle végétatif peut être compensé par l'irrigation par les eaux de ruissellement;

— le rapport surface de périmètre cultivé/surface de bassin versant atteint 1 : 10 pour une capacité de rétention utilisable par les plantes entre 15 et 20 % et une culture de sorgho.

4. En ce qui concerne le contrôle de l'érosion, on peut clairement avancer que plus de 90 % du ruissellement d'une superficie de 10 à 100 ha peuvent être utilisés

en irrigation réduisant ainsi le risque d'érosion sur les champs et à l'aval dans les vallées alluviales.

5. Seuls un système de distribution simple et une formation très intensive des cultivateurs pendant quelques années de travail en commun peut faire accepter et assurer la réussite de l'irrigation par les eaux de ruissellement.

6. Compte tenu de l'habilité des cultivateurs à gérer les systèmes d'irrigation par les eaux de ruissellement, il est fortement recommandé d'introduire ces systèmes progressivement, en commençant par des constructions simples comme des micro-bassins, puis des systèmes en terrasse, comme le périmètre A, et finir par les systèmes d'irrigation, comme le périmètre B.

7. Bien que les périmètres pilotes en soient à leur quatrième année de fonctionnement consécutif, il est encore trop tôt pour faire une réelle analyse coût/bénéfice.

Références

- Belmans C., Feddes R.A., Wesseling J.G. (1983). Simulation Model of the Water balance on a Cropped Soil : SWATRE. Journal of Hydrology 63, Amsterdam : Elsevier Science Publisher BV.
- Evenari M., Shanan T., Tadmor N. (1982). The Negev, The Challenge of a Desert. Cambridge : Harvard University Press, 2nd ed.
- Horneber G. (1988). Kleinbäuerlicher Wasserkonzentrationsanbau in Kanguessanou. Final Report « Assessment and Exploitation of Surface Waters ». Karlsruhe : EC-Project TSD-228.
- Klem W. (1990). Sturzwasserbewässerung — Bewässerung mit Niederschlagswasser ohne Zwischenspeicherung im Sahel, Mitteilung des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik 179, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Meßmer B. (1989). Entwurfskriterien für Micro-Catchment Anlagen im Sahel. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

25

Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale de dispositifs agronomiques

M. VAUCLIN⁽¹⁾, J.-L. CHOPART⁽²⁾

⁽¹⁾ *Institut de Mécanique de Grenoble / Groupe Hydrologie (UMR 101), BP 53 X, Grenoble Cedex, France*

⁽²⁾ *IDESSA / Département des Cultures Vivrières, BP 635, Bouaké, Côte d'Ivoire*

La variabilité spatiale de deux dispositifs agronomiques, situés l'un à Bouaké, et l'autre à Ferkessédougou, est analysée à l'aide de concepts géostatistiques. Les résultats montrent que les différentes variables étudiées présentent une structure spatiale caractérisée par une échelle intégrale isotrope de 9 m environ pour Bouaké. Dans le cas de Ferkessédougou, il apparaît une dérive dans le sens de la pente traduisant un déterminisme auquel se superpose un bruit stochastique anisotrope caractérisé par des échelles intégrales de 12 m dans le sens de la pente et de 5 m dans le sens perpendiculaire. Ces résultats permettent une analyse critique du dimensionnement des parcelles élémentaires, afin de rendre les observations ultérieures indépendantes l'une de l'autre.

Introduction

En Sciences du Sol, de très nombreuses études expérimentales effectuées au cours de cette dernière décennie ont montré la grande variabilité spatiale des propriétés

physico-chimiques des sols, même à l'échelle de la parcelle agronomique (voir Vauclin [9] pour une compilation de résultats). Le caractère bien souvent non aléatoire de ces variations nécessite alors la prise en compte de ces structures spatiales dans le traitement statistique des observations (Sisson et Wierenga [6], Vauclin *et al.* [8], Ruelle *et al.* [5]). En Agronomie, l'analyse des rendements, généralement mesurés sur de petites surfaces élémentaires suppose classiquement leur indépendance statistique (Snedecor et Cochran [7]). Cependant, compte-tenu des fortes interactions entre rendements et propriétés du sol, la validité de cette hypothèse de base semble très problématique, comme le montrent notamment les résultats de Bresler *et al.*, Morkoc *et al.* [3], Munoz-Pardo *et al.* [4].

L'objectif de l'étude est de présenter une analyse statistique et géostatistique de la variabilité de deux milieux expérimentaux situés l'un à Bouaké et l'autre à Ferkessédougou (République de Côte d'Ivoire), d'apprécier quantitativement la pertinence des dispositifs agronomiques mis en place (randomisation par blocs) notamment le dimensionnement des parcelles élémentaires pour s'assurer de l'indépendance spatiale des informations.

Matériel et méthodes

Sites expérimentaux

Dans le cadre du projet R3S-Programme Fédérateur n° 2 (parcelles), des essais agronomiques ont été mis en place en 1988 à Bouaké (sole E4) et à Ferkessédougou dans le but d'étudier l'effet des techniques culturales sur la résistance à la sécheresse de cultures pluviales. Les dispositifs expérimentaux mis en place (voir figure 1) correspondent à des essais bloc à 6 répétitions et 6 traitements. Les dimensions des parcelles élémentaires, retenues essentiellement sur des critères agronomiques et de physique du sol sont : 26 m de longueur et 7,2 m de largeur. Les résultats présentés ici sont relatifs à une culture uniforme de cotonnier (2^e cycle à Bouaké, cycle unique à Ferkessédougou) sans travail du sol (essais « à blanc »). Pour Bouaké, les variables suivantes ont été étudiées : taux d'éléments grossiers (TEG) sur 0-100 cm de profondeur, déterminés aux 20 sites de mesures du bilan hydrique (figure 1a), densité apparente (DA) en 19 sites, stock hydrique (STO) sur 0-90 cm mesuré à l'implantation des tubes d'accès pour humidimètre neutronique, rendements graines (Y_G) et pailles (Y_p) déterminés sur 108 sous-parcelles (A, B, C de la figure 1a). Pour Ferkessédougou, le nombre de pieds de coton par unités de surface (NPD) et le rendement total (Y_T) mesurés sur 108 sous-parcelles (figure 1b).

Principe de l'analyse

La culture du cotonnier ayant été conduite de façon homogène, les deux dispositifs sont considérés comme des entités ($186 \times 43,2$ m pour Bouaké; 92×90 m pour Ferkessédougou) et chaque variable échantillonnée est assimilée à une Fonction Aléatoire (F.A.) bidimensionnelle $Z(r)$ dont on connaît une réalisation $z(r_i)$ constituée de NP observations supposées ponctuelles. La structure statistique de

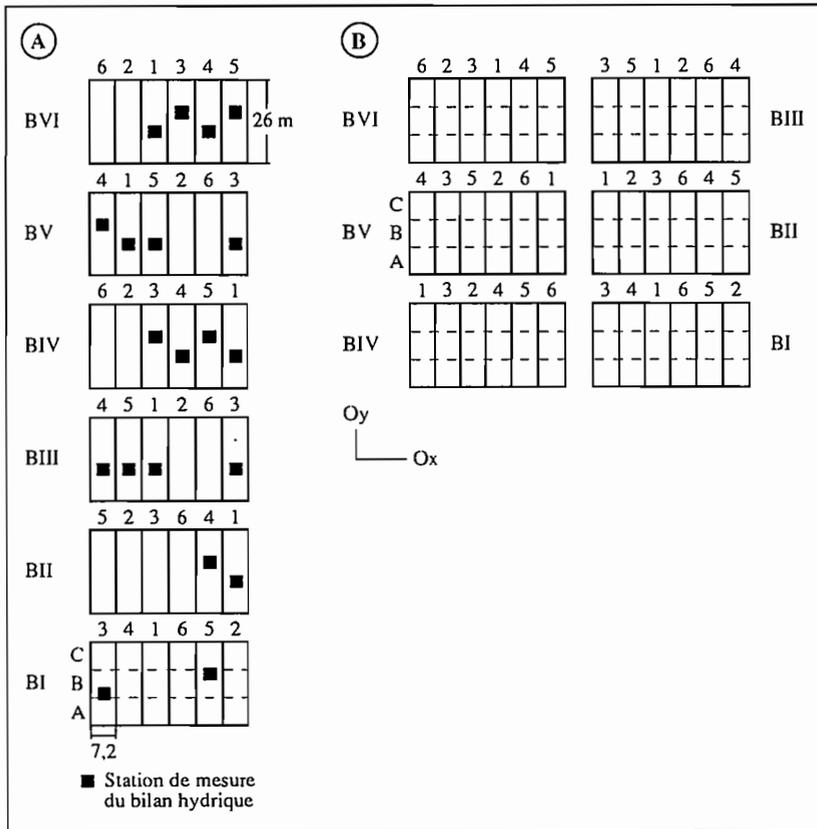


Figure 1. 1a : Dispositif expérimental de Bouaké (sols E4). 1b : Dispositif expérimental de Ferkessédougou.

cette variable est alors parfaitement définie par ses fonctions de distribution et d'auto-covariance. En effet, l'identification de la densité de probabilité permet de calculer les $p^{\text{ièmes}}$ moments et notamment la valeur moyenne (équation 1a) et la variance (équation 1b) :

$$m(r) = E\{Z(r)\} \quad (1a)$$

$$s^2 = E\{[Z(r) - m(r)]^2\} \quad (1b)$$

où $E\{\cdot\}$ représente l'espérance mathématique.

Sous l'hypothèse de stationnarité du 2^e ordre la valeur moyenne $m(r)$ et la fonction d'auto-covariance définie par :

$$C(h) = E\{(Z(r) - m)(Z(r + h) - m)\} \quad (2)$$

sont indépendantes de l'espace. $C(h)$ ne dépend que de la distance h séparant deux observations. On notera que la stationnarité de l'autocovariance implique celle de la variance, l'inverse n'étant pas vrai. C'est la raison essentielle pour laquelle il est

d'usage courant d'introduire l'hypothèse intrinsèque plus faible que la stationnarité au 2^e ordre. Elle suppose que la variance des incréments $Z(r + h) - Z(r)$ soit finie et indépendante de la position r :

$$E\{[Z(r + h) - Z(r)]^2\} = 2 \gamma (h) \tag{3}$$

où $\gamma (h)$ est la fonction semi-variogramme qui peut être estimée par :

$$\gamma(h) = 1/2 N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [z(r_i + h) - z(r_i)]^2 \tag{4}$$

$N(h)$ étant le nombre de paires d'observations distantes de h .

Sous l'hypothèse de stationnarité au 2^e ordre, les fonctions covariance et semi-variogramme sont deux outils équivalents pour décrire et quantifier la dépendance spatiale de la F.A. $Z(r)$. Elles sont reliées par l'expression :

$$C(h) = s^2 - \gamma(h) \tag{5}$$

qui s'écrit également :

$$\rho(h) = 1 - \gamma(h)/s^2 \tag{6}$$

où $\rho(h) = C(h)/s^2$ est la fonction d'autocorrélation.

Un moyen simple d'estimer la distance moyenne pour laquelle des observations sont autocorrélées est l'utilisation du concept d'échelle intégrale qui dans le cas d'une F.A. stationnaire au 2^e ordre et isotrope s'exprime par (Lumley et Panoisky [2]) :

$$J = [2 \int_0^\infty \rho(h) h dh]^{1/2} \tag{7}$$

L'ensemble des données acquises lors des deux expérimentations est essentiellement analysé ici à l'aide de la fonction semi-variogramme (équation 4) et de l'échelle intégrale (équation 7).

Résultats

Site de Bouaké

L'analyse statistique montre que tous les échantillons sont issus de populations normales pour lesquelles les valeurs moyennes (m) et les variances (s^2) expérimentales sont données Tableau I. La variabilité est globalement exprimée par le coefficient de variation (CV).

Tableau 1. Sole E4 de Bouaké : paramètres statistiques et géostatistiques. NP est le nombre d'observations disponibles.

	NP	m	s ²	CV	C ₀	C ₁	a(m)	J(m)	l(m)
TEG (%)	20	28,95	75,93	0,30	0,15	1,01	40	8,2	14,2
DA (g cm ⁻³)	19	1,64	0,0067	0,05	0,15	0,97	40	10,9	18,9
STO (mm d'eau) ..	20	138,6	371,5	0,14	0,40	0,71	35	6,3	11
Y _G (kg.ha ⁻¹)	108	921,5	47 584	0,24	0,35	0,72	30	8,2	14,2
Y _P (kg.ha ⁻¹).....	108	891,7	62 717	0,28	0,50	0,54	30	7,8	13,5

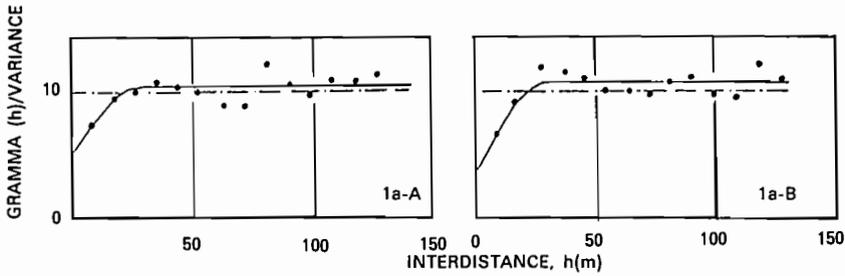


Figure 2. Site de Bouaké : semi-variogrammes expérimentaux (●) et théoriques (—) des rendements en paille (A) et en grain (B).

A titre d'exemple, les semi-variances brutes calculées par l'équation (4), toutes directions confondues, sont représentées figure 2 pour les données agronomiques. On notera qu'elles sont normalisées par les variances expérimentales ($\gamma(h)/s^2$). Les commentaires suivants peuvent être faits.

- L'augmentation des semi-variances avec l'interdistance h jusqu'à une certaine valeur, la portée, montre la dépendance spatiale d'observations voisines.
- La stabilisation des semi-variances, au-delà de la portée, met en évidence l'absence de dérive : les dimensions du domaine échantillonné ($186 \times 43,2$ m) sont suffisantes pour décrire l'ensemble de la variabilité des variables étudiées. L'hypothèse de stationnarité au 2^e ordre est pertinente.
- Le modèle sphérique suivant :

$$\begin{aligned} \gamma(h)/s^2 &= C_0 + C_1 [1,5 h/a - 0,5 (h/a)^3] & h \leq a \\ \gamma(h)/s^2 &= C_0 + C_1 = C_2 & h > a \end{aligned} \quad (8)$$

permet de modéliser correctement les semi-variogrammes expérimentaux. Les paramètres C_0 , C_1 et a sont donnés Tableau I. Il apparaît que les données de rendements présentent une portée (30 m environ) inférieure à celle relative aux données sol (de l'ordre de 40 m). L'effet de pépité C_0 qui traduit la variabilité à courte distance (inférieure au pas d'échantillonnage) ainsi que les incertitudes expérimentales affectant les mesures représente au minimum 15 % (TEG et DA) et au maximum 50 % (Y_P) de la variance totale. La comparaison des résultats de rendement pailles et graines montre un effet de pépité plus fort pour Y_P que pour Y_G se traduisant globalement par un CV plus élevé et ce, aussi bien pour les sous-parcelles B que pour l'ensemble. Les valeurs du palier $(C_0 + C_1)s^2$ légèrement supérieures à s^2 , comme il se doit au plan théorique, constituent une estimation non biaisée de la variance totale. Le biais varie de 2 % pour le rendement pailles (sous-parcelles B) à 16 % pour le taux d'éléments grossiers.

- Le calcul des semi-variogrammes directionnels (4 directions correspondant à $\phi=0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$) n'a pas permis de mettre en évidence d'anisotropie significative (figure 3) des rendements en pailles et graines des 108 sous-parcelles. On notera cependant que le trop faible nombre d'observations des autres variables ne permet pas le calcul de leurs semi-variogrammes directionnels.

• Les hypothèses de normalité, de stationnarité au 2^e ordre et d'isotropie étant jugées pertinentes, il est possible de caractériser la structure spatiale par l'échelle intégrale qui, compte-tenu des relations (6), (7) et (8) est estimée par :

$$J = (1 - C_0 - 4/5 C_1)^{1/2} \cdot a \quad (9)$$

Les valeurs correspondantes sont reportées sur le Tableau I. Elles seront utilisées dans la suite pour l'analyse critique du dispositif expérimental envisagé dans les études ultérieures.

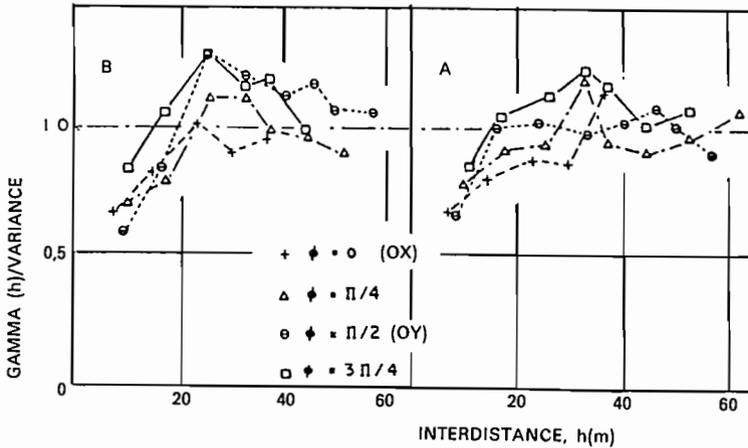


Figure 3. Site de Bouaké : semi-variogrammes directionnels des rendements en pailles (A) et en grains (B).

Site de Ferkessédougou

Les résultats sont donnés Tableau II. Alors que les observations de rendement sont issues d'une population normale, celles du nombre de pieds par unité de surface apparaissent log-normalement distribuées (coefficients de symétrie et d'aplatissement égaux respectivement à - 0,102 et 3,04 pour LnNPD et à 0,47 et 4,22 pour NP).

Tableau II. Site de Ferkessédougou : paramètres statistiques et géostatistiques. Ox et Oy sont les deux axes principaux d'anisotropie (voir figure 1b).

Variables	NP	m	s ²	CV	C ₀ Ox/Oy	C ₁ Ox/Oy	a(m) Ox/Oy	J(m) Ox/Oy	l(m) Ox/Oy
NPD/m ²	108	7,44	1,69	0,17	0,45/0,48	0,57/0,58	35/28	10,7/6,6	18,5/11,5
Y _T (kg.ha ⁻¹).....	108	2 517	296 360	0,21	0,27/0,27	0,73/0,78	46/22	12,2/5,1	21/9

Les semi-variances brutes calculées par l'équation (4) toutes directions confondues et directionnelles (Ox et Oy) sont présentées figure 4a pour Y_T. Contrairement au cas précédent, elles mettent en évidence la présence d'une dérive (augmentation de $\gamma(h)/s^2$ avec la distance, sans tendance à la stabilisation) : les dimensions du

domaine échantillonné sont ici insuffisantes pour décrire l'ensemble de la variabilité. On notera un comportement équivalent pour la variable NPD.

Ainsi, ces deux fonctions peuvent être décomposées en la somme de deux composantes :

$$Z(r) = Z_d(r) + Z_{st}(r)$$

où $Z_d(r)$ est liée à un certain déterministe existant à l'échelle globale du dispositif et $Z_{st}(r)$ est un bruit stochastique, traduisant une variabilité à plus courte distance. La figure 4b présente les semi-variances directionnelles de la composante stochastique de Y_T , la dérive ayant été extraite de la série des données brutes, par le modèle empirique suivant :

$$Y_T(x,y) = 2\,065 + 10\,y \text{ avec } R^2 = 0,49.$$

Les commentaires suivants peuvent être faits :

- La stabilisation des semi-variances au-delà de la portée montre que la contribution stochastique est stationnaire au 2^e ordre.
- L'existence de portées différentes selon les directions O_x et O_y traduit une anisotropie géométrique de $Z_{st}(r)$ dont le grand axe est en fait situé dans le sens de la pente topographique moyenne (O_x).
- Les paramètres du modèle sphérique ajusté aux semi-variances expérimentales sont reportés Tableau II pour les deux directions principales ainsi que les valeurs correspondantes de l'échelle intégrale.

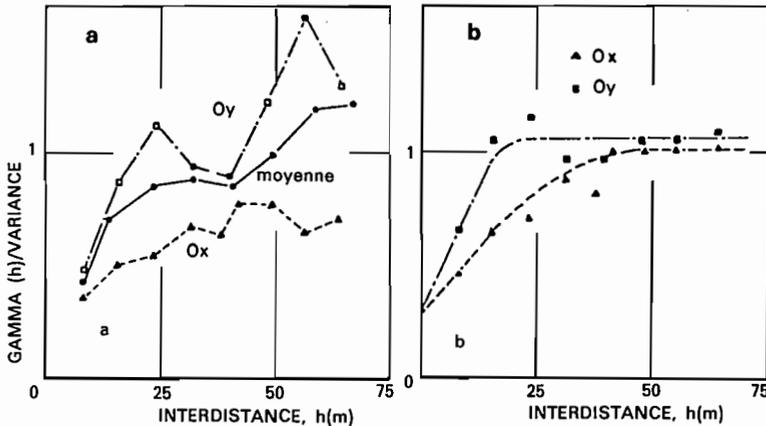


Figure 4. Site de Ferkessédougou : semi-variogrammes du rendement brut (4a) et du rendement après extraction de la dérive (4b).

Conséquences pour le plan d'échantillonnage

En assimilant le domaine d'étude à une collection de parcelles carrées contiguës de dimension caractéristique 1 telles que les valeurs d'une variable d'intérêt $Z(r)$ soient constantes sur chaque parcelle et suivent pour l'ensemble des parcelles la

fonction gaussienne de distribution, on peut montrer que la fonction d'autocorrélation correspondante est de la forme :

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 1 - h/1 && \text{pour } h < 1 \\ \rho(h) &= 0 && \text{pour } h > 1 \end{aligned} \quad (10)$$

à laquelle correspond, d'après l'équation (7), l'échelle intégrale suivante :

$$J = 1/\sqrt{3} \quad (11)$$

Ainsi deux points r_1 et r_2 séparés d'une distance $h = |r_1 - r_2|$ supérieure à 1 seront nécessairement situés dans deux parcelles différentes et les valeurs $Z(r_1)$ et $Z(r_2)$ seront indépendantes l'une de l'autre.

Ainsi, l'équation (11) couplée aux valeurs de J données Tableaux I et II pour les deux sites expérimentaux permet d'estimer les dimensions caractéristiques des parcelles nécessaires pour assurer leur indépendance spatiale. Les valeurs correspondantes sont reportées Tableaux I et II. Elles suscitent les commentaires suivants :

- Pour le site de Bouaké, une dimension 1 voisine de 15 m semble souhaitable pour assurer l'indépendance spatiale des observations entre deux parcelles. Les dimensions initialement retenues sont à cet égard limites notamment en ce qui concerne la largeur, mais acceptables.

- Pour le site de Ferkessédougou, l'existence d'une dérive à l'échelle du dispositif laisse présager un « effet bloc » marqué. De plus, le caractère anisotrope des variations de rendements ainsi que les valeurs correspondantes des échelles intégrales conduisent à remettre en cause le dispositif initial en portant la largeur des parcelles élémentaires de 7 à 20 m et en réduisant la longueur de 26 à 11 m environ afin de les rendre spatialement indépendantes. Cela conduit globalement à réduire de 6 à 4 le nombre de traitements.

Conclusions

L'analyse précédente montre que les variables étudiées ne sont pas aléatoirement distribuées à l'échelle des dispositifs expérimentaux échantillonnés. Elles présentent une structure spatiale pouvant être caractérisée par une échelle intégrale. La méthode utilisée permet également d'estimer les dimensions caractéristiques des parcelles élémentaires pour assurer l'indépendance spatiale des observations entre deux parcelles, condition nécessaire à la mise en œuvre des méthodes classiques de traitement statistique.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet R3S-PF2 de la CORAF « *Amélioration de l'alimentation hydrique des cultures par les techniques culturales* » financé par la CEE-DG XII.

Références

1. Bresler E., Dasberg S., Russo D., Dagan G. (1981). Spatial variability of crop yield as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 600-605.
2. Lumley J.-L., Panofsky A. (1964). *The structure of atmospheric turbulence*. John Wiley et Sons. Inc. N.Y.
3. Morkoc F., Biggar J.W., Miller R.J., Nielsen D.R. (1985). Statistical analysis of sorghum yield : a stochastic approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 1342-1348.
4. Munoz-Pardo J., Ruelle P., Vauclin M. (1990). Spatial variability of an agricultural field : statistical analysis of soil texture, soil moisture and yield components of two rainfed crops. *Catena* (sous presse).
5. Ruelle P., Ben Salah D., Vauclin M. (1986). Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale d'une parcelle agronomique. Application à l'échantillonnage. *Agronomie*, 6 : 529-539.
6. Sisson J.B., Wierenga P.J. (1981). Spatial Variability of steady state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 699-704.
7. Snedecor G.W., Cochran W.G. (1967). *Statistical Methods*, The Iowa State University Press, Ames, Iowa.
8. Vauclin M., Vieira S.R., Bernard R., Hatfiel J.-L. (1982). Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil. *Water Resour. Res.* 18 : 1677-1686.
9. Vauclin M. (1983). Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Dans « Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols. Collection « Les Colloques de l'INRA », n° 15 : 9-43.

26

Le défi de la formation de techniciens de terrain

N.G. CAMPHUIS

Ecole Inter-Etats des Techniciens Supérieurs de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural (ETSHER) OI BP 594 Ouagadougou OI, Burkina Faso

Pour répondre aux besoins des techniciens confrontés aux réalités du terrain, l'ETSHER organise annuellement 6 sessions de formation continue de 2 à 3 semaines chacune. Une récente session s'intéressait, du 15 janvier au 3 février 1990, à la « Conservation des eaux et des sols, comme outil de gestion de terroir ».

Nous tirons cette communication de l'évaluation faite par les stagiaires qui ont suivi cette session.

Conclusions de la session

Première conclusion

Les techniciens sont les chevilles ouvrières de la plupart des actions de terrain. On leur confie généralement des responsabilités dignes d'ingénieurs, qui dépassent leur formation initiale et nécessitent une formation complémentaire pratique.

Hommes de terrain, ils rencontrent quotidiennement la difficulté de mettre en œuvre des projets qui ont rarement approfondi l'aspect insertion sociale de la démarche. Ils butent régulièrement sur des problèmes sociaux.

Quelques exemples de travaux confiés à des anciens élèves, qui ont peiné par manque de connaissances approfondies :

- conception de retenue d'eau;
- établissement d'une carte de potentialités d'un terroir et plan directeur d'aménagement de ce terroir;
- hydrologie d'un bassin versant;
- rectification de ravine en cours d'érosion;
- organisation d'un réseau d'encadreurs, etc.

Quand s'intéressera-t-on à fournir et diffuser une information pratique pour des hommes de terrain qui ne sont ni ingénieurs, ni encadreurs et bien souvent isolés ?

Deuxième conclusion

A un technicien de terrain, on demande une polyvalence qu'il ne possède pas. Il lui faudrait des connaissances en génie civil, en hydraulique, en agriculture-élevage, en foresterie, en économie, en conduite d'hommes, etc.

Voici quelques exemples des polyvalences demandées en utilisation rationnelle de l'eau dans les petits bassins versants.

Interrogations des participants à la session

On envisagera successivement les différents domaines.

Agriculture

Un technicien du Génie Rural n'est pas expert agricole, ni agronome.

Or on sait qu'aucun aménagement « technique » (cordons de pierres, diguettes en terre, digues filtrantes,...) ne survit et ne se révèle rentable pour les bénéficiaires si on ne le met pas en valeur par des protections et des productions végétales.

Mais au Sahel, la diversité des conditions agroclimatiques et des traditions paysannes ne permet pas la généralisation facile de « techniques culturelles miracles », faciles à diffuser.

Voici trois thèmes sur lesquels nous avons longuement débattu avec les techniciens lors de la session :

Quelle pratique culturale pour améliorer les sols ?

Quelle démarche et quels éléments d'expériences apporteriez-vous à un technicien qui ne saurait :

- s'il faut introduire un travail du sol après aménagement, car cela fait autant de travail en plus pour le paysan, et pour quel résultat ?
- quelle technique proposée, sélectionnée selon quel critère prioritaire dans chaque cas précis d'aménagement : impact sur la structure du sol, temps de travail, investissement, etc. ?

Agroforesterie

Il faut végétaliser, tout le monde le dit. Mais où trouver une information claire, non contradictoire, correctement argumentée et qui tienne compte des réalités de terrain : coût et difficultés d'approvisionnement en plan, semis ou repiquage, climat, etc.

Le zaȳ

Cette technique, utilisée par les paysans depuis longtemps, cumule plusieurs effets bénéfiques : diminution des temps de travaux, concentration de l'eau et de la matière organique, amélioration de la structure du sol. Pas étudiée par les chercheurs, elle est généralement absente des enseignements africains et dédaignée par les experts car mal connue.

Est-ce un archaïsme paysan à combattre ou une tradition à remettre en valeur là où elle est plus intéressante que d'autres ?

Face à nos hésitations, le technicien ne sait que penser...

Réintroduction de la riziculture

La riziculture traditionnelle sahéenne a disparu après les vagues de sécheresse. Les récentes années pluvieuses et les techniques de conservation de l'eau amènent les paysans à espérer le retour de la riziculture. Ils demandent des « barrages » qui ne le permettront pas.

Le technicien ne possède pas de référence de petits ouvrages rizicoles (sinon au Mali).

Doit-on encourager ce retour à la riziculture ? Et comment répondre positivement aux vœux des paysans ?

Génie civil

Face à l'accroissement des ruissellements et la baisse des infiltrations, deux types d'ouvrage ont la faveur des concepteurs et des populations :

- les barrages créant des retenues d'eau;
- les digues filtrantes favorisant l'infiltration et enrayant l'érosion.

Les techniciens se voient de plus en plus sollicités pour réaliser des petits barrages ou des digues filtrantes. Ils se sentent souvent dépassés par l'ampleur des responsabilités. Voici quelques-unes de leurs interrogations.

Les digues filtrantes

C'est nouveau, mais est-ce la panacée ? (Remarquons le travail remarquable du CIEH avec l'AFVP-Burkina pour apporter des éléments de réflexion après 3 années d'étude des digues filtrantes de Rissiam.)

Comment l'employer dans la correction de ravine. Faut-il faire des murs de gabions ou des ouvrages plus légers ?

Quelle règle de dimensionnement utiliser ? Quelles protections des fondations et des ancrages ?

La tranchée d'ancrage d'un petit barrage en terre

On nous dit d'appliquer la règle de Lane ! Mais personne n'est d'accord sur les modalités (compter ou non les filtres). Certains vont même dire qu'elle n'apporte aucune indication.

N'existe-t-il pas une méthode simple pour éviter les fuites dans les fondations ? Ne pourrait-on l'étendre au test de la perméabilité de la cuvette ?

Avec ou sans filtre ?

Drains ou filtres sont dits indispensables dans les ouvrages pour rabattre la nappe, éviter les sous-pressions, etc.

Quels essais véritables a-t-on faits sur leur utilité et leur efficacité en construction rurale africaine ? Face à la complexité de leur mise en œuvre et la difficulté de trouver le matériau les constituant, que faire ?

Même question d'opportunité vis-à-vis des géotextiles !

Hydrologie

On sollicite souvent le technicien pour estimer une crue ou pour calculer les apports annuels d'un bassin versant. Il doit alors utiliser les méthodes Rodier-Auvray ou CIEH, dont on éprouve rapidement les difficultés de manipulation par un technicien. Il aura surtout une difficulté à « relativiser » le résultat obtenu.

La difficulté revient par exemple sur les cas suivants :

Apports en eau d'un barrage

Pour dimensionner avant sa réalisation tout aménagement hydro-agricole ou rizicole, l'idéal consiste à connaître pour différentes périodes de retour (décennales sèches et humides), les apports à attendre du bassin versant.

Dimensionnement à la crue d'un ouvrage routier

Quelle méthode utiliser ?

Economie

Les paysans finissent toujours par faire le calcul de l'opportunité économique d'un investissement en temps de travail, en matériaux, en argent. Le technicien souhaiterait faire ce même calcul avant les paysans, pour s'assurer que son action sera crédible aux yeux des bénéficiaires et conforter ainsi son action.

Mais quelle méthode simple d'évaluation existe actuellement, fondée sur des exemples précis, concernant le calcul de :

- l'opportunité d'un barrage face à divers scénarios d'utilisation et de construction, face aux contraintes qu'il crée ?

- l'opportunité de la réhabilitation de terres abandonnées, suivant le degré de dégradation de ces terres et le coût de leur réhabilitation ?

Aspects sociaux

Après l'échec de trop d'aménagements, par non valorisation et non entretien par les bénéficiaires, les techniciens de terrain sont déroutés. Ne pouvant accumuler les échecs dans leur zone d'intervention, ils recherchent une information sur les « animations qui marchent » et les moyens de « conscientiser » efficacement.

Le relation ambiguë

Comment ne pas se faire piéger par une population qui sera toujours prête à accepter tout aménagement, même si elle le pressent inutile ou néfaste, pour s'assurer l'intérêt et la collaboration des « projets de développement » ?

Que faire pour qu'une population demande ce dont elle a vraiment besoin, et non ce qu'elle sait qu'on peut lui donner ?

Initiative privée ou démarche collective

Face à l'échec de nombreux groupements ou coopératives, le soutien de l'initiative privée a le vent en poupe. Mais peut-il vraiment engendrer un développement communautaire sans aggraver les différences au sein de populations où la sécheresse a déjà accentué les disparités ?

Conclusions

Un défi

L'homme de terrain a besoin de notions tirées de la réalité, pratiques à mettre en œuvre et chiffrées, dans des domaines aussi variés que ceux abordés ici pour améliorer l'utilisation rationnelle de l'eau dans les petits bassins versants :

- agriculture, foresterie, élevage;
- hydrologie, hydraulique à surface libre;
- génie civil, ouvrages souples, géotechnie;
- topographie, photographie aérienne;
- calculs économiques;
- prospective et animation sociales;
- animation d'équipe, gestion de stocks, rédaction.

Des solutions concrètes

Mieux former en formant continuellement, pour une vraie spécialisation

- Utiliser des stages de formation continue (plutôt que la formation initiale) ciblés sur les réelles difficultés rencontrées par les hommes de terrain.
- Permettre au technicien de suivre un cycle de plusieurs stages de formation continue sur les aspects variés de l'aménagement et lui donner ainsi une forme de « spécialisation » reconnue officiellement, sur les différentes réponses nécessaires à son travail.

Cibler la recherche appliquée et améliorer la diffusion des résultats

- Cibler les recherches sur des questions pratiques rencontrées sur le terrain par les techniciens et améliorer la vulgarisation et la diffusion des résultats obtenus par des équipes interdisciplinaires de recherche intéressées au développement rural.

27

Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne

C. PUECH

*Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF, BP 5095,
34033 Montpellier Cedex 01, France*

Le présent travail a été réalisé par le Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF associé à J. Carette Consultant pour le compte du Ministère Français de la Coopération et du Développement. Il concerne une action ayant un double but :

- formation aux techniques de la télédétection aérienne et spatiale, au profit d'une quinzaine de stagiaires de l'AFVP (Association Française des Volontaires du Progrès), Organisation non gouvernementale mettant en œuvre des micro-réalisations agricoles dans le Sahel;
- mise au point méthodologique, les utilisations de la télédétection effectuées devant pouvoir être reproduites facilement et avec profit.

C'est pourquoi nous avons choisi une formation à travers un projet réel de l'AFVP, situé au Burkina Faso dans la région de Titao. Le but de l'opération était la définition d'un schéma directeur d'aménagement rural utilisant autant que possible, et de façon complémentaire, les techniques présentées (données satellitaires et aériennes).

Dans la pratique ont été abordées, en combinant formation et souci de mise au point méthodologique, les étapes suivantes.

1. Préparation de l'utilisation de la télédétection : choix des documents de travail, mesures de terrain, reconnaissances.

2. Dépouillement des images satellite et des photographies aériennes pour obtenir un certain nombre de plans d'explication du paysage. Ce qui pose un certain nombre de problèmes particuliers au Sahel.

3. Utilisation finalisée des informations pour fournir des applications dans le domaine de l'aménagement rural, de la connaissance des terroirs villageois et de la détermination de ruissellement des bassins versants étudiés.

Zone d'étude

Il s'agit du bassin versant du Baongo, au Nord-Est du Burkina Faso. Ce bassin totalise 270 km² de superficie, découpé en 15 sous-bassins de 2 à 70 km² environ (figure 1).

La région est soumise à un régime tropical sec à une seule saison des pluies qui s'étend en général de juin à septembre. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 680 mm (moyenne 1951-1980), et la pluie journalière décennale est estimée à 90 mm (CIEH 1980).

La région est une zone de savanes, les cultures (mil et sorgho essentiellement) ainsi que la végétation arborée se rencontrant surtout dans les bas-fonds.

Phase préparatoire

Choix des documents de travail

Les documents utilisés sont les suivants :

— photographies aériennes : couverture aérienne IGN1952 et IGB1982 au 50 000^e ;

— images du satellite SPOT : une image en mode XS du 27.07.87 qui a servi à définir un protocole de mesures de terrain et une image SPOT XS programmée pendant la prise d'information de terrain pour obtenir une concomitance aussi parfaite que possible entre mesures de terrain et prise d'image.

Le choix de la date des mesures à effectuer sur le terrain (et donc de l'image satellite associée) est un compromis entre plusieurs nécessités plus ou moins contradictoires :

— Être en saison sèche afin que la méthode soit facilement réutilisable : obtention d'image sans nuage et possibilité de parcours aisé de la zone d'étude.

— Nécessité de bien reconnaître tous les éléments de terrain : les informations utiles peuvent varier suivant le but recherché (terroir, hydrologie...) et il y a donc, en toute rigueur, une ou plusieurs dates optimales, chacune en référence à un problème donné. Par exemple, une connaissance fine des cultures demande au moins une image pendant la saison des pluies, tandis qu'une estimation des possibilités de ruissellement s'accomode mieux d'une image de saison sèche pendant laquelle le satellite est à même de mieux caractériser le sol.

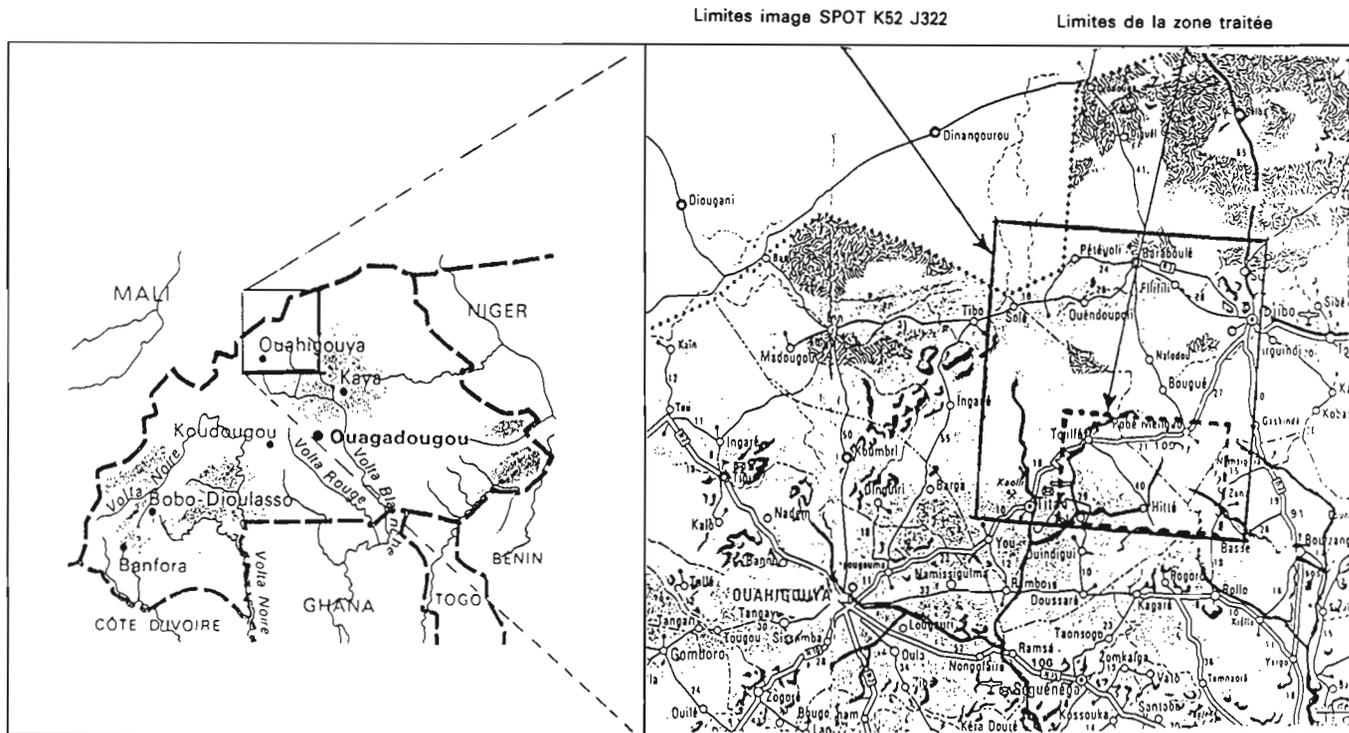


Figure 1. Localisation du site d'étude. Région de Titao (Burkina Faso).

— Prévoir l'ensemble de l'opération de projet-formation au cours d'une même saison sèche (formation préalable et mesures de terrain, traitement des données, puis confrontation des résultats pour élaborer les documents finaux).

C'est pourquoi nous avons choisi le mois d'octobre (début de saison sèche), l'image SPOT programmée étant obtenue le 23.10.88.

Mesures de terrain

Elles ont été de plusieurs types.

Mesures hydrologiques préalables au projet

Sept pluviomètres ont été installés sur le bassin versant dès le début de la saison des pluies 1988. Contrairement aux idées initiales, il n'a pas été possible de mettre en place des équipements limnigraphiques pour obtenir des informations sur un certain nombre d'événements pluie-débit. Toutefois le 25.08.88 a été enregistré une pluie homogène très forte : respectivement 73, 78, 67, 70, 65, 65 et 76 mm aux 7 pluviomètres de la zone. Comparées aux 90 mm de la pluie journalière décennale ponctuelle, nous avons estimé que le ruissellement correspondant devait s'approcher du débit décennal. Une enquête à l'exutoire du sous-bassin n° 4, faite de façon contradictoire auprès de plusieurs villageois a permis d'estimer l'extension maximale de la crue.

Enfin, des mesures topographiques précises des profils en travers et en long ont permis d'estimer ce débit par utilisation de la formule de Manning Strickler et l'adoption d'un coefficient de rugosité $k=35$.

Le débit résultant est de $52,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mesure de pente

Elles sont destinées à étalonner les pentes issues de l'analyse des photographies aériennes stéréoscopiques. Si les pentes sont en effet assez faciles à hiérarchiser, leurs valeurs absolues doivent s'appuyer sur des références précises de terrain pour être fiables.

Mesures destinées à classifier l'image satellite

Technique

Nous cherchions à obtenir à partir de l'image satellite et des documents de terrain une ou plusieurs cartes thématiques décrivant le paysage pixel à pixel, en donnant les éléments les plus pertinents possibles vis-à-vis du ruissellement.

La méthode classique en télédétection consiste à définir des parcelles (zones fermées) pour lesquelles on connaît parfaitement l'appartenance : pour un parcellaire agricole ceci est aisé puisque les contours des zones sont bien définis (limites des champs) et la caractérisation du couvert connu sans ambiguïté (telle culture).

Au Sahel, pour la description d'un paysage, la démarche est notoirement plus complexe. En effet, d'une part les limites des différentes compositions du paysage sont floues, voire enchevêtrées, d'autre part chaque zone élémentaire ne peut être caractérisée par un seul descripteur; le ruissellement, par exemple, fait intervenir des éléments tels que : pente, microreliefs, sols, végétation (pourcentage).

Aussi travaille-t-on suivant une technique de transects (lignes de parcours pas nécessairement rectilignes) dont le but est de définir en chaque point ces descripteurs du paysage, en espérant que l'on pourra les mettre en corrélation avec les radiométries observées sur chaque pixel. La description est opérée par ensembles de taille constante, le pas d'espace choisi étant basé sur la taille du pixel de l'image à traiter (20 m pour une image SPOT XS). Vu les difficultés de positionnement exact sur l'image (on ne peut, quelle que soit la méthode choisie, être certain de la position d'un point sur l'image à moins de 1 à 2 pixels près), on va travailler par grosses entités couvrant plusieurs pixels contigus. Pour des raisons pratiques nous avons choisi un pas d'espace de 100 m.

Nous avons effectué une dizaine de transects dont la longueur varie de 1 000 à 3 000 m.

Protocole de mesures

Les mesures ont été effectuées de préférence dans des zones homogènes, pour diminuer l'effet d'un positionnement incertain sur l'image satellite. La recherche

Tableau I.

	Code
Densité de végétation	
< 20 %	V0
de 20 à 50 %	V1
de 50 à 80 %	V2
> 80 %	V3
marigot assez dense	V4
marigot très dense.....	V5
Type de couvert	
pas de végétation	C0
herbacé	C1
herbes + arbustes.....	C2
cultures	C3
arboré	C4
Texture	
cuirasse	T0
croûte + gros gravillons latéritiques.....	T1
croûte + petits gravillons ou sables grossiers	T2
croûte nue	T3
sable	T4
argile + limon	T5
Type d'écoulement	
non visible	E0
en nappe.....	E1
individualisé.....	E2
lit marqué.....	E3
Pente	
plat (< 0,5 %)	0
pente faible (< 0,5 à 1,5 %)	1
pente moyenne (1,5 à 3 %)	2
pente forte (> 3 %).....	3

de ces zones homogènes est facilitée par un travail préalable à l'acquisition de données sur le terrain réalisé sur une classification non supervisée d'image satellite. Ce calcul purement mathématique, sans information de terrain, décompose l'image en un certain nombre de classes radiométriquement homogènes. Le protocole de mesures de terrain est tel que chaque classe fournie par le calcul doit être parcourue sur le terrain, de préférence dans des zones où sa présence est majoritaire. Les transects finalement retenus sont décidés en combinant ces documents issus d'images satellites et les cartes de la zone à étudier (présence de pistes, début et fin de transects facilement identifiables).

Codification

Les critères de description que nous avons retenu pour la zone d'étude sont représentés dans le Tableau I.

Ces critères sont certainement modifiables et améliorables. Certains se sont avérés inutilisables, tels certains types d'écoulement impossible à détecter sur l'image satellite, ou redondants, tel couvert végétal et densité de la végétation.

Exemple de transect codifié (Tableau II)

Tableau II.

Distance cumulée	Azimut (degrés)	Pente	Pourcent. végétation	Type couvert	Texture	Écoulement
000						
100	67	1	2	2	2	2
200	70	0	2	2	2	1
300	25	1	3	3	2	1
400	30	1	2	3	2	0
		etc.				

Phase d'analyse des documents aériens et satellitaires

Photographies aériennes

Après constitution de mosaïque, les photos aériennes sont étudiées sous stéréoscope et, pour l'aspect évolution, les photos de 1952 sont comparées à celles de 1982.

L'étude menée par carrés élémentaires de 25 ha procure les documents suivants :

Téledétection et aménagement des bassins versants

- Cartographie géomorphologique dans laquelle sont distingués :
 - le lit majeur;
 - le piémont;
 - le haut de versant;
 - le relief résiduel.

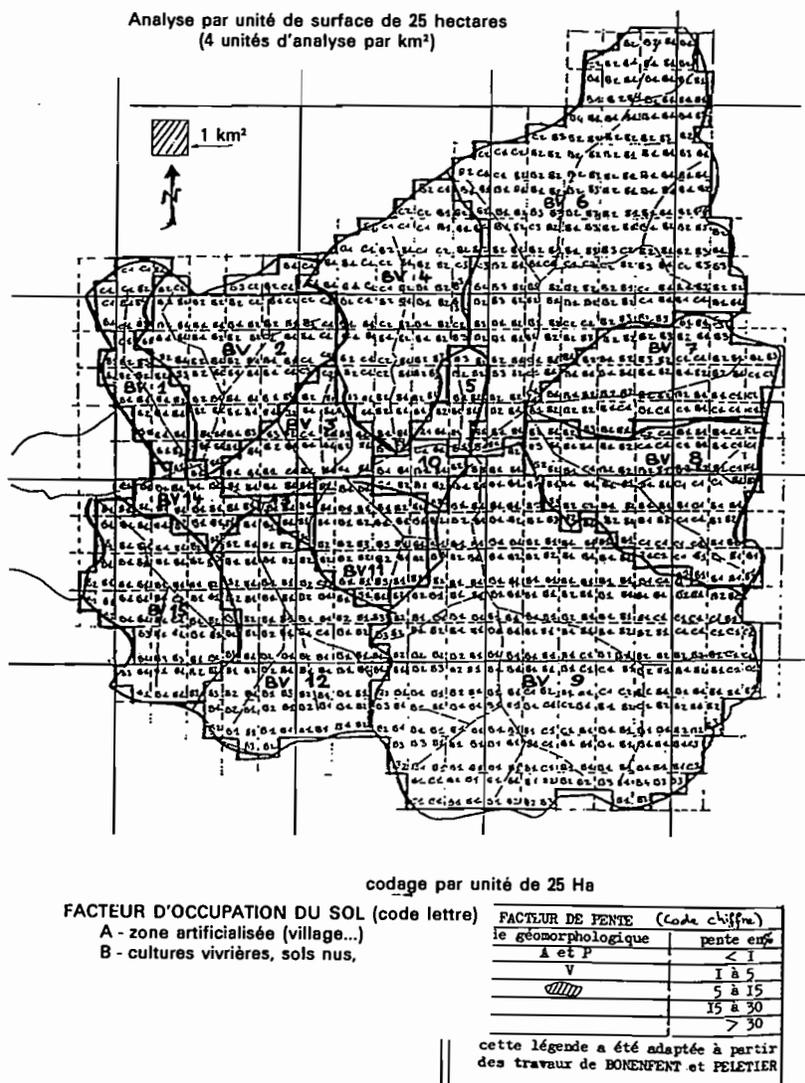


Figure 2. Cartographie des états de surface et des pentes d'après dépouillement de photos aériennes.

D'où l'on déduit une évaluation des possibilités agro-sylvo-pastorales, ainsi que les limites des bassins versants.

- Carte d'évolution de l'occupation du sol. On observe que le terroir agricole est moins important en 1982, notamment en haut de bassin versant.

- Carte des contraintes d'érosion et d'assainissement. La confrontation des deux séries de photos indique clairement les lieux d'érosion active. On note qu'une baisse de l'occupation agricole est souvent liée à l'évolution de l'érosion.

- Carte des états de surface et des pentes selon les critères suivants (figure 2) :

Etats de surface :

- A. zone artificialisée
- B. cultures vivrières, sols nus, savane herbeuse à arbustive
- C. cultures arbustives, savane arbustive à arborée
- D. cultures arborées, savane arborée à forêt claire
- E. forêt dense

Pentes :

- 1. < 1 % ;
- 2. 1 à 5 % ;
- 3. 5 à 15 % ;
- 4. 15 à 30 % ;
- 5. > 30 %.

Classification de l'image satellite

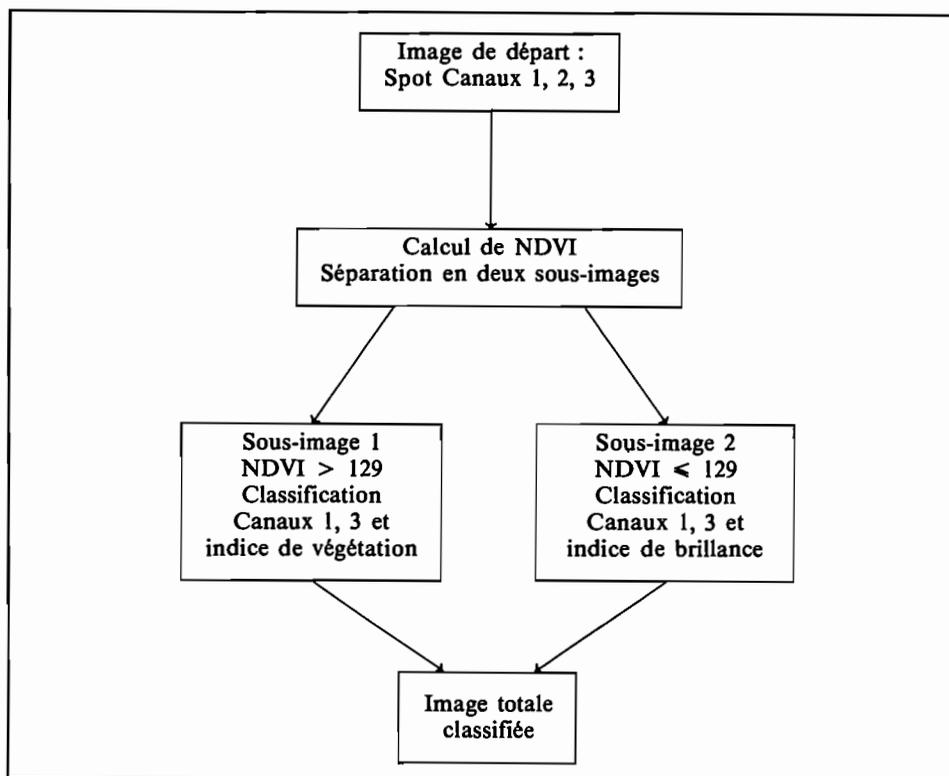
Elle est réalisée suivant la méthode paramétrique dite du « maximum de vraisemblance » qui maximise la probabilité conditionnelle d'appartenance à une classe.

Le schéma de classification a adopté un calcul en deux parties, les zones à fortes végétation étant codées selon la densité de végétation, tandis que les zones nues sont codées suivant le critère dit de texture.

On trouvera figure 3 un extrait de cette classification concernant la zone centrale du projet. A partir de ces résultats et des limites de bassins versants, on peut connaître la répartition des différentes classes de paysage à l'intérieur de chaque bassin versant (*encadré, page suivante*).

Validation de la classification de l'image satellite

La validation habituelle des classifications d'images se réfère à des matrices de confusion qui vérifient si les observations effectuées sur le terrain se retrouvent effectivement en bonne place après classification. Nos résultats sont conformes à une « bonne classification » puisque les pourcentages d'affectation varient suivant les classes de 80 à 100 %, sauf confusion plus forte entre T1 et T2, ce qui était à attendre vu le caractère très proche de ces deux groupes.



NDVI = Normalized difference vegetation index, soit : Indice de végétation en différence normalisée

$NDVI = (PIR - R)/(PIR + R)$, avec PIR = réflectance dans le canal Proche Infra Rouge R = réflectance dans le canal Rouge

Une validation plus parlante a été effectuée en comparant l'image classifiée et des photographies aériennes obliques prises par survol aérien de la zone en avion léger pendant les mesures de terrain (figure 4).

La confrontation qui apparaît très probante est intéressante à plus d'un titre :
— vision globale de la zone : la comparaison des deux documents donne une idée rapide de la précision de l'image satellite et de sa capacité à expliquer le paysage étudié;

— validation de classification même sur des zones restreintes : la localisation d'un groupe de pixels est aisée et le contrôle peut affecter les pixels pris quasi individuellement. Dans les estimations classiques ceci n'est jamais possible, les difficultés de positionnement sur l'image imposant de se focaliser sur l'intérieur des grandes zones homogènes;

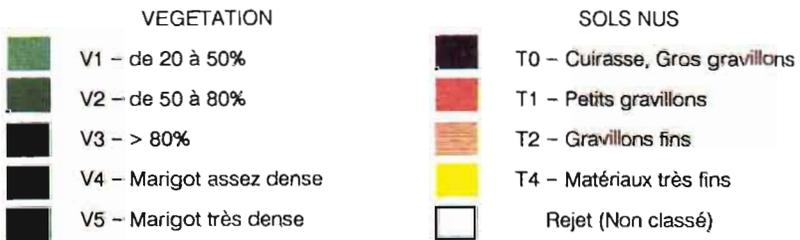
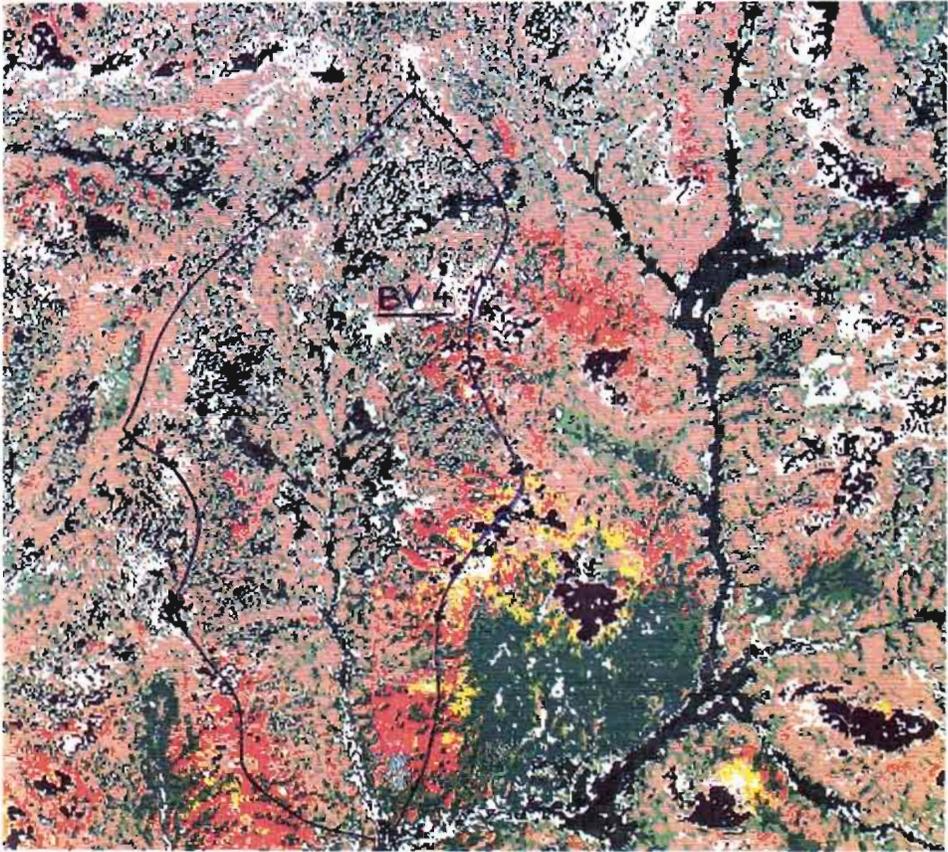


Figure 3. Image SPOT XS du 23 décembre 1988 KO52-J322 (laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF). Classification supervisée, extrait (450 × 450 pixels) (Échelle 1/50 000^e).

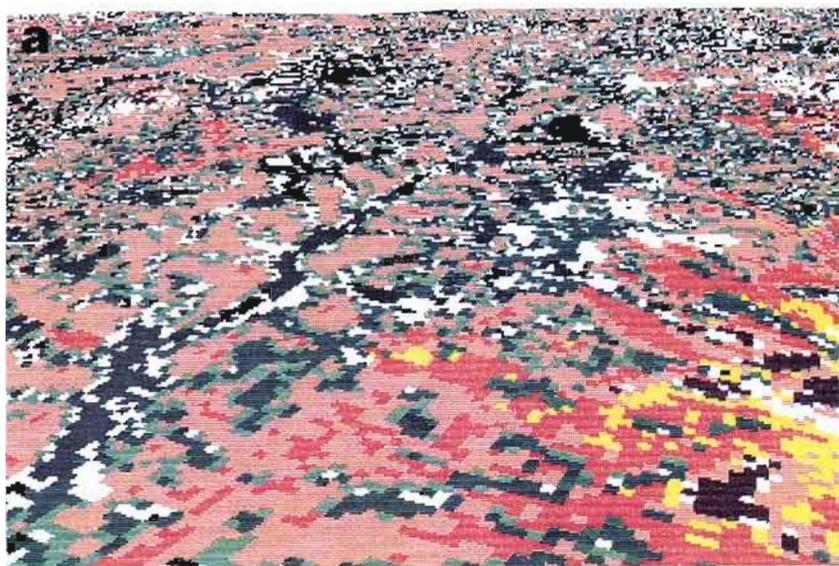


Figure 4. Bassin de Hitte-Validation de classification. (A) Image SPOT XS du 23 décembre 1988. (B) Photo aérienne du 12 décembre 1988 (altitude 400 m) (laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF).

— classification pouvant être jugée par le lecteur lui-même sans référence à des opérateurs mathématiques plus ou moins bien compris, et cachant souvent bien des erreurs dans leur globalité.

Etude des grandes parties agricoles de l'image satellite

Nous avons également étudié l'image satellite à un niveau plus global, par une technique manuelle de photo-interprétation d'image sur écran d'ordinateur, le plan de travail étant une composition colorée c'est-à-dire une visualisation en fausses couleurs (sans calcul) de l'image brute. Le travail de délimitation des contours est assez aisé et conduit rapidement à un classement de l'image en trois zones :

- zone de cultures, en exploitation actuelle;
- zone de hauts de versants, à l'opposé, à vocation pastorale, où parfois se retrouvent quelques villages;
- zone de mi-versant, intermédiaire, ayant été cultivée par endroits ou pouvant être mise en culture, et où les problèmes d'érosion sont accrus.

Phase d'applications

Complémentarité des techniques

La photographie aérienne permet une approche peu onéreuse qui peut être effectuée sur le site lui-même, le dépouillement pouvant être contrôlé directement sur le terrain.

Systematisé par carroyage élémentaire comme expliqué ci-dessus, ce type de dépouillement aboutit à des cartographies qui révèlent les grandes tendances du paysage, et donne une délimitation rapide des zones et de leurs problèmes. La précision des photos permet en effet de discerner sans ambiguïté les ravines, l'implantation humaine, les chemins...

Le relief peut aussi être abordé par la stéréoscopie. Mais l'aspect fastidieux du dépouillement le limite à quelques images contiguës.

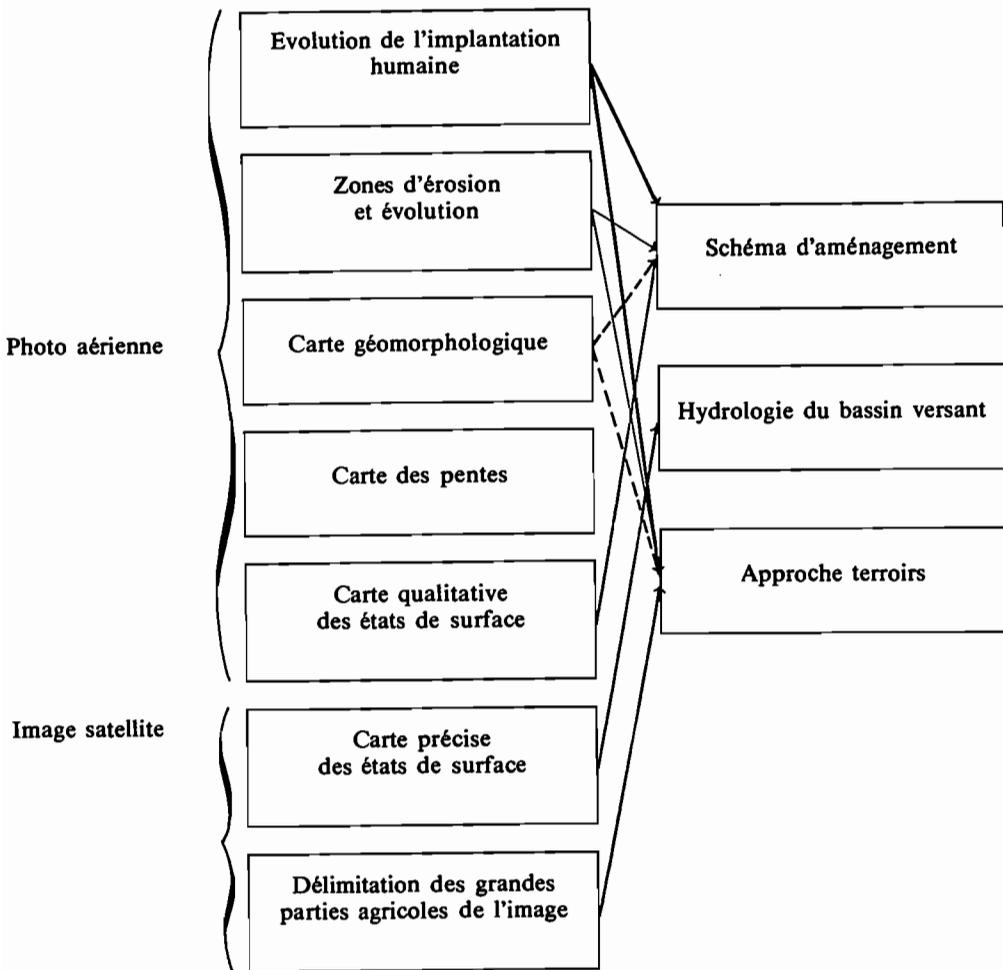
Les photos aériennes permettent d'obtenir facilement les grandes unités de paysage autour des zones d'enquête mais elles ne peuvent être obtenues qu'à des dates non programmables, parfois éloignées dans le temps.

L'image satellite est beaucoup plus coûteuse, et n'a pas une aussi grande finesse dans les détails. Toutefois, ceci est compensé par l'aspect multispectral permettant de mieux connaître les unités de sol, par les possibilités offertes par les techniques de traitement d'image et un choix plus large pour la date d'acquisition de l'image.

L'utilisation d'un tel outil sera intéressante si elle permet d'extrapoler à une vaste zone les résultats d'observation de terrain, ou si elle permet d'observer des phénomènes fugitifs ou trop difficiles à observer par des méthodes classiques.

Ainsi, chacun de ces outils a ses inconvénients et ses points forts, la complémentarité de leur utilisation étant mise en évidence.

L'obtention d'applications concrètes viendra d'une utilisation combinée d'un ou plusieurs plans d'information suivant l'encadré de la page suivante.



Définition d'un schéma directeur d'aménagement du bassin versant

Cette application a été effectuée à l'aide des 4 plans suivants :

- P1. Géomorphologie;
- P2. Erosion (1952/1982);
- P3. Etat de surface;
- P4. Pente.

Tous ces plans d'informations sont tirés de l'analyse des photographies aériennes. Pour le plan « état de surface » nous aurions pu utiliser la cartographie plus fine issue du dépouillement de l'image satellite, mais nous avons opté pour celui provenant des photos aériennes car cela procure d'emblée tous les plans à la même échelle.

La méthodologie de croisement retenue est manuelle mais pourrait se prêter facilement à une utilisation du type « Système d'Information Géographique ».

Elle est basée sur le carroyage par éléments de 25 ha traités lors de l'analyse des photos aériennes. Chaque carré élémentaire va être numérisé en fonction des 4 critères retenus. Ces critères sont alors combinés deux à deux : le plan P1 (géomorphologie) et le plan P2 (érosion) sont combinés suivant une grille de décision pour donner un plan qui renseigne sur les possibilités hydroagricoles de chaque carré élémentaire.

Par exemple :

- piémont dominant (plan P1) + érosion faible (plan P2) \Rightarrow domaine pluvial avec problèmes de conservation des eaux et du sol;
- plans P3 (états de surface) + P4 (pentes) \Rightarrow informations sur l'aptitude agro-sylvo-pastorale;
- savane boisée, forêt claire (plan P3) + pente de 5 à 10 % (plan P4) \Rightarrow domaine pastoral.

Enfin, dans chaque carré, les deux renseignements sont confrontés : les potentialités hydroagricoles estimées ci-dessus sont améliorées par le recoupement avec les informations sur l'aptitude agro-sylvo-pastorale.

On obtient alors une vision du bassin versant par carrés élémentaires de 25 ha qui permet de dresser un schéma général du bassin au point de vue des potentialités agricoles ou pastorales et renseignent sur les zones à risque érosif. D'où l'on peut déduire les zones susceptibles d'être aménagées (voir carte de synthèse, figure 5).

Terroirs villageois

Le même type d'analyse est possible pour définir les différentes composantes du terroir : écosystèmes, évolution récente et historique.

Ici l'outil de base sera l'image satellite sur laquelle ont été répertoriées par photo-interprétation d'image les 3 grandes classes d'occupation des terres : zones de cultures, zones de haut de versants, zones de mi-versant.

Les plans annexes, tel l'érosion, la géomorphologie, l'implantation humaine et son évolution, l'occupation du sol serviront pour améliorer la connaissance en détail de chacune de ces zones.

L'utilisation de l'image satellite fournit une analyse rapide de l'occupation villageoise sur une zone de taille importante, mais ceci reste toutefois à l'état d'ébauche ou de dégrossissage du problème. Il va sans dire qu'à tout travail précis sur un village donné seront associées des visites de terrain et des enquêtes qui ne peuvent qu'affiner le travail précédent.

Application à l'hydrologie

Téledétection et hydrologie au Sahel

Le problème soulevé ici est celui de l'estimation des ruissellements potentiels, plus exactement des débits de crue, en utilisant la téledétection.

Dans le Sahel, la connaissance actuelle des débits de crue des petits bassins versants est assez grossière. Elle est généralement effectuée à travers deux méthodes globales, celle de Rodier-Auvray (1965) à tendance déterministe et celle du CIEH (1983) purement statistique. Ces méthodes ont malheureusement un degré d'incerti-

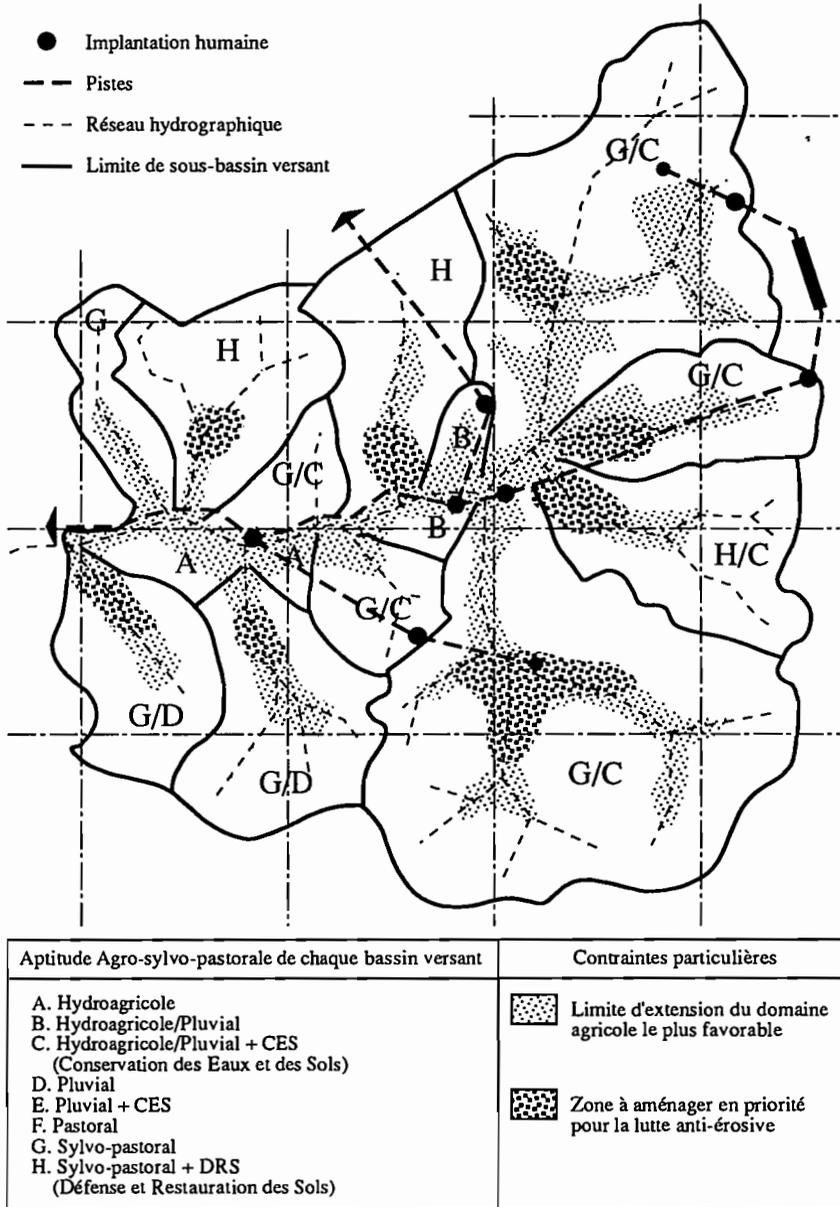


Figure 5. Schéma directeur d'aménagement. Carte de synthèse.

tude assez élevé; on estime en effet l'erreur moyenne aux environs de 100 %. La difficulté d'estimation exacte des ruissellements provient en grande partie de la mauvaise connaissance de « l'aptitude au ruissellement » de chaque bassin versant, surtout quand celui-ci a une composition très différente de celle des bassins expérimentaux servant de référence.

La télédétection satellitaire ne prétend pas proposer des cartographies absolument précises d'une zone donnée, les « matrices de confusion » associées aux classifications sont là pour nous le rappeler. Toutefois, il est légitime de penser que la vision fine depuis l'espace est à même de nous permettre une connaissance détaillée de chaque bassin versant et laisse donc augurer une meilleure connaissance des potentialités de ruissellement, notamment pour les bassins qui s'écartent de la normale.

Quelle que soit l'approche utilisée, la précision attendue sur les débits estimés sera toutefois limitée par celle de la technique de télédétection. Ainsi, si les méthodes d'estimation classiques donnaient des résultats à 10 % ou 20 % près, il serait illusoire de vouloir les améliorer à l'aide des informations satellitaires. C'est le taux d'erreur très élevé des méthodes d'estimations actuelles des débits de crues au Sahel qui nous autorise à croire qu'un progrès sensible peut y être apporté par la télédétection.

Méthodologies possibles

L'utilisation de la télédétection satellitaire pour caractériser l'aptitude au ruissellement passe par plusieurs étapes :

— une phase de classification de l'image satellite au cours de laquelle on va tenter d'obtenir une ou plusieurs cartes thématiques décrivant le paysage pixel à pixel;

— une phase de transformation de ces éléments de paysage en aptitude au ruissellement sous une forme numérique : lame ruisselée, coefficient de perméabilité...;

— une phase d'utilisation de calculs hydrologiques dans laquelle on essaie de calculer le ruissellement global du bassin à l'aide d'outils plus ou moins complexes : du plus simple (estimation globale) au plus sophistiqué (modélisation mathématique).

Nous avons un but de formation devant déboucher sur une méthodologie simple, pouvant être réutilisée facilement et immédiatement par les stagiaires AFVP. Aussi, avons nous retenu dans ce projet les solutions les plus simples, comme premier pas vers l'utilisation rationnelle de ces nouveaux outils. Plus tard, nous espérons pouvoir tester d'autres solutions, plus complexes, plus performantes sans doute.

Amélioration des paramètres globaux

C'est ainsi que, loin de mettre au point de nouvelles méthodes d'estimation utilisant au mieux la grande richesse d'information de l'image satellite, nous avons essayé de nous en servir comme guide d'estimation des paramètres globaux nécessaires à la mise en œuvre des méthodes classiques.

La détermination habituelle est subjective

Ces paramètres, globaux, concernent essentiellement la pente et la perméabilité. Ils sont généralement peu précis et l'hydrologie classique a souvent utilisé des « classes » de pente ou de perméabilité pour lesquelles les critères d'affectation sont, sinon subjectifs, du moins délicats à déterminer, surtout par un ingénieur de projet a priori peu versé dans les subtilités de cette approche. Cette critique, maintes fois évoquée, peut être partiellement amoindrie par les techniques de la télé-détection qui peuvent servir de « garde-fou » dans la détermination des indices ou classes traditionnelles.

A titre d'exemple de l'utilité d'un tel garde-fou, remarquons qu'au Sahel, c'est souvent l'indice de perméabilité qui a la plus forte influence sur les résultats : on a pu constater sur le bassin n° 4 de Titao une variation du coefficient de ruissellement décennal (cf. abaques de Rodier) de 30 à 70 % selon que la classe de perméabilité passe de P2 à P3. Cette extrême variation devient très déroutante quand on la compare aux nuances très faibles entre les différentes dénominations : « bassins imperméables » pour P2, « bassins assez imperméables » pour P3.

Paramètres de perméabilité

Ce calcul correspond à la phase de la transformation des éléments de paysage en aptitude au ruissellement sous forme numérique.

Plusieurs solutions sont envisageables, mais il est impératif d'utiliser des résultats de mesures de terrain. Une voie possible consiste à se baser sur les mesures de mini-simulateur de pluie de l'ORSTOM effectuées au Sahel depuis une dizaine d'années sur des parcelles expérimentales de 1 m². Valentin propose un catalogue des « états de surface » associés aux valeurs de lame ruisselées (en cours de publication). Le problème ne sera pas pour autant entièrement résolu, le point délicat restant le passage du m² au bassin versant (coefficient de passage de 10⁶ à 10⁸ !).

La détermination que nous proposons ici consiste en une estimation de la classe de perméabilité ORSTOM évoquée ci-dessus en utilisant les résultats de télé-détection.

Notre idée est que le choix de la classe de perméabilité peut être associé au pixel élémentaire, ceci procurant plusieurs avantages :

- l'estimation de cette classe est moins subjective appliquée à un état de surface élémentaire au lieu de l'estimation globale sur le bassin versant;
- le calcul global fait au prorata de la surface limite les défauts éventuels de classement;
- le résultat final de la classe est conservé sous forme numérique, d'où une hiérarchie possible entre bassins et une évolution lente du coefficient de ruissellement avec l'évolution des états de surface.

La méthodologie consiste donc à estimer la classe de perméabilité associée à chaque classe obtenue sur la classification d'image en se servant de la grille habituelle ORSTOM. Puis, on estime une classe globale de perméabilité P sur le bassin au prorata des surfaces. Par exemple, sur le bassin n° 4 nous avons obtenu : P = 2,25.

Paramètre de pente

Etant dans une zone où les seules cartes existantes sont au 200 000^e, les courbes de niveau sont trop distantes pour renseigner sur la topographie du bassin, a fortiori des sous-bassins. Les seules indications objectives sur ce type de paramètre ne peuvent être déduites que par les outils de télédétection.

Les images stéréoscopiques du satellite SPOT permettent l'obtention d'un « modèle numérique de terrain » à un pas très fin. Toutefois, les coûts correspondants, très élevés, ne peuvent être envisagés que dans de gros projets, sûrement pas pour un petit projet d'aménagement rural.

C'est pourquoi nous avons utilisé les photographies aériennes stéréoscopiques dépouillées par carré élémentaire de 25 ha, ce qui nous fournit une cartographie des classes de pente. Le passage aux classes de pente R traditionnelles à l'ORS-TOM et à l'indice global de pente Ig est possible à travers des opérateurs simples. Pour le bassin n° 4, on a obtenu : $R = 3,56$ et $I_g = 11,0$.

Calcul des débits de crues

Le calcul des débits de crues par les méthodes habituelles au Sahel s'en suit; nous donnons ici directement les résultats de ces calculs sur le bassin n° 4 :

Surface : 20,5 km².

Classe de perméabilité : $P = 2,25$.

Classe de pente : $R = 3,56$.

Indice de pente : $I_g = 11,0$.

Méthode Rodier Auvray : $Q_{10} = 47,8$ m³/s.

Méthode CIEH : $Q_{10} = 60,0$ m³/s.

Observation de terrain : $Q = 52,5$ m³/s.

On ne peut à l'aide d'un seul bassin tirer des résultats statistiques. Toutefois, on peut faire deux remarques :

1. Comparaison des méthodes entre elles. Les résultats des méthodes sont souvent observés dans l'ordre Rodier-Auvray : un peu faible; CIEH : un peu trop fort. On retrouve ici l'ordre « habituel » des estimations.

2. L'utilisation de la télédétection a permis de déterminer sans difficulté des débits qui s'avèrent très proches de l'observation de terrain réalisée. Le débit observé de 52,5 m³/s (en le supposant comme représentatif de la réalité) s'écarte respectivement de - 9 % et + 14 % de ceux obtenus par les 2 méthodes citées. Ces deux chiffres n'ont qu'une valeur indicative, d'autant que le « débit observé » est simplement un ordre de grandeur, mais il est intéressant de noter que l'on est largement à l'intérieur du domaine de 100 % d'erreur considéré comme limite à ne pas franchir.

Conclusion

A travers le projet de Titao, nous avons exploré les différentes possibilités de connaissance du terrain que nous offre la télédétection aérospatiale pour des petits bassins versants de zone sahélienne.

L'utilisation de la **photographie aérienne** est une technique largement rodée et intégrée depuis longtemps dans les projets. Son intérêt n'est plus à prouver, et ici encore elle nous a procuré des documents très performants pour la connaissance des bassins. Nous avons repris les méthodes de travail classiques ou moins classiques, pour extraire de ces images l'information utile, et avons porté en annexe les éléments d'information nécessaire pour les mettre en œuvre.

La **téledétection satellitaire** en est à ses débuts pour l'application pratique à des projets réels dans la zone sahélienne. Plusieurs écueils en ont empêché pour l'instant l'utilisation : le coût important des images, la difficulté à affecter un personnel qualifié à ce type de démarche, la difficulté à trouver sur place du matériel de traitement d'image, le fait qu'aucune méthode totalement opérationnelle ne soit disponible. Quelques essais existent çà et là pour les zones concernées : ils relèvent pour l'instant de la pure recherche.

La première partie de notre démarche a consisté à essayer d'obtenir des documents fiables et reproductibles décrivant le plus fidèlement possible le paysage. Les résultats semblent encourageants et la vision que procure l'image satellite apparaît comme particulièrement pertinente, expliquant bien les différentes composantes du paysage.

Ces plans d'information apparaissent comme plus riches que ceux obtenus par photographies aériennes, et leur plus grande extension géographique en fait un outil très intéressant. Toutefois, leur limite en résolution fait que certains éléments n'apparaissent que difficilement sur ces images (routes, habitats, érosion...) alors que ces éléments peuvent être obtenus aisément par photographies aériennes. Celles-ci peuvent en outre apporter des informations visuelles anciennes, alors que l'imagerie satellite n'est disponible dans le meilleur des cas qu'à partir de 1972. Ainsi, la **complémentarité des approches satellitaire et aérienne** est mise en évidence.

Pour la **connaissance hydrologique** de la zone, toutes les personnes autorisées sont d'accord pour penser que la possibilité nouvelle de vision en détail des bassins versants que procure l'image satellite est primordiale pour la détermination des conditions de ruissellement, difficilement cernables par les mesures au sol.

Le point délicat demeure le passage à une quantification : nous avons proposé ici un premier élément de travail, à savoir une détermination améliorée des paramètres explicatifs de l'écoulement dans les méthodes classiques de calcul des débits de crue, en utilisant les données de téledétection satellitaire comme garde-fou d'estimation. Les résultats obtenus, difficilement généralisables puisqu'ils ne concernent qu'un seul bassin versant, sont toutefois encourageants, puisque les écarts entre valeurs observées et valeurs calculées sont très nettement en-deçà du seuil de tolérance souhaité.

Nous nous étions fixés comme **objectif de fournir une méthode directement utilisable**. Il s'ensuit que la méthodologie proposée n'apporte pas vraiment de changement dans la détermination des débits de crue : elle cherche à améliorer l'emploi des méthodes existantes, globales, en amenant une détermination plus objective des paramètres, et réduisant ainsi le taux d'erreur. Aussi peut-elle être utilisée dès à présent, en particulier par les stagiaires AFVP.

On pourrait rester un peu frustré de l'utilisation somme toute restreinte de l'information satellitaire qui a été faite ici. En effet, celle-ci apparaît a priori beaucoup plus riche que l'information globale qui en a été retirée. Mais pour exploiter pleinement cette richesse d'information il faut mettre au point des

méthodologies nouvelles, spécifiques, faisant intervenir plus complètement ces plans d'explication dans les estimations. De nouveaux outils, non disponibles pour l'instant, sont envisagés et seront progressivement mis au point dans les prochaines années : modèles hydrologiques utilisant les apports de la télédétection, introduction d'observations numériques nouvelles (mesures par mini-simulateur, mesures par sous-bassins...).

Pour l'aménagement des bassins versants et la connaissance des terroirs villageois, les différents plans d'information élaborés se sont révélés être des outils performants pour la compréhension de l'espace. Il faut cependant garder à l'esprit que ces informations ne fournissent qu'une approche de l'état à un instant donné de la zone d'étude : les problèmes réels doivent être cherchés à travers les conséquences physiques, seules visibles sur le terrain. Par ailleurs, la présence de populations sur la zone introduit des données complémentaires, tout aussi importantes pour la connaissance ou l'amélioration de l'espace : le choix du type d'aménagement et de sa localisation va donc dépendre de critères techniques et sociaux. Techniques, par exemple ceux de l'aménagement anti-érosif, pour lesquels les spécialistes ne sont pas toujours d'accord entre eux. Sociaux, et c'est là un point fondamental à ne pas négliger, car les besoins et avis de la population locale sont à prendre en compte à tous les niveaux.

Les résultats obtenus par télédétection pourront servir de base aux discussions conduisant aux aménagements, la télédétection pouvant ainsi être un nouvel outil de communication et d'animation.

L O U I S - J E A N
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 92.53.17.00
Dépôt légal : 581 — Juillet 1991
Imprimé en France

Universités francophones est la collection de l'Université des Réseaux d'Expression Française (UREF). Cette dernière, qui fonctionne au sein de l'AUEPELF comme une Université sans murs, a été choisie par le Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement des pays ayant en commun l'usage du français comme l'opérateur privilégié du Sommet en matière d'enseignement supérieur et de recherche.

Cette collection de manuels universitaires et d'ouvrages de référence s'adresse à tous les étudiants francophones. Elle est appelée à constituer une bibliothèque universitaire en langue française dont les ouvrages sont proposés à des prix modérés.

190,00 FF

80,00 FF — UREF / Prix préférentiel : Afrique, Asie, Amérique du Sud, Haïti

REF 59.4320.4



U R E F



9 780861 963157

AUEPELF



John Libbey
EUROTEXT