

LABORATOIRE COMMUN
DE TELEDETECTION



Cemagref **ENGREF**

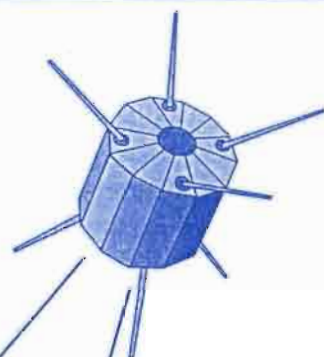
ORSTOM

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT
EN COOPERATION

ATELIER / WORKSHOP
INTERNATIONAL

TELEDETECTION ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

REMOTE SENSING AND WATER RESSOURCES MANAGEMENT



FOOD AND AGRICULTURE
ORGANIZATION OF THE
UNITED NATIONS

MONTPELLIER 29.11 - 01.12.1995

PROGRAMME & RESUMES *PROGRAM & ABSTRACTS*

PROGRAMME et RESUMES

PROGRAM and ABSTRACTS

**COMITE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
TECHNICAL AND SCIENTIFIC COMMITTEE**

M. BIED CHARRETON, Environmental and Information Management Service, FAO, Rome

J.W. FINCH, Institute of Hydrology, Wallingford

J.M. GRESILLON, LTHE, Université de Grenoble

J.M. LAMACHERE, Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, Montpellier

P. PALLAS, Land and Water Development Division, FAO, Rome

C. PUECH, LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier

COMITE D'ORGANISATION

C. PUECH, LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier

500 rue J.F. Breton

34093 Montpellier Cedex 5 - France

Tel (33) 67.54.87.45 / Fax (33) 67.54.87.00

e-mail : christian.puech@teledetection.fr

J.M. LAMACHERE, Laboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM, Montpellier

911 Avenue AGROPOLIS,

BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1. France

Tel (33).67.61.75.32 / Fax (33).67.41.18.06

e-mail : lamacher@orstom.orstom.fr

**Mercredi /29.11.1995/ Wednesday
(9h - 12h30)**

PRESENTATION

9h Ouverture de l'atelier

Présentation des journées / Workshop presentation :

Les nouvelles méthodologies au service de l'hydrologie : télédétection, SIG

New methodologies for hydrology : Remote Sensing and GIS.

9h40 PALLAS P., FAURES J.M.(FAO, Rome)

Manuel pour l'estimation des crues et apports en Afrique sahélienne et tropicale sèche.

p.9

10h00 NOUVELOT J.F., LAMACHERE J.M. (ORSTOM, Montpellier)

Manuel FAO : Le logiciel Sahel.

p.11

10h20 Pause café

A GESTION DES RESSOURCES / WATER MANAGEMENT

A1. Approche régionale / regional approach

10h50 LOINTIER Marc (ORSTOM, Montpellier)

Gestion intégrée des bassins versants côtiers et des zones humides en milieu tropical. Apport de la télédétection.

p.13

11h10 FAURES J.M., BOUSQUET Mathieu (FAO, Rome)

Regional assessment of water resources with ARCINFO. Case study of the niger river basin

Evaluation régionale des ressources en eau au moyen d'un SIG - le cas du bassin du Niger.

p.14

11h30 BOUSQUET M., FAURES J.M. (FAO, Rome)

Assessment of irrigation potential in africa using ARC-INFO

Evaluation du potentiel d'irrigation pour l'Afrique à l'aide d'ARC-INFO.

p.15

11h50 SAVANE Issiaka (Institut d'Ecologie Tropicale, Abidjan, Côte d'Ivoire), GOZE B et H.Q. GVYN (CARTEL, Univ Sherbrooke, Canada)

Evaluation des ressources en eaux souterraines dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat dans le bassin d'Odienné.

p.16

12h10 Dr. ARIAS ROJO H.M., SAIZ J., WATTS C. (Mexique)

Natural Resource Management in Sonora, Mexico, using AVHRR Images.

p.17

12 h30 Pause repas

**Mercredi /29.11.1995/ Wednesday
(14h - 18h)**

- 14h00 NGUYEN XUAN DAO (Université Catholique de Louvain, Belgique)
Suivi des problèmes de gestion de l'eau d'irrigation dans le delta du Fleuve Rouge à l'aide des données SAR.
- 14h20 BEN AMOR S., MAKHLOUF A. (CNT, Tunis) et DUTARTRE P. (BRGM)
Utilisation de la télédétection pour la sélection des sites favorables à l'implantation des retenues collinaires et l'aménagement des bassins versants. région de Béja - Tunisie. p.18
- 14h40 TRAORE Karim (DRH/HB, Bobo Dioulasso, Burkina Faso)
La planification comme moyen d'appui à la planification des ressources en eau ; cas du sud-ouest du Burkina Faso p.19
- 15h00 DESCROIX Luc (ORSTOM, Mexique)
Application de la télédétection à l'évaluation des ressources en eau de la région hydrologique 36 (Nord Mexique). p.20
- 15h20 Discussion thème A1**
- 15h50 pause**

A GESTION DES RESSOURCES / WATER MANAGEMENT
A2. Approche locale / local approach

- 16h20 PUECH Christian (LCT, Montpellier), Joël CARETTE (Consultant, Ivry)
De l'aérien au satellite : évaluation des ressources en eau. p.22
- 16h40 PATRICK Eric (University College, LONDON, U.K.)
Using Remote Sensing and Anthropology as data inputs into a GIS to optimize site location of water harvesting schemes in semi-arid Africa. p.23
- 17h00 KILLMAYER A (GEOSYS, Toulouse)
De la télédétection à la gestion d'un «cadastre irrigation» dans le delta du fleuve Sénégal. p.24
- 17h20 BIEMI J. , JOURDA J.P. (Univ.. Nle de Côte d'Ivoire), DESLANDES S. , GVYN H. (CARTEL, Univ Sherbrooke, Québec)
Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire. par Télédétection et SIG p.25
- 18h00 Apéritif offert à la Maison de la Télédétection

**Jeudi / 30.11.1995 / Thursday
(9h00 -12h30)**

- 9h00 AOUNI L. (CNT Tunis)
Apport de la télédétection dans la mobilisation des ressources en eau de surface et la gestion du secteur irrigué (région de la basse vallée de la Medjerda). p.26
- 9h20 Mohamed Rachid EL MESLOUHI (DGH, Rabat, Maroc)
Etude hydrogéologique par télédétection du bassin hydrogéologique de Taza p.27
- 9h40 NGUETORA Madira (EIER, Ouagadougou)
SIG et Gestion des ressources en eau d'un Bassin Versant Africain. p.28

10h00 Discussion thème A2

10h30 Pause café

B MODELISATION HYDROLOGIQUE ET DETERMINATION DE PARAMETRES HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS
--

B1. Caracteristiques hydriques des sols / Soils hydric characteristics

- 11h00 LAMACHERE J.M. (ORSTOM Montpellier)
Télédétection, états de surface et observations au sol p.30
- 11h20 LAMACHERE J.M.(ORSTOM Montpellier), PUECH C (LCT)
Télédétection et cartographie des états de surface p.31
- 11h40 GUILLET François (ORSTOM/CIRAD)
Etats de surface et hydrologie sur un petit bassin versant soudano-sahélien du nord Yatenga. p.32
- 12h00 GUILLET François (ORSTOM/CIRAD), J.M. LAMACHERE (ORSTOM)
Transformation des états de surface et modélisation hydrologique sur le petit bassin versant de Samniweogo (Région de Bidi, Province du Yatenga, Burkina Faso). p.33

12h30 Pause repas

**Jeudi / 30.11.1995 / Thursday
(14h00 - 18h10)**

- 14h00 COLOMBO R., MARTUCCI A., ONGARO L., SARFATTI P. (Inst. Agro. per l'Oltremare, Firenze, Italie)
Remote sensing for hydrological analysis of two sub-catchments of the Mareb river (Eritrea). p.34
- 14h20 BERGAOUI M., CAMUS H.(ORSTOM, Tunis)
Caractérisation des zones homogènes pour des fins de modélisation hydrologique p.35
- 14h40 VINÉ Pascal (LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier)
Apport de la télédétection à l'étude des zones contributives aux écoulements. Cas du site de la Mare d'Oursi (Burkina Faso). p.36
- 15h00 DAOUD Abdelkarim (Fac. Lettres S. Humaines, Sfax, Tunisie),
TRAUTMANN J. (CNRS CEREG, URA 95, Strasbourg)
Rôle de la télédétection dans l'évaluation et la cartographie des épandages artificiels des crues dans les hautes steppes tunisiennes. p.38
- 15h20 Discussion thème B1**

15h50 Pause

HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS

B2. Bilan hydrique / Water balance

- 16h20 Emilia HURTADO SANTI (Universidad de Castilla - La Mancha, Albacete),
V. CASELLES (Univ. de Valencia), M.M. ARTIGAO (Albacete, Espagne)
Using one or two layer models for determining evapotranspiration with remotely sensed data. p.40
- 16h40 CHEHBOUNI Aghani (ORSTOM Montpellier), D. LO SEEN (NASA), G.
DEDIEU (CESBIO, Toulouse), M. DAUBAS (USDA) et B. MONTENY
Utilisation de la télédétection spatiale pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle. p.41
- 17h00 TROUFLEAU D.(LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier)
Evaporation et télédétection infrarouge thermique en zone aride et semi aride.
Mapping real evapotranspiration over arid and semi-arid regions from IRT p.42
- 17h20 OUSMANE Abdou.(Min. Hydraulique, Niamey, Niger)
Reconstitution de chroniques de données hydrologiques anciennes par télédétection (mares du Niger). p.43

17h40-18h10 Discussion thème B2

Vendredi / 01.12.1995 / Friday

**B MODELISATION HYDROLOGIQUE ET DETERMINATION DE PARAMETRES
HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS**

B3. Modèles hydrologiques / Hydrological models

- 9h00 SAMBOU Soussou (Univ.Cheikh Anta Diop., Dakar, Sénégal), J.P. LAMAGAT (ORSTOM, HYDROCONSULT, Montpellier)
Modèle stochastique de prévision des crues sur le fleuve Gambie. p.45
- 9h20 SAMBOU Soussou (Univ.Cheikh Anta Diop. Dakar, Sénégal), J. ALBERGEL (ORSTOM, Dakar), A. NONGUIERMA (Gembloux, Belgique)
Modèle hydrologique et gestion d'une digue anti-sel : cas du bas fond de Ajiguinoum. p.46
- 9h40 PUECH C.(LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier)
Télé-détection et modélisation hydrologique : quelle vision, quelle échelle, quels processus ? p.47
- 10h00 GRESILLON J.M (LTHE, Université de Grenoble)
Estimation des crues au Sahel. Réflexion sur l'utilisation de la télé-détection pour la prédétermination. p.48
- 10h20 Pause café
- 10h50 GINESTE P (LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier)
Télé-détection radar pour la modélisation des crues. p.49
- 11h10 NONGUIERMA A.(Fac Sciences Agro. Gembloux, Belgique)
Modélisation hydrologique de petits bassins ruraux sahéliens : Apport de la télé-détection et des S.I.G p.50
- 11h30 PEREZ Pascal (CIRAD CA Montpellier), URVOIX D. (USTL Montpellier), ARNAUD M.(CIRAD C.A., Montpellier)
Application du modèle GRASS-ANSWERS à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant d'Afrique de l'Ouest. p.51
- 11h50 PERSONS E et RANDRIAMAHERISOA A. (Université Catholique de Louvain, Belgique)
M.H.M. : Le modèle hydrologique maillé. p.52
- 12h10 Discussion thème B3**
- 12h40 Discussion générale / general discussion**
- 13h00 CLOTURE DE L'ATELIER / END OF WORKSHOP**

PRESENTATION

INTRODUCTION

Cet atelier fait suite à une importante étude confiée par la FAO (Land and Water Development division) au LCT (Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF de Montpellier) à l'ORSTOM (Institut Français de recherche en Coopération, centres de Ouagadougou et de Montpellier) et enfin au CIEH (Comité InterAfricain d'études Hydrauliques de Ouagadougou).

L'étude a consisté en la rédaction d'un manuel pour le calcul des débits de crue et des apports annuels des petits bassins versants sahéliens. Si la plus grande partie de cette étude a concerné les méthodes classiques d'estimations hydrologiques, une part importante touchait à l'utilisation de télédétection comme alternative pour estimer les écoulements.

Des méthodes intéressantes ont été mises au point, mais il faut en reconnaître les limites : elles sont majoritairement réservées au domaine de la recherche. Il y a encore de grandes difficultés à définir des méthodes vraiment opérationnelles par le biais de ces données télédéteectées. Aussi nous a t-il semblé judicieux, en marge de cette étude, de rassembler des chercheurs de tous horizons pour confronter les recherches et les méthodes opérationnelles. Volontairement le sujet a été élargi au domaine plus général de la **gestion des ressources en eau à partir de télédétection** dans les pays du ressort de la FAO.

Le but de cet atelier est ainsi de faire le point sur les techniques et méthodes opérationnelles d'utilisation de la télédétection pour l'évaluation et la gestion des ressources en eaux. L'accent sera mis sur l'hydrologie de surface et la gestion de l'eau dans les bassins versants ainsi que sur l'application pratique de ces techniques. L'atelier se concentrera plus particulièrement sur les problèmes des pays arides et semi-arides en développement pour lesquels ces techniques peuvent représenter un atout particulièrement important.

On s'intéressera donc à la gestion des ressources, partie a priori plus opérationnelle, et à la modélisation hydrologique utilisant les paramètres issus de télédétection.

L'atelier se décompose alors de la façon suivante : :

Présentation du manuel FAO, à l'origine du présent atelier

A GESTION DES RESSOURCES EN EAU

approche régionale

approche locale

B MODELISATION HYDROLOGIQUE ET DETERMINATION DES PARAMETRES

Caractéristiques hydriques des sols

Bilan hydrique

modèles hydrologiques

INTRODUCTION

The origin of this workshop is an important study given by FAO (Land and Water Development division) to LCT (Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF de Montpellier), to ORSTOM (Institut Français de recherche en Coopération, Ouagadougou and Montpellier Centers) and also to CIEH (Comité InterAfricain d'études Hydrauliques, Ouagadougou).

The aim of this study is to realise a manual to determine annual and maximum runoffs in small catchments of Sahelian Regions. The majority of the manual concerns classical hydrological methods of estimation. The manual also covers the uses of new technologies such as Remote Sensing data (RS).

Interesting methodologies using RS have been developed but they are limited in a greater part to the research domain. Operational methods using RS are more difficult to obtain. That is why, we thought it was interesting to gather researchers on these topics in order to compare their approaches.

The purpose of this workshop is then to highlight techniques and operational methods in RS which can be applied to water resources assessment and management. Emphasis should be given to surface hydrology and river basin water management as well as the practical application of these techniques. The workshop will concentrate more specifically on problems encountered in arid and semi-arid developing countries for which the application of these techniques is believed to be of great relevance.

The different parts of the workshop are :

Presentation of FAO practice book, which is the origine of this workshop

A WATER MANAGEMENT

Regional approach

Local approach

B HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS

Soils hydric characteristics

Water balance

Hydrological models

MANUEL POUR L'ESTIMATION DES CRUES ET APPORTS EN AFRIQUE SAHELIENNE ET TROPICALE SECHE

FAO

Food and Agriculture Organization of the United Nations
Via delle terme de Caracalla, Rome (Italie)

Présentation

La maîtrise de l'eau pour l'agriculture est un des préalables fondamentaux au développement rural durable en Afrique sub-saharienne. Celle-ci requiert, pour la réalisation d'aménagements hydrauliques, deux catégories d'informations particulièrement importantes et difficiles à estimer en l'absence de réseaux de mesures hydrologiques. Il s'agit d'une part des événements hydrologiques exceptionnels (crues), dont la quantification est requise pour le dimensionnement des ouvrages, et d'autre part des volumes d'écoulement des bassins versants, nécessaires à l'estimation du potentiel de développement hydraulique et au dimensionnement des retenues de barrages.

De nombreuses mesures ont été effectuées durant les trente dernières années sur des petits bassins versants représentatifs en Afrique sahélienne et tropicale sèche et plusieurs méthodes ont été mises au point pour l'estimation des crues. Par contre, le problème de l'écoulement annuel n'a fait jusqu'à présent l'objet d'aucune étude de synthèse et la rareté des séries statistiques de débits de longue durée rendent cet exercice particulièrement délicat.

Au regard de cette situation, la FAO a décidé de financer un programme qui a été exécuté conjointement entre 1991 et 1994 par le Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), l'ORSTOM (l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) et le Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF/ENGREF. Ce programme avait les objectifs suivants :

- la compilation de toutes les données existantes concernant les crues et apports annuels des petits bassins versants de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche;
- la révision et l'actualisation des principales méthodes de prédétermination des crues décennales;
- la présentation, sous la forme d'un manuel unique, des principales méthodes de prédétermination des crues décennales et des apports annuels sur les petits bassins versants non jaugés;
- l'étude des possibilités d'application de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la détermination des caractéristiques hydrologiques des petits bassins versants.

L'ouvrage présenté est le résultat de ce programme. **Il s'agit d'un manuel pratique** présentant les différentes méthodes existantes selon le schéma suivant:

- **Définition des termes hydrologiques et détermination des principaux paramètres** intervenant dans le calcul des crues et apports,

- **Les méthodes de prédétermination des crues décennales (révisées):**

 - la méthode ORSTOM,

 - la méthode C.I.E.H.,

 - les formules d'écoulement.

- **Les méthodes d'évaluation de l'écoulement annuel**

 - La méthode Rodier,

 - Le modèle Girard,

 - La méthode Dubreuil-Vuillaume,

 - La méthode du bilan d'eau des retenues.

- Une description de **l'apport que peuvent fournir la télédétection et les systèmes d'information géographiques** pour l'estimation des caractéristiques hydrologiques des petits bassins versants.

- **La liste des bassins versants répertoriés.**

Les méthodes ORSTOM et C.I.E.H. pour le calcul de la crue décennale, ainsi que la check-list ont été informatisées dans le **logiciel SAHEL**. Ce logiciel, ainsi qu'un fichier contenant la liste des bassins versants expérimentaux recensés, seront disponibles sur disquette.

LE LOGICIEL SAHEL

Jean François NOUVELOT*, Jean-Marie LAMACHERE**

*ORSTOM, A.P. 225-3 (ZI) 35 071 Gomez-Palacio (DGO) Mexique

**Centre ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

Résumé

Le logiciel Sahel a été conçu par l'ORSTOM pour la prédétermination, en Afrique de l'Ouest, des crues décennales sur les petits bassins versants (1 à 300 km²) des zones sahéenne et tropicale sèche.

Ce logiciel utilise le langage de programmation FoxPro associé au concept des triolets (Cruette J., Paugy D. et Reversat J., 1992) pour mémoriser et reconstruire des phrases enchaînées entraînant des actions qui sont elles mêmes liées entre elles dans une suite logique. P. Gourjon (1994) a modifié la structure initiale des verbes, associés au concept des triolets, afin de faciliter l'introduction de formules mathématiques et la mémorisation des choix et des résultats. Les différents fichiers nécessaires au logiciel sont archivés et compactés sur une disquette de capacité 1,44 Mo.

Le logiciel Sahel se présente comme un menu déroulant proposant à l'utilisateur une série de questions auxquelles celui-ci doit répondre pour effectuer des choix et fournir les informations nécessaires aux calculs. Dans son menu *modèles*, le logiciel Sahel propose trois méthodes de prédétermination des crues décennales : la méthode *ORSTOM* d'approche déterministe, La méthode *CIEH* d'approche stochastique et la méthode *de la section droite et de la pente* basée sur la mise en oeuvre de formules d'hydraulique. Par son menu *pluies*, le logiciel Sahel permet également de déterminer automatiquement la hauteur pluviométrique journalière de fréquence décennale et la hauteur pluviométrique moyenne annuelle en un point défini par ses coordonnées géographiques.

Les trois méthodes de prédétermination des crues décennales sont exposées de manière très complète dans le manuel pour la prédétermination des crues et des apports des petits et moyens bassins versants d'Afrique sahéenne et tropicale sèche (FAO 1995). Dans la phase d'initiation, consulter ce manuel est indispensable à l'utilisation du logiciel.

A 1

GESTION DES RESSOURCES
Approche régionale

WATER MANAGEMENT
regional approach

GESTION INTEGREE DES BASSINS VERSANTS COTIERS ET DES ZONES HUMIDES EN MILIEU TROPICAL. APPORT DE LA TELEDETECTION

INTEGRATED COASTAL AREA AND WETLANDS PLANNING IN TROPICAL ENVIRONMENT

Marc LOINTIER*

*Chargé de recherche ORSTOM, Maison de la Télédétection, 500, rue J. F. Breton, 34093 Montpellier cedex 05, France Tél. : (33) 67 54 8 7 03 Fax. : (33) 67 54 8 7 00 E-mail: lointier@teledetection.fr

Résumé

L'aménagement progressif des zones humides et côtières du Département de la Guyane soulève, comme dans beaucoup de régions côtières, des problèmes de gestion de l'espace littoral, dans un contexte d'une communauté d'acteurs qui peuvent aller jusqu'au "conflit d'usage". Les recommandations de l'agenda n°21 de la conférence de Rio en 1992 sur la gestion intégrée des zones côtières peuvent être le point de départ d'un "exercice" de réflexion s'appliquant à un contexte géographique spécifique : 320 km de linéaire côtier, 1270 km² de zones humides à l'ouest de Cayenne dont 5,2 % sont aménagées, une dynamique littorale très forte, en font une région où il est nécessaire que l'investigation scientifique s'appuie sur une importante base de connaissance. Parmi les méthodes utilisées pour mieux décrire les 4 000 km² au total des zones humides du Département, l'utilisation des données de télédétection est un atout majeur : plusieurs programmes, depuis 1987, ont permis de confronter l'expérience de terrain avec des données optiques (Spot, Landsat), mais aussi radar (ERS1, projets pilote de l'ESA n°12).

L'utilisation des données satellite, qui convient parfaitement à la description de ces vastes espaces souvent difficiles d'accès, est intégrée à plusieurs niveaux de la démarche : nous montrons comment l'on peut analyser le linéaire côtier avec les données radar afin de qualifier, à un instant donné, les échanges entre l'océan et les zones humides. Nous montrons également comment les données optiques permettent d'aborder le problème de la cartographie thématique et comment celle-ci s'insère dans un problème, plus délicat, de description des unités écologiques et de classification des zones humides. Enfin, par l'utilisation dans certains cas particuliers des données radar multitemporelles, il est possible d'aborder des processus dynamiques en hydrologie des zones humides.

La réflexion est ensuite ouverte vers les moyens et les méthodes à utiliser pour obtenir des concepts génériques sur le fonctionnement de ces espaces, et ce qu'apporte une démarche systémique dans le contexte de "gestion intégrée".

Abstract

The progressive planning of wetlands and coastal zones in Guyana raises, as it is the case in many regions, problems of the littoral planning, and it is in a context of stakeholders which can lead to the "conflict of usage". N°21 diary recommendations from the 1992 RIO Conference on the integrated coastal area planning can be the start of reflection on this specific geographical context: 320 km coastline, 1 270 km² wetlands in western Cayenne (5,2 % being planned), and a very important coastal dynamics shape some kind of region where the scientific investigation is necessary for the large knowledge base. In order to obtain a better description of the Guyana 4 000 km² wetlands, the use of remote sensing data is a very important advantage : since 1987, several programs have allowed to confront the fieldwork experience with optical data (SPOT, LANDSAT), and radar data (ERS1, pilot projects from ESA N°12).

The use of satellite data, perfectly suited to the description of these wide spaces, being often difficult to be accessed, is associated to several levels: we show how the coastline is able to be analysed with radar data in order to qualify, during a given moment, the exchanges between the ocean and wetlands. We also show how optical data let the thematic cartography problem to be approached and how the latter finds its place in a more difficult problem of description of ecological units and wetlands classification. Through multitemporal radar data use, in some particular cases, it is possible to approach dynamic processes in hydrology of wetlands.

Then, the reflection is opened towards means and methods in order to obtain generic concepts of wetland functioning, and its contribution in the context of "integrated planning".

REGIONAL ASSESSMENT OF WATER RESOURCES WITH ARCINFO CASE STUDY OF THE NIGER RIVER BASIN

Jean-Marc FAURES*, Mathieu BOUSQUET*

*FAO, AGLW, Viale delle Terme di Caracala, 100 Rome, Italie

Abstract

The United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 1992, called for sustainable management of land and water resources for agricultural development. Assessing the potential and monitoring the development of these resources at global and regional scales require considerable amounts of data collection and processing.

At FAO, soil and climatic resources are assessed and monitored on a regional basis with the help of the geographic information system (GIS) ArcInfo. Geographical representation of water resources for the purpose of regional assessment, planning and monitoring is much more complex and requires the development of specific technical capacities which are not yet widely used and tested.

A tool is now being developed to help assess water resources at a regional scale. Based on ArcInfo, it combines the classical approach of hydrologic modelling with the geographical capacities of GIS. It is currently being tested on the Niger River Basin, a large basin in West Africa.

GIS makes use of available coverage at continental scale on topography, soil moisture capacity, geology, precipitation, potential evapotranspiration, vegetation and rivers. This information constitutes the basic data used as input to three hydrologic models: a vertical water balance model, a transfer function and a combination of groundwater models. Time series of runoff and precipitation at given locations are used to calibrate the models.

The model produces geographical estimates of effective precipitation (the part of precipitation which does not evaporate) and of surface water and groundwater resources for each sub-basin of the Niger basin, as well as contributions from upstream to downstream sub-basin and exchanges between administrative regions or countries. Hydrological regime at any point in the basin is represented through monthly distribution of runoff. Specific problems related to the modelling of flat areas like the Inner Delta are also discussed in the paper.

The final objective of this programme is to build a tool for planning of water resources development. The model is designed to address questions such as the impact of withdrawal on downstream hydrological regime or the impact of development scenarios on water resources in neighbouring regions or countries within a basin. Applications for water resources assessment at national level are discussed and examples of preliminary experiments are described.

ASSESSMENT OF IRRIGATION POTENTIAL IN AFRICA USING ARC-INFO

Mathieu BOUSQUET*, Jean-Marc FAURES*

*FAO, AGLW, Viale delle Terme di Caracala, 100 Rome, Italie

Abstract

Irrigation potential is usually estimated at project level, but studies at national, regional, continental, or most important, river basin level, are rare. A good estimate of irrigation potential is necessary for large-scale planning of water resources management. In 1995, the Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO) undertook a study to assess the irrigation potential of Africa, using a Geographical Information System (GIS).

Two main physical factors determine irrigation potential: water resources and land suitability for irrigation. To integrate information on land and water at the river basin level, knowledge of irrigation water requirements per unit of land area is necessary. Irrigation water requirements depend on irrigation cropping patterns and efficiency which are determined on the basis of the actual situation, and on climatic information. This information is provided from selected GIS coverages and the climate database of FAO. Water requirements are computed using CROPWAT: a model for calculation of crop water requirements.

Zones of homogeneous cropping pattern are defined on the basis of information of actual irrigated crops: Africa is divided into 24 zones, taking into consideration the types of crops, cropping intensity and cropping calendar. These 24 zones have been digitized and used in Arc-Info.

Long-term average rainfall and potential evapotranspiration data for 1025 climate stations spread over Africa, available in the climatic database FAOCLIM, are used. As these data refer to specific locations, Arc-Info was used to draw Thiessen polygons which determine the area of influence of each station. The quality of climatic data is then verified by plotting yearly average rainfall and ET_0 data using Arc-Info thematic maps, and comparing them with other existing coverages.

Combining the cropping pattern zones (24) and the climate station data represented by Thiessen polygons (1025) in Arc-Info results in 1437 basic map features, homogeneous in irrigation cropping characteristics and climate. These features constitute the basic mapping units on which all further calculations are carried out. Net irrigation water requirements are computed for different levels of cropping intensity. Assessment of irrigation efficiency by cropping zones allows for the computation of gross irrigation water requirements for each of the 1437 units. Finally 50 areas of homogeneous cropping pattern and gross irrigation water requirements are identified, based on a combination of Arc-Info and a manual adjustment.

The methodology has been tested and calibrated for Egypt, where the figures for water requirements resulting from the computation could be compared with those for agricultural withdrawal and irrigated land, known with precision in that area.

Combining information on gross irrigation water requirements, area of soils suitable for irrigation and available water resources by basin eventually results in an estimation of the physical irrigation potential for Africa.

**EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE SOCLE
PAR L'ETUDE DES FRACTURES A L'AIDE DES DONNEES LANDSAT
DANS LE BASSIN D'ODIENNE**

Issiaka SAVANE*, B. GOZE**, H.Q. GWYN**

* Institut d'Ecologie Tropicale 08 B.P. 109 Abidjan 08

** CARTEL, Université Sherbrooke, P.Q Canada J1K2R1

Résumé

Dans le cadre d'un projet de recherche entre U R E F , I.E.T. et le CARTEL de l'Université de Sherbrooke, visant à évaluer le rôle de la télédétection dans la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin, une étude structurale et géologique par télédétection a été entreprise. Cette étude avait pour but, l'inventaire des réseaux de linéaments principaux dans le choix des sites privilégiés des forages.

L'interprétation géologique des images associée aux données géologiques déjà existantes sur la nature des roches, a permis d'établir une carte d'unités géologiques et des axes structuraux majeurs sur des formations constituées en grande partie de granite et granite migmatitique. L'exploitation des données provenant à la fois des études sur l'affleurement, de l'interprétation des photographies aériennes, et des images satellitaires a permis de dégager les grandes orientations tectoniques suivantes : No-20°, N30-60°, N80-100°, et N120-170°, dont l'âge varie du Paléozoïque inférieur au Crétacé.

Les diagrammes de fréquence ont permis de déterminer les grandes directions de fractures de tension pouvant parfois présenter des ouvertures productives. Ce sont les directions NE, NW, NS. Les traitements numériques ont porté sur le rehaussement, les rapports et combinaisons entre bandes TM et la classification semi-dirigée.

On a retenu les composantes principales et le rapport $TM\ 7 - TM\ 4 / TM\ 7 + TM\ 4$.

Abstract

In a project setting between UREF - EET and the CARTEL, aiming at to evaluate the remote sensing implication in fractured- rock and underground water research, a structural and geological study has been undertaken. The purpose of this study was to make the inventory of major lineament networks in best well-yield locations. Order to find the geological images 91 interpretation together with existing geological data on rock nature, allowed to establish geological and structural map. Geological formations are mainly constituted of granite and granite-migmatitic. Data exploration providing by both outcrop, aerial photographs and satellite images studies allowed us to put evaluate the following high tectonic trends : N0-20°, N30 -60°, N80-100° and N120-170°, which age ranges from inferior Palaeozoic to Cretaceous.

Frequency diagrams allowed us to determine high tension fracture directions which can often be present opening productive. These directions are NE, MN, NS. Numeric processing consisted of enhancement, ratio and combinaison between TM bands and classification semi-diriged. We retained principal components and the $TM\ 7 - TM\ 4 / TM\ 7 + TM\ 4$ ratio.

WATER RESOURCES MANAGEMENT IN SONORA, MEXICO, USING GIS, REMOTE SENSING TECHNIQUES AND MATHEMATICAL MODELS

Hector M. ARIAS*

*CIDESON, Reyes y Aguascalientes, Esq., Hermosillo, Sonora, Mexico 83 190

Abstract

The state of Sonora is the second largest in Mexico, about 172 million ha, and with prevalent semi-arid and arid characteristics in the north-west part of the country. The natural resource management requires a huge volume of information to take wiser decisions; for example, how many areas would be devoted to preservation, or what are the most vulnerable habitats in the state, and what are the regions that have the best chances to generate revenue with the least investment, and of course, what are the best land use and its future development. In order to answer those questions, a project was started to (1) develop a natural resources inventory, (2) analyse the land degradation processes and its effects on human activities, and (3) provide alternatives for economic development without destroying the environment.

Since a lot of information required was already available in maps, Geographic Information Systems were used based on digitization of those maps. Remote sensing was also used to update information, since many of the maps were outdated or not available. Then, GIS were also used to analyze the information in terms of land degradation processes, namely erosion, salinity, water and air pollution, coupling mathematical models to GIS. Finally, a land capability map with the best options in terms of biodiversity and habitat location, as well as socio-economic information and degradation processes, was produced to provide options for economic development or investment on the main human activities of the state to the decision makers.

UTILISATION DE LA TELEDETECTION POUR LA SELECTION DE SITES FAVORABLES A L'IMPLANTATION DES RETENUES COLLINAIRES ET L'AMENAGEMENT DES BASSINS VERSANTS DE LA REGION DE BEJA - TUNISIE

M. Salah BEN AMOR*, Mlle. Amel MAKHLOUF*, M. Ph. DUTARTRE**

*C.N.T Centre National de Télédétection, BP 200, 1 080, Tunis cedex, Tunisie-
**BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières - France-

Résumé

Une contribution importante à la lutte contre la désertification et pour une meilleure gestion des eaux de surface peut être apportée par la réalisation de retenues collinaires. Ces dernières sont très vulnérables aux transports solides induits par l'érosion donc, l'importance affecte directement la durée de vie de ces ouvrages.

L'étude menée sur la région de Béjà - Tunisie s'articule en deux phases. La première consiste en une description du milieu physique basée sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire et des données exogènes. Elle permet de dresser une carte de sensibilité à l'érosion. La seconde phase consiste, en s'appuyant sur les conclusions des résultats précédents, à rechercher par éliminations successives les sites les plus favorables à l'implantation de retenues collinaires, sur des critères de sensibilités à l'érosion, de conditions topographiques, hydrologiques, géologiques et socio-économiques.

LA TELEDETECTION COMME MOYEN D'APPUI A LA PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU (CAS DU SUD-OUEST DU BURKINA FASO)

Karim TRAORE*

*Ministère de l'Eau, Direction Régionale de l'Hydraulique, Hauts Bassins, Burkina Faso

Résumé

Pays Sahélien, le BURKINA FASO est situé en Afrique de l'Ouest. La pluviométrie annuelle varie de 500 mm au Nord à 1 200 mm au Sud, donnant naissance à des cours d'eau pérennes dans la partie sud-ouest du pays (COMOE, MOU HOUN, BOUGOURIBA).

Malgré le caractère sahélien du pays, la zone du Sud-Ouest, d'une superficie de 60.600 km², recèle d'importantes ressources en terre et en eau. Cette zone connaît une intense activité de mobilisation et d'utilisation des eaux : périmètre sucrier de la SOSUCO (3.800 ha), périmètre rizicole de la vallée du Kou (1.000 ha), 1.300 ha de bas-fonds améliorés avec l'opération riz COMOE, la plaine de DOUNA (400 ha), périmètre rizicole de KARFIGUELA (350 ha).

Ces potentialités expliquent la présence du nombre de plus en plus croissant de migrants sur les terres du Sud-Ouest où se développent simultanément divers projets et activités sans une vision prospective et sans cohérence dans les aménagements. A cela s'ajoute la faible croissance des ressources en terre et en eau en vue de leur planification et de leur gestion durable.

Face à ce constat, la Direction Régionale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins, à travers le programme de Développement et de Valorisation des Ressources en Eau dans le sud-ouest du BURKINA FASO (RESO), sur Financement du Fonds Européen de Développement (7^e FED), a entrepris la réalisation d'un Schéma Directeur et planification qui servira de cadre à la collecte de données indispensables pour la planification et la gestion des Ressources naturelles, dans une approche écosystémique ; ces données seront intégrées dans un système d'information géographique (S.I.G.).

Pour la réalisation de ces objectifs, l'utilisation de l'outil télédétection a été privilégiée. Ainsi, la caractérisation de la situation actuelle (occupation des sols, hydrologie, etc..) sera basée sur l'analyse des images Landsat-TM de 1994. L'évaluation de la dégradation des sols se fera à l'aide de deux séries d'images (Landsat MSS et TM) séparées d'une dizaine d'années (1984 et 1994). Dans certains cas, l'études des photographies aériennes complétera les observations de terrain prévues de 1994 à 1997.

L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DE LA REGION HYDROLOGIQUE 36 (NORD MEXIQUE)

Luc DESCROIX*

* ORSTOM, AP 225-3, 35071, Gomez Palacio ZI, DGO, Mexique

Résumé

L'étude des ressources en eau des zones arides et semi-arides se prête à l'utilisation de l'outil d'imagerie satellitaire du fait :

- de la grande extension des zones concernées (ici 92 000 km² pour la seule RH36),
- du manque de données récentes au niveau des ressources naturelles (eau, sol, végétation),
- de la bonne qualité et de la répétitivité des scènes (dues à la faible nébulosité).

La RH36 est un grand bassin endoréique dont les eaux de ruissellement sont intégralement utilisées pour l'irrigation ; une surexploitation de l'aquifère y a déséquilibré le bilan volume disponible/volume utilisé et une meilleure connaissance de l'un comme de l'autre s'avère indispensable.

1) Détermination des unités de végétation pour l'étude du ruissellement

Le but du projet étant la détermination des ressources en eau de ruissellement, l'imagerie satellitaire sert à la définition de zones supposées homogènes vis-à-vis du ruissellement; sur ces zones sont ensuite installés des bassins-versants et parcelles de mesure du ruissellement dont les résultats peuvent être extrapolés grâce aux zones définies par télédétection.

D'autre part, l'évolution de la couverture végétale sur plus de 20 ans (depuis le lancement de premiers Landsat MSS) est mise en parallèle avec les données hydrométriques existantes du réseau mexicain, afin de connaître l'impact du surpâturage et du déboisement sur les écoulements.

2) "Presones" et eaux superficielles

La multitude des retenues collinaires de petite taille ("presones") rend leur inventaire difficile : leur repérage sur scène SPOT et l'essai d'extrapolation sur des scènes Landsat MSS, bien moins coûteux et pouvant couvrir toute la zone, permet de localiser la plus grande partie d'entre eux (le plus souvent par l'auréole surpâturée qui les entoure).

3) Prospective : ruissellement et télédétection

Dans une optique plus prospective, ce projet doit aussi être mis à profit pour tenter de définir des démarches scientifiques destinées à mettre en évidence les corrélations existant entre les radiométries et les facteurs du ruissellement, ainsi que toute caractéristique hydrique du bassin versant.

A 2

GESTION DES RESSOURCES
Approche locale

WATER MANAGEMENT
local approach

DE L'AERIEN AU SATELLITE FROM PLANE TO SATELLITES

Christian PUECH* et Joël CARETTE**

*LCT CEMAGREF /ENGREF, 500 rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier, Cedex 5, France

**Consultant, 91000 IVRY

Résumé

Même en Afrique, la télédétection peut s'entendre avec des capteurs multiples, et les informations utiles à l'aménageur peuvent (et doivent) dépasser les seules données satellitaires, souvent difficiles à utiliser au niveau local. Notre exposé est basé sur un ouvrage de synthèse portant sur l'utilisation de données spatiales en Afrique de l'Ouest pour la connaissance de petits bassins versants en vue de leur aménagement. Réalisée pour le compte du Ministère de la Coopération, cette synthèse s'appuie sur plusieurs projets, de la Mauritanie au Niger, utilisant des données spatiales de divers supports : photo aérienne de type amateur ou professionnelle, ou images de satellites à haute résolution.

Une première partie pose les bases de la réflexion : l'utilisation rationnelle de ces outils passe en effet par une réflexion préalable sur les échelles de travail en fonction des objectifs testés. Les images satellites et les photographies aériennes se situent aux deux bouts de la chaîne de vision actuellement disponible : les échelles de travail vont du 1/100 000 (schéma directeur, niveau régional où l'imagerie satellitaire devient très efficace.) au 1/5000 (aménagement local pour lequel les photographies aériennes sont précieuses). Ces documents deviennent très utiles pour les zones d'accès difficile, par leur rapidité d'obtention et comme outils de communication. A eux seuls généralement insuffisants, ils tirent tout leur intérêt de la complémentarité externe avec les informations traditionnelles, et interne par utilisation des différentes échelles.

Quelques exemples d'application pour une meilleure connaissance des bassins versants en Afrique de l'Ouest illustrent ces réflexions : cartographie globale, érosion, plans d'eau, plaques de sol nu ...

Abstract

Even in Africa, useful remote sensing data for management are not only satellite images : they also include others sensors. At local stage, studies uses with difficulty satellite data due to its too big resolution. A synthetic work has been done about uses of remote sensing in West Africa for a better knowing of small catchments. Done for French Cooperation Ministry, this study is based on a few projects for management of catchments from Mauritania to Niger, using various sensors : professional or not aerial photographs and high resolution satellite imagery.

In a first part we present some preliminary considerations and controls : rational uses of these tools in management from global to local stage needs interrogations about scales and objectives to adapt one to each other. For these objectives, useful scales vary from 1/5000 to 1/100 000. Interesting objectives also vary gradually : local one with a great interest of aerial photographs to regional one where satellite images are OK. All these data are useful in areas with difficulty of access, where usual means are expensive. A great interest is the rapidity of taking data. Alone, RS data are generally not useful, but became of great interest when combining with others ground data and using various scales.

Some examples of applications illustrate these possibilities of uses in Western Africa catchments : for global cartography, erosion, ponds, bare soils areas, ...

**USING REMOTE SENSING AND ANTHROPOLOGY
AS DATA INPUTS INTO A GIS TO OPTIMIZE SITE LOCATION
OF WATER HARVESTING SCHEMES IN SEMI-ARID AFRICA**

Eric PATRICK*

*Department of Geography, University College London, 26 Bedford Way, London, U.K..

Abstract

I am attempting to develop an operational methodology which could be used by intermediate size western non government development agencies or government ministries to quickly assess the potential of an area (different possible scales) for Water Harvesting, on both physical and human criteria. Landsat, 1:50,000 and 1:4,000 scale aerial photography will be used together with ground survey to assess the physical suitability of an area for runoff and run-on (i.e. good cropping soils at run-on location). Particular attention will be paid to the degree to which surface crusting can be detected remotely and can be related to runoff potential. As a function of the scale of remote sensing data input available, an area will be assessed both for macro (i.e. topography controlled) and micro (i.e. crust controlled) catchment potential. Rainfall simulation will be used to assess the runoff potential of crust types, which will then be related, if possible, to characteristics of said crusts detectable from remote sensing.

Anthropological techniques of social investigation, known collectively as Participatory Rural Appraisal, will be used to generate data about local social, economic, and political constraints to participation by a target population in an intended water harvesting scheme. Additionally, physical ground data (for example soil type) will be collected on the basis of indigenous knowledge and compared to results achieved by conventional scientific modes of data collection and classification. Western and local maps of opportunities and constraints will be compared. An attempt will be made to “spacialize” socio-economic data such that it is in a form which can be accommodated by a GIS; thus socio-economic constraints and opportunities for water harvesting will be mapped. As the socio-economic data does not necessarily neatly match the physical data structure, particular attention will be paid to developing practical techniques for harmonizing them.

The study area is central Kenya, approx. rainfall 500 mm, plus a second comparative case study site to be selected in francophone sahelian west Africa.

DE LA TELEDETECTION A LA GESTION D'UN CADASTRE IRRIGATION DANS LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

A. KILLMAYER*

*GEOSYS, 3 rue Hermès, 31 526 Ramonville, France

Résumé

La SAED, société d'aménagement du delta du SENEGAL, a la responsabilité d'assumer le pilotage du plan directeur de la vallée. Ses fonctions sont au nombre de 5 :

- coordination du développement rural intégré,
- gestion de l'eau,
- appui conseil aux organisations paysannes,
- maîtrise d'oeuvre des aménagements,
- suivi et évaluation.

Une telle mission pluridisciplinaire est à remettre dans un contexte de croissance, où l'ouverture du foncier et l'accès facile au crédit ont provoqué une implantation rapide des organisations paysannes.

La fonction suivi-évaluation revêt donc une importance primordiale, puisqu'elle permet la connaissance de l'existant sur laquelle les autres viennent s'appuyer.

Le fonds d'aide et de coopération français (FAC) a confié à un consortium, composé du BDPA et du CIRAD, une tâche de support, d'assistance technique et de transfert de savoir faire dans les domaines de l'appui conseil et du suivi et de l'évaluation.

Le BDPA s'est appuyé sur sa filiale SYSAME/ GEOSYS pour réaliser des tâches très spécifiques de spatialisation de l'information d'occupation du foncier, des inventaires de cultures de riz irrigué, et de constitution de bases de données géographiques numériques. Ces actions, ponctuelles et réduites en regard de l'opération d'ensemble réalisée par le consortium, s'inscrivent néanmoins dans la phase initiale de l'élaboration d'un observatoire de l'état de l'utilisation des sols, de l'irrigation, et de l'organisation des structures d'exploitation irriguées.

La SAED possédait déjà une base de données alphanumériques des aménagements hydro-agricoles et des organisations paysannes associées. GEOSYS, grâce à l'utilisation de la télédétection, a permis à la SAEDU, aidée par les experts du consortium, de spatialiser cette information : c'est à dire de dresser des schémas des structures, d'identifier des structures non présentes sur les fichiers de base, et de positionner les stations de pompage, les canaux d'alimentation, de drainage et les infrastructures. A l'aide de ces interprétations et des visites de terrain, GEOSYS fut donc en mesure de constituer une base numérique géographique des Unités de Mise en Valeur (UMV), de les caractériser, et de mesurer les surfaces réellement en production à l'intérieur de ces unités.

Cet inventaire graphique est à rapprocher du concept de casier-irrigation, sorte de cadastre d'utilisation foncière non relié au titre de propriété, mais aux organisations paysannes. GEOSYS a élaboré une version 0 (1992), à partir d'images SPOT XS, puis a réalisé la version 1 (1993) à partir d'une couverture XS et PAN en niveau 2B, calculée à partir de levés GPS. Devant le succès de l'opération, la SAED a demandé en 1994, pour fin 1995, une acquisition et un traitement satellite qui permettront une mise à jour de la base de données. Cette mise à jour pourra être renouvelée annuellement.

POSITIONNEMENT, PRODUCTIVITE ET GESTION DES FORAGES EN MILIEU FISSURE DE CÔTE D'IVOIRE PAR TELEDETECTION ET SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

J. BIEMI †, J.P. JOURDA*, S. DESLANDES**, H. GVYN**

*Université Nationale de Côte d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

**CARTEL, Université de Sherbrooke, Québec

Résumé

Les traitements numériques des images satellitaires du bassin de la Haute Marahoué ont porté sur les techniques de rehaussement, les composantes principales, le rapport de bandes TM7-TM4/TM7+TM4 et la combinaison TM6+TM7 pour l'interprétation visuelle. Les données obtenues ont été intégrées et interprétées à l'intérieur d'un système d'information géographique à référence spatiale (SIHRS); ce qui a permis d'identifier le complexe volcano-sédimentaire du sillon intracratonique de Boundiali et la masse du granite circonscrit de Séguéla, dont la forme n'a pu être décrite jusqu'à ce jour par les méthodes classiques. La confection d'un bloc diagramme dans le SIHRS a servi à l'étude des limites inférieures des fractures ouvertes et du profil d'altération dans le socle cristallin, captés par de nombreux forages dans la région. Une carte des fracturations, couvrant une superficie de 12 500 km², illustre assez bien des mégafractures d'importance régionale dans le socle avec des orientations N170-190, N30-60, N80-100 et N120-160, caractéristiques de la tectonique cassante en Afrique de l'Ouest. Une étude sectorielle des relations entre les accidents et le réseau hydrographique a révélé que les principaux cours d'eau circulent essentiellement dans les axes tectoniques.

Les écoulements et les possibilités de formation des réservoirs d'eaux dans les milieux fissurés peuvent être appréhendés grâce à l'étude des perméabilités induites par les fractures. Cependant, jusqu'à maintenant, les résultats obtenus par cette technique sont restés tributaires de l'importance et surtout de la densité des fractures susceptibles d'être visualisées sur les photographies aériennes classiques. Les images Landsat TM du bassin versant de la Haute Marahoué, traitées numériquement et interprétées à l'intérieur du SIRHS, ont considérablement amélioré cette approche grâce à une forte densité de fractures (62 fractures en moyenne pour 1,44 km²), repérables sur les images satellitaires rehaussées. En effet, les perméabilités induites, obtenues par ce procédé, varient entre 0,11 et 0,66 10⁻⁴ m s⁻¹, contre des valeurs de 10⁻⁸ m s⁻¹ par les méthodes classiques. Par conséquent, elles sont voisines des perméabilités réelles des terrains fissurés affectés par l'altération.

Les relations possibles entre les quatre principales directions d'accidents relevées sur les images (N-S, NE-SO, E-O et NO-SE), l'emplacement de 103 forages en exploitation et la détermination des profils de productivité associés aux directions préférentielles des linéaments, montrent que dans le bassin, 68 % des forages sont implantés à l'intérieur à moins de 200 mètres des linéaments, avec 27 % des forages creusés directement sur un linéament. Tous les forages en exploitation dans le bassin présentent une position plus ou moins idéale par rapport à au moins une direction majeure de linéament, la distance maximale étant de 1,1 km pour les quatre directions. Les accidents NO-SE sont les plus productifs, avec 63 % de débits élevés (débit compris entre 6 et 14 m³ h⁻¹) contre 25 % pour ceux orientés N-S; ces deux directions interviennent pour plus de 62 % des cas de guidage dans le choix du site des ouvrages.

**APPORT DE LA TELEDETECTION DANS LA MOBILISATION
DES RESSOURCES EN EAUX DE SURFACE
ET LA GESTION DU SECTEUR IRRIGUE
Région de la basse vallée de Medjerda (Nord Tunisie)**

Lamine AOUNI*

*C.N.T., Centre National de Télédétection, BP 200, 1 080 Tunis cedex, Tunisie

Résumé

L'objectif de ce travail est de présenter une application de la télédétection dans l'identification et la cartographie des ressources en eau de surface dans une zone à vocation agricole et à forte consommation d'eau : la basse vallée de Medjerda.

En effet, en période de sécheresse, les zones irriguées se trouvent ainsi confrontées à un défi majeur, celui de l'exploitation rationnelle d'une ressource naturelle de l'eau, de plus en plus rare et chère.

Les images satellites à haute et moyenne résolution spatiale HRV de SPOT et TM de LANDSAT (10-20 m et 30 m), avec une bonne fréquence de prise de vues et la possibilité de traiter de vastes régions, pourraient apporter une contribution à l'inventaire des ressources en eaux de surface. La possibilité d'un suivi de l'évolution de cette ressource permet de constituer une base d'informations numériques et cartographiques sur la zone d'étude. Cette base d'informations peut aider à optimiser l'exploitation de la ressource en eaux dans la zone d'étude et permettra une gestion rationnelle du secteur irrigué en fonction de ses exigences et des choix de planification économique du pays.

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE PAR TELEDETECTION DU BASSIN HYDROGEOLOGIQUE DE TAZA

Mohamed Rachid EL MESLOUHI*

*Direction Générale de l'Hydraulique, Rabat, Maroc

Résumé

L'étude présentée montre comment il est possible, grâce à une approche multi-échelle, d'obtenir un bâti structural d'une région permettant d'aider à comprendre certains phénomènes hydrogéologiques d'une région karstique.

Une des originalités de cette étude est l'extrapolation du bâti structural, clairement apparent au niveau du Moyen Atlas, sous une couverture marneuse rifaine à morphologie peu marquée, afin d'orienter l'implantation de profils géophysiques pour l'orientation des campagnes de reconnaissance hydrogéologique.

APPLICATION OF REMOTE SENSING FOR THE HYDROGEOLOGIC STUDY THE TAZA BASIN

Abstract

This study shows how it is possible to obtain a regional tectonic framework to understand hydrogeologic processes in a karstic region. The methodology is based on multiscale approach.

The originality of this study lies in the possibility of extrapolation of a regional tectonic framework, clearly apparent in the Middle Atlas mountain and disappearing under a confusing overburden marl formation of the Rif, to guide geophysics campaign.

**SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET GESTION DE RESSOURCES EN EAU
D'UN BASSIN VERSANT AFRICAINE
Cas du bassin versant du Massili au Burkina Faso.**

Madjyra NGUETORA *

* EIER, BP7.023, Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé

Notre étude a pour objectif la conception d'un SIG pour la gestion des ressources en eau en milieu semi-aride africain. Cette approche doit permettre de mettre en place un outil d'aide à la décision permettant la programmation des actions de mobilisation ou d'aménagement des eaux. Cet outil doit en outre permettre de simuler différents scénarios afin de prévoir et de faire face aux crises nées de l'insuffisance des ressources pendant les années de faible pluviométrie.

Le bassin versant retenu est celui du Massili situé au centre-est du Burkina Faso. Celui-ci a une superficie de 4.460 km², ce qui permet une étude cohérente et exhaustive. Il est aménagé et compte plus d'une quinzaine de petits et micro-barrages dont le plus important (Loumbila, 35 millions de m³) est principalement destiné à l'alimentation en eau de la ville de Ouagadougou

La télédétection satellitaire sera utilisée comme outil d'inventaire de certains usages de l'eau. Son intérêt dans notre étude est de permettre :

- une délimitation plus précise du bassin versant étudié
- une mise en évidence du réseau hydrographique accompagnée d'une évaluation de sa dégradation
- un inventaire des bas-fonds, zones inondables et éventuellement leur exploitation
- l'établissement d'une carte d'occupation des sols
- éventuellement une correction ou une mise à jour des informations digitalisées sur les cartes (les aménagements nouveaux ou ceux ayant disparu)
- l'établissement d'un inventaire des retenues d'eau (mares et micro-barrages) et une éventuelle évaluation de leur cubature et durée de vie annuelle [
- la mise en évidence de l'usage des eaux des retenues pour l'irrigation
- la mesure de l'importance des éventuels piratages d'eau sur tête-morte des canaux d'irrigation

B 1

**MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET
DETERMINATION DE PARAMETRES
Caracteristiques hydriques des sols**

**HYDROLOGICAL MODELLING
AND
DETERMINATION OF PARAMETERS
Soils hydric characteristics**

TELEDETECTION, ETATS DE SURFACE ET OBSERVATIONS AU SOL

Jean-Marie LAMACHERE*

*Laboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

Résumé

En Afrique de l'Ouest, on pense généralement que l'amélioration de l'estimation des ruissellements à l'échelle des petits bassins versants viendra d'une meilleure connaissance des aptitudes des sols au ruissellement (Rodier et al., 1984). Les travaux des hydrologues et pédologues de l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest (Casenave et Valentin, 1989) ont montré que l'aptitude des sols au ruissellement dépendait fortement de l'état de surface des sols, notion qui cumule l'observation de la végétation, du sol et de son organisation superficielle.

Or la télédétection satellitaire haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 20 m (SPOT XS) ou 30 m (LANDSAT TM). La détection est limitée aux couches superficielles de la surface du sol en l'absence de nuages. L'accès aux couches inférieures ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs en surface de la texture et de la structure du sol. L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface nécessite donc la réalisation d'observations au sol permettant de préciser, aux échelles d'observation de l'appareil embarqué à bord du satellite, les principales caractéristiques des états de surface. Pour ce faire, nous présentons dans cet article une méthode d'observations au sol des états de surface bien adaptée à l'interprétation et à l'analyse numérique des images satellitaires.

La méthode proposée consiste, pour des bassins versants de superficie supérieure à 10 km², à réaliser la description au sol des états de surface par blocs contigus de 100*100 m, sur des distances de 2 à 3 km. Les repérages au sol sont effectués par l'emploi d'un GPS (Global Position System). Les observations sont ensuite normalisées et reportées sur des tableaux récapitulatifs permettant leur utilisation dans le traitement numérique des images. Pour des bassins versants de superficie inférieure à 10 km², les observations au sol sont effectuées sur des bandes rectilignes longues de 300 à 500 m, larges de 20 m qui procurent un taux de sondage équivalent et une meilleure précision dans la description des états de surface.

TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

Jean-Marie LAMACHERE*, Christian PUECH**

*Laboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

**L.C.T. CEMAGREF / ENGREF, 500 rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5 - France

Résumé

L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface permet d'envisager aisément une extension spatiale de la caractérisation de l'aptitude des sols à l'infiltration et au ruissellement en Afrique de l'Ouest. Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées dans cette région ont en effet montré l'influence déterminante de trois facteurs principaux sur le comportement hydrique des sols : le type de sol, le couvert végétal et l'organisation superficielle du sol (Casenave et Valentin, 1989).

A partir des observations de terrain décrivant les états de surface, la procédure cartographique proposée (Lamachère et Puech, 1995) consiste à réaliser deux décodages des images satellites.

Un décodage primaire définit trois plans thématiques :

- un plan *végétation* élaboré sur la base de classes de densité du couvert végétal,
- un plan *sols*, différenciant les sols par leur granulométrie superficielle,
- un plan *occupation du sol*, séparant les zones cultivées des zones non cultivées.

Un décodage secondaire permet de caractériser chaque classe radiométrique, résultant du traitement numérique des images, par leur composition en surfaces élémentaires types. Pour chaque classe radiométrique, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en surfaces types élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain.

Le croisement, dans un Système d'Information Géographique, des trois plans thématiques issus du décodage primaire permet également, selon une procédure analogue au décodage secondaire, la cartographie d'unités hydrologiques homogènes caractérisées, grâce aux observations de terrain, par leurs compositions en surfaces élémentaires. L'hypothèse forte selon laquelle les critères secondaires (composition en surfaces types élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires doit être validée. Au cas où elle ne le serait pas par la prise en compte des trois critères primaires, il faudrait y ajouter un autre critère suffisamment discriminant, par exemple le relief.

ETATS DE SURFACE ET HYDROLOGIE SUR UN PETIT BASSIN VERSANT SOUDANO-SAHELIEN DU NORD YATENGA

François GUILLET*

*La Pergola, E 8 Cours Malbosc, 34 080 Montpellier, France
Travail effectué en collaboration avec le CIRAD et l'ORSTOM

Résumé

Ce travail s'inscrit dans la lignée des études sur le fonctionnement hydrologique et la détermination de la ressource en eau des cultures au sein d'un terroir. Le bassin de Samniweogo fait partie du terroir de BIDI au Nord Yatenga (Burkina Faso). Il constitue un site de dimension intermédiaire (3 km²) au sein d'un dispositif emboîté : parcelle (ha), petit bassin (km²), grand bassin versant (50 km²).

Les observations de terrain sont effectuées sur des bandes longues de quelques centaines de mètres, larges d'une vingtaine de mètres et sur un ensemble de 75 sites ponctuels (100m²). Elles portent sur le couvert végétal, le sol et son organisation superficielle. La typologie des Surfaces de Référence du bassin est établie à partir d'une codification des observations effectuées sur les 75 sites et d'une étude statistique par les Distances Minimum de Tri. La typologie des bandes est définie à partir de leurs compositions en surfaces élémentaires types (Casenave et Valentin, 1989), ce qui permet de caractériser leur comportement hydrologique.

La cartographie des états de surface est établie après amélioration des contrastes par recalibration des histogrammes de chaque bande spectrale (adaptation dynamique). L'image utilisée est une image SPOT de début de saison des pluies (22-06-1987). Deux traitements sont réalisés sur cette image. Un premier traitement par photo-interprétation permet de dessiner les contours des unités cartographiques auxquelles sont associées la description des bandes. Un second traitement, numérique, permet de définir 8 classes radiométriques qui sont caractérisées par leur composition en Surfaces de Référence.

La topologie des surfaces du bassin versant est un sous-produit de la cartographie des états de surface. Elle permet d'envisager un nouveau type de modélisation hydrologique à l'échelle des versants et du bassin versant.

TRANSFORMATION DES ETATS DE SURFACE ET MODELISATION HYDROLOGIQUE SUR LE PETIT BASSIN VERSANT DE SAMNIWEOGO (REGION DE BIDI, PROVINCE DU YATENGA, BURKINA FASO)

François GUILLET*, Jean-Marie LAMACHERE**

* La Pergola, E 8 Cours Malbosc, 34 080 Montpellier, France

**Centre ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

Résumé

Au cours d'une même saison des pluies, un état de surface se transforme sous l'effet de l'humidification du sol, de l'impact des gouttes de pluie, du développement de la végétation herbacée ou du travail du sol.

A l'échelle interannuelle, la destruction du couvert arboré, arbustif ou herbacé, par la mise en culture ou le surpâturage, modifie durablement le comportement hydrologique des sols en transformant les états de surface d'un bassin versant.

En prenant comme exemple le petit bassin versant de Samniwéogo, en zone soudano-sahélienne au Burkina Faso, nous nous efforçons de présenter des documents cartographiques permettant de suivre l'évolution des états de surface. La caractérisation hydrologique de ces états de surface, selon la méthode proposée par Casenave et Valentin (1989) à partir d'une typologie des surfaces élémentaires et d'une analyse de leur répartition spatiale, est utilisée pour la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant. Une procédure originale a été mise au point dans le but d'y intégrer l'évolution des états de surface à l'échelle saisonnière et interannuelle ainsi que les intensités pluviométriques.

Cependant, dans son état actuel, ce type de modélisation ne fait pas intervenir les interactions et les liens dynamiques entre les différents types de surface.

REMOTELY SENSED DATA FOR HYDROLOGICAL ANALYSIS OF TWO SUB-CATCHMENTS OF THE MAREB RIVER (ERITREA)

R. COLOMBO*, A. MARTUCCI*, L. ONGARO*, P. SARFATTI*

*Istituto Agronomico per l'Oltremare, Via Cocchi 4, 50 131 Firenze, Italy

Abstract

The sustainable use of water resources is one of the main problems in Eritrea; the aim of the present work is to evaluate the contribution that remote sensing techniques can give to the analysis of water resources.

The study area is located in Eritrea, in the upper catchment of the Mareb river and it is about 500 km² in size.

A geomorphological map has been obtained by satellite image processing and aerial photo interpretation. The whole area has been divided in Terrain System and Terrain Units, and the main geomorphic processes have been mapped. A detailed field survey has been conducted in two different sub-catchments closed by two earth dams: the Shiketi and the Emni-Tzellim sub-catchments have different morphological and agricultural features. A Land Unit map has been produced for the two sub-catchments and each homogeneous unit has been described by geology, lithology, geomorphology, hydrology, soil, vegetation and land use. All information has been stored into a GIS and basins areas and shapes, as well as other morphometric parameters have been calculated. The hydrological study of these catchments has a great importance since they are representative of great part of volcanic areas of the eritrean highland where numerous earth dams are located, and where most of traditional agriculture is conducted.

Due to the lack of hydrological quantitative data, the only practical way to determine precipitation losses caused by infiltration was by means a simple runoff model : the procedure proposed by United States Soil Conservation Service (US-SCS) has been tested for estimating runoff and peak discharge of the watersheds.

The appropriate Runoff Curve Number has been estimated for each Land Unit by using remotely sensed data in conjunction with field data : Vegetation Index has been used to estimate vegetation cover type and grade; Brightness and Wetness have been used to classify soils into four hydrological soils groups as proposed by SCS. Runoff Curve Number has been used to estimate the unit peak flow rate for each Land Unit and the peak runoff rate of the whole sub-catchment. Results can be used to calculate expected water inflow in the dams and can be considered as preliminary data for basin management decisions.

CARACTERISATION DES ZONES HOMOGENES POUR DES FINS DE MODELISATION HYDROLOGIQUE

M. BERGAOUI*, Henri CAMUS**

*Enseignant et chercheur, ORSTOM, 1 004 El Menzah, BP 434, Tunis, Tunisie

**ORSTOM, 1 004 El Menzah, BP 434, Tunis, Tunisie

Résumé

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des problèmes d'érosion en Tunisie à travers un bassin versant expérimental de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama, Tunisie Centrale). Vue les limites d'application offertes par le logiciel DEMIURGE, nous avons été amenés à extraire le bassin versant en question, et à déduire ses caractéristiques géomorphologiques et hydrométriques, à partir du modèle numérique de terrain du bassin versant qui le contient en l'occurrence celui de Oued El-Hissiane. Ainsi nous avons pu obtenir, par superposition des cartes de pentes et des indices de Beven, les zones hydrologiquement homogènes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud.

L'extraction du bassin versant de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama, Tunisie Centrale) et la déduction de ses caractéristiques géomorphométriques et hydrométriques à partir du modèle numérique de terrain du bassin versant de l'oued El-Hissiane qui le contient ont permis d'obtenir, par superposition des cartes de pentes et des indices de Beven, les zones " grossièrement homogènes " du bassin versant de l'oued Ez-Zioud.

Mots clés : Topographie, Numérisation, Modèle, Homogène.

Abstract

In first time, we try to calculate the Digital Elevation Model (DEM) of Hissiane watershed with application program DEMIURGE. Thus, we proved the possibility to make henceforth topographic map numeration at large scale.

The extraction of Ez-Zioud wadi watershed and the deduction of geomorphometrics and hydrometrics characteristics of this watershed from Hissiane watershed DEM help us to obtain, after superposition of slop map and saturation degree map, some "identical zones".

Key words : Topography, Digital, Model, Homogeneous.

APPORT DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE DES ZONES CONTRIBUTIVES AUX ECOULEMENTS :

Cas du site de la Mare d'Oursi (Burkina Faso)

REMOTE SENSING AND DETERMINATION OF CONTRIBUTING AREAS

Example of Mare d'OURSIS (Burkina Faso)

Pascal VINÉ *

* Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF, 500 rue Jean-François Breton
34093 Montpellier cedex 5, France

Resumé

Le LCT conduit depuis plusieurs années un programme de recherche destiné à valoriser des approches spatialisées (utilisant entre autres techniques la télédétection et les systèmes d'information géographique), afin de parvenir à une meilleure connaissance et maîtrise des ressources en eau de surface, en vue notamment de la régionalisation hydrologique. L'utilisation de l'information géographique peut en effet permettre une prédétermination des paramètres régissant les relations pluie/débit, et par conséquent faciliter les futures tentatives de régionalisation.

Dans ce contexte, une analyse spatialisée de la relation pluie/débit a été développée au LCT. Elle s'appuie sur l'hypothèse que le bassin versant peut être partagé en zones homogènes vis à vis des écoulements, sur la base d'informations géographiques, notamment d'origine satellitale. Chacune de ces zones est caractérisée par un coefficient d'écoulement (hypothèse d'invariance) et est supposée contribuer au débit total proportionnellement à sa surface (hypothèse de linéarité). Une démarche par déconvolution utilisant plusieurs sous-bassins jaugés permet alors de déterminer ces coefficients d'écoulement. Cette analyse doit bien entendu être conduite à un pas de temps compatible avec les hypothèses du modèle.

Cette démarche présente deux intérêts majeurs : - elle permet, dans le cadre d'une approche déterministe, de tester l'aptitude à l'écoulement d'un zonage, et de produire une analyse en termes de mécanismes hydrologiques ; - elle offre la perspective d'une régionalisation.

Les premiers travaux conduits sur des bassins méditerranéens (Réal Collobrier, Massif des Maures, France) se sont montrés très prometteurs. Plusieurs zonages ont été étudiés (distinction selon les catégories végétales pour l'étude du rôle hydrologique de la végétation, partage fondé sur la proximité du réseau hydrographique pour l'analyse des processus de type « surfaces saturées contributives »).

Dans cet article, la démarche est mise en oeuvre sur des bassins versants présentant des conditions différentes, tant du point de vue climatologique (Sahel), que du point de vue des mécanismes hydrologiques (ruissellement de surface prépondérant), afin de tester la pertinence, la validité et les possibilités de régionalisation de l'approche. Ce travail s'appuie sur le site de la mare d'Oursi (Burkina Faso), et utilise les mesures hydrologiques et les analyses effectuées par l'ORSTOM de 1976 à 1981. Les phases suivantes sont développées :

- présentation de la démarche et de ses hypothèses, ainsi que des principaux résultats obtenus sur le bassin versant du Réal Collobrier ;
- partage de l'espace (bassins versants jaugés de la Mare d'Oursi) en zones hydrologiquement homogènes sur la base d'informations satellitales ;
- calcul, par déconvolution, de la relation pluie/débit pour chacune de ces zones, à différents pas de temps ;
- analyse des résultats et discussion.

Abstract

One of the main task of the Cemagref-ENGREF Remote Sensing Laboratory is to further the development of spatial approaches (using, among other techniques, remote sensing and geographic information systems), in order to improve understanding and management of surface water resources,

in particularly for hydrological regionalization. Indeed, geographical information can contribute to a better understanding of the parameters which explain the rainfall-runoff relation, and, thus, can make easier the future attempts to regionalize.

In this context, a spatialized analysis of the rainfall-runoff relation has been developed by LCT. This one is based on the hypothesis that the watershed can be divided in several hydrological homogeneous areas, with the help of geographic information (remote sensing data). Each homogeneous area contributes to runoff proportionally to its surface area. Then, on the basis of several basins, it becomes possible to estimate runoff coefficients for each homogeneous area. This analysis must be done for a time scale compatible with the model hypothesis.

This approach has two major interests :

- it permits to test the hydrological behavior of a partition of space, and to analyze this behavior in terms of hydrological process ;
- it permits to offer possibilities for future regionalization.

The first work undertaken on Mediterranean basins (Real Collobrier, Massif des Maures, France) is very promising. Different partitions of space have been studied (partition on the base of vegetation cover to study the role of vegetation on runoff, partition based on the distance to river in order to analyze the process linked to the « variable contributing areas » concept).

In this paper, the approach is undertaken for watersheds in different climatologic conditions (Sahel), and with different hydrologic process (runoff is predominant), in order to test the interest, the validity and the possibilities to regionalize the method.

This work is done on a site situated in Burkin Faso : La Mare d'Oursi, and uses data and information acquired by ORSTOM from 1976 to 1981. The main steps are the following :

- description of the method, its hypothesis, and the main results obtained on Réal Collobrier basin ;
- partition of space on the base of remote sensing data ;
- assessment of the runoff coefficients of each homogeneous area, at different time scales ;
- Analysis of the results and discussion.

ROLE DE LA TELEDETECTION DANS L'EVALUATION ET LA CARTOGRAPHIE DES EPANDAGES ARTIFICIELS DES CRUES DANS LES HAUTES STEPPES TUNISIENNES

Abdelkarim DAOUD*, J. TRAUTMAN**

*Faculté des Lettres, Département de Géographie, Sfax, Tunisie

**CNRS CEREG, URA 95, 3 rue de l'Argonne, F 67 083, Strasbourg, France

Résumé

L'insuffisance et l'irrégularité des précipitations dans les hautes steppes tunisiennes rendent nécessaire le recours à des apports d'eau supplémentaires dans tout effort d'intensification de l'agriculture. Les différentes civilisations anciennes ont pratiqué des techniques ingénieuses de mobilisation des eaux de ruissellement, et, parmi celles ci, l'épandage artificiel des crues. Mais, face aux besoins toujours croissants en eau d'irrigation, les agriculteurs des hautes steppes tunisiennes ont eu, de plus en plus, recours à l'utilisation des eaux des nappes phréatiques captées par puits de surface équipés en motopompes.

Cette modernisation de l'agriculture a entraîné un abandon presque total des techniques traditionnelles de mobilisation des eaux, transmises et enrichies de génération en génération et bien adaptées à ce milieu naturel fragile. L'exploitation effrénée de ces nappes a entraîné le rabattement inquiétant de leur niveau piézométrique. Outre ce phénomène, cette communication tente d'étudier, à partir d'exemples précis, le résultat du recours actuel à ces techniques anciennes d'épandage des eaux de crue, par la mise en place d'ouvrages modernes de dérivation sur les lits des oueds, dans le but d'irriguer des superficies supplémentaires dans les plaines d'épandage et de favoriser l'infiltration des eaux pour la recharge artificielle des nappes phréatiques, aux dépens du ruissellement.

Avec des enquêtes effectuées sur le terrain, la télédétection permet d'évaluer l'impact spatial des épandages artificiels, de les cartographier, et de repérer les sites potentiellement favorables à la mise en place de nouveaux ouvrages.

B 2

**MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET
DETERMINATION DE PARAMETRES
Bilan hydrique**

**HYDROLOGICAL MODELLING
AND
DETERMINATION OF PARAMETERS
Water balance**

USING ONE OR TWO LAYER MODELS FOR DETERMINING EVAPOTRANSPIRATION WITH REMOTELY SENSED DATA

E. HURTADO*, V. CASELLESand M. M. ARTIGAO***

***Department of Applied Physics, Agronomical School of Albacete, University of Castilla La Mancha, 02071 Albacete, Spain.**

****Department of Thermodynamics, Faculty of Physics, University of Valencia, 46 100 Burjassot, Spain**

Abstract

Knowledge of evapotranspiration is useful for different aims like water budget calculations, climatological and meteorological studies. In arid regions evapotranspiration is a significant and often the dominant water flux leaving the Earth's land surface, nearly all the inputs in the form of rain is lost through evapotranspiration, therefore the importance of this parameter for controlling watering schedule and determining crops productivity. We have applied this methodology to the Barrax and Tomelloso (Albacete, Spain) areas, pilot experiment zones of the EFEDA project. (Bolle and Langer, 1991).

UTILISATION DE LA TELEDETECTION SPATIALE POUR L'ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

A. CHEHBOUNI*, J. QI****, D. LO SEEN**, G. DEDIEU***, M. DAUBAS M***, B. MONTENY

*ORSTOM, 911 Av. d'Agropolis, B.P 5045, 34032, Montpellier, France.

**NASA-JPL, MS 300-233, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, 91109, CA, USA.

***CESBIO, 18 Av. E. Belin, 31055, Toulouse, France.

****USDA- ARS, Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona, USA.

Résumé

Les données de télédétection dans le visible et dans l'infrarouge thermique ont été largement utilisées pour estimer la distribution spatiale des composants du bilan d'énergie.

L'approche la plus répandue, dite instantanée, consiste à estimer le rayonnement net, le flux de chaleur dans le sol et le flux de chaleur sensible à partir, d'une part, des données météorologiques récoltées sur le terrain, et d'autre part, des variables télédétectées : la température de surface, l'albédo et l'indice de végétation. L'évapotranspiration réelle est ensuite déduite comme étant le terme résiduel de l'équation du bilan d'énergie.

La deuxième approche, dite dynamique, est basée sur l'utilisation d'un modèle de processus de type SVAT en conjonction avec un modèle de transfert radiatif et un schéma de minimisation numérique. Le principe de cette méthode consiste à forcer le modèle SVAT à restituer une signature spectrale de la surface en accord avec la mesure satellitaires.

L'objectif de cette étude est de tester la performance de ces deux méthodes en utilisant des données récoltées sur des surfaces agricoles et sur des surfaces naturelles. Les avantages et les limites associés à chacune des deux approches sont discutés.

METHODS TO ESTIMATION OF REAL EVAPOTRANSPIRATION USING REMOTELY SENSED DATA

Abstract

Remotely sensed surface temperatures (i.e. radiative surface temperatures) have been widely used in estimating spatially distributed energy balance equation components.

The general approach, called instantaneous approach, consists of estimating the sensible heat flux and available energy from micrometeorological and optical/thermal infrared remotely sensed data. Real Evapotranspiration is then derived as the residual term of the one-dimensional energy balance equation.

The second approach, called dynamic, consists of using a SVAT model in conjunction of radiative transfer model associated with numerical scheme. The principle of this approach is based on the minimization of the differences between measured and simulated remotely sensed data.

The objective of this study is to test the performance of both approaches using data from agricultural and natural fields. The advantage and the limitations associated with both approaches will be discussed.

EVAPOTRANSPIRATION ET TELEDETECTION INFRAROUGE THERMIQUE EN ZONE ARIDE ET SEMI-ARIDE

D. TROUFLEAU*

*LCT CEMAGREF-ENGREF, 500 rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier cedex 5, France

Résumé

La disponibilité de données satellitaires dans l'infrarouge thermique (NOAA AVHRR, Landsat TM) a permis de développer de nombreux outils pour le suivi de la consommation en eau des couverts végétaux par télédétection à des échelles de temps et d'espace variées: estimation du flux d'évapotranspiration instantané ou au pas de temps journalier, stress hydrique (CWSI, SDD)... Le suivi spatialisé de ces variables représente en effet un enjeu majeur dans des domaines aussi variés que l'hydrologie (estimation d'un terme du bilan hydrique), la climatologie (paramétrisation des modèles de circulation générale de l'atmosphère) l'agronomie (prévision des rendements), ou l'environnement (suivi du risque d'incendie de forêt).

Or, tous ces outils reposent sur l'hypothèse que la température radiométrique T_r , mesurée par le satellite, peut être assimilée à la température de surface T_o requise dans les modèles théoriques de flux d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Si les modèles utilisant cette hypothèse ont pu être largement validés sur des couverts denses et homogènes, leur généralisation à des couverts épars, typiques des zones arides et semi-arides, a par contre montré certaines limites. De nombreux travaux montrent par exemple qu'il est possible d'ajuster empiriquement l'un des paramètres clés de ces modèles (kB^{-1}), à défaut de pouvoir l'estimer théoriquement. Les résultats restent pourtant contradictoires sur la valeur de ce paramètre et ni l'expérimentation ni la modélisation n'ont permis à ce jour de prédire son comportement. Malgré ces limitations, cette approche reste cependant largement utilisée.

L'objectif de cet exposé est de montrer que les approches classiques utilisant l'infrarouge thermique ne peuvent être généralisées efficacement aux couverts épars par un simple calage des modèles semi-empiriques existants. Une brève analyse des bases théoriques permettra ainsi de mettre en évidence les risques liés à l'utilisation d'un paramètre d'ajustement en dehors du contexte où il a été défini. Des données acquises au Sahel et en Arizona illustreront ensuite ce point avant de conclure sur les perspectives restreintes concernant l'utilisation de ce type de modèle pour les zones arides et semi-arides. L'utilisation de l'infrarouge thermique reste cependant possible, à condition que la spécificité des couverts épars soit directement prise en compte dans le choix des modèles utilisés (modèle bicouche) et dans la formulation des hypothèses (relation entre T_r et T_o). Certaines approches seront ainsi envisagées puis évaluées (complémentarité optique/thermique/radar).

RECONSTITUTION DE CHRONIQUES DE DONNEES HYDROLOGIQUES ANCIENNES PAR TELEDETECTION (MARES DU NIGER)

Abdou OUSMANE *

*Ingénieur Hydrologue, Chef du Centre National de Prévisions Hydrologiques, Niamey, Niger

Résumé

Pays sahélien par excellence, le Niger possède un seul cours d'eau pérenne (le fleuve Niger) qui traverse le territoire sur un tronçon de 550 km. Malgré les quelque vingt-cinq milliards de m³ annuellement charriés par ce cours d'eau, l'on note l'inexistence d'un véritable ouvrage de régulation de nature à sécuriser l'exploitation des périmètres rizicoles. En attendant la réalisation d'un tel ouvrage, la connaissance des ressources en eau des mares constitue une préoccupation de taille pour le pays car elle demeure une alternative notable dans la lutte pour l'autosuffisance alimentaire. En effet, les cultures développées autour des plans d'eau naturels (appellation locale " Culture de contre-saison ") constituent une réserve d'appoint à la production générée par les cultures pluviales.

Face aux coûts élevés des moyens conventionnels d'investigation (problèmes d'accès en saison pluvieuse, répartition géographique des mares, délais d'exécution, etc.), la télédétection satellitaire apparaît comme un outil décisionnel, en amont de tout projet d'aménagement dans les zones concernées. Elle permet en effet de mettre rapidement des informations fiables à la disposition des planificateurs.

Au cours de notre exposé, nous nous attellerons tout d'abord à développer les points ci après :

- Pourquoi la télédétection peut elle être utilisée dans la connaissance des phénomènes de stockage et de destockage des plans d'eau sahéliens ?
- Problématique d'estimation des surfaces : délimitation du plan d'eau.

Avant de conclure, nous présenterons les résultats obtenus sur quelques mares du Nord Ouest du Niger qui offrent un certain intérêt économique.

B 3

**MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET
DETERMINATION DE PARAMETRES
Modèles hydrologiques**

**HYDROLOGICAL MODELLING
AND
DETERMINATION OF PARAMETERS
Hydrological models**

MODELE STOCHASTIQUE DE PREVISION DES CRUES SUR LE FLEUVE GAMBIE

Soussou SAMBOU*, Jean-Pierre LAMAGAT**

*Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences, Département de Physique, Dakar, Sénégal

**ORSTOM, HYDROCONSULT, B.P. 5 045, 34 032 Montpellier cedex 1, France

Résumé

Le réseau hydrographique du fleuve Gambie, en amont de Gouloumbou, est très dense. De nombreux affluents contribuent à l'alimentation de l'écoulement du fleuve. Les stations hydrométriques sont toutes univoques. Les pentes des affluents et du cours d'eau principal étant généralement élevées, les termes d'inertie ont été supposés négligeables et une approche stochastique, basée sur l'équation de l'onde cinématique et s'inspirant sur la méthode des caractéristiques, a été utilisée.

En amont de Gouloumbou, le bassin du fleuve a été subdivisé en sous bassins comportant un certain nombre de biefs. Pour chacun de ces biefs, les courbes donnant les temps de propagation en fonction des débits, et les correspondances entre débits aux stations situées aux extrémités des biefs, ont été déterminées en utilisant de longues séries d'observations hydrométriques. La combinaison de ces courbes permet de déterminer le débit en une station aval à partir du débit à la station amont, pour un délai correspondant, en moyenne, au temps de propagation de la crue.

Au niveau des jonctions, suivant le cas, le problème a été simplifié en négligeant l'effet de la confluence. Chaque affluent a été traité séparément. Quand ils sont sensiblement de même importance et que les stations hydrométriques les plus proches de la jonction étaient situées à des distances sensiblement égales, leurs apports ont été regroupés.

Le modèle a été articulé de façon à pouvoir introduire ultérieurement les données de la télédétection dans son calage et son utilisation en temps réel.

MODELE HYDROLOGIQUE ET GESTION D'UNE DIGUE ANTI-SEL : CAS DU BAS FOND DE DJIGUINOUM

Soussou SAMBOU*, Jean ALBERGEL**, Aloys NONGUIERMA***

*Université Cheikh Anta Diop, F.S.T., Département de Physique, Dakar, Sénégal

**ORSTOM, 1 004 El Menzah, BP 434, Tunis, Tunisie

***Faculté des Sciences Agronomiques, L.H.A., 5 030 Gembloux, Belgique

Résumé

Le bassin de Djiguinoum, dans la Casamance maritime, a une superficie de 24 km². La gestion du barrage antisel, construit en aval pour arrêter l'intrusion saline provenant de la marée, a nécessité la mise sur pied d'un équipement hydrologique complet grâce auquel des observations sur les précipitations et sur la nappe phréatique ont été collectées.

Pour simuler le fonctionnement du bassin versant sous contraintes de gestion du barrage anti-sel, un modèle paramétrique matriciel a été réalisé. Le bassin versant a été décomposé en éléments de surface de géométrie semblable, sur lesquels les caractéristiques physiographiques (% lacs, marais, forêt), ainsi que les sens du drainage, ont été relevés à partir des cartes topographiques. Les réseaux pluviométrique et piézométrique ont été optimisés à l'aide d'une analyse en composantes principales en vue de leur utilisation dans le modèle. Sur chacun de ces éléments de surface, les données climatiques (précipitations, températures minimales et maximales) ont été déterminées par interpolation.

Le bilan hydrique vertical a été obtenu en supposant, dans un premier temps, les pertes constantes en fonction du temps. Le bilan horizontal a été fait d'aval en amont en ajoutant, suivant le sens du drainage, les volumes provenant des éléments de surface adjacents au volume produit sur chaque surface élémentaire. Le calage du modèle a été fait en comparant les hydrogrammes calculés aux hydrogrammes observés d'une part, et, d'autre part, en étudiant les valeurs d'un certain nombre de critères de qualité tels que l'écart quadratique moyen, le décalage des pointes et l'erreur relative de pointe.

Le modèle a été réalisé à partir du tableur Excel. Il est conçu de façon à intégrer aisément les données de la télédétection qui, pour le moment, ne sont malheureusement pas disponibles.

TELEDETECTION et MODELISATION HYDROLOGIQUE : QUELLE VISION, QUELLE ECHELLE, QUELS PROCESSUS ?

Remote sensing and hydrological modelisation : Which sight, which scale, which processes ?

Christian PUECH *

* Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF /ENGREF , 34000 Montpellier

Résumé

La modélisation hydrologique peut se faire selon divers niveaux d'agrégation, depuis une approche globale jusqu'à la modélisation hydrologique très finement distribuée. La liaison avec des données issues de télédétection pose le problème de l'adéquation des deux logiques, hydrologie ou vision, et des échelles correspondantes. Deux **échelles** sont a priori disponibles, la taille de la cellule de calcul hydrologique et le pixel issu des images de télédétection.

Le choix d'un type de modélisation et de la taille de calcul est un préalable. Il s'en déduit des schémas hydrologiques simples (modèles globaux) ou très compliqués (modèles finement distribués) pour lesquels la connaissance des processus élémentaires devient importante. L'utilisation d'images de télédétection vise parallèlement à fournir certains paramètres hydrologiques à partir d'informations disponibles en surface à l'échelle du pixel. Mais la vision de surface n'est pas toujours compatible avec les besoins hydrologiques.

Parallèlement l'augmentation de complexité des modèles est souvent sans lien avec l'augmentation de la qualité des résultats numériques. En effet la décomposition à des échelles de plus en plus fines conduit à une explosion du nombre de paramètres ainsi que des interrogations sur la validité des équations et concepts à l'échelle de la maille utilisée, étape fondamentale souvent négligée. Ainsi l'apport du couplage entre modèles finement distribués et de la télédétection apparaît plus intéressant pour une meilleure connaissance des processus locaux et pour la gestion en scénario pour tester les modifications de l'état du milieu que pour une amélioration sensible des résultats numériques des simulations.

La cartographie des états de surface du Sahel effectuée dans le cadre du projet FAO sur la connaissance de débits illustre ces propos. Sont décrits le choix des processus et de l'échelle de travail, le type de résultats et leur qualité ainsi que les incertitudes pour passer du pixel au bassin versant. Notre choix s'est porté sur une modélisation de la fonction de production locale pour une zone où les écoulements de surface sont prépondérants. L'échelle pixel est alors acceptable. Le décodage des plans primaires issus de la télédétection en plans utiles quantifiés est effectué sur la base des expérimentations de simulation de pluie.

Abstract

Hydrological modelling can be done under various scale levels, from global to finely distributed models. Calculation size comes from a preliminary choice about modelisation. Uses of RS data is then a problem of linking two logics, hydrology or sight, and their different scales. Two scales are possible : the cell of hydrologic calculation and the pixel given by RS.

Hydrological modelling and size of calculation cell have to be chosen first. The consequences are hydrologic schemes from the simplest (global models) to the more complicated (fine distributed models). For the last one, elementary processes become very important to know. The RS images are used to give some hydrologic parameters from surface information at pixel size. But surface features and hydrologic needs are not ever compatible.

If we want operational products using RS, we have to remember that a more complex simulation model does not warrant better numerical results : in hydrological distributed models, the number of parameters often grows with increasing resolution. Moreover, physical equations are scale dependant. Often, they are often valid at laboratory scale only, and we have to be careful with models using them at pixel size or more. So distributed models and RS images (as source of spatialized data) are more interesting to gain knowledge about local processes or effects of land use modification than to give more precise numerical results.

This is illustrated through the mapping of surface features in Sahelian countries done under FAO project. Are described choices of process (surface runoff as major process in Sahelian countries), hydrologic scale (pixel), primary levels (vegetation, soils and cultivated lands), results (local production function) and quality ; the uncertainty due to scale problem from pixel to the whole catchment is also discussed. The transformation from primary levels to local production function involves rain simulators.

ESTIMATION DES CRUES AU SAHEL REFLEXION SUR L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION POUR LA PREDETERMINATION

J.M GRESILLON *

* LTHE, Université Joseph FOURIER, Grenoble

Résumé

Quel que soit le soin apporté à l'acquisition des données hydro-pluviométriques par les hydrologues, il s'avère que la qualité des extrapolations faites à partir de ces données n'est guère satisfaisante. Pour les besoins de la prédétermination - notamment pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques - l'extrapolation est pourtant indispensable. A condition de bien cerner quelles sont les grandeurs qui jouent un rôle dans les processus hydrologiques, la télédétection peut permettre de réduire les intervalles d'incertitudes de ces extrapolations.

Un exemple d'extrapolation à une durée de retour de dix ans, de données prélevées en moyenne pendant trois années, permet d'illustrer les limites des analyses hydrologiques classiques. Il s'agit des études faites par l'ORSTOM dans les années 1960-1970 sur plus d'une centaine de bassins de l'Afrique sahélienne ou tropicale. Chacun d'eux a fait l'objet de campagnes de mesures pendant deux, trois ou quatre années et la qualité des données présente toutes les garanties nécessaires, de même que le sérieux de leur exploitation. Néanmoins, on montre que les extrapolations à la durée de retour dix ans de grandeurs telles que débits extrêmes ou coefficients d'écoulement manquent de fiabilité. A l'aide d'une analyse statistique, on montre aussi que la fiabilité des extrapolations est d'autant moins bonne que les épisodes observés s'écartent davantage de ceux qui sont estimés. Une critique des données précédentes est donc proposée, reposant sur le critère de la violence de la plus grande crue observée pendant les quelques années d'observation. Une analyse de ces mêmes données ainsi critiquées met en évidence le rôle de la végétation sur les coefficients d'écoulement d'épisode, notamment pour des durées de retour de dix ans. En régions sahéliennes particulièrement, la végétation diminue les écoulements de crue. En revanche, certaines grandeurs représentatives des vitesses de transfert (temps de montée des hydrogrammes ou rapidité des récessions des crues) paraissent plus stables et susceptibles d'extrapolations, notamment en régions sahéliennes toujours, où la notion d'hydrogramme unitaire est bien fondée. La végétation joue néanmoins aussi un rôle important sur la valeur de ces grandeurs.

L'importance de la végétation sur un bassin versant, s'avère donc essentielle dans le bilan hydrologique à l'échelle d'une crue en région aride. Elle n'est pas vraiment quantifiable par d'autres moyens que ceux que fournit la télédétection et n'est donc pas prise en considération pour déterminer les grandeurs hydrologiques qui en dépendent pourtant beaucoup. Il s'agit là, pour la télédétection, d'un champ d'utilisation encore mal exploré, essentiellement parce que les données relatives aux coefficients d'écoulement d'épisodes sont rares. En Afrique tropicale sèche ou sahélienne, une étude associant la télédétection et l'analyse des coefficients d'écoulement serait particulièrement utile et porteuse de progrès pour la prédétermination des débits de crues. Il est probable que des analyses du même type dans certaines régions méditerranéennes semi-arides, pourraient apporter également des informations sur les risques de crues.

TELEDETECTION RADAR : PERSPECTIVES POUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

RADAR REMOTE SENSING : PROSPECTS FOR HYDROLOGICAL MODELING

Philippe GINESTE *

* Laboratoire Commun Télédétection CEMAGREF-ENGREF, Montpellier.

Résumé

Face au problème des pollutions d'origine agricole sous nos latitudes tempérées et à la pression démographique des pays moins développés, il devient urgent de proposer des outils d'aide à la décision fiables permettant une gestion rationnelle des eaux et des sols. Deux objectifs concrets bien distincts sont identifiés : prédire le débit à l'exutoire d'un bassin versant et gérer la circulation de l'eau au sein du bassin.

L'analyse proposée suggère qu'en dépit d'une bien meilleure compréhension des processus du ruissellement, les modèles actuels même les plus sophistiqués répondent mal à l'un et l'autre de ces objectifs. Aussi s'attache-t-on à en faire ressortir les causes afin d'esquisser les contributions potentielles de la télédétection, notamment radar, à ces problématiques.

Il apparaît que la télédétection radar présente un intérêt fondamental pour la compréhension de la spatialisation des processus du ruissellement qui doit permettre in fine de proposer une modélisation adaptée aux bassins étudiés. Dans les zones plutôt arides pour lesquelles le mécanisme Hortonien est largement accepté et essentiellement contrôlé par la surface des sols, les perspectives d'utilisation des données satellitaires sont naturellement plus prometteuses...

Abstract

The spreading of agricultural pollutions and the demographic pressure upon less developed countries stress the need for reliable soil and water management tools. Two main objectives are : to predict the flow at the outlet of a watershed and to represent the water paths within the watershed.

However, despite great progresses in the understanding of runoff processes, the analysis suggests that even the most sophisticated models badly address the previous objectives. This paper therefore aims to identify the major causes of this discrepancy especially to point out possible contribution of active microwave remote sensing.

Radar eventually appears as a fundamental tool to study the spatialization of hydrological processes. This may finally lead to a modeling approach that is suited to the watershed under investigation. In rather arid areas, where the Hortonian process is generally accepted and is essentially controlled by the soil surface, remote sensing is felt even more promising as the Rainfall - Runoff transformation may be easier to deduce from the watershed topographic and spectral characteristics.

MODELISATION HYDROLOGIQUE DE PETITS BASSINS RURAUX SAHELIENS : APPORT DE LA TELEDETECTION ET DES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LA RECHERCHE DES PARAMETRES.

André NONGUIERMA*, S. DAUTREBANDE**

*Centre Régional AGRHYMET, BP 11 011 Niamey, Niger

**Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Passage des Déportés, 2, B-5030, Gembloux, Belgique

Résumé

Dans la région sahélienne, en Afrique sub-saharienne, le ruissellement de surface est pratiquement la seule forme d'écoulement observé sur les bassins. Son importance dépend en partie de l'aptitude au ruissellement du bassin.

Dans cette étude, le paramètre numérique de ruissellement (CN, de la méthode SCS) est associé à un modèle paramétrique pluie-débit (modèle SWRRB), conduisant à l'estimation de volumes de crue journaliers au niveau de quelques bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi au Burkina Faso).

L'utilisation conjointe de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique élargit l'horizon de la recherche en permettant la détermination synthétique du potentiel de ruissellement. La démarche est significative et conduit à une modélisation satisfaisante des écoulements.

Mots-clés : Sahel, Ruissellement, Oursi, Modélisation hydrologique, Bassins versants, Télédétection, Système d'information géographique.

APPLICATION DU MODELE GRASS/ANSWERS A LA MODELISATION HYDROLOGIQUE D'UN PETIT BASSIN VERSANT D'AFRIQUE DE L'OUEST.

Pascal PEREZ* , Damien URVOIX** , Michel ARNAUD***

*CIRAD-CA, URGE, BP5035, 34032 Montpellier cedex 1.

**USTL, Fac. Géographie, 34095 Montpellier cedex 5.

***CIRAD-CA, URFCM, BP5035, 34032 Montpellier cedex 1.

Résumé

L'étude des problèmes environnementaux entraîne une globalisation croissante des techniques d'observation et des méthodes d'analyse. Cette tendance s'accompagne d'une interdisciplinarité de plus en plus marquée de l'approche scientifique. Au sein des processus environnementaux majeurs le cycle de l'eau tient une place prépondérante. C'est le cas en Afrique de l'ouest dont l'agriculture pluviale doit faire face à des aléas climatiques importants. Afin d'établir un diagnostic pertinent et de concevoir des stratégies adaptatives opérantes, agronomes, écologistes, hydrologues et économistes doivent posséder quelques outils d'analyse communs, en particulier en terme de modélisation. Dans cette optique, certains modèles biophysiques - comme GRASS/ANSWERS - font figures de standards de par leur aptitude à gérer les informations d'entrée et leur capacité à développer des scénarios facilement gérables, en aval, par des modèles économiques.

Nous avons donc entrepris de tester le modèle GRASS/ANSWERS sur un petit bassin versant d'Afrique de l'ouest. Le bassin de Ndiba (16,5 km²) est situé dans la région agricole du Sine Saloum au Senegal. Fortement cultivé, le bassin versant a été étudié de 1983 à 1990 d'un point de vue hydrologique et agronomique. Le système d'information géographique GRASS est renseigné à partir d'une image classée LANDSAT-TM et d'une carte topographique issue d'orthophotoplans (1/25 000). Le modèle numérique de terrain utilisé souffre d'une forte imprécision, compte tenu du faible relief observé. Cependant, le réseau hydrographique et les contours du bassin versant demeurent satisfaisants, en comparaison des cartes de terrain. Les données hydrologiques, issues des enregistrements effectués entre 1983 et 1988, sont composées de 24 couples pluie/écoulement correspondant à des événements pluvieux supérieurs à 35 mm. Le modèle hydrologique ANSWERS, événementiel et distribué, nécessite la fourniture de 12 paramètres principaux caractérisant les sols, la végétation, le réseau hydrographique. En l'absence d'écoulement de base et d'interaction avec la nappe phréatique pour le bassin de Ndiba, le module hydrogéologique n'a pas été renseigné. De même l'absence de données expérimentales fiables nous a contraint à négliger les informations relatives à l'érosion. Parmi les paramètres nécessaires, 8 peuvent être fixés de manière déterministe à partir de données expérimentales disponibles ou de sous routines de simulation déjà validées dans la zone d'étude. En revanche, 4 paramètres se révèlent difficiles à déterminer et nécessitent un calage préalable. Or deux d'entre eux entraînent des fluctuations très fortes dans la réponse du modèle. Il s'agit en particulier du coefficient de Manning affecté au ruissellement non concentré. Le calage a été réalisé sur l'écoulement le plus fort enregistré pendant la période. La validation du modèle sur les autres enregistrements montre que les volumes écoulés sont reconstitués de manière acceptable mais que le débit de pointe et le temps de montée sont mal modélisés compte tenu des pentes très faibles du bassin versant.

En conclusion, ce modèle peut être appliqué sur ce type de bassin versant si on dispose d'une couverture topographique de grande précision et de données expérimentales suffisantes pour le paramétrer. La limitation essentielle réside dans le calage des paramètres à forte impédance. Leur choix se révèle délicat pour un hydrologue, qu'en est-il pour un néophyte attiré par la convivialité du modèle ?

LE MODELE HYDROLOGIQUE MAILLE (M.H.M.):

E. PERSOONS* et A. RANDRIAMAHERISOA*

*Unité de Génie Rural, Université Catholique de Louvain, Place Croix du Sud 2, Bte 9, 1 348 Louvain la Neuve, Belgique

Résumé

Dans le contexte actuel de la politique de gestion durable de notre environnement, la compréhension de l'évolution des phénomènes naturels ou anthropiques est d'une importance capitale pour une meilleure gestion des ressources. A cet égard, la modélisation hydrologique est un outil indispensable.

Dans le cadre du travail présenté ici, une méthodologie originale a été développée pour l'analyse qualitative et pour l'évaluation quantitative de l'impact de l'évolution des caractéristiques physiques d'un bassin sur le régime d'une rivière. Ce modèle hydrologique maillé, baptisé "MHM", répond à un double objectif. D'une part, sa fonction proprement hydrologique consiste à simuler les hydrogrammes de crues exceptionnelles pour le dimensionnement d'ouvrage d'art. D'autre part, vu qu'il est basé sur la répartition spatiale de ses paramètres selon la variabilité des caractéristiques physiques du bassin, il permet le suivi de la modification du régime des crues en fonction de l'évolution spatio-temporelle de l'environnement suite à un phénomène naturel ou due à l'activité humaine.

Le modèle MHM est le résultat de l'utilisation combinée de deux technologies de pointe : la modélisation déterministe distribuée et la cartographie numérique. C'est justement l'analogie de la discrétisation du bassin versant en maille régulière carrée, avec la structure raster de la cartographie numérique, qui permet la prise en compte de la distribution spatiale et de l'évolution des caractéristiques physiques du bassin lors de la paramétrisation du modèle. En effet, le modèle MHM traite de la réponse hydrologique unitaire spécifique à un bassin à partir des caractéristiques physiques du bassin sous forme de cartes numérisées et/ou télédéteectées, gérées à l'aide d'un système d'information géographique raster.

Le modèle MHM est appliqué en particulier au cas d'un grand bassin versant situé au nord-est de Madagascar où la rivière Lokoho et ses affluents inondent fréquemment une vaste plaine très fertile au centre du bassin. Le cas traité présente un caractère fondamental dans le sens où il permet la validation du modèle MHM pour ses fonctions purement hydrologiques et la compréhension des phénomènes de crues scientifiquement très intéressants dans ce bassin. Il est aussi appliqué parce qu'il s'intègre dans le cadre d'un projet de protection de ce bassin contre les inondations, l'érosion et la déforestation.

• LABORATOIRE COMMUN DE TELEDETECTION
• CEMAGREF / ENGREF
• MONTPELLIER



ENGREF

 **Cemagref**

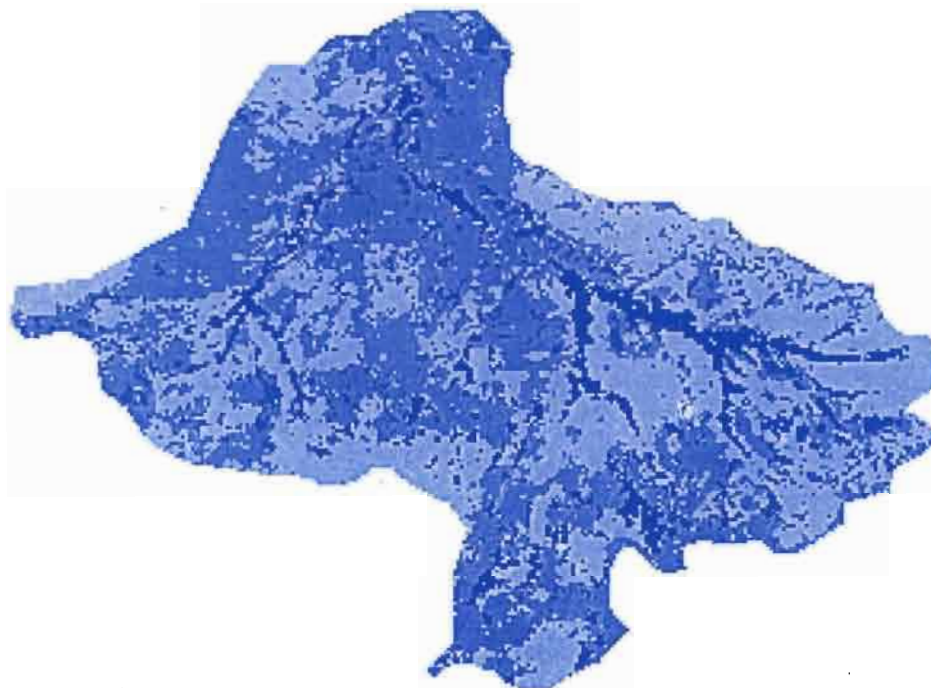
ORSTOM

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT
EN COOPERATION
MONTPELLIER

ATELIER / WORKSHOP
INTERNATIONAL

**TELEDETECTION ET
GESTION DES RESSOURCES
EN EAU**

**REMOTE SENSING AND
WATER RESOURCES MANAGEMENT**



• FOOD AND AGRICULTURE
• ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS
• ROME

MONTPELLIER 29.11 - 01.12.1995

COMMUNICATIONS
(Recueil provisoire)
PRE - PROCEEDINGS

COMMUNICATIONS

(Recueil provisoire)

PRE-PROCEEDINGS

INTRODUCTION

Cet atelier fait suite à une importante étude confiée par la FAO (Land and Water Development division) au LCT (Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF de Montpellier) à l'ORSTOM (Institut Français de recherche en Coopération, centres de Ouagadougou et de Montpellier) et enfin au CIEH (Comité InterAfricain d'études Hydrauliques de Ouagadougou).

L'étude a consisté en la rédaction d'un manuel pour le calcul des débits de crue et des apports annuels des petits bassins versants sahéliens. Si la plus grande partie de cette étude a concerné les méthodes classiques d'estimations hydrologiques, une part importante touchait à l'utilisation de télédétection comme alternative pour estimer les écoulements.

Des méthodes intéressantes ont été mises au point, mais il faut en reconnaître les limites : elles sont majoritairement réservées au domaine de la recherche. Il y a encore de grandes difficultés à définir des méthodes vraiment opérationnelles par le biais de ces données télédéteectées. Aussi nous a-t-il semblé judicieux, en marge de cette étude, de rassembler des chercheurs de tous horizons pour confronter les recherches et les méthodes opérationnelles. Volontairement le sujet a été élargi au domaine plus général de la **gestion des ressources en eau à partir de télédétection** dans les pays du ressort de la FAO.

Le but de cet atelier est ainsi de faire le point sur les techniques et méthodes opérationnelles d'utilisation de la télédétection pour l'évaluation et la gestion des ressources en eaux. L'accent sera mis sur l'hydrologie de surface et la gestion de l'eau dans les bassins versants ainsi que sur l'application pratique de ces techniques. L'atelier se concentrera plus particulièrement sur les problèmes des pays arides et semi-arides en développement pour lesquels ces techniques peuvent représenter un atout particulièrement important.

On s'intéressera donc à la gestion des ressources, partie a priori plus opérationnelle, et à la modélisation hydrologique utilisant les paramètres issus de télédétection.

L'atelier se décompose alors de la façon suivante : :

Présentation du manuel FAO, à l'origine du présent atelier

A GESTION DES RESSOURCES EN EAU

approche régionale

approche locale

B MODELISATION HYDROLOGIQUE ET DETERMINATION DES PARAMETRES

Caractéristiques hydriques des sols

Bilan hydrique

modèles hydrologiques

INTRODUCTION

The origin of this workshop is an important study given by FAO (Land and Water Development division) to LCT (Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF de Montpellier), to ORSTOM (Institut Français de recherche en Coopération, Ouagadougou and Montpellier Centers) and also to CIEH (Comité InterAfricain d'études Hydrauliques, Ouagadougou).

The aim of this study is to realise a manual to determine annual and maximum runoffs in small catchments of Sahelian Regions. The majority of the manual concerns classical hydrological methods of estimation. The manual also covers the uses of new technologies such as Remote Sensing data (RS).

Interesting methodologies using RS have been developed but they are limited in a greater part to the research domain. Operational methods using RS are more difficult to obtain. That is why, we thought it was interesting to gather researchers on these topics in order to compare their approaches.

The purpose of this workshop is then to highlight techniques and operational methods in RS which can be applied to water resources assessment and management. Emphasis should be given to surface hydrology and river basin water management as well as the practical application of these techniques. The workshop will concentrate more specifically on problems encountered in arid and semi-arid developing countries for which the application of these techniques is believed to be of great relevance.

The different parts of the workshop are :

Presentation of FAO practical book, which is the origin of this workshop

A WATER MANAGEMENT

Regional approach

Local approach

B HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS

Soils hydric characteristics

Water balance

Hydrological models

PRESENTATION

NOUVELOT J.F., LAMACHERE J.M. (ORSTOM, Montpellier)
Manuel FAO : Le logiciel Sahel.

A GESTION DES RESSOURCES / WATER MANAGEMENT

A1. Approche régionale / regional approach

LOINTIER Marc (ORSTOM, Montpellier)

Gestion intégrée des bassins versants côtiers et des zones humides en milieu tropical. Apport de la télédétection.

SAVANE Issiaka (Institut d'Ecologie Tropicale, Abidjan, Côte d'Ivoire), GOZE B et H.Q. GVYN (CARTEL, Univ Sherbrooke, Canada)

Evaluation des ressources en eaux souterraines dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat dans le bassin d'Odienné.

TRAORE Karim (DRH/HB, Bobo Dioulasso, Burkina Faso)

La planification comme moyen d'appui à la planification des ressources en eau ; cas du sud-ouest du Burkina Faso

DESCROIX Luc (ORSTOM, Mexique)

Application de la télédétection à l'évaluation des ressources en eau de la région hydrologique 36 (Nord Mexique).

A GESTION DES RESSOURCES / WATER MANAGEMENT

A2. Approche locale / local approach

PUECH Christian (LCT, Montpellier), CARETTE Joël(Consultant, Evry)

De l'aérien au satellite : évaluation des ressources en eau.

PATRICK Eric (University College, LONDON, U.K.)

Using Remote Sensing and Anthropology as data inputs into a GIS to optimize site location of water harvesting schemes in semi-arid Africa.

BIEMI J. , JOURDA J.P. (Univ.. Nle de Côte d'Ivoire), DESLANDES S. , GVYN H. (CARTEL, Univ Sherbrooke, Québec)

Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire. par Télédétection et SIG

NGUETORA Madira (EIER, Ouagadougou)

SIG et Gestion des ressources en eau d'un Bassin Versant Africain.

**B MODELISATION HYDROLOGIQUE ET DETERMINATION DE PARAMETRES
HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS**

B1. Caracteristiques hydriques des sols / Soils hydric characteristics

LAMACHERE J.M. (ORSTOM Montpellier)

Télédétection, états de surface et observations au sol

LAMACHERE J.M.(ORSTOM Montpellier), PUECH C (LCT)

Télédétection et cartographie des états de surface

COLOMBO R., SARFATTI P. (Inst. Agro. per l'Oltremare, Firenze, Italie)

Remotely sensed data for hydrological analysis of two sub-catchments of the Mareb river (Eritrea).

BERGAOUI M., CAMUS H.(ORSTOM, Tunis)

Caractérisation des zones homogènes pour des fins de modélisation hydrologique

DAOUD Abdelkarim (Fac. Lettres S. Humaines, Sfax, Tunisie), TRAUTMANN J. (CNRS CEREG, URA 95, Strasbourg)

Rôle de la télédétection dans l'évaluation et la cartographie des épandages artificiels des crues dans les hautes steppes tunisiennes.

HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS

B2. Bilan hydrique / Water balance

HURTADO SANTI Emilia(Universidad de Castilla - La Mancha, Albacete,), CASELLES V.(Univ. de Valencia), ARTIGAO M.M.(Albacete, Espagne)
Using one or two layer models for determining evapotranspiration with remotely sensed data.

CHEHBOUNI Aghani (ORSTOM Montpellier), D. LO SEEN (NASA), G. DEDIEU (CESBIO, Toulouse), M. DAUBAS (USDA) et B. MONTENY (ORSTOM)
Utilisation de la télédétection spatiale pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle.

OUSMANE Abdou.(Min. Hydraulique, Niamey, Niger)

Reconstitution de chroniques de données hydrologiques anciennes par télédétection (mares du Niger).

**B MODELISATION HYDROLOGIQUE ET DETERMINATION DE PARAMETRES
HYDROLOGICAL MODELLING AND DETERMINATION OF PARAMETERS**

B3. Modèles hydrologiques / Hydrological models

SAMBOU Soussou (Univ.Cheikh Anta Diop., Dakar, Sénégal), J.P. LAMAGAT
(ORSTOM, HYDROCONSULT, Montpellier)
Modèle stochastique de prévision des crues sur le fleuve Gambie.

PUECH C.(LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier)
Télédétection et modélisation hydrologique : quelle vision, quelle échelle,
quels processus ?

GINESTE P (LCT CEMAGREF/ENGREF, Montpellier)
Télédétection radar pour la modélisation des crues.

NONGUIERMA A (Centre régional AGRHYMET, Niamey), DAUTREBANDE S.
(Fac Sciences Agro. Gembloux, Belgique)
Modélisation hydrologique de petits bassins ruraux sahéliens : Apport de la
télédétection et des S.I.G

PEREZ Pascal (CIRAD CA Montpellier), URVOIX D. (USTL Montpellier), ARNAUD
M.(CIRAD C.A., Montpellier)
Application du modèle GRASS-ANSWERS à la modélisation hydrologique
d'un petit bassin versant d'Afrique de l'Ouest.

EL IDRISSE A., PERSONS F. (Université Catholique de Louvain,, Fac des Sciences
Agro.)
M.H.M. : Le Modèle Hydrologique Maillé.

PRESENTATION

LE LOGICIEL SAHEL

Jean François NOUVELOT*, Jean-Marie LAMACHERE**

*ORSTOM, A.P. 225-3 (ZI) 35 071 Gomez-Palacio (DGO) Mexique

**Centre ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

Résumé

Le logiciel Sahel a été conçu par l'ORSTOM pour la prédétermination, en Afrique de l'Ouest, des crues décennales sur les petits bassins versants (1 à 300 km²) des zones sahéenne et tropicale sèche.

Ce logiciel utilise le langage de programmation FoxPro associé au concept des triolets (Cruette J., Paugy D. et Reversat J., 1992) pour mémoriser et reconstruire des phrases enchaînées entraînant des actions qui sont elles mêmes liées entre elles dans une suite logique. P. Gourjon (1994) a modifié la structure initiale des verbes, associés au concept des triolets, afin de faciliter l'introduction de formules mathématiques et la mémorisation des choix et des résultats. Les différents fichiers nécessaires au logiciel sont archivés et compactés sur une disquette de capacité 1,44 Mo.

Le logiciel Sahel se présente comme un menu déroulant proposant à l'utilisateur une série de questions auxquelles celui-ci doit répondre pour effectuer des choix et fournir les informations nécessaires aux calculs. Dans son menu *modèles*, le logiciel Sahel propose trois méthodes de prédétermination des crues décennales : la *méthode ORSTOM* d'approche déterministe, La *méthode CIEH* d'approche stochastique et la *méthode de la section droite et de la pente* basée sur la mise en oeuvre de formules d'hydraulique. Par son menu *pluies*, le logiciel Sahel permet également de déterminer automatiquement la hauteur pluviométrique journalière de fréquence décennale et la hauteur pluviométrique moyenne annuelle en un point défini par ses coordonnées géographiques.

Les trois méthodes de prédétermination des crues décennales sont exposées de manière très complète dans le manuel pour la prédétermination des crues et des apports des petits et moyens bassins versants d'Afrique sahéenne et tropicale sèche (FAO, en cours d'édition). Dans la phase d'initiation, consulter ce manuel est indispensable à l'utilisation du logiciel.

Introduction

Le texte qui suit correspond à la notice technique destinée à l'utilisateur du logiciel SAHEL.

Le texte définitif de l'article comprendra deux parties : une partie traitant de l'utilisation du logiciel, réduite à 4 ou 5 pages et une partie traitant plus spécifiquement de la méthode des triolets et de son application dans le cadre du logiciel SAHEL.

ORSTOM

Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération

Département des Eaux Continentales

NOTICE DE L'UTILISATEUR

LOGICIEL SAHEL

SOMMAIRE

1. INSTALLATION DU LOGICIEL.....	1
1.1. COPIE DES FICHIERS.....	1
1.2. LANCEMENT DU LOGICIEL.....	1
2. MENU Modèles	2
2.1. RECOMMANDATIONS.....	2
2.2. CARACTERISTIQUES GENERALES DES DIFFERENTES METHODES.....	2
2.3. PRINCIPALES ETAPES A SUIVRE	5
2.3.1. Archivage des résultats dans un fichier	5
2.3.2. Impression des résultats en cours de programme	7
2.3.3. Fenêtre de travail et Fenêtre d'archivage	8
2.3.4. Règles d'utilisation et de Saisie des données.....	9
2.3.5. Fin de programme	10
3. MENU Pluies	11
3.1. PLUIES ANNUELLES	11
3.2. PLUIES JOURNALIERES	11
3.3. FONCTIONNALITES.....	12

1. INSTALLATION DU LOGICIEL "SAHEL"

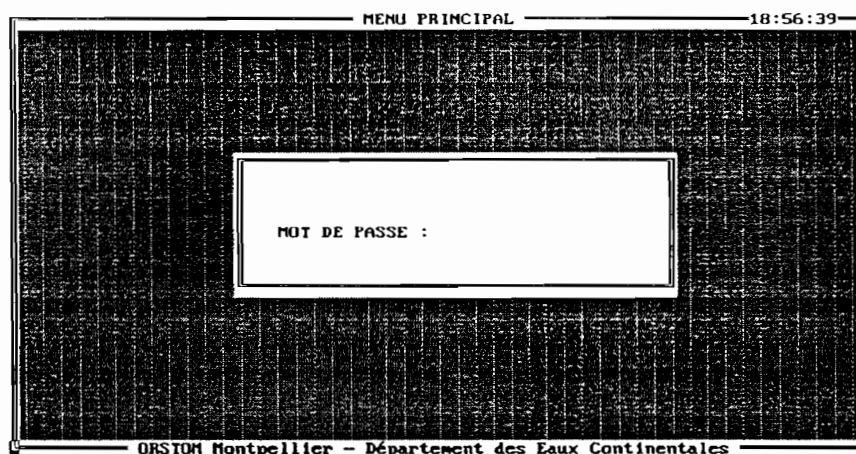
1.1. COPIE DES FICHIERS

Les différents fichiers nécessaires au logiciel sont archivés et compactés sur une disquette de capacité de 1,44 Mo. Pour l'installation dans un répertoire choisi, taper a: puis la commande **install c:\nom du répertoire**. Par exemple, la commande **install c:\sahel** réalise l'installation du logiciel dans le répertoire *sahel*.

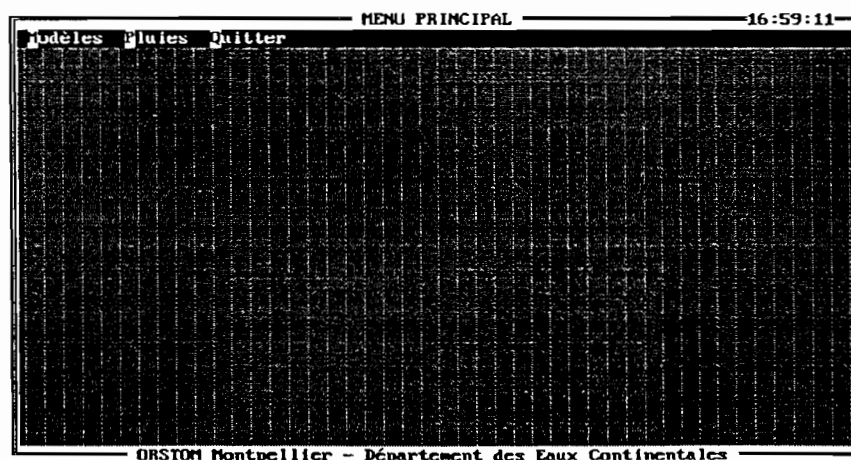
Le logiciel "Sahel" fonctionne deux fois plus vite s'il a accès à suffisamment de mémoire paginée (EMS). L'installation de cette dernière peut être faite à l'aide de la commande DOS *memmaker*.

1.2. LANCEMENT DU LOGICIEL

A partir du répertoire choisi, taper "sahel" pour faire apparaître une fenêtre dans laquelle le mot de passe "sahel" devra être saisi.



Une fois le mot de passe tapé et validé (frapper la touche Entrée), la barre de MENU PRINCIPAL s'affiche à l'écran :



Le choix des différentes options sur la barre de menu se fait soit en cliquant à l'aide de la souris sur l'un des menus proposés soit en tapant **Alt + première lettre de l'option**. Par exemple, **Alt + M** active le menu **Modèles**.

2. MENU "Modèles"

Cette option de la barre de **MENU PRINCIPAL** permet d'exécuter le programme d'estimation des caractéristiques de crue (et plus particulièrement de crue décennale) à l'aide de différentes méthodes.

2.1. RECOMMANDATION

Pour une utilisation efficace du logiciel, il est recommandé de disposer du document intitulé "Manuel pour la détermination des crues et des apports des petits et moyens bassins versants d'Afrique Sahélienne et Tropicale Sèche". Ce manuel, publié par la FAO, a été rédigé par l'ORSTOM, le CEMAGREF et le C.I.E.H.

2.2. CARACTERISTIQUES GENERALES DES DIFFERENTES METHODES

Le menu **Modèles** permet de mettre en oeuvre trois méthodes qui correspondent à des approches sensiblement différentes :

- La méthode *ORSTOM*, basée sur une approche déterministe, s'applique au Sahel africain hors de la zone côtière, entre les isohyètes annuelles 150 et 850 mm. Elle permet la détermination des caractéristiques de l'hydrogramme de crue de fréquence décennale : le débit maximum, les temps de base et de montée, les volumes ruisselés et écoulés ainsi que les lames d'eau correspondantes. Elle est bien adaptée, sans restrictions, aux bassins dont la superficie est inférieure à 120 km². Pour les bassins dont la superficie est comprise entre 120 et 350 km², l'indice de pente global doit être supérieur à 4 m/km. Pour les autres bassins, de pente plus faible ou de plus grande superficie, des précautions, soulignées et expliquées lors de l'exécution du logiciel, doivent être prises.
- La méthode *C.I.E.H.*, basée sur une approche stochastique, s'applique, dans la version utilisée par le logiciel, aux régions sèches d'Afrique Tropicale, entre les isohyètes 0 et 800 mm. Elle fournit, pour différents découpages climatiques et géographiques, uniquement le débit maximum de crue de fréquence décennale. Elle peut être utilisée pour toutes les gammes de superficie mais l'échantillon de bassins de référence est nettement regroupé dans la gamme des superficies comprises entre 20 et 300 km².
- La méthode *de la section droite et de la pente*, basée, selon différentes variantes, sur la mise en oeuvre de formules d'hydraulique, est d'application très générale. Elle ne fournit pas directement le débit maximal de crue de fréquence décennale mais un débit correspondant à un certain niveau d'eau, déduit d'enquêtes ou de mesures de terrain. Sa fréquence d'apparition doit être ensuite évaluée. Le manuel, déjà cité en référence paragraphe 2.1, propose pour cela différentes méthodes d'estimation et fournit, par ailleurs, un certain nombre de coefficients qui permettent de passer, compte tenu du contexte physico-climatique du bassin étudié, de la crue de fréquence médiane à des crues d'autres fréquences : 0,1; 0,05; 0,02; 0,01. On admet généralement qu'en région sahélienne la crue qui atteint

le sommet des berges correspond à un événement dont la fréquence doit se situer entre les fréquences annuelle et médiane.

Il est possible d'utiliser une seule de ces méthodes ou, au contraire, plusieurs d'entre elles en séquence. Dans ce dernier cas, l'ordre de sélection est laissé au libre choix de l'utilisateur. Il est conseillé, dans la mesure du possible, d'exploiter les différentes options proposées et de comparer les résultats obtenus.

Les données d'entrée communes aux deux premières méthodes (*ORSTOM* et *C.I.E.H.*) sont :

- la **superficie** du bassin versant, en km^2 ;
- le **périmètre** du bassin versant, en km ;
- la **dénivelée**, exprimée en mètres, séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la superficie du bassin situés au-dessus d'elles ($D = H_5 - H_{95}$);
- les **coordonnées géographiques**, avec une précision du demi degré, d'un point de référence du bassin (exutoire ou barycentre approximatif, par exemple).

L'application de la méthode *ORSTOM* demande, par ailleurs, une estimation de l'**infiltrabilité** du bassin, définie qualitativement à l'aide de cinq **indices** : *PI* (Particulièrement Imperméable), *I* (imperméable), *RI* (Relativement Imperméable), *P* (Perméable), *TP* (Très Perméable). La sélection de ces différents indices se fait à l'aide de la **barre d'espacement** du clavier. Le logiciel offre la possibilité d'entrer **deux indices d'infiltrabilité** et le **coefficient de pondération du premier** d'entre eux, celui du second étant calculé automatiquement par le logiciel en prenant le complément à 1 du premier. Par exemple, l'**infiltrabilité** d'un bassin peut être : $0,45 \cdot I + 0,55 \cdot RI$; il suffit de sélectionner *I* puis *RI*, à l'aide de la barre d'espacement, puis à l'invite de taper 0,45.

Lorsque la méthode *C.I.E.H.* est utilisée avant ou sans la méthode *ORSTOM*, et dans le cas où la connaissance du **coefficient de ruissellement de fréquence décennale KR10** est demandé, le logiciel permet (mais le choix est laissé à l'utilisateur) de calculer ce coefficient à l'aide de la méthode *ORSTOM*, c'est à dire en utilisant la notion d'**infiltrabilité** telle qu'elle a été définie précédemment.

Quel que soit l'ordre de sélection des deux méthodes, toutes les données nécessaires ne sont saisies qu'une seule fois.

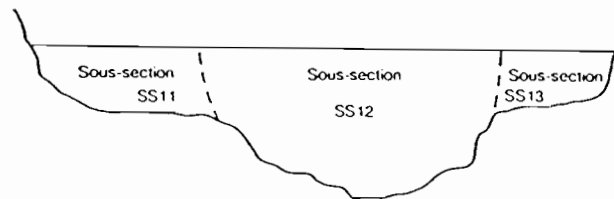
Cette règle est mise en défaut lorsque la notion de **bassin réduit** (ou **contributif** ou **actif**) est appliquée dans la méthode *ORSTOM*. En effet, la superficie du bassin réduit, et par conséquent les autres caractéristiques (périmètre, dénivelée et infiltrabilité) sont différentes de celles du bassin topographique total, utilisées dans l'application de la méthode *C.I.E.H.* Si, dans ces conditions, cette dernière est sélectionnée en séquence après la méthode *ORSTOM*, les caractéristique du bassin total seront demandées. Si inversement la méthode *C.I.E.H.* est utilisée avant la méthode *ORSTOM*, cette dernière sera appliquée nécessairement à l'ensemble du bassin. Il sera donc prudent de s'assurer que, compte tenu du contexte physique de ce bassin, cette approche est satisfaisante. Si tel n'est pas le cas, la méthode *ORSTOM* devra être appliquée une nouvelle fois en entrant les caractéristiques du bassins actif (ou réduit), après avoir répondu par l'affirmatif (**O**) à la question "**Souhaitez-vous traiter un autre bassin ?**", posée en fin de programme.

Pour l'application de la méthode *de la section droite et de la pente*, les données nécessaires sont celles relevées, pour un niveau d'eau déterminé, sur une ou différentes sections droites (**4 au maximum**) d'un bief de cours d'eau :

- superficie (S), en m^2 ;
- périmètre (P), en m ;
- pente de la ligne d'eau (i), en mm/m (si celle-ci n'est pas connue, le logiciel demande la pente du fond du lit) ;
- coefficient de rugosité (n) de Manning-Strickler, sans dimension.

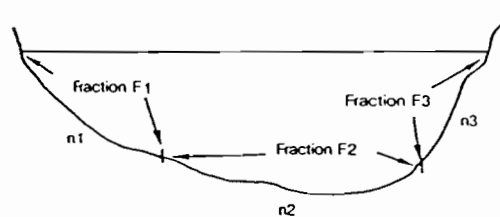
Pour ce dernier paramètre, différents cas peuvent être rencontrés :

- La rugosité est homogène sur toute la section : une seule valeur de n est demandée.
- La rugosité n'est pas homogène sur l'ensemble de la section :
 - soit la section peut être divisée en plusieurs sous-sections (**3 au maximum**) de rugosité homogène, traitées d'une manière indépendante par le logiciel ;



Découpage d'une section droite de cours d'eau
en sous - sections homogènes

- soit la section ne peut pas être séparée en sous-sections homogènes et il est alors nécessaire de découper le périmètre mouillé en fractions de rugosité homogène (**3 au maximum**), exprimées en % du périmètre total.



Découpage d'une section droite de cours d'eau
en fractions de rugosités différentes

La formule de Manning-Strickler utilisée s'écrit :

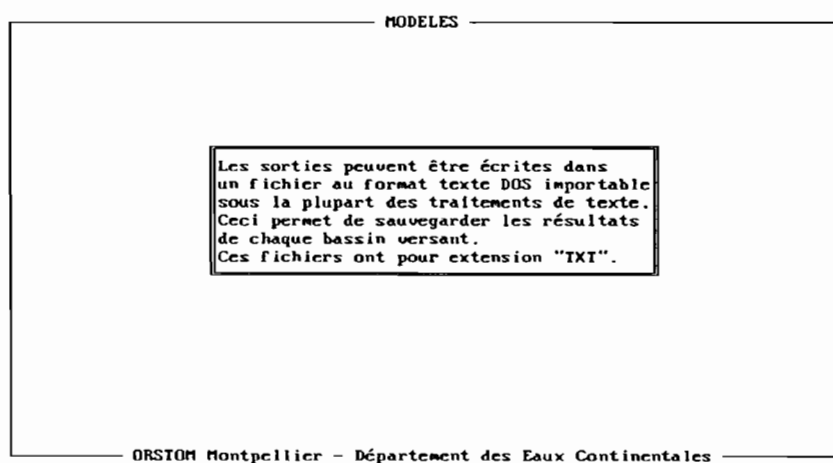
$$Q = 1/n \cdot S \cdot (S/P)^{2/3} \cdot (i/1000)^{1/2}$$

en respectant les unités données ci-dessus.

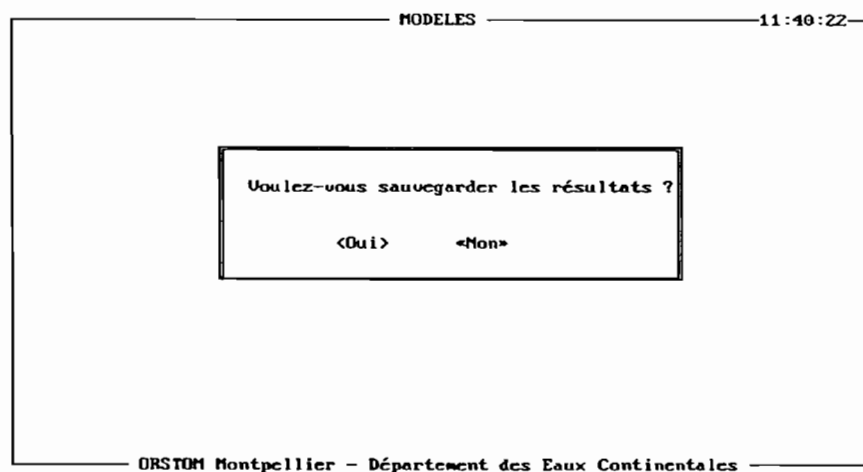
2.3. PRINCIPALES ÉTAPES A SUIVRE

2.3.1. Archivage des résultats dans un fichier

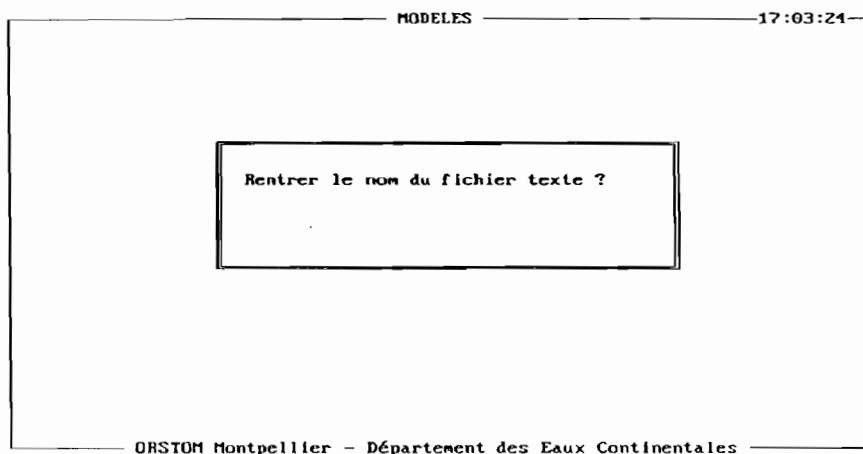
Une fois l'option **Modèles** sélectionnée, une fenêtre s'affiche pour avertir l'utilisateur que les résultats, par ailleurs visibles en permanence à l'écran, peuvent être sauvegardés dans un fichier au format texte DOS.



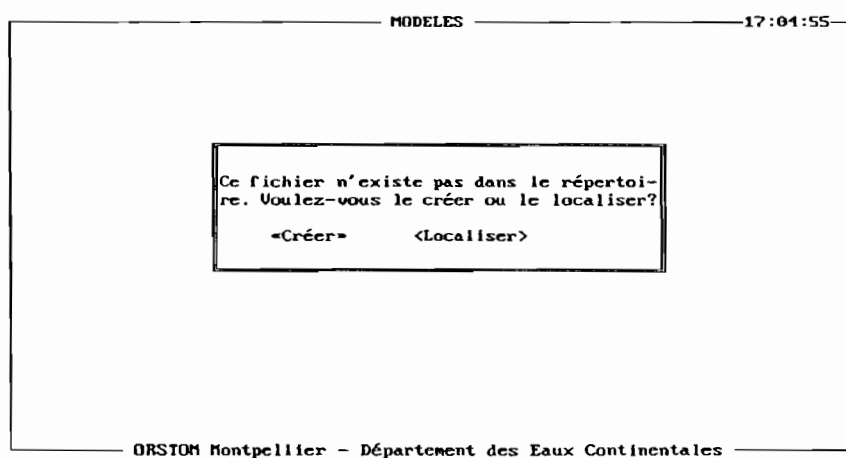
Après avoir cliqué en n'importe quel point de cette fenêtre ou appuyé sur la touche **Entrée**, une seconde fenêtre permet de valider l'option choisie :



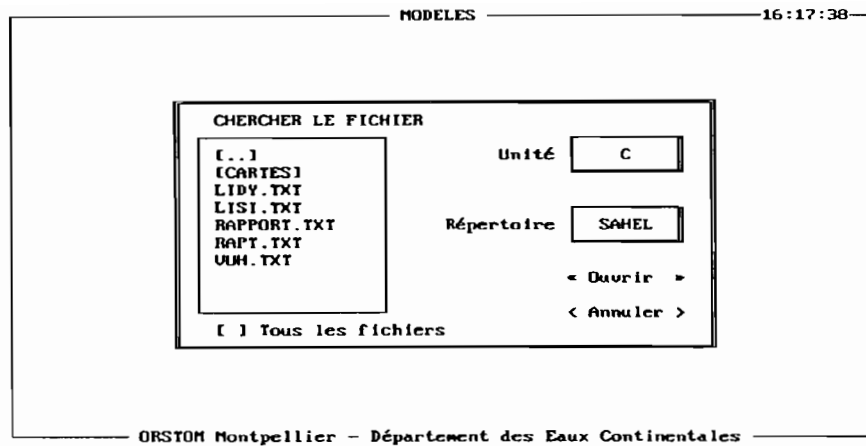
Si la réponse est affirmative (cliquer sur **OUI** ou taper **O**), le nom du fichier est alors demandé :



Pour créer un nouveau fichier, il suffit de taper son **nom** + **Entrée**, puis dans la fenêtre suivante de cliquer sur **Créer** (ou de taper **C**).



Pour utiliser un fichier existant, taper sur la touche **Entrée** sans exécuter l'ordre "**Rentrer le nom du fichier texte**", puis sur l'écran suivant cliquer sur **Localiser** (ou taper **L**) pour faire apparaître la fenêtre de recherche des fichiers :

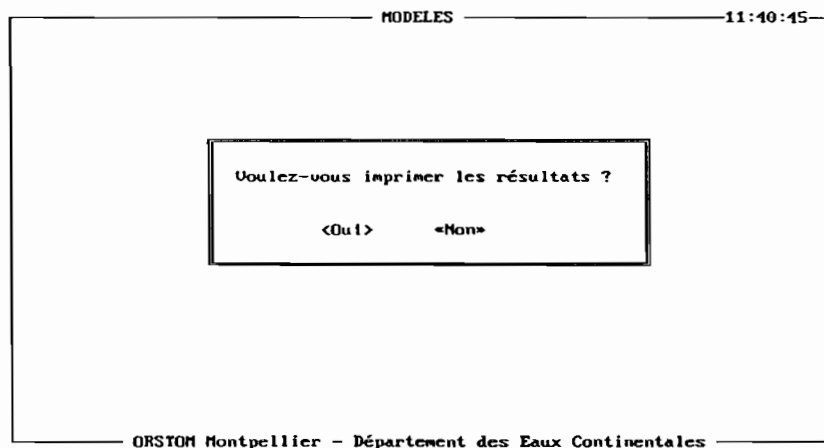


La sélection se fait en cliquant sur le **nom du fichier** choisi ou en utilisant les **touches de déplacement** puis la touche **Entrée**.

Ce fichier peut être ensuite mis en forme (si nécessaire) et édité à l'aide de n'importe quel logiciel de traitement de texte.

2.3.2. Impression des résultats en cours de programme

Pour disposer d'une trace des questions, commentaires et résultats qui jalonnent le programme, ainsi que des données saisies, il suffit de répondre positivement (cliquer sur **OUI** ou frapper la touche **O**) à la question "**Voulez - vous imprimer les résultats ?**". L'impression s'effectue alors au fur et à mesure du déroulement du logiciel.



2.3.3. Fenêtre de travail et Fenêtre d'archivage

L'interface logiciel/utilisateur se décompose en deux parties : le quart inférieur de l'écran - **Fenêtre de travail** - est réservé à l'affichage des questions, des commentaires et des résultats brutes ainsi qu'à la saisie des données ou des réponses demandées ; le reste de l'écran est occupé par une fenêtre où s'affichent toutes les questions posées et les réponses faites par l'utilisateur, les commentaires et les résultats définitifs - **Fenêtre d'archivage** -.

MODELES 14:29:57

MODELES DE CALCUL DES CRUES DECENNALES DANS LE SAHEL AFRICAIN

- Quel nom porte le cours d'eau : Tsanaga
- Quel nom porte l'exutoire du bassin versant : Maroua
- Le bassin est-il situé en zone sahélienne (entre les isohyètes 150 et 850 mm), hors de la bande de 10 à 20 km qui borde l'océan : OUI
- Le bassin hydrographique est-il fortement dégradé : NON
- Souhaitez-vous appliquer la méthode ORSTOM, surtout adaptée à des bassins dont la superficie est inférieure à quelques centaines de km² : OUI
- Un réservoir couvre-t-il une partie notable du bassin : NON
- Le bassin est-il dégradé à l'amont, sans trace de ruissellement issu de cette zone : NON

Le bassin imperméable présente-t-il à l'amont une partie inactive, plate, très perméable ou marécageuse, sans trace de drainage ? O/N

REPONSE : N
 Vous avez répondu NON Voulez-vous MODIFIER ? O/N N

ORSTOM Montpellier - Département des Eaux Continentales

La **fenêtre d'archivage** est une fenêtre déroulante qui permet de visualiser toutes les informations traitées, même lorsqu'elles n'apparaissent plus à l'écran : il suffit d'utiliser la touche F2 et de cliquer sur OK dans la fenêtre VISUALISATION DES SAISIES (ou de taper O).

MODELES 17:56:23

MODELES DE CALCUL DES CRUES DECENNALES DANS LE SAHEL AFRICAIN

tributaires secondaires une zone perméable inactive (sables éoliens, blocs de roches cristallines ou sédimentaires, cuirasses démantelées)
NON

- Le bassin comporte-t-il à l'amont du tributaire principal ou des tributaires secondaires, une zone présentant des traces de ruissellement (s des drains) : NON
- Le bassin se t (ant pas ou presque pas d' (raccordées
- Le bassin est- (a elle-ci est par un goulet Dans ce cas la superficie du bassin inférieure à 120 km².

VISUALISATION DES SAISIES

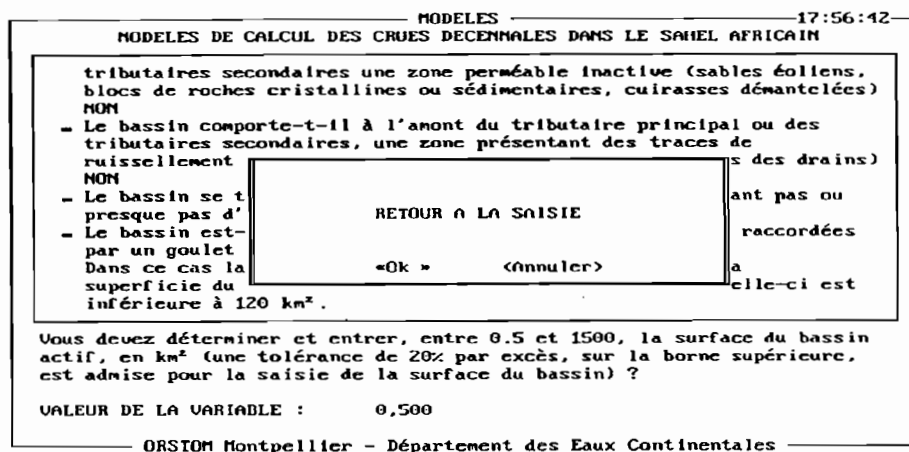
«Ok » <Annuler>

Vous devez déterminer et entrer, entre 0.5 et 1500, la surface du bassin actif, en km² (une tolérance de 20% par excès, sur la borne supérieure, est admise pour la saisie de la surface du bassin) ?

VALEUR DE LA VARIABLE : 0.500

ORSTOM Montpellier - Département des Eaux Continentales

Les touches d'édition classiques (PgUp, PgDn, Up, Dn, Left, Right, HOME, END) facilitent ensuite les déplacements et les recherches à l'intérieur de l'archive. Pour reprendre l'exécution du programme, taper sur la touche **Echap** ou la touche **Entrée** puis cliquer sur **OK** dans la fenêtre **RETOUR A LA SAISIE** (ou taper sur la touche **O**) :



2.3.4. Règles d'utilisation et de Saisie des données

Les règles générales d'utilisation du logiciel et de saisie des données sont les suivantes :

- La saisie de texte au clavier peut se faire indifféremment en **majuscules** ou en **minuscules**.
- Les réponses aux questions posées se font par **N (NON)**, affiché par défaut, ou par **O (OUI)**.
- Le **séparateur numérique** est la **virgule**. Dans la **Fenêtre de travail**, les nombres sont toujours affichés avec une précision de 3 décimales après la virgule (nombres saisis ou résultats brutes). Par contre, les valeurs affichées dans la **Fenêtre d'archivage** sont arrondies en fonction de leur précision connue ou attendue.
- Les **coordonnées géographiques** doivent être saisies en degrés et dixièmes de degré ; par exemple : 15,2 ou - 18 sont des valeurs admises. Néanmoins, l'estimation des hauteurs pluviométriques est faite avec une précision qui est celle des cartes d'isohyètes des précipitations annuelles et journalières de référence : localisation au 1/2 degré près.
- A l'ouest du 0°, les longitudes doivent être précédées du **signe -**, celles situées à l'est peuvent être saisies **sans signe**, le **signe +**, bien qu'accepté, n'étant pas nécessaire.
- Si une réponse erronée à une question posée est validée (au moyen de la touche **Entrée**), il est possible de revenir en arrière en tapant sur la touche **F3**. Cependant, dans certains cas, ce retour arrière n'est pas autorisé et un message s'affiche alors en haut et à droite de l'écran : "**RETOUR ARRIERE IMPOSSIBLE**".

- La demande de confirmation "**Voulez-vous CORRIGER ?**", dans le cas d'une réponse par OUI (O) ou par NON (N), ou "**Voulez-vous MODIFIER ?**", pour la saisie d'une valeur numérique, permet de changer les réponses ou les valeurs numériques proposées par défaut par le logiciel, ou de corriger les erreurs de frappe.
- La question "**Voulez-vous modifier ce résultat ?**" permet d'intervenir, si nécessaire, sur les résultats intermédiaires des calculs.

Ces différentes facilités donnent au logiciel une grande souplesse d'utilisation. Si, par exemple, seul est connu l'**indice global de pente I_g** du bassin et non la **dénivelée**, il suffit d'accepter, pour cette dernière, la valeur proposée par défaut, soit 0,010 m, puis de saisir ultérieurement la valeur de I_g en répondant OUI (O) à la question "**Voulez-vous modifier ce résultat ?**", lorsque apparaît à l'écran (8 pas plus loin) : "**L'indice global de pente en m/km est égal à : x,xxx**".

De la même manière, si le calcul automatique de la pluie journalière de fréquence décennale et de la pluie moyenne annuelle, à partir des coordonnées géographiques d'un point de référence du bassin, n'est pas souhaité ou si ces dernières ne sont pas connues, il suffit d'accepter la longitude -18,000 et la latitude 8,000, proposées par défaut, puis de taper sur la touche **Entrée** après l'affichage, dans le coin supérieur droit de l'écran, du message : "**ERREUR : Hors de la zone d'étude**". Les valeurs 0,000, alors proposées pour chaque hauteur de pluie (journalière et annuelle), peuvent être remplacées par les valeurs souhaitées en répondant OUI (O) à la question "**Voulez-vous modifier ce résultat ?**".

2.3.5. Fin de programme

Il est possible à tout instant d'interrompre le déroulement du programme en appuyant sur la touche **Echap**. Confirmation est ensuite demandée :

MODELES		18:09:31
MODELES DE CALCUL DES CRUES DECENNALES DANS LE SAHEL AFRICAÏN		
presque pas d'apports : NON - Le bassin est-il constitué de deux parties amont et aval raccordées par un goulet d'étranglement : NON Dans ce cas la superficie du bassin actif correspond à la superficie du bassin topographique total, si toutefois celle-ci est inférieure à 1		
- Vous devez déterminer la superficie du bassin actif, supérieure, es Z00 - Vous devez déterminer la superficie du bassin actif en m : 100 - Vous devez déterminer la superficie du bassin actif en m : 100	Voulez-vous quitter le programme ? <Oui> <Non>	surface du bassin : périmètre du bassin : dénivelée
Vous devez déterminer et entrer, entre -18 et 24, la longitude en demi-degré ? VALEUR DE LA VARIABLE : -18,000		
ORSTOM Montpellier - Département des Eaux Continentales		

Une réponse affirmative permet de revenir au **MENU PRINCIPAL**.

En fin de programme, non interrompu volontairement par l'utilisateur, apparaît dans le coin supérieur droit de l'écran le message "**FIN NORMALE**". En tapant ensuite sur n'importe quelle touche, s'affiche la fenêtre **VISUALISATION DES SAISIES** : l'option **Annuler**, sélectionnée à l'aide de la

souris ou en appuyant sur la touche **A**, fait apparaître le message **"PROGRAMME TERMINE"**. Il suffit ensuite d'utiliser une touche quelconque pour que s'affiche la barre de **MENU PRINCIPAL**.

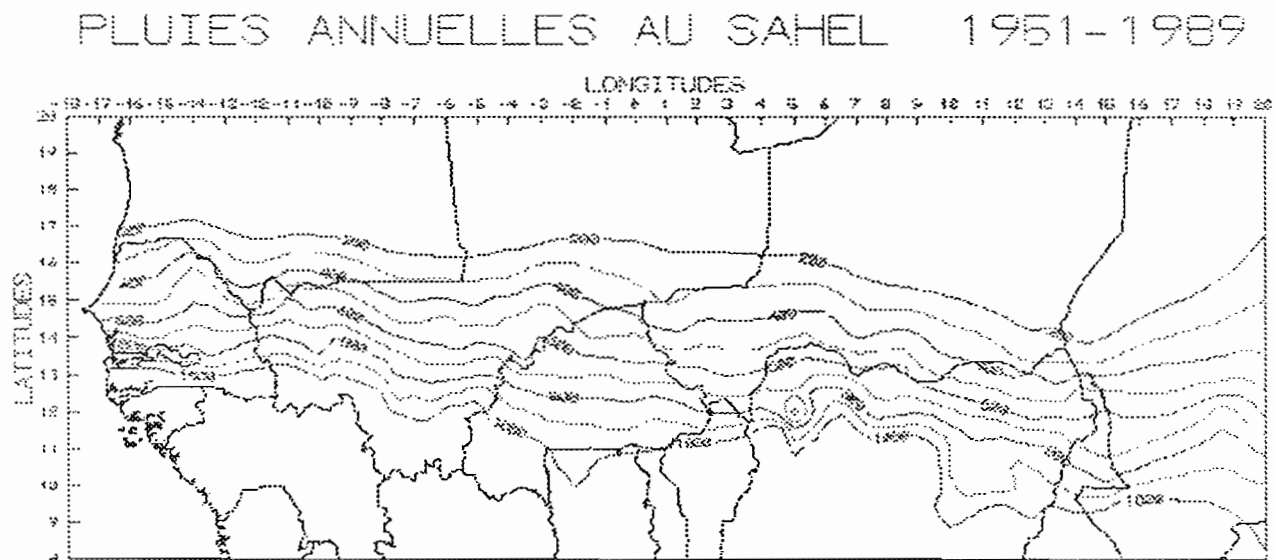
3. MENU "Pluies"

Dans le menu **Modèle**, deux des trois options disponibles (méthode *ORSTOM* et méthode *C.I.E.H.*) offrent la possibilité de déterminer automatiquement la hauteur pluviométrique journalière de fréquence décennale et la hauteur pluviométrique moyenne annuelle en un point défini par ces coordonnées géographiques (voir paragraphe 2.2). Par ailleurs, dans l'application de la méthode *de la section droite et de la pente*, la connaissance de ces deux hauteurs caractéristiques de pluies peuvent aider à l'estimation de la fréquence d'apparition du débit de crue calculé. Dans ce but et à titre illustratif, une visualisation des cartes d'isohyètes des précipitations journalières de fréquence décennale et des précipitations moyennes annuelles est offerte.

3.1. PLUIES ANNUELLES

L'option **Annuelles** du menu **Pluies**, sélectionnée en cliquant sur **Pluies** (ou en frappant les touches **Alt + P**) puis en cliquant sur **Annuelles** (ou en tapant sur la touche **A**), affiche à l'écran la carte des isohyètes des précipitations moyennes annuelles pour l'ensemble du Sahel africain.

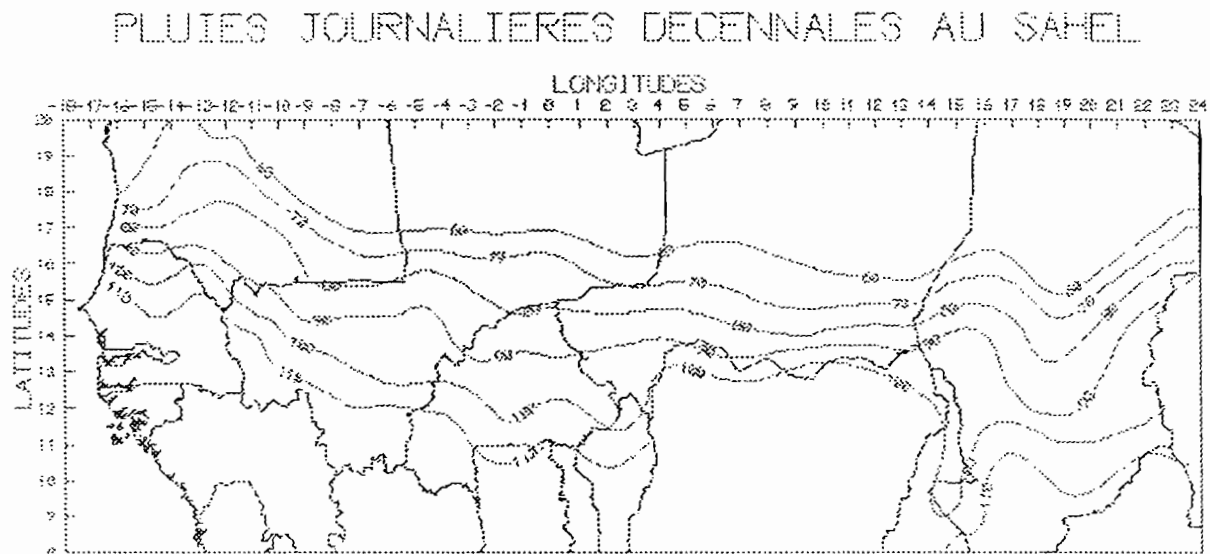
Cette carte a été établie à partir d'un fichier de hauteurs pluviométriques ponctuelles observées en différentes stations d'observations (Mahé, 1993).



3.2. PLUIES JOURNALIERES

L'option **Journalières** du menu **Pluies**, sélectionnée en cliquant sur **Pluies** (ou en frappant les touches **Alt + P**) puis en cliquant sur **Journalières** (ou en tapant sur la touche **J**), affiche à l'écran la carte des isohyètes des précipitations journalières de fréquence décennale.

Cette carte, élaborée par le C.I.E.H. (1985), a été numérisée.



3.2. FONCTIONNALITES

Une fois l'une des cartes affichée à l'écran, les fonctions suivantes sont disponibles :

- la touche **G** permet de visualiser, dans le coin inférieur gauche de l'écran, les coordonnées absolues (X et Y) du point matérialisé par le curseur qui peut être déplacé à l'aide des flèches de direction ;
- une seconde pression sur **G** provoque l'affichage, pour le même point, des coordonnées géographiques, exprimées en degrés et 1/2 degré, et de la hauteur de pluie (Z), exprimée en millimètres ;
- la touche **Echap**, frappée 2 fois, permet de sortir du menu **Pluies** et de revenir au **MENU PRINCIPAL**.

A 1

GESTION DES RESSOURCES
Approche régionale

WATER MANAGEMENT
regional approach

Atelier : Télédétection et gestion des ressources en eau

Gestion intégrée des bassins versants côtiers et des zones humides en milieu tropical. Apport de la télédétection

Marc LOINTIER

Chargé de recherche à l' ORSTOM
Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier
tél : (33) 67 54 87 03 ; fax : (33) 67 54 87 00 email : lointier@teledetection.fr

Résumé

L'aménagement progressif des zones humides et côtières du Département de la Guyane soulève, comme dans beaucoup de régions côtières, des problèmes de gestion de l'espace littoral, dans un contexte d'une communauté d'acteurs qui peut aller jusqu'au "conflit d'usage". Les recommandations de l'agenda n° 21 de la conférence de Rio en 1992 sur la gestion intégrée des zones côtières, peuvent être le point de départ d'un "exercice" de réflexion s'appliquant à un contexte géographique spécifique : 320 km de linéaire côtier, 1270 km² de zones humides à l'ouest de Cayenne, dont 5,2 % sont aménagées, une dynamique littorale très forte, en font une région où il est nécessaire que l'investigation scientifique s'appuie sur une importante base de connaissance. Parmi les méthodes utilisées pour mieux décrire les 4000 km² au total, de zones humides du Département, l'utilisation des données de télédétection est un atout majeur : plusieurs programmes, depuis 1987, ont permis de confronter l'expérience de terrain avec des données optiques (Spot, Landsat) mais aussi radar (ERS1, projets pilote de l'ESA n° 12).

L'utilisation des données satellite, qui convient parfaitement à la description de ces vastes espaces souvent difficiles d'accès, est intégrée à plusieurs niveaux de la démarche : nous montrons comment l'on peut analyser le linéaire côtier avec les données radar afin de qualifier, à un instant donné, les échanges entre l'océan et les zones humides. Nous montrons également comment les données optiques permettent d'aborder le problème de la cartographie thématique et comment celle-ci s'insère dans un problème, plus délicat, de description des unités écologiques et de classification des zones humides. Enfin, par l'utilisation dans certains cas particuliers des données radar multitemporelles, il est possible d'aborder des processus dynamiques en hydrologie des zones humides.

La réflexion est ensuite ouverte vers les moyens et les méthodes à utiliser pour obtenir des concepts génériques sur le fonctionnement de ces espaces, et ce qu'apporte une démarche systémique dans le contexte de "gestion intégrée".

I Introduction

La démarche de gestion intégrée des zones côtières est par nature assez complexe, multisectorielle et multi-acteurs. Parmi les tâches indispensables, il en est une qui revient au scientifique : l'inventaire, l'analyse des systèmes naturels et leur fonctionnement qui précède toute la démarche. Quelque soit la méthode de gestion choisie, l'analyse préliminaire des zones étudiées nécessite une méthodologie d'approche des milieux qui satisfasse à leur connaissance, à leur typologie, et lorsque c'est possible, à leur description systémique.

Les zones humides de la Guyane, situées non loin de la ligne de rivage, font l'objet de plus en plus de projets d'aménagement, alors que par ailleurs, elles sont reconnues, pour certaines de ces zones en liaison avec l'océan, comme des biotopes indispensables aux cycles biologiques d'espèces marines. La crevette *Penaeus*, par exemple, est une ressource économique importante pour le Département avec 5000 tonnes pêchées par an (Lhomme, 1992).

L'étude de ces vastes espaces "paraliques" nécessite l'utilisation de données spatialisées d'origine satellitaire, tant pour la description des milieux que pour leur approche fonctionnelle. Nous exposons dans ce travail quelles démarches ont été employées pour la finalité de "gestion intégrée", en utilisant les données optiques et radar ROS (Radar à Ouverture Synthétique), sur la zone côtière du Département de la Guyane.

II - Zone d'étude : les zones humides et les bassins côtiers

Le littoral du Département de la Guyane, s'étend sur 320 km, de l'embouchure du fleuve Maroni, frontière avec le Surinam, jusqu'à l'embouchure du fleuve Oyapok, frontière avec le Brésil.

1) les zones humides

La zone côtière marécageuse peut être divisée en deux sous-ensembles, séparés par la presqu'île de Cayenne (fig 1) :

-A l'ouest, de Cayenne au Maroni, la bande côtière est étroite (5 à 8 km), comportant de nombreux marais côtiers, dont l'ensemble représente une superficie de 1270 km².

-A l'est, entre Cayenne et l'Oyapok, on trouvera les deux grands ensembles marécageux de Kaw (720 km²) et de la pointe Béhague à la localité de Ouanary (910 km²).

Une des caractéristiques majeure de la plaine côtière de Guyane, est la présence de ces vastes espaces situés en arrière de la mangrove de front de mer, dont le fonctionnement est encore peu connu.

Par ailleurs, ce littoral est soumis à d'intenses phénomènes de dépôts et d'érosion liés au transport des vases de l'Amazonie (Prost, 1992 ; Muller-Karger et al., 1988 ; Eisma, 1988), entraînant l'ouverture ou la fermeture vers la mer de ces marais côtiers.

Au total, ce Département possède un ensemble de zones humides couvrant un espace de 4000 km², dont les échanges avec l'océan sont tributaires du phénomène de sédimentation ou d'érosion de la ligne de rivage. Ces écosystèmes ont une alimentation en eau d'origine pluviale, mais également fluviale par les petits bassins côtiers.

2) Bassins versants côtiers

Outre les grands estuaires qui traversent les zones humides, celles-ci sont souvent parcourues et alimentées par le réseau terminal de petits bassins versants. Ceux-ci sont recouverts de savanes exondées et de forêt primaire, et leur superficie est comprise entre 20 et 200 km². Les bilans sur ces bassins sont obtenus à partir de mesures hydrologiques (hauteurs, jaugeages) classiques. L'interprétation des mesures est souvent compliquée par des variations de hauteurs d'origine océanique ou du plan d'eau du marais aval (Lointier, 1994).

III - Matériels et méthodes

1) Les données satellite utilisées

Une série de données optiques et radar (projet pilote ESA/ppF12 UPMC/BRGM/Orstom) ont été acquises sur le littoral de la Guyane :

-données SPOT : panchromatique du 28 oct 1993

-données Landsat : 18 juillet 1988

-données radar (tableau 1):

ERS1 en bande C en mode standard (PRI). Les orbites sont descendantes, les acquisitions ont eu lieu à 14:15 TU, entre avril et décembre 1992

Un fond de carte thématique a été établi pour les sites étudiés en détail, en s'appuyant sur la carte IGN au 1 : 25 000^e et sur les résultats de traitements de données optiques (Spot, LandsatTM) de 1986 et 1988.

Une cartographie globale au 1 : 100 000^e a été réalisée avec les données radar ERS1 afin de couvrir l'ensemble du littoral.

2) Mesures de terrain

En l'absence de facilités d'accès, la plupart des prospections ont été faites en canot et à pied dans les savanes et les marais avec une progression souvent lente et difficile. Chaque relevé a été localisé par GPS (Global Positioning System) avec une précision de l'ordre de 20 mètres.

Prélèvements d'eau : destinés à déterminer la salinité des eaux rencontrées.

Tous les éléments de terrain ont été reportés sur la donnée SPOT panchromatique (fig 2).

3) La "gestion intégrée des zones côtières" : le système bassin versant et zone humide.
Contexte général de la démarche :

Les objectifs nécessaires à la gestion intégrée des zones côtières sont inspirés des résolutions de l'agenda n° 21 de la conférence de Rio en 1992 (A/CONF. 151/26, vol II, p.145). Il y figure l'objectif de "permettre dans toute la mesure du possible, aux particuliers, aux groupes, et aux organismes, d'accéder à une information pertinente et d'offrir les possibilités de consultation et de participation à la planification et à la prise de décision aux niveaux appropriés".

Trois recommandations viennent compléter cet objectif :

"a) créer et maintenir des bases de données pour l'évaluation et la gestion des zones côtières, des mers et de leurs ressources.

b) définir des indicateurs socio-économiques et écologiques.

c) Procéder à des évaluations périodiques de l'environnement sur les zones côtières et marines"

La base de données sur le littoral est en cours de constitution, notamment dans le cadre d'un projet labellisé "Eureka", nommé "ADAGE", et qui a pour objectif de créer un outil d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement de l'environnement. Le travail que nous présentons jette les bases d'une intégration des données spatialisées à cette démarche.

L'approche intégrée trans-sectorielle développée dans plusieurs travaux (IUCN, 1994; Gilard, 1995; Anys et al., 1995; Abrassart, 1994) propose un plan et un cadre de gestion qui prennent en compte la spécificité et la complexité de chaque site dans les domaines institutionnels et réglementaires ainsi que leurs relations avec les différentes composantes du milieu physique. Sans entrer dans les détails de cette approche dont la vocation est d'améliorer la méthodologie d'aide à la décision, il apparaît certaines étapes préliminaires incontournables comme :

-la définition de critères de description de l'espace par rapport à une thématique, dans le contexte du problème qui est posé.

-l'élaboration de règles de classification ou de typologie des milieux à décrire.

-la recherche de méthodes de zonage de l'espace.

Ces étapes dont la solution conditionne le résultat final, sont souvent traitées arbitrairement, faute d'éléments spatialisés.

IV - Résultats

Certains éléments "spatialisés" nécessaires à la description hydrologique des zones humides, sont obtenus par télédétection :

1) Propriétés biophysiques :

1.1) cartographie thématique avec les données optiques.

L'objectif est de rechercher avec ces données une description la plus fidèle possible des zones humides, l'occupation du sol, mais aussi des éléments indispensables à l'hydrologue comme l'étendue des marais, les zones de bas fonds à circulation...

Cette démarche classique, s'appuie sur les classifications par voie non dirigée réalisées à partir des données optiques, notamment Landsat TM.

La zone étudiée est un petit bassin versant côtier (la Karouabo), pour laquelle nous possédons une bonne réalité de terrain. Les thèmes retenus par classification des données satellite, ont été les suivants :

-eau libre

-systèmes inondés avec végétation de surface

-savanes (trois classes différentes)

-mangrove (deux classes : adulte et jeune)

-palmiers bêche et végétation arbustive de front de mer

-forêt

-terrains nus ou aménagés

Le retour sur le terrain avec les classements, a montré quelques confusions entre la forêt primaire des zones de forêt inondable et de forêt sur cordon. Par contre, les trois classes obtenues dans les savanes permettent de bien cartographier les bas fonds et les principales zones propices à la circulation de l'eau. Enfin, l'importance de l'extension des marais recouverts de végétation aquatique n'est pas mesurable. La biomasse de la végétation de marais est si importante, que la présence d'eau n'est pas détectable.

La complexité de ces milieux se révèle assez grande et leur description ne peut être faite que par étapes, avec un "retour au terrain" fréquent.

Nous considérerons que la couche d'information biophysique est pertinente pour une thématique simple, ne comportant pas plus d'une dizaine de classes.

L'utilisation d'une donnée SPOT panchromatique de 1993, nous a permis, pour le thème savane, d'améliorer la définition du réseau de circulation de bas-fond, principalement à cause de la résolution à 10 mètres (fig 3).

1.2) compléments thématiques avec les données radar

L'utilisation des données radar brutes permet de faire une discrimination des zones d'eau libre de son contexte environnant. Cette information est assez pauvre et s'enrichit par fusion multitemporelle de plusieurs dates, ou par filtrage spécifique comme GGMAP (maximum à postériori, Lopès et al., 1993 ; Nezry et al., 1993). Les possibilités de cartographie ont été démontrées sur ces zones (Lointier, 1993 ; Rudant et al., 1994) avec une thématique évidemment plus grossière qu'en optique : on distinguera, par exemple, les principales unités de paysage comme la forêt, les savanes et l'eau libre.

Les données radar actuelles présentent l'avantage de leur acquisition tout temps, complétant les lacunes d'information optique, et surtout d'offrir dans les milieux non forestiers une information originale, de nature géophysique, et qu'il convient encore d'interpréter.

2) Propriétés dynamiques

2.1) Évaluation qualitative du niveau d'échange des zones humides avec l'Océan à l'aide des données ERS1 :

Par degré d'échange, on entend la possibilité "mécanique" de l'eau de mer à entrer dans les zones humides, en arrière du cordon littoral. Une première approche de cette notion a été faite avec les données Landsat TM de 1988, en exploitant les canaux du spectre "visible" (1, 2 et 3) et en repérant le nombre d'émissaires côtiers, repérables en mer par leur panache turbide (Travassos, 1994).

Les données ERS1 (1992) ont l'avantage de couvrir une grande partie du linéaire côtier et de traduire la rugosité du milieu. Nous avons pu analyser, à la faveur des acquisitions à marée basse, 230 km de côtes, du marais de Kaw au fleuve Maroni. L'observation de terrain à pied et lors de survols aériens à basse altitude, confrontée aux informations radar, permet de définir quatre classes :

a-pas d'échange : présence de bancs de sable littoral "interdisant" l'intrusion océanique (signal rétrodiffusé faible et aspect rectiligne et étroit de la ligne de côte).

b-échange faible : mangrove adulte en cours de destruction, peu de passages dans le cordon sableux consolidé en arrière de la mangrove (signal rétrodiffusé fort et aspect de la côte dentelé).

c-échange moyen : banc de vase et mangrove jeune plus propice aux ruptures de cordon (signal absent sur bancs de vase).

d-échange fort : marais ouvert à l'océan (signal rétrodiffusé fort et étalé au contact avec l'océan).

La mesure des longueurs concernées nous permet de dresser le tableau 2. Les résultats globaux obtenus sont les suivants :

classe	longueur (km)	pourcentage
1	56	24
2	90	38,6
3	75	32
4	13	5,4

On constate globalement que un quart du linéaire analysé serait sans échanges avec l'Océan, et que la présence des marais complètement ouverts à la mer sont peu nombreux (5,4%). Ces résultats permettent de proposer un premier critère de caractérisation des zones humides littorales, fondé sur une information de type "niveau d'échange".

2.2)Cartographie d'événements hydrologiques :

Une série de données ERS1 obtenues à pas de temps assez court (3 semaines), en 1992, ont été comparées aux données hydrologiques des bassins versants de la Karouabo (Lointier & Rudant, 1994). Ce travail a permis d'obtenir une cartographie locale contenant une information de type dynamique et spatialisée (fig. 4). On obtient ainsi une "légende" comportant un terme temporel : stockage permanent, saisonnier, mensuel et à l'échelle de la crue.

Ce type de document nous permet d'aborder une description fonctionnelle des zones humides et de proposer, à partir d'études de cas particuliers, des concepts plus génériques.

3)Schémas de fonctionnement des zones humides

L'ensemble des informations (hydrologiques, spatialisées, dynamiques spatialisées) permet de proposer trois cas génériques de fonctionnement des zones humides :

- zone humide ouverte à la mer (fig. 5).

La prédominance marine s'exprime sur un réseau de drainage bien marqué, réutilisé en cas de fortes pluies. Ce système est en relation avec les plans d'eau saumâtres voisins qui subissent les effets dynamiques (variation de hauteurs) et mécaniques (flux et reflux) de la marée. Le marais d'eau douce intérieur est indépendant de ce système.

- zone humide avec échanges océaniques très réduits (fig 6)

Les eaux douces s'accumulent le long des cordons sableux, privilégiant les circulations latérales. Ces zones sont hors de l'influence de la marée. La communication avec l'océan s'effectue, lorsque le débit est important, par des chenaux, à l'aval des bassins versants. Ces zones sont de petits estuaires sous influence dynamique et mécanique de la marée.

- zone humide en relation avec un estuaire (fig. 7)

Les eaux douces continentales alimentent un système de savanes inondées temporairement ou en permanence. Celles-ci subissent uniquement l'effet dynamique de la marée.

V Conclusion

La description du milieu physique et de ses caractéristiques hydrologiques conduit doréavant à considérer l'information spatiale dont nous disposons par satellite, comme un moyen supplémentaire, de type "géophysique" (cf. radar), d'obtenir une information réaliste sur les caractéristiques des zones étudiées. L'analyse de ces données nécessite un retour au terrain toujours indispensable, ainsi que l'exploitation des mesures traditionnelles (hauteurs, débits).

L'approche spatialisée en hydrologie des zones humides nous a permis de montrer que l'information obtenue peut comporter trois niveaux informatifs :

-la cartographie précise et géoréférencée des limites des grandes unités naturelles (plans d'eau, savanes, marais...) et du réseau de circulation de l'eau.

-la cartographie qualitative de certaines relations entre les zones humides et son environnement (carte du linéaire côtier et de sa "perméabilité" aux processus océaniques).

-la cartographie de certaines réponses du milieu (par l'approche multitemporelle), permettant d'introduire une dimension dynamique dans la description de ces zones (réponse à un événement, à une série ou à l'ensemble de la saison des pluies).

Ces caractéristiques spatialisées, intrinsèques au milieu, sont autant de "couches d'information" qui doivent être introduites dans la démarche de synthèse pour aborder leur modélisation, mais aussi de leur classification. La démarche conventionnelle (et complexe) de classification de l'espace, qui est de type "systématique" par la recherche d'une typologie des zones humides, se trouve enrichie d'informations sur les fonctions hydrologiques (Brinson, 1994) de chaque unité localisée par l'approche spatialisée. C'est l'introduction d'une approche systémique.

La démarche qui consiste à classer l'espace en de zones homogènes, munies d'une typologie robuste, ne va-t-elle pas nous conduire à considérer la seule entité réellement homogène à nos échelles d'observation : le pixel ?

Références bibliographiques

- Abrassart, J. (1994) Un outil d'aide à la décision pour évaluer et réduire la pollution (N,P) des élevages intensifs à différentes échelles géographiques. Conférence SIG et changements d'échelle. Maison de la télédétection de Montpellier.
- Anys, A. et al. (1994) Remote sensing and GIS based mapping and modelling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. Geocarto International. Vol 1, pp. 31-40
- Brinson, M. M., W. Kruczynski, L. C. Lee, W.L. Nutter, R.D. Smith & D.F. Whigham (1994) Developing an approach for assessing the functions of wetlands. Global wetlands : Old World and New. Edited by Mitsch W. J. Elsevier Science B.V.
- Eisma D., (1988) - Dispersal of Amazon supplied particulate matter. Abstracts of the Chapman Conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System : River and Ocean. AGU. Charleston. Wild Dunes, USA.
- Gilard, O. (1995) De nouveaux concepts pour l'aménagement des rivières : ralentissement dynamique et méthode inondabilité. Cemagref Lyon. Division hydrologie-hydraulique. Support de cours Engref.
- IUCN, (1994) - Cross-sectoral, Integrated Coastal Area Planning : Guidelines and Principles for Coastal Area Development. 219 Huntington road, Cambridge, CB3 0DL, UK. 64 pp.
- Lhomme, F., (1992) - Le recrutement des postlarves de la crevette *Penaeus subtilis* dans deux estuaires de Guyane Française. Annales de l'Institut Océanographique, Paris, 68 (1-2) : 169-178.
- Lointier, M. & Rudant, J.P., (1994) Contribution du SAR de ERS1 à l'analyse hydrologique en milieu tropical humide : résultats du programme pp-F12 en Guyane. Xe journées hydrologiques Orstom. Orstom éd.
- Lointier, M., (1994)-Etude Hydrologique des Bassins de la Karouabo et de la Passoura -lot 3- : rapport d'étude Orstom/Cnes, Cayenne, 86 p.
- Lointier, M., Rudant, J.P. Sabatier, D. & Prost, M.T., (1993) Contribution of ERS1 Sar data to hydrologic approach in tropical area : example in French Guiana. Second ERS1 Symposium. Hamburg. ESA Ed.
- Lopes, A., Nezry E., Touzi R. & H. Laur, (1993)-Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. Intern. Journ. of Remote Sensing, vol. 14, 9, 1735-1758, June 1993.
- Muller-Karger F., McClain, C.R. & Richardson, P.L., (1988)-The dispersion of the Amazon's Water, Nature, vol 333, n° 6168 : 55-59 May 1988. USA.
- Nezry E., Lopes A. & D. Ducros-Gambart, (1993)-Supervised radiometric and textural segmentation of SAR images. Proceedings of IGARSS' 93, Tokyo (Japan), 18-21 August 1993, IEEE 93CH3294-6, vol.3, 1426-1428.
- Prost M.T. & Charron C. (1992)-L'érosion côtière en Guyane. In "Coastal Protection: International Experiences and Prospect". Special Issue of the Cahiers Nantais. Ed. A. MIOSSEC. Univ. de Nantes. France
- Rudant, J.P., Baltzer F., LCL Czerwinski G., Deroin J.P., Lointier M., Maître H., Pénicand C., Prost M.T., Sabatier D.- (1994) -Possibilités cartographiques offertes par ERS1 en contexte tropical humide (Projet pp-F12). Exemples en Guyane. Workshop ERS1 ESA, Tolède, Juin 94.
- Travassos, P., (1994) - Cartographie par télédétection optique et radar du littoral de la Guyane. Importance de la mangrove pour la production crevette. Mémoire de DESS/CETEL93-94.

Tableaux

Tableau 1 : Données radar utilisées

satellite	date	résolution	bande/polarisation	incidence
ERS1(RTM)	09 avril 1992	30 m (pixel=12,5m)	C (5,3 GHz) - VV	40°
ERS1(PRI)	17 avril 1992	id.	id.	23°
ERS1(PRI)	03 mai 1992	id.	id.	23°
ERS1(PRI)	22 mai 1992	id.	id.	23°

Tableau 2

Evaluation qualitative du niveau d'échange des zones humides avec l'Océan

km cumulés	catégorie	long KM
10,2	3	10,2
22,9	2	12,7
27,9	3	5,1
35,1	2	7,1
55,4	3	20,3
70,6	2	15,2
96,0	2	25,4
108,2	3	12,2
113,3	4	5,1
136,1	2	22,9
148,8	1	12,7
162,6	3	13,7
170,2	4	7,6
176,8	2	6,6
186,9	1	10,2
190,0	3	3,0
212,9	1	22,9
223,0	3	10,2
233,2	1	10,2

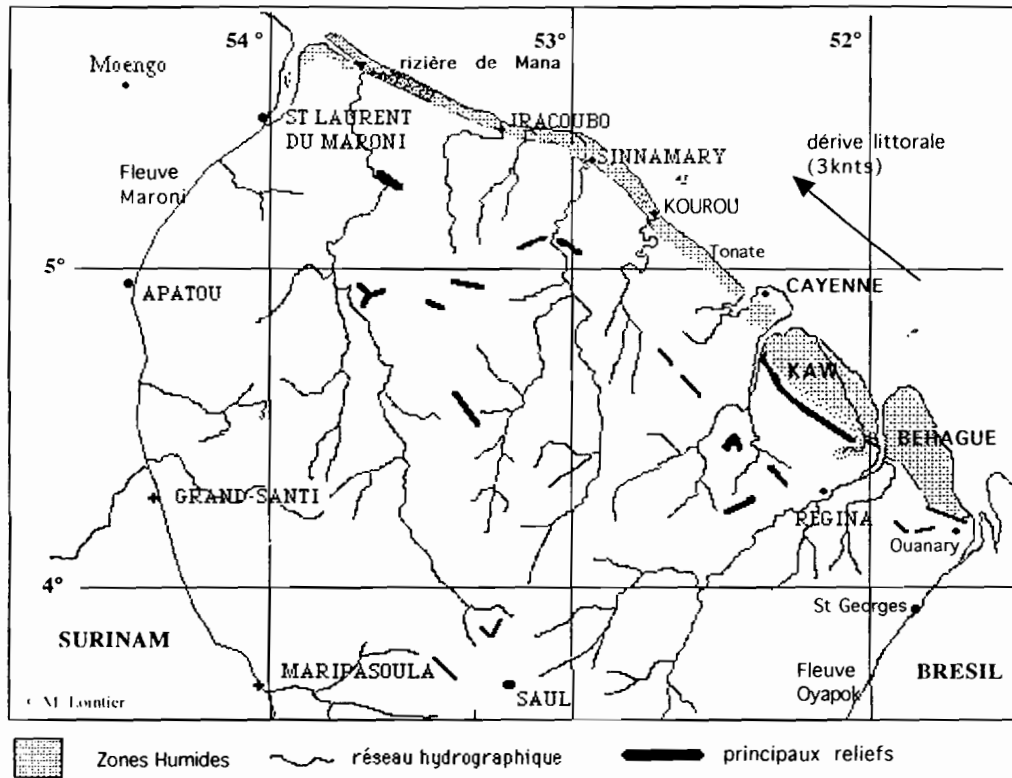


Figure 1 : Département de la Guyane (partie nord)



Figure 2 : Report des données de terrain sur les données Spot panchro (28 oct 1993). Cette zone test constitue une des zone d'entrainement pour la cartographie globale des circulations.



Figure 3

Carte des drains et des sens de circulation dans les savanes et les marais côtier de la Karouabo. Interprétation des données Landsat TM et SPOT panchromatique d'après les données de terrain.

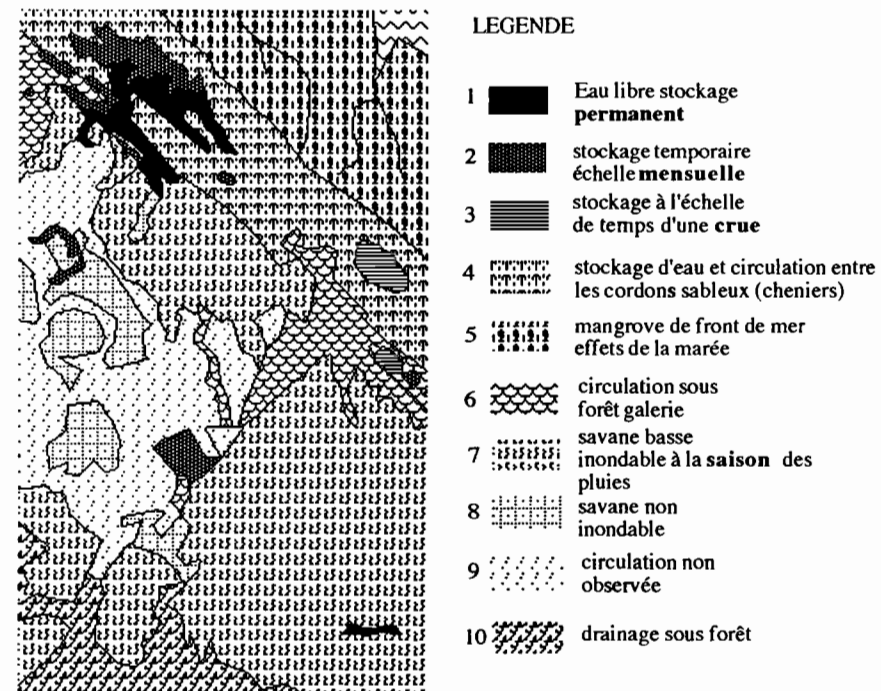


Figure 4

Interprétation des données radar multitemporelles. Le croisement avec les données hydrologiques permet de réaliser un document contenant une information de type dynamique et spatialisée.

Figure 5 Zone humide ouverte à la mer

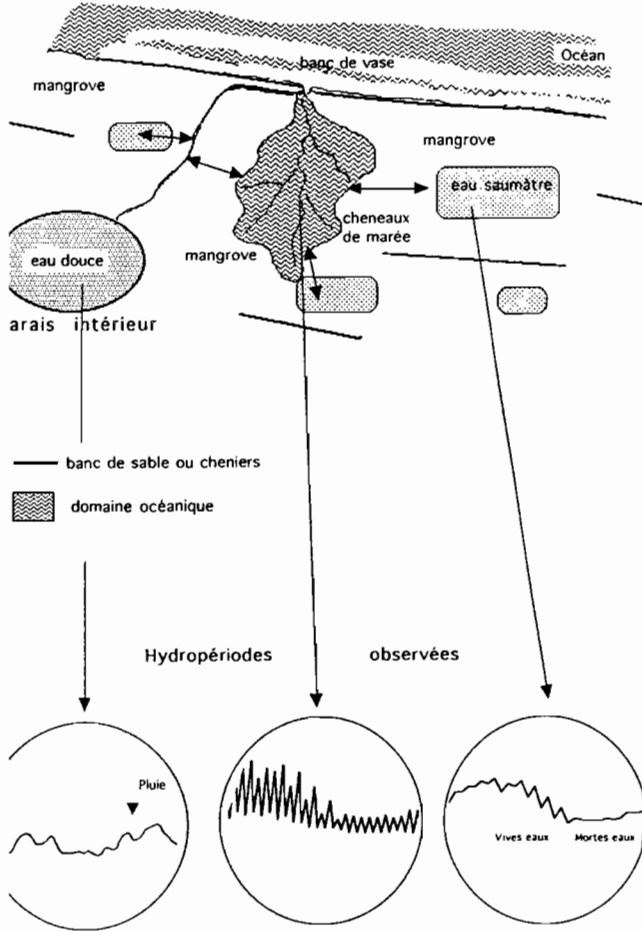


Figure 6 Zone humide en faible relation avec l'Océan

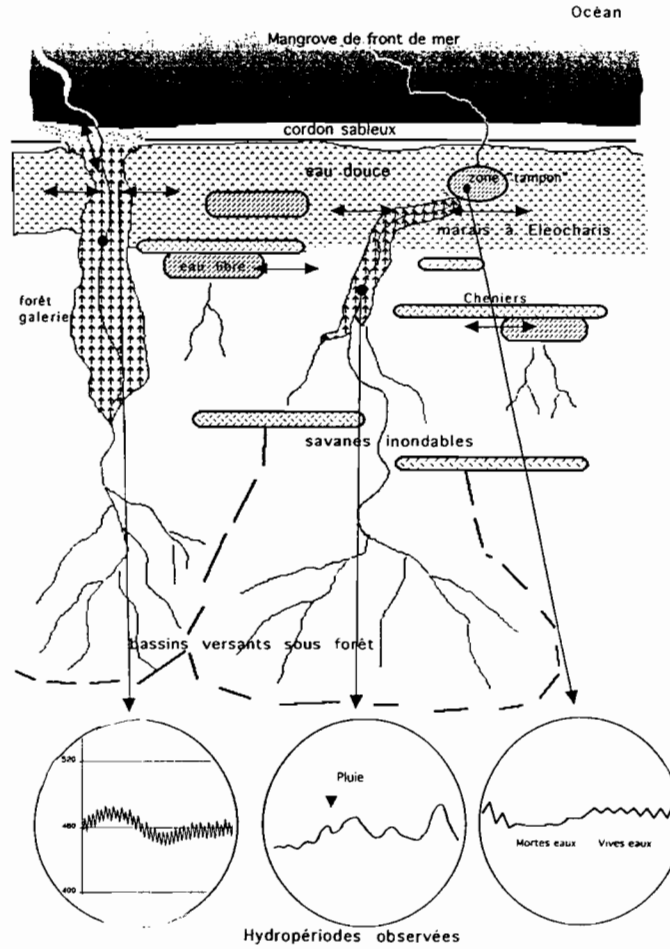
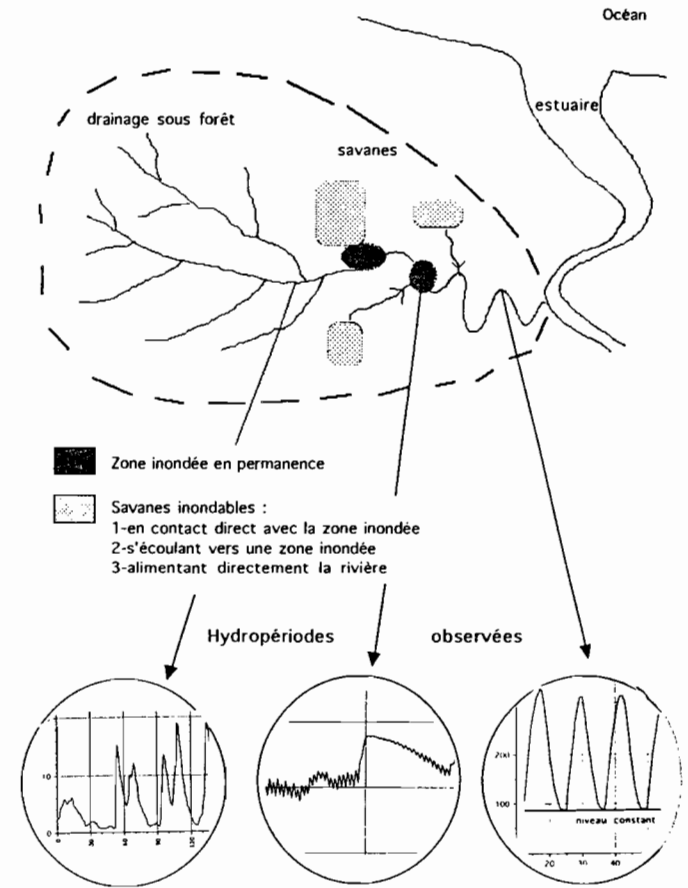


Figure 7 Bassin versant et la zone humide associée en relation avec un estuaire



EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE SOCLE PAR L'ETUDE DES FRACTURES A L'AIDE DES DONNEES LANDSAT DANS LE BASSIN D'ODIENNE.

SAVANE Issiaka*, GOZE B. Bénié**, H.Q. GWYN***

* Institut d'Ecologie Tropicale 08 BP 109 Abidjan 08
** CARTEL, Université Sherbrooke, P.Q Canada J1K2R1

Résumé : Dans le cadre d'un projet de recherche entre U R E F , I.E.T. et le CARTEL de l'Université de Sherbrooke, visant à évaluer le rôle de la télédétection dans la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin, une étude structurale et géologique par télédétection a été entreprise. Cette étude avait pour but, l'inventaire des réseaux de linéaments principaux dans le choix des sites privilégiés des forages.

L'interprétation géologique des images associée aux données géologiques déjà existantes sur la nature des roches, a permis d'établir une carte d'unités géologiques et des axes structuraux majeurs sur des formations constituées à grande partie de granite et granite migmatique. L'exploitation des données provenant à la fois des études sur l'affleurement, de l'interprétation des photographies aériennes, et des images satellitaires a permis de dégager les grandes orientations tectoniques suivantes : No-20°, N30-60°, N80-100°, et N120-170°, dont l'âge varie du Paléozoïque inférieur au Crétacé.

Les diagrammes de fréquence ont permis de déterminer les grandes directions de fractures de tension pouvant parfois présenter des ouvertures productives. Ce sont les directions NE, NW, NS. Les traitements numériques ont porté sur le rehaussement, les rapports et combinaisons entre bandes TM et la classification semi-dirigée. On a retenu les composantes principales et le rapport $TM 7 - TM 4 / TM 7 + TM 4$.

Abstract : In a project setting between UREF - IET and the CARTEL, aiming at to evaluate the remote sensing implication in fractured- rock and underground water research, a structural and geological study has been undertaken. The purpose of this study was to make the inventory of major lineament networks in best well-yield locations. Order to find the geological images interpretation together with existing geological data on rock nature, allowed to establish geological and structural map. Geological formations are mainly constituted of granite and granite-migmatite. Data exploration providing by both outcrop, aerial photographs and satellite images studies allowed us to put evaluate the following high tectonic trends : NO-20°, N30-60°, N80-100° ans N120-170°, which age ranges from inferior Paleozoic to cretaceous. Frequence diagrams allowed us to determine high tension fracture directions which can often be present opening productive. These directions are NE, NW, NS. Numeric processing consisted of enhancement, ratio and combinason between TM bands and classification semi-diriged. We retained principal components and the $TM7 - TM4 / TM7 + TM4$ ratio.

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de ses activités, le réseau de Télédétection de UREF, l'IET, et le CARTEL ont initié un projet de recherche des eaux souterraines en milieu de socle au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Ce projet vise à situer la place de la télédétection dans la résolution de ce problème. L'une des méthodes les plus utilisées dans la prospection des eaux sosuterraines dans le socle

est la sélection des sites d'implantation des forages à grand débit, par l'exploitation des fractures. C'est sur cet aspect, que nous avons concentré nos efforts. Les problèmes d'échelle, de superposition des documents et des reproductions photographiques des scènes Landsat aux cartes topographiques limitent la précision dans le choix des sites. Les travaux de Biémi (1992) sur le bassin de la Marahoué, sur la géologie et les linéaments régionaux, les travaux de Géomine (1986) sur la géologie de la région d'Odienné ont été les éléments de base de ce travail.

Notre contribution consiste à l'inventaire des réseaux de fracture à rôle hydraulique dans la région, l'étude géologique et structurale à partir des scènes Landsat et la comparaison des grandes directions de fracture, à partir de l'analyse de terrain, de photoaérienne et de l'image satellitaire. L'intégration numérique de ces données ont permis de réaliser la cartographie de la région et l'étude de l'exploitation des fractures dans la recherche de la productivité des forages.

II. METHODOLOGIE

L'étude de ce site a nécessité trois scènes Landsat Thematic Mapper. Ce sont des images du 8 Janvier 1986, du format 6250 BPI adaptable au logiciel I2S, dont les caractéristiques sont les suivantes :

Paths	Rows	Quadrant
199	53	2 et 4
198	53	1 et 3
198	54	1 et 2

En plus de ces scènes, une représentation photosatellitaire du site à l'échelle 1/100.000 a été utilisée. Ces images ont été prises en l'absence de nuages, en pleine saison sèche. La création de la mosaïque a nécessité un calibrage radiométrique (ajustement de la moyenne et de l'écart-type entre les secteurs de recouvrement) ; la correction géométrique comporte un rééchantillonnage de la taille des pixels à 50 * 50 mètres, compte tenu de la grande superficie du secteur d'étude (13.340 Km²). Les bandes 3 (rouges), 4 (proche infrarouge), 5 (infrarouge moyen) et 7 (infrarouge lointain) ont été retenues.

Les traitements d'images ont porté sur la recherche des combinaisons d'images rehaussées favorisant la discrimination des ensembles lithologiques et la perception des linéaments sur les compositions colorées. Ainsi, l'étude géologique a été menée à partir des composantes principales, du rapport TM7 - TM4, de la combinaison TM6 + TM7 et des filtres directionnels de Sobel utilisant une matrice 3 * 3 ou 7 * 7. Plus de 200 photos aériennes ont été utilisées pour couvrir la zone d'étude, et à partir desquelles les études des linéaments et de la géomorphologie ont été menées. Ces photos sont à l'échelle 1/50.000, en noir et blanc. A ces images et photos, s'ajoutent les cartes topographiques 1/200.000 et les informations géologiques préexistantes ou recueillies lors des études géologiques à l'affleurement.

III. PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1. Cartes géologiques

L'esquisse de la carte géologique (fig. 1) met en évidence l'importance des granites à biotite d'extension régionale qui occupent 42 % de la superficie, vient en deuxième position les migmatites (migmatites anciennes et récentes) avec 30 % de la superficie, les granites à biotites homogènes, granites à 2 micas et granodiorites occupent 11 %. Les métasédiments et

métavulcanites 5 % et le gneiss 12 %. Les formations impliquées dans les orogénèses qui affectent la région d'Odienné peuvent être divisées en deux groupes (Potin, 1988) :

- Les roches métamorphiques constituées de reliques de roches libériennes, d'un ensemble de roches d'origines volcanique, subvolcanique et sédimentaire qui se sont mises en place dans les sillons d'âge birrimien, d'orthogneiss et amphibolites considérés tantôt comme libérien, tantôt comme précoces en cycle éburnéen. Le métamorphisme qui affecte ces formations est du faciès granulite pour les roches libériennes, généralement du faciès schiste pour les métavulcanites et les associées, enfin du faciès amphibolite pour orthogneiss et amphibolites.

- Les plutonites dont l'essentiel est formé de granitoïdes et de roches associées. Toutes ces formations ont subi d'importants phénomènes dont elles portent la marque.

L'étude pétrographique des granitoïdes d'Odienné a permis de distinguer les granodiorites, les granites hétérogènes, les granites homogènes, les granites à 2 micas, les pegmatites et aplites associées.

Les faciès sont très variés, tant par leur texture, leur structure que par leur composition minéralogique. Les faciès les plus fréquents ont un aspect orienté avec des alternances à limites diffuses de zones leucocrates à grains moyens et des zones mésocrates, en général à grains plus fins, à biotite ou biotite amphibole (Géomines, 1982). Tous ces faciès présentent :

- une altération hydrothermale qui s'exprime souvent par une séricitisation des feldspaths, une chloritisation de la biotite et une ouralisation de l'amphibole ;

- une cataclase caractérisée par des torsions ou ruptures des minéraux accompagnées parfois de petits décrochements de macles ; une linéation minérale fréquente, l'extinction onduleuse et les bandes de déformations dans le quartz, preuves d'une mise en place syncinématique.

Enfin un zonage de feldspaths marque le caractère magmatique de ces formations.

Le Birrimien est représenté par des métasédiments et métavulcanites présents surtout dans la partie centrale de la carte.

Les migmatites anciennes ont été cartographiées dans la partie Est et Nord-Est. Les gneiss traversent la carte du NNO-SSE (fig.1).

3.2. Réseaux de linéaments régionaux

Les linéaments identifiés à partir des images TM et ceux identifiés par photographie aérienne ont été superposés aux fractures observées sur les affleurements. Les rosaces de direction représentés à partir de ces trois observations, ont permis de déterminer les grandes directions de fractures régionales (Fig.2). On a pu noter une très forte correspondance entre les traits géologiques dominants perçus sur les trois données. Ceux-ci se répartissent selon les principales directions tectoniques : N0-20°, N30-60°, N80-100°, N120-170°.

Direction N0 - 20°

Elle correspond aux grands couloirs de cisaillement de zievasso, qui est le prolongement de la faille de Séguela, et de Tiémé ; et aux failles de Niamasso, Tiémé, Sokoro, Odienné, et Sirana d'Odienné.

Direction N30-60°

C'est la direction la plus pourvue en accidents majeurs. On y distingue les couloirs de cisaillement de Samango et les failles de Kaniasso, Mafeleni et Sangouani.

Direction N80-100°

Fig. 1. CARTE GEOLOGIQUE DE LA REGION D'ODIENNE

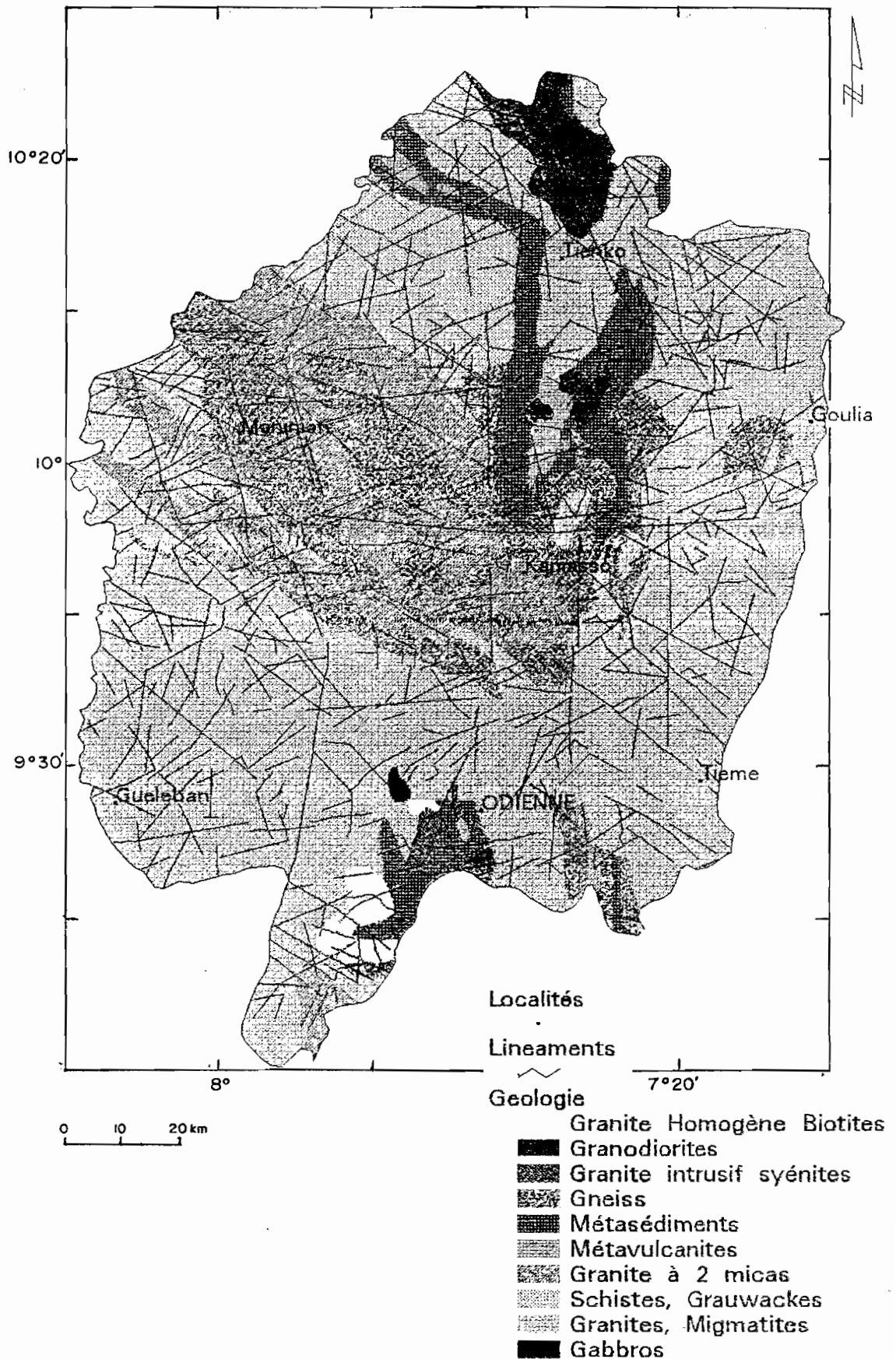


Fig. HISTOGRAMME DE FREQUENCE DE FRACTURES
SUR LES PHOTOS AERIENNES

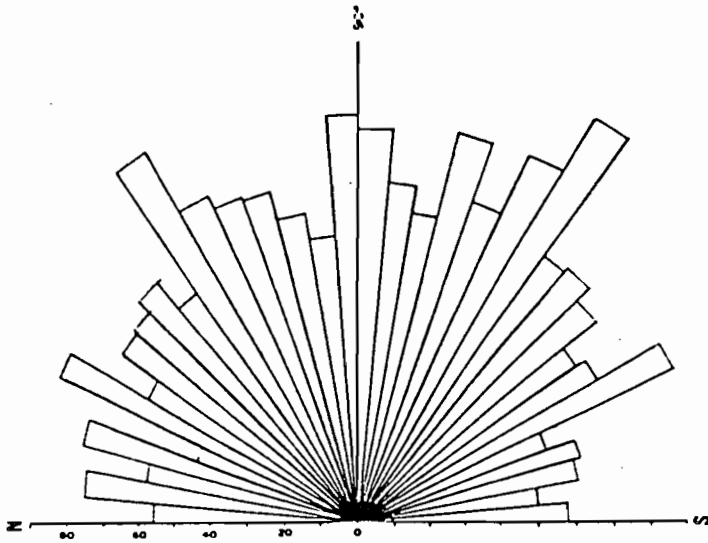


Fig. HISTOGRAMME DE FREQUENCE DE FRACTURES
PAR LES IMAGES SATELLITAIRES

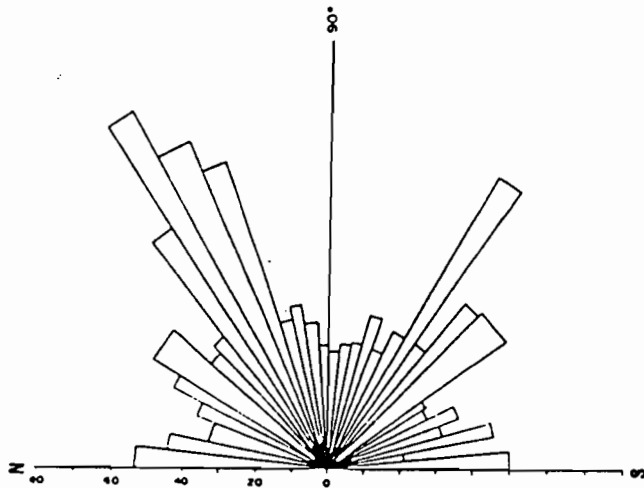


Fig. HISTOGRAMME DE FREQUENCE DE FRACTURES
SUR LE TERRAIN

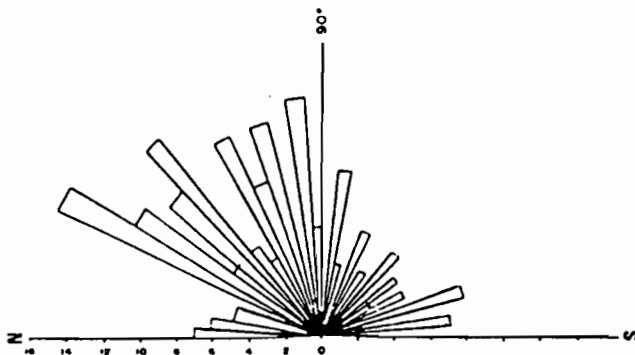


Fig. 2 HISTOGRAMME DE FREQUENCE DE FRACTURES

Les accidents Est-Ouest sont plus nets surtout du côté Ouest de la carte. Ils s'expriment par les failles de Gouando, Kadiola, Koubouena, et Goulia.

Direction N120-170°

Elle caractérise les couloirs de Ngoloblasso, Sambadougou, Goulia et les accidents de Tiela, Samakona, Kimbirila, Tougouso.

Les trois méthodes présentent des directions presque similaires. Le diagramme de fréquence à partir des observations sur les affleurements, est légèrement différent des deux autres observations. Cela s'explique par le fait que : d'une part le nombre de fréquence d'observations des directions des fractures sur les affleurements est faible en raison des difficultés d'accès à tous les endroits du site pour une observation effective, alors qu'avec les images satellitaires et les photos aériennes cette observation est effective même dans les endroits les plus reculés du site ; d'autre part, en plus de la restriction des affleurements à observer, il existe une importante omission d'observation de directions de fractures au moment des collectes des données.

Les observations des images offrent donc beaucoup plus d'avantages et de temps dans l'élaboration d'une carte de fractures que celles de terrain.

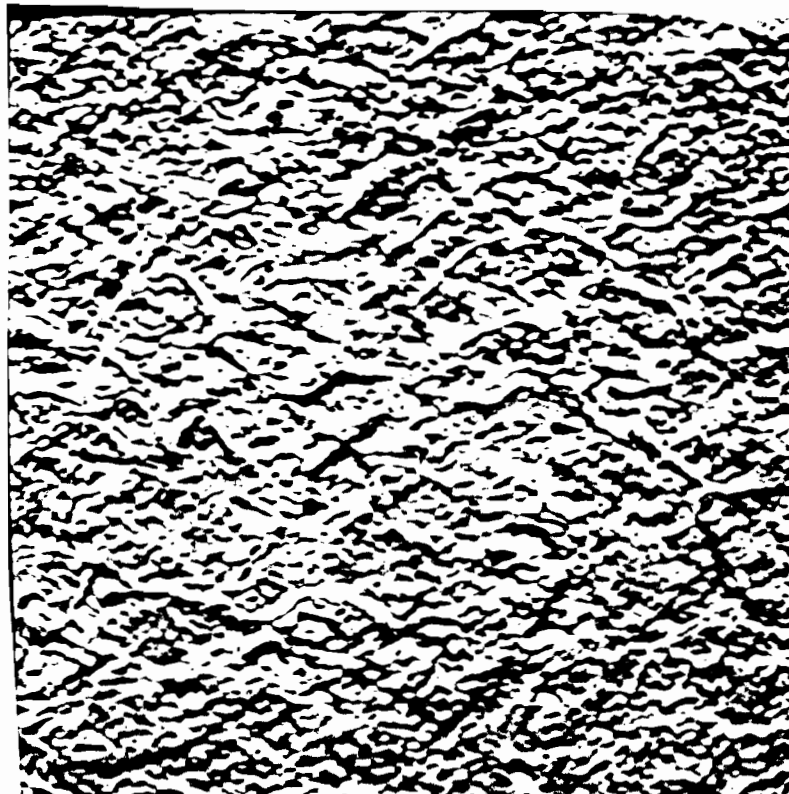
D'une façon générale, ces accidents s'intègrent parfaitement à la tectonique cassante de la Côte d'Ivoire. Les couloirs de cisaillement correspondent à des directions majeures dans le socle africain. Ces cassures dans le socle seraient apparues au cours des orogénèses libériennes (2500 MA), panafricaine (600 MA), hercynienne (350 MA) ou au moment de l'ouverture de l'Atlantique, il y a 200 MA (Biémi et al, 1991), Cependant, nombre d'entre elles auraient subi continuellement des phases de remobilisation depuis le Cretacé.

3.3. Interprétation hydrogéologique des images

3.3.1. - Filtrage directionnel de Sobel

Les images obtenues à partir du filtre directionnel de Sobel permettent de mettre en évidence les structures du sol en fonction des directions choisies. Nous avons choisi quatre directions : N-S, E-O, NE-SO, SE-NW.

La photo 1 représente la structure du sol de la fenêtre (2) de l'image dans la direction N-S.



3.3.2. - Les indices de la présence d'eau souterraine

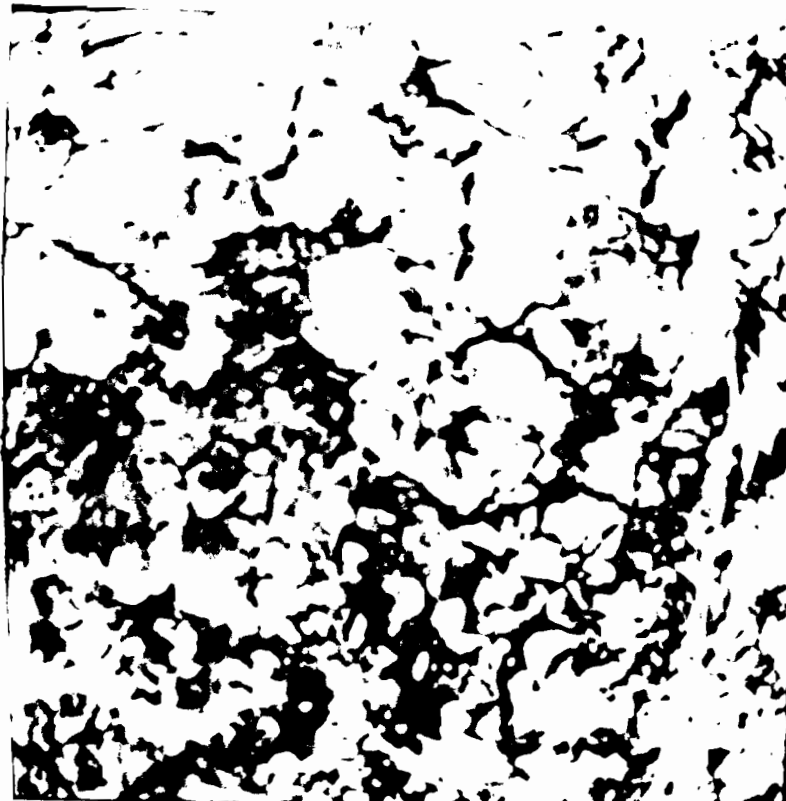
Ce sont des indices qui permettront d'orienter sur les images les recherches après l'utilisation des différentes techniques de rehaussement.

3.3.2.1. - Les couloirs de cisaillement

Les couloirs de cisaillement sont de grandes zones de fractures du substratum qui drainent les eaux souterraines à une grande échelle. C'est la raison pour laquelle en hydrogéologie de socle, c'est l'un des éléments les plus visés.

Les images obtenues à partir de la combinaison additive des canaux TM6 et TM7, permettent de mettre en évidence cette structure.

La photo 2 met en évidence des zones de couloirs de cisaillement après rehaussement des images TM.

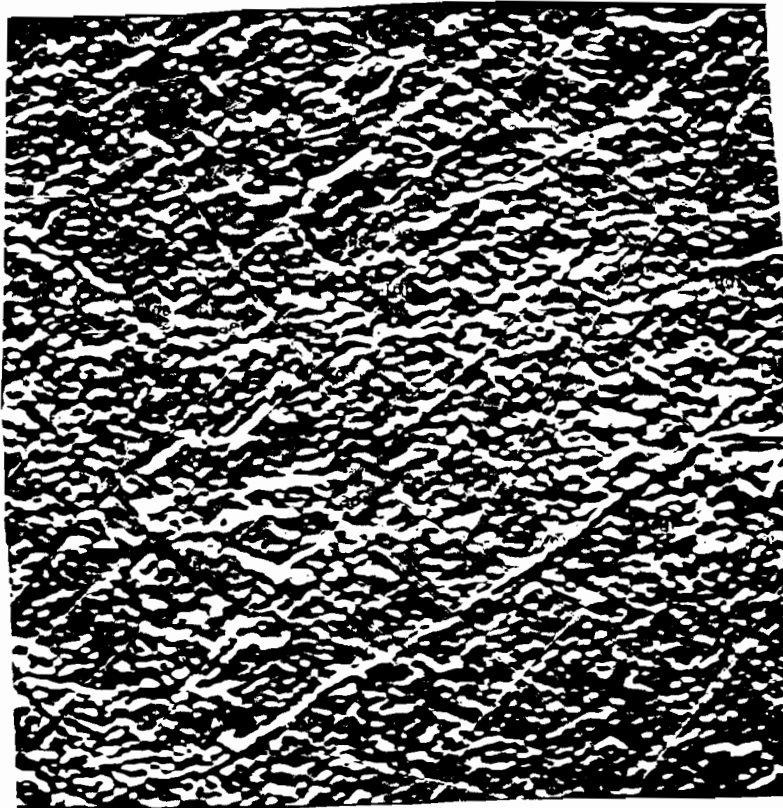


Les images de la combinaison additive font ressortir également plusieurs structures liées aux accidents tectoniques. Ainsi, on peut distinguer des structures circulaire , des structures en étoile et des structures en damiers .

3.3.2.2. - Recherche des sites d'implantation des forages

L'obtention d'un grand débit dépend en grande partie du positionnement des forages. La position la plus convoitée est celle située sur l'intersection de deux ou plusieurs fractures kilométriques.

Le rehaussement des images TM par le filtre directionnel de Sobel, permet de mettre en évidence les grandes fractures dans les différentes directions. Par l'intermédiaire d'un système graphique, on peut tracer ces fractures et ensuite déterminer les différentes intersections qui offrent plus de chance de succès (la photo 3).



3.4. - Relation entre fractures, positionnement et productivité des forages

Si l'on tient compte des critères d'implantation des forages dans le socle qui sont :

- être dans le croisement de fractures les plus longues, les plus nettes et si possible les plus nombreuses.
- être en un point topographiquement bas,
- être en aval d'un bassin versant le plus large possible,
- être à proximité d'un marigot permanent.

On doit admettre que chaque forage réalisé dans le socle est positionné par rapport à au moins un accident appartenant à une direction tectonique déterminée. Par conséquent, l'étude des

relations entre forages et fractures peut s'avérer intéressante pour expliquer le rôle hydraulique de certaines directions d'accidents.

La carte de linéaments réalisée à partir des images satellitaires a été introduite dans le système Arc-Info. Dans ce système, nous avons classé les fractures selon les directions N-S, NE-SO, E-O et NO-SE. Sur ce fichier, nous avons superposé la base des données sur les ouvrages à la carte de linéament, après avoir produit une carte thématique représentant la distance de tout point de la zone d'étude par rapport au linéament le plus rapproché. On a déterminé par le système Arc-Info, la distance séparant chacun des 134 ouvrages de la fracture la plus proche dans chacune des quatre directions précitées.

3.4.1. - Influence des accidents sur le positionnement des forages dans le socle

Le calcul des pourcentages d'ouvrages liés à chaque direction tectonique au moment de l'implantation des ouvrages donne les résultats suivants :

Pourcentage de forages liés à chaque direction tectonique

N-S	: 22.35 %
NE-SW	: 29.10 %
E-W	: 22.68 %
NW-SE	: 25.88 %

Ces pourcentages permettent de classer les accidents en fonction de leur influence dans le positionnement des forages : NE-SO > NO-SE > E-O > N-S.

Les accidents NE-SO et NO-SE qui s'associent aux directions libériennes et éburnéennes d'Afrique, sont les mieux visibles sur les images satellitaires.

Quand on étudie la répartition des gros débits suivant les quatre directions, on constate que :

Pourcentage de gros débits et des débits moyens dans chaque direction

% de débit > 6 m³/h

N-S	: 2,73 %
NE-SW	: 29,80 %
NW-SE	: 32,36 %
E-W	: 35,12 %

% de débit 3 < Q < 6 m³/h

N-S	: 23,83 %
NE-SW	: 31,74 %
NW-SE	: 26,93 %
E-W	: 17,50 %

Pour les débits supérieurs 6 m³/h, on note 35,12 % liés aux fractures E-W, 32,36 % liés à NW-SE et 29,80 % à NE-SW, et seulement 2,73 % à N-S. Donc, du point de vue productivité, ce sont les accidents E-W et NW-SE qui sont les plus importants.

L'influence des accidents NS- et NE-SW n'est remarquable que sur les débits moyens. En effet, dans ce cas, 55 % des ouvrages à débits moyens sont liés ces fractures.

3.4.2. - Régression des pourcentages des forages en fonction des distances de leur éloignement par rapport aux fractures

La distribution des ouvrages à l'intérieur des classes d'éloignement de 200 en 200 m par rapport aux fractures est représentée dans le tableau 1. Elle a été interpolée dans le système Arc-Info.

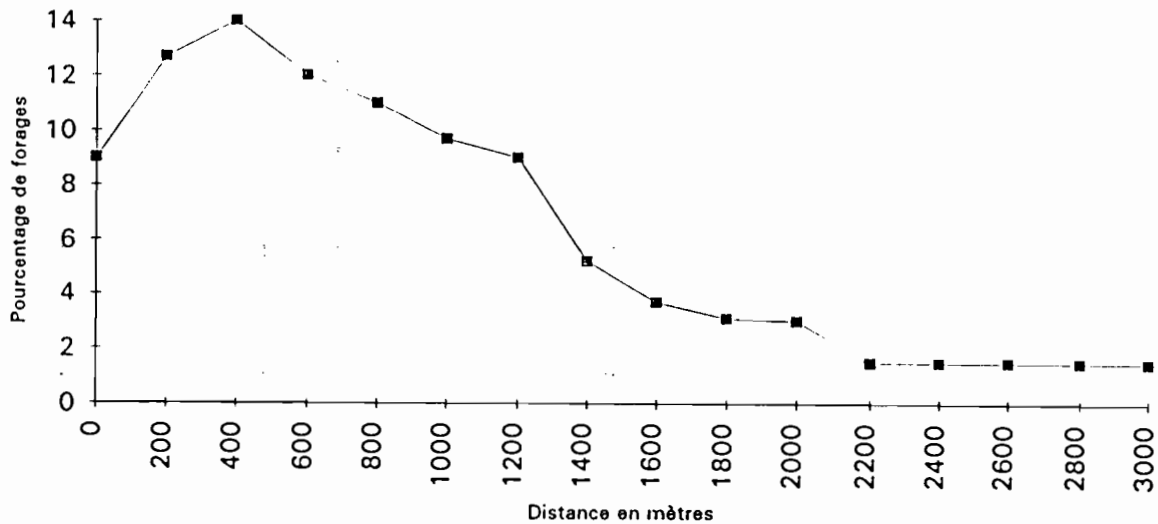
Tableau 1 : Distribution des ouvrages à l'intérieur des classes d'éloignement de 200 en 200 m par rapport aux fractures

XI	Nombre d'ouvrages	% de forages
0	12	9
200	17	12,7
400	19	14
600	16	12
800	15	11
1000	13	9,7
1200	12	9
1400	7	5,2
1600	5	3,7
1800	4	3,1
2000	4	3
2200	2	1,5
2400	2	1,5
2600	2	1,5
2800	2	1,5
3000	2	1,5

La figure 3 permet de distinguer 3 parties :

- une droite des implantations idéales localisées sur l'axe des ordonnées entre 0 et 9 % qui renseigne sur le nombre de forages captant directement les fractures,
- un pic entre 0 et 400 m, correspondant à des pourcentages de 9 à 14 %, qui montre qu'à défaut de capter directement les fractures, la majorité des ouvrages sont implantés le long d'un couloir de 400 m autour des accidents ;
- enfin, une courbe de décroissance rapide entre 400 et 2200 m limite à partir de laquelle les pourcentages des ouvrages les plus éloignés des fractures tombent généralement à 0.

Fig. 3 Courbe de décroissance des pourcentages de forages en fonction des distances d'éloignement par rapport aux fractures



Ainsi, on constate qu'un forage réalisé dans le socle sur la base des photographies aériennes et/ou de la géophysique ne peut être distante de plus de 2 km de l'accident visé. Donc, chaque forage se situe à proximité d'au moins une fracture dont il est censé capter les eaux souterraines.

L'interpolation des distances d'éloignement par rapport aux fractures présente un certain nombre de sources d'erreurs. En raison de sa grande dimension, le pixel du site a été échantillonné à 50 m. Compte tenu des différentes sources d'erreurs, on a accepté pour cette étude une marge de ± 2 pixels, ce qui correspond à 100 m. Les sources d'erreur sont les suivantes :

- la correction géométrique,
- l'interpolation plus ou moins tordue,
- les erreurs dans les relevés des linéaments,
- les traces de crayon,
- les erreurs de lecture.

IV . CONCLUSION

Une interprétation géologique des images Landsat TM et les photos aériennes a permis d'établir la carte des principales unités géologiques et les rosaces des principales directions des fractures majeures de la région.

Sur le plan géologique, la région est caractérisée essentiellement par les formations de granito-migmatites, les granites, les granites à biotite homogène, les granites à deux micas, le gneiss, et les formations volcaniques.

Les linéaments sont caractérisés par les principales directions suivantes : NO-20°, N30-60°, N80-100°, N120-170°. Ces directions de fractures définissent plusieurs couloirs de cisaillement et de failles. Ainsi on peut noter les couloirs suivants : les couloirs de Zievasso, Tiémé, Samango, Ngoloblasso, Sambadougou et Goulia. On peut noter également les grandes failles suivantes : les failles de Niamasso, Tiémé, Sokoro, Odienné, Gouando, Kadiola, Koubouena, Kaniasso, Mafeleni, Sangouani.

Ces accidents cassants ont un rôle hydrogéologique. En effet, pour garantir un débit optimum pour les forages, la recherche des fractures ou des intersections de fractures est conseillée. C'est ainsi que pour cette étude nous avons repertorié plusieurs fractures qui présentent des intérêts certains pour les futures campagnes d'hydraulique villageoise.

L'étude des linéaments et des fractures présentent certaines limites dans leur interprétation. On doit notamment tenir compte du facteur humain. En effet, pendant l'interprétation les copies dures peuvent subir une rotation et ainsi les traits des linéaments sont observés à différents angles. D'autre part, dans l'interprétation des images de Landsat à travers un viseur additif couleur, la scène est observée sous des directions d'observations limitées.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'UREF (Université des réseaux d'expression française) pour nous avoir permis de réaliser ce travail grâce à une subvention de recherche partagée.

V . REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DCH, 1982 : Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Cahier n° 4. Géomine Ltée, 24 P.

Potin Koffi B.K. 1988 : Péetrographie et Géochimie des formations précambriennes de la région d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Doctorat ès-sciences naturelles.

J. Biémi, Q.H.J. GWYN, S. Deslandes, P. Jourda, 1991 : Géologie et réseaux de linéaments régionaux du bassin versant de la Marahoué, Côte d'Ivoire : cartographie à l'aide des données

Landsat TM et du champ magnétique total. Télédétection et gestion des ressources. Vol. VII, Paul Gagnon (edit.). L'association Québécoise de Télédétection. PP 135-145.

Larsson, I. 1968 : Groundwater in precambrian rocks in southern Sweden, Groundwater problems - Pergamon Press.

Reeves, C.V. 1985 : Airborne geophysics for geological mapping and regional exploration, ITC Journal, vol. 3, 15 P.

**COMMUNICATION PRESENTEE A L'ATELIER ORGANISE PAR LE CEMAGREF ET
L'ORSTOM (FRANCE) SOUS L'EGIDE DE LA FAO SUR LE THEME "TELEDETECTION
ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU".**

MONTPELLIER DU 29 NOVEMBRE AU 1ER DECEMBRE 1995.

**LA TELEDETECTION COMME MOYEN D'APPUI A LA
PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU.
(CAS DU SUD-OUEST DU BURKINA FASO)**

**TRAORE Karim
Programme RESO
S/P Schéma Directeur et Planification
Direction Régionale de l'Hydraulique
des Hauts-Bassins.**

BOBO-DIOULASSO (Burkina Faso).

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION
2. DESCRIPTION DE LA ZONE DU PROJET
3. RESSOURCES EN EAU
 - 3.1. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE
 - 3.2. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE
 - 3.3. RESSOURCES EN TERRE
4. PROBLEMATIQUE DE LA PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE SUD-OUEST DU BURKINA FASO
5. APPROCHE METHODOLOGIQUE
6. REMARQUES SUR LE CHOIX DES IMAGES

LISTE DES FIGURES :

- Fig. 1 : Plan de situation
- Fig. 2 : Principaux bassins versants
- Fig. 3 : Carte des unités hydrogéologiques de la zone sédimentaire de Bobo-Dioulasso
- Fig. 4 : Carte de la GUINGUETTE

RESUME

Pays Sahélien, le BURKINA FASO est situé en Afrique de l'Ouest. La pluviométrie annuelle varie de 500 mm au Nord à 1.200 mm au Sud, donnant naissance à des cours d'eau pérennes dans la partie Sud-Ouest du pays (COMOE, MOUHOUN, BOUGOURIBA).

Malgré le caractère sahélien du pays, la zone du Sud-Ouest, d'une superficie de 60.600 km², recèle d'importantes ressources en terre et en eau. Cette zone connaît une intense activité de mobilisation et d'utilisation des eaux ; périmètre sucrier de la SOSUCO (3.800 ha), périmètre rizicole de la Vallée du Kou (1.000 ha), 1.300 ha de bas-fonds améliorés avec l'opération riz COMOE, la plaine de DOUNA (400 ha), périmètre rizicole de KARFIGUELA (350 ha).

Ces potentialités expliquent la présence du nombre de plus en plus croissant de migrants sur les terres Sud-Ouest où se développent spontanément divers projets et activités sans une vision prospective et sans cohérence dans les aménagements. A cela s'ajoute la faible connaissance des ressources en terre et en eau en vue de leur planification et gestion durable.

Face à ce constat, la Direction Régionale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins, à travers le programme de Développement et de Valorisation des Ressources en Eau dans le Sud-Ouest du BURKINA FASO (RESO), sur financement du Fonds Européen de Développement (7^e FED), a entrepris la réalisation d'un Schéma Directeur et Planification qui servira de cadre à la collecte de données indispensables pour la planification et la gestion des Ressources naturelles, dans une approche écosystémique ; ces données seront intégrées dans un système d'information géographique (S.I.G.).

Pour la réalisation de ces objectifs, l'utilisation de l'outil télédétection a été privilégié parmi d'autres. Ainsi, la caractérisation de la situation actuelle (occupation des sols, hydrologie, etc...) sera basée sur l'analyse des images Landsat - TM de 1994. L'évaluation de la dégradation des sols se fera à l'aide de deux séries d'images (Landsat - MSS et RM) séparées d'une dizaine d'années (1984 et 1994). Dans certains cas, l'étude des photographies aériennes complétera les observations de terrain prévues de 1994 à 1997.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du Programme de Développement et de Valorisation des Ressources en Eau du Sud-Ouest du Burkina Faso (RESO), financé par le Fonds Européen de Développement (FED), la télédétection occupe une place de choix dans l'inventaire des données spécifiques pour la planification et la gestion des ressources en eau.

Aussi, cette communication a pour but de situer le contexte dans lequel intervient la télédétection, d'analyser les objectifs techniques visant à privilégier l'utilisation de cette source d'informations et, de présenter notre approche méthodologique afin de susciter des réflexions et commentaires.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE

La zone d'intervention du Programme RESO couvre une superficie d'environ 60 600 km² avec une densité de 35 habitants / km². Elle regroupe les provinces de la Bougouriba, de la Comoé, du Houet, du Kéné Dougou et du Poni (fig. 1).

La zone est située entre les longitudes 3° 20 W et 5° 50 W et les latitudes 9°10 N et 12° 10 N.

Cette partie Sud-Ouest du Burkina recoupe pour l'essentiel, les bassins versants de la Comoé et du Mouhoun qui sont les deux cours d'eau pérennes du Pays (fig. 2).

Le réseau hydrographique est le plus dense que partout ailleurs au Burkina. La zone est comprise entre les isohyètes 900 mm et 1200 mm. L'évapotranspiration moyenne annuelle est de 1759 mm selon la formule de Penman.

Le climat est de type soudano-sahélien avec deux saisons bien contrastées : une saison sèche de novembre à mai et une saison pluvieuse de juin à octobre.

Environ 40 % de la région est constituée de terrains sédimentaires et 60 % de roches métamorphiques ou granitiques.

3. RESSOURCES EN EAU

3.1. RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

On distingue deux systèmes d'aquifère :

- le système aquifère de la zone du socle
- le système aquifère de la zone sédimentaire

Les aquifères dans les roches cristallines (socle) ont une structure discontinue et les ressources en eau exploitables sont limitées aux fissures et aux niveaux altérés d'une épaisseur de 10 à plus de 50 mètres.

Dans les zones sédimentaires, on rencontre essentiellement une variété gréseuse. Parfois, les roches sont poreuses et contiennent des ressources en eau très importantes.

L'étude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso par SOGREAH en 1993 limitée uniquement sur 1600 km² environ a mis en évidence des aquifères multicouches. L'étude a identifié sur 20 km seulement quatre aquifères dont celui des grès à granules de quartz en contient deux nappes hydrochimiquement distinctes. (Fig. 3).

Les débits maxima obtenus par essais de débit au niveau de ces aquifères atteignaient 200 et 360 m³ / h (pompage 1 semaine, remontée 1 semaine).

La zone se caractérise également par la présence de nombreuses sources dont les plus connues sont celles de la Guinguette ($Q_e > 6000 \text{ m}^3 / \text{h}$), de Nasso ($Q_e > 800 \text{ m}^3 / \text{h}$) et de Pessa ($Q_e > 400 \text{ m}^3 / \text{h}$). D'autres sources à débit important existent dans la zone mais sont encore très mal connues.

3.2. LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

Le réseau hydrographique de la zone est très dense et compte des rivières pérennes telles que le Mouhoun et la Comoé. (cf. fig. 2). Les ressources en eau de surface sont également abondantes. On y rencontre de nombreuses mares et chutes. (mares aux hippopotames, chutes de Banfora, de Tourni etc...) ainsi que de nombreux barrages et retenues d'eau dont les plus importants sont indiqués à la fig. n°2.

Tous ces barrages sont situés dans le bassin versant de la Comoé ou du Mouhoun. Le bassin du Niger ne comporte aucun grand ouvrage.

Des projets de barrages sont également en étude. Il s'agit du barrage de Noumbiel et du barrage de Samandéni sur le Mouhoun supérieur d'une capacité de 400 millions de m³.

3.3. LES RESSOURCES EN TERRES

La zone du Sud-Ouest recèle d'importantes ressources en terres et connaît une intense activité d'utilisation de celles-ci à travers :

- les plaines irriguées existantes ; périmètre sucrier de la SOSUCO (3 800 ha), périmètre rizicole de la Vallée du Kou (1 000 ha), le périmètre rizicole de Banzon (360 ha).
- l'Opération Riz Comoé avec 1 300 ha de bas-fonds améliorés essentiellement exploités par des femmes.
- la valorisation de la culture irriguée par des initiatives de base autour des retenues d'eau ainsi que le long de la rivière Kou.

L'arboriculture, la production irriguée informelle essentiellement maraîchère ainsi que d'autres types de productions occupent une place non négligeable dans l'utilisation des ressources en terre, mais restent mal connues.

4. PROBLEMATIQUE DE LA PLANIFICATION DES RESSOURCE EN EAU DANS LE SUD-OUEST.

Cette problématique se traduit par :

- La présence de bois sacrés et de zones boisées non accessibles.
- Des cours d'eau avec débit d'étiage constant.
- La faible connaissance des ressources en terre et en eau, à l'exception de la Guinguette.
- La pression démographique qu'accélère l'afflux de migrants venant du centre et du Nord du Pays ; ce qui a pour conséquence les aménagements spontanés sans concertation entre les différents utilisateurs.

Ainsi, au niveau des surfaces cultivées et des berges, des indices de dégradation sont de plus en plus perceptibles sans que l'on puisse caractériser leur ampleur spatiale ni leur impact réel sur les ressources en eau, conditions essentielles pour l'évaluation de leurs évolutions.

Afin de pallier à cette situation et de gérer de façon durable les ressources naturelles, et plus particulièrement les ressources en eau dans une approche écosystémique, une collecte de données spécifiques à cette approche sera réalisée au moyen de l'outil télédétection. A ce sujet, le fonctionnement de la Guinguette avec diverses sources à droite et à gauche est illustratif (cf. fig. 4).

5. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Les images à utiliser seront celles de Landsat MSS et TM. Ce choix est guidé par l'objet de la photo-interprétation (occupation et dégradation des sols, hydrologie...), l'échelle de travail ainsi que par la disponibilité des images.

Dans la présente étude, il s'agit de collecte de données à l'échelle régionale pour l'élaboration d'un schéma directeur et planification des ressources en eau. Une échelle finale de 1/200.000 correspondant aux feuilles topographiques de l'Institut Géographique du Burkina (IGB) qui serviront de références pour les résultats, est acceptable.

L'évaluation des indices de dégradation et de l'évolution du paysage sera basée sur l'interprétation des images Landsat MSS de 1984 et les TM de 1994 / 1995.

L'analyse de la situation actuelle sera effectuée essentiellement à partir de la série d'images récentes Landsat TM de 1994. Il s'agit d'une analyse visuelle de tirages au 1/200.000 de cartes images (images découpées et mosaïquées au format des cartes IGB). Les photographies aériennes ainsi que les informations issues des enquêtes de terrain seront utilisées en complément.

Par ailleurs, il est prévu selon les besoins :

- Une photo-interprétation d'autres compositions colorées sur écran
- Un traitement numérique spécifique pour certains thèmes.

Les résultats interprétés sur transparent seront finalisés sous deux formes :

- Cartes au trait sur support reproductible
- Cartes numérisées pour exploitation vers le SIG.

Les résultats attendus sont :

Caractérisation qualitative et spatiale des éléments suivants :

- Types de végétation, zones de culture, plantations, habitat,
- Bassins versants, réseau hydrographique, retenues d'eau, sources, . . .
- Phénomènes érosifs et dégradation du réseau hydrographique.
- La raison d'être et la fonction hydrologique ou hydrogéologique des bois tropicaux

La géomorphologie, l'étude des linéaments et l'agropédologie seront également traitées.

Tous les résultats feront l'objet d'études approfondies puis intégrés dans un SIG pour être valorisés dans le cadre du Schéma Directeur et Planification.

6. QUELQUES REMARQUES SUR LE CHOIX DES IMAGES

La différence de résolution géométrique au niveau de l'analyse diachronique va affecter la qualité des résultats, mais l'interprétation des photographies aériennes pour compléter certaines données spécifiques pourra contribuer à rehausser le niveau de détail de la situation ancienne (1984).

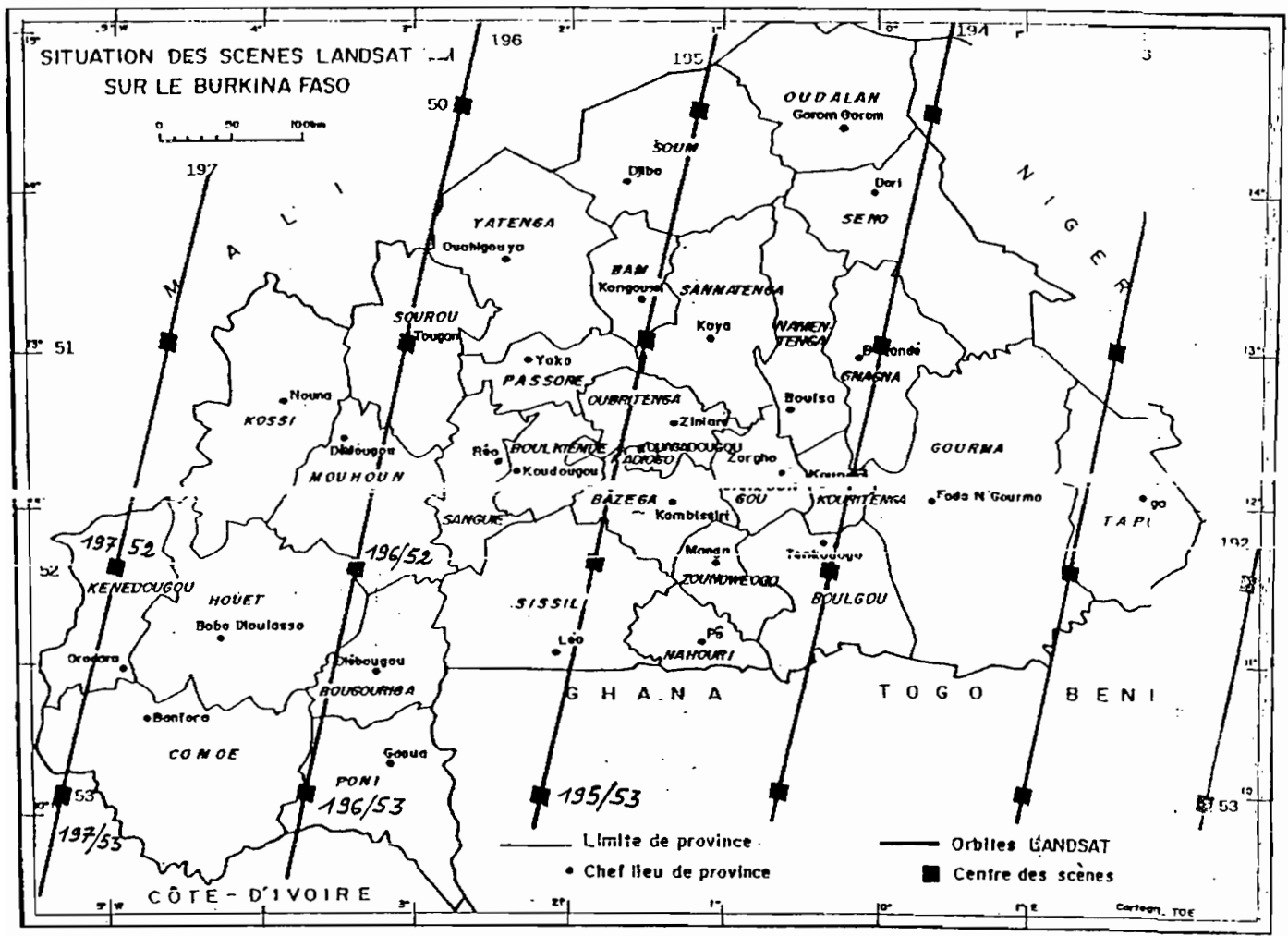
Par ailleurs, les deux saisons de prise de vue (novembre et avril/mai) étant différentes pour les deux séries d'images, les clés d'interprétation seront différentes pour les deux situations.

Dans les deux cas, en plus des photographies aériennes, les observations de terrain devront apporter des informations utiles pour l'interprétation.

ANNEXES

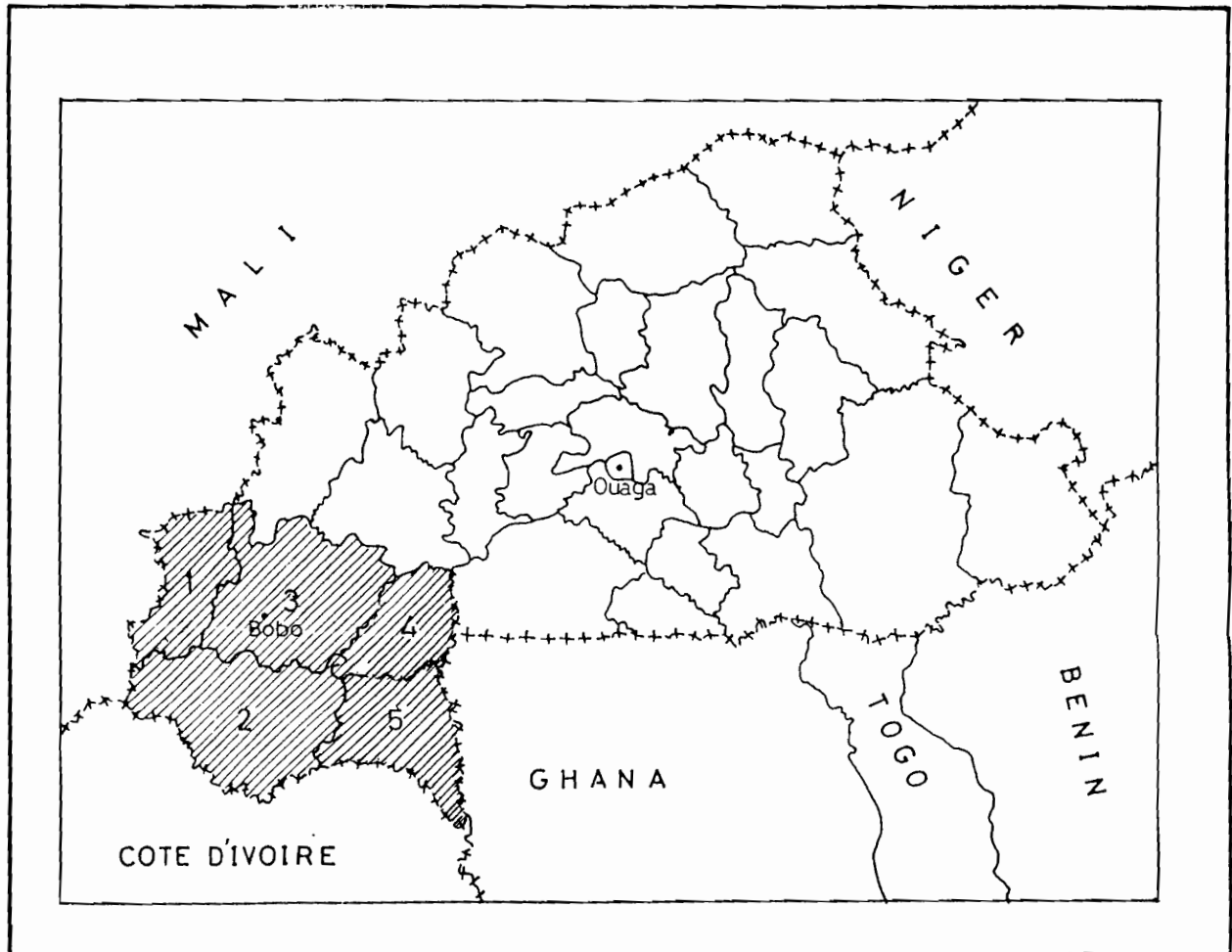
REFERENCE DES IMAGES CHOISIES

	LANDSAT MSS	LANDSAT TM
197/52	26/11/84	28/04/94
197/53	26/11/84	28/04/94
196/52	19/11/84	23/05/94
196/53	19/11/84	23/05/94
195/53	20/11/84	16/05/94



PLAN DE SITUATION

Fig:1

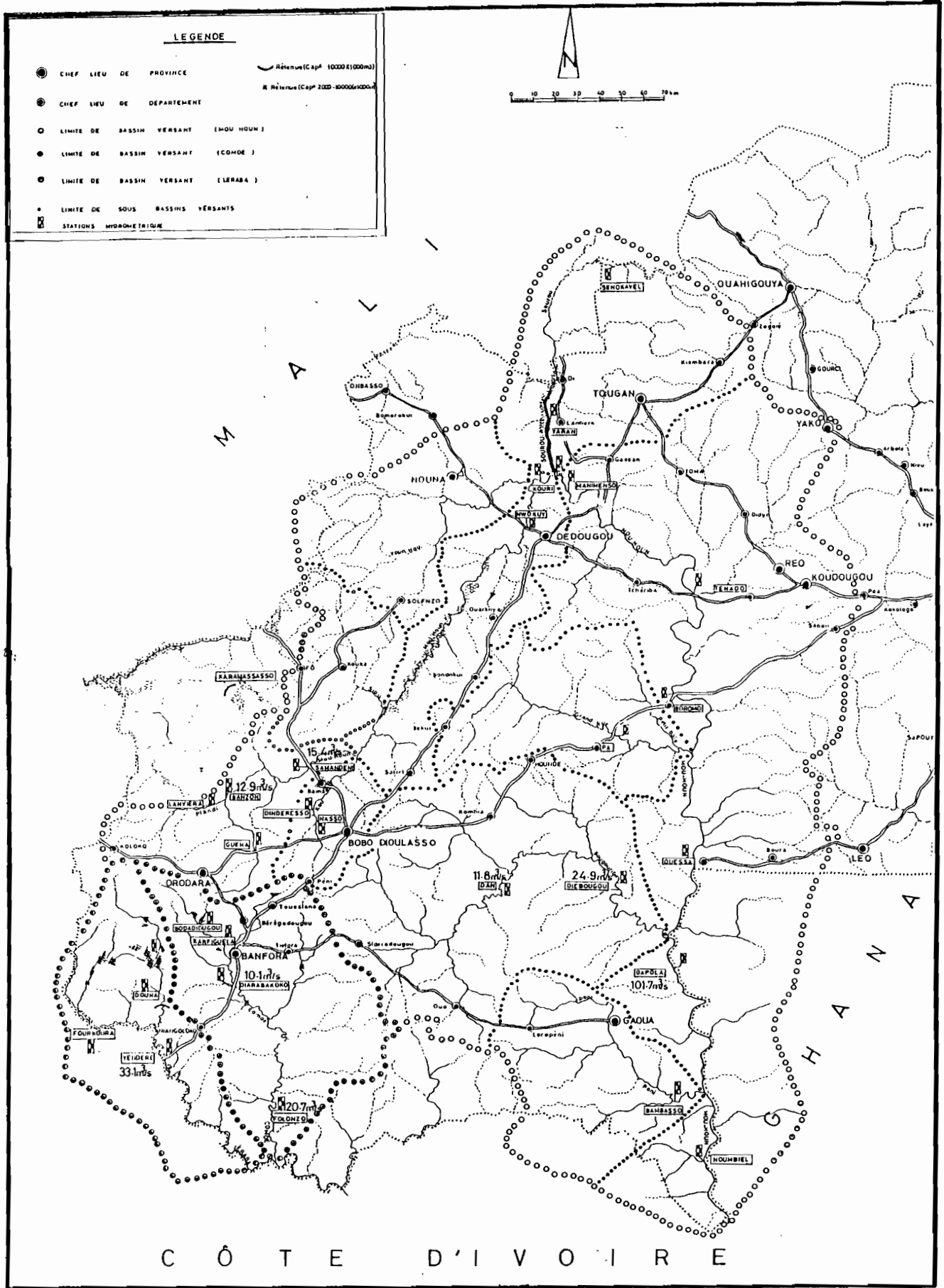


1. Province du Kéné Dougou
2. Province de la Comoé
3. Province du Houet
4. Province de la Bougouriba
5. Province du Poni

Karim Traoré
Atelier "Télédétection et gestion
des ressources en eau"
Montpellier Nov.-Déc. 95

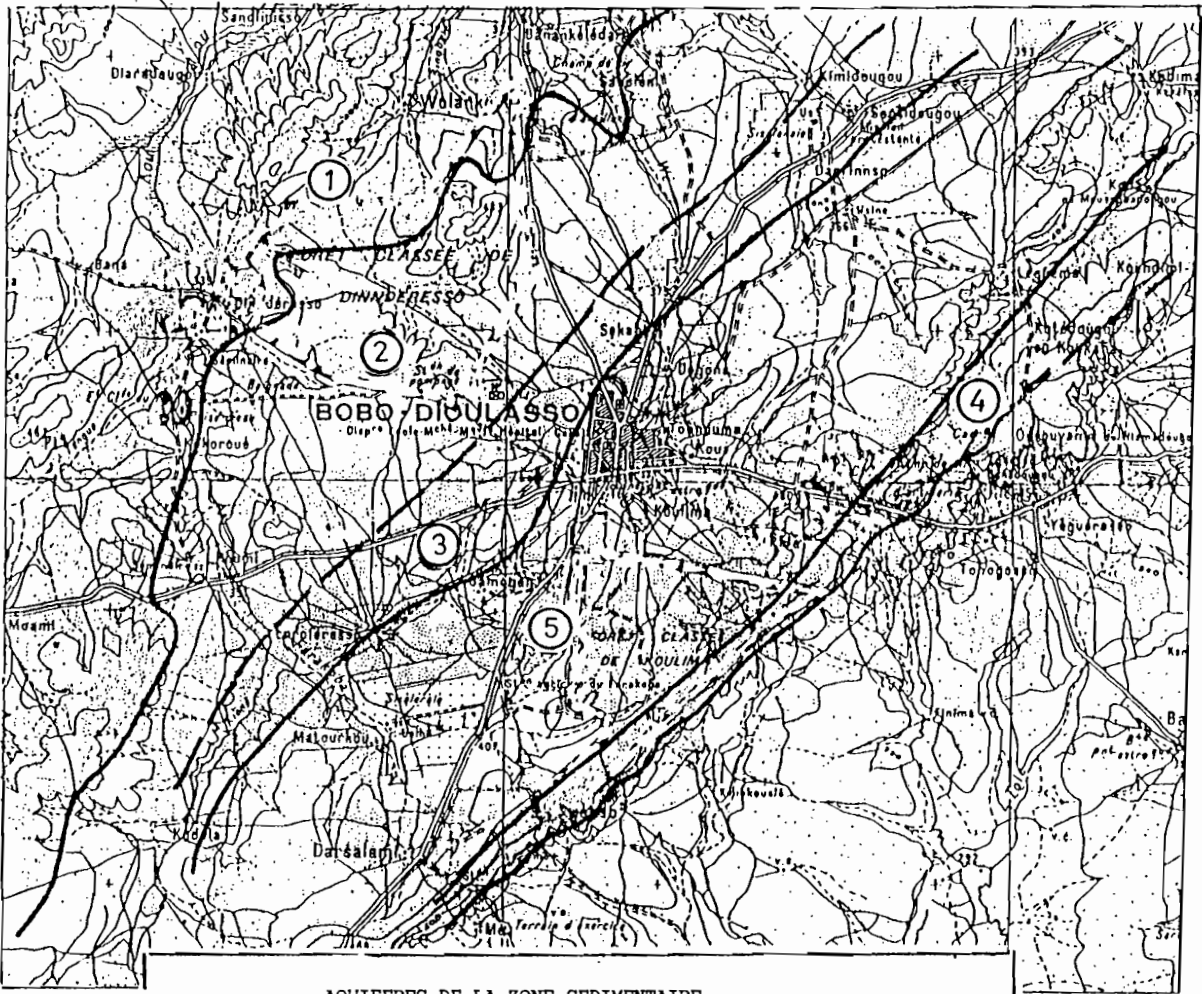
Fig:2

BURKINA FASO CARTE DES BASSINS VERSANTS



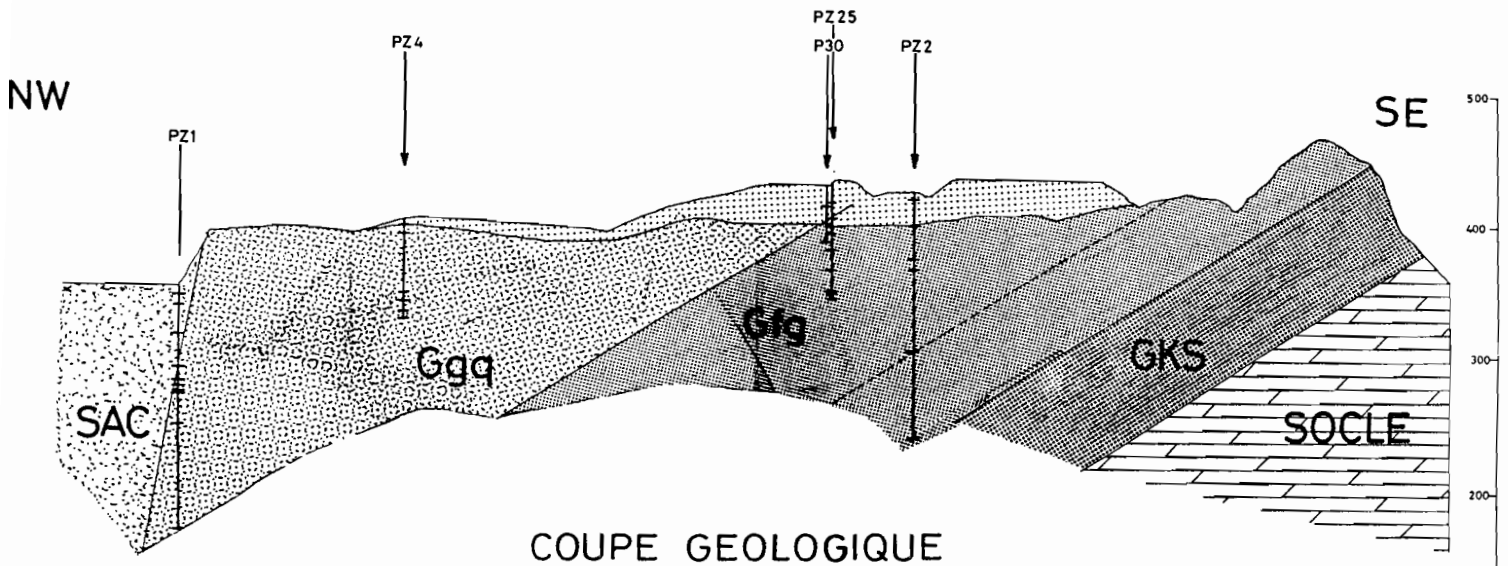
**CARTE DES UNITES HYDROGEOLOGIQUES
(ZONE SEDIMENTAIRE DE BOBO-DIOULASSO)**

Fig.3



AQUIFERES DE LA ZONE SEDIMENTAIRE
DE BOBO-DIOULASSO

- les grès de base (GKS)
- les grès fins glauconieux (Gfg)
- les grès à granules de quartz (Ggq)
(2 nappes)
- les silstones-argilites-carbonates (Sac)

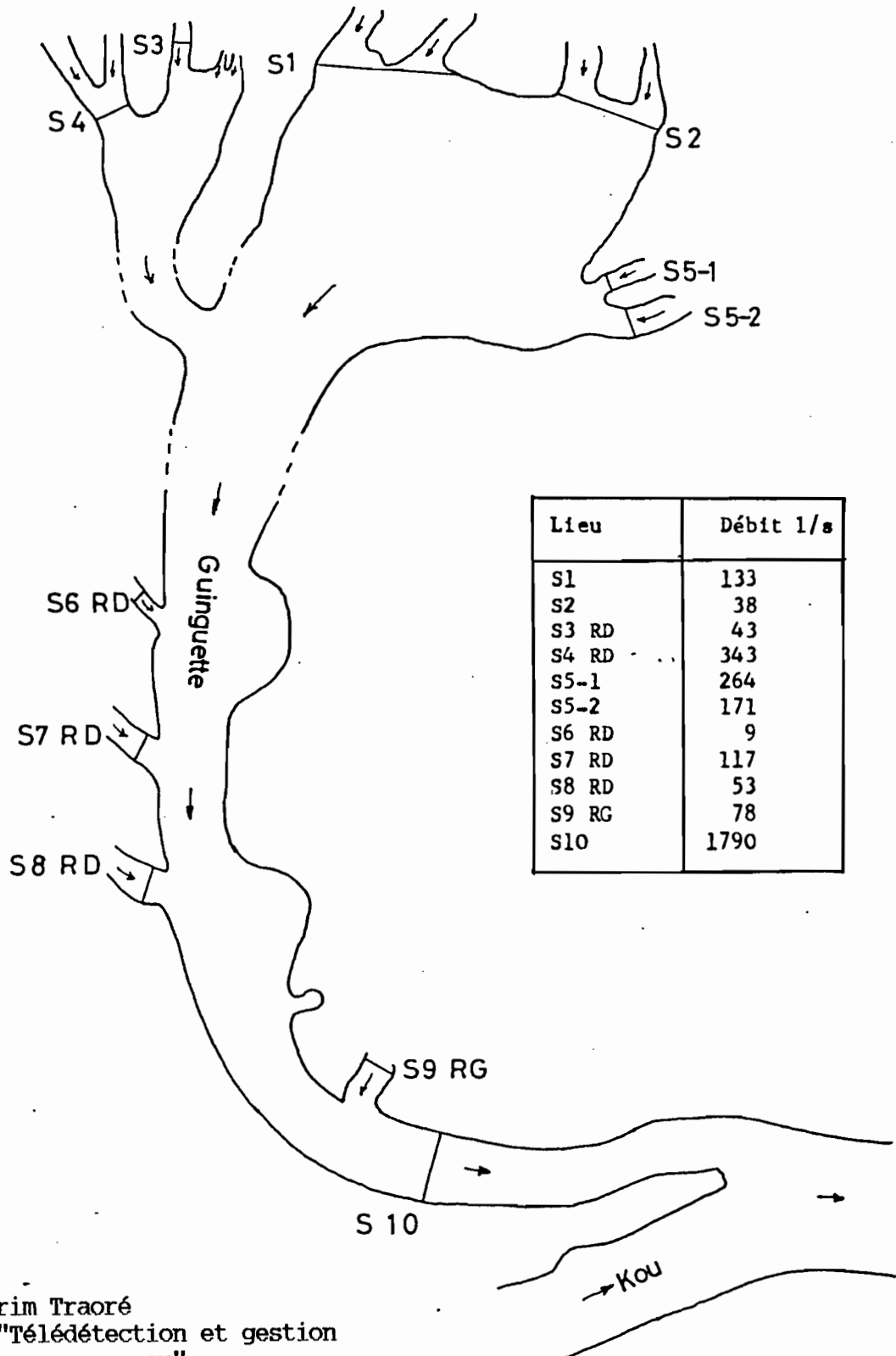


COUPE GEOLOGIQUE

LA GUINGUETTE A NASSO

Schéma des points de mesure du débit des différentes sources principales

Fig:4



Karim Traoré
 Atelier "Télédétection et gestion
 des ressources en eau"
 Montpellier Nov.- Déc. 95

L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DE LA REGION HYDROLOGIQUE 36 (NORD MEXIQUE)

Luc DESCROIX*

* ORSTOM, AP 225-3, 35071, Gomez Palacio ZI, DGO, Mexique

Résumé

L'étude des ressources en eau des zones arides et semi-arides se prête à l'utilisation de l'outil d'imagerie satellitaire du fait :

- de la grande extension des zones concernées (ici 92 000 km² pour la seule RH36),
- du manque de données récentes au niveau des ressources naturelles (eau, sol, végétation),
- de la bonne qualité et de la répétitivité des scènes (dues à la faible nébulosité).

La RH36 est un grand bassin endoréique dont les eaux de ruissellement sont intégralement utilisées pour l'irrigation ; une surexploitation de l'aquifère y a déséquilibré le bilan volume disponible/volume utilisé et une meilleure connaissance de l'un comme de l'autre s'avère indispensable.

1) Détermination des unités de végétation pour l'étude du ruissellement

Le but du projet étant la détermination des ressources en eau de ruissellement, l'imagerie satellitaire sert à la définition de zones supposées homogènes vis-à-vis du ruissellement; sur ces zones sont ensuite installés des bassins-versants et parcelles de mesure du ruissellement dont les résultats peuvent être extrapolés grâce aux zones définies par télédétection.

D'autre part, l'évolution de la couverture végétale sur plus de 20 ans (depuis le lancement de premiers Landsat MSS) est mise en parallèle avec les données hydrométriques existantes du réseau mexicain, afin de connaître l'impact du surpâturage et du déboisement sur les écoulements.

2) "Presones" et eaux superficielles

La multitude des retenues collinaires de petite taille ("presones") rend leur inventaire difficile : leur repérage sur scène SPOT et l'essai d'extrapolation sur des scènes Landsat MSS, bien moins coûteux et pouvant couvrir toute la zone, permet de localiser la plus grande partie d'entre eux (le plus souvent par l'auréole surpâturée qui les entoure).

3) Prospective : ruissellement et télédétection

Dans une optique plus prospective, ce projet doit aussi être mis à profit pour tenter de définir des démarches scientifiques destinées à mettre en évidence les corrélations existant entre les radiométries et les facteurs du ruissellement, ainsi que toute caractéristique hydrique du bassin versant.

L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU DE LA REGION HYDROLOGIQUE 36 (NORD MEXIQUE)

L'étude des ressources en eau des zones arides et semi-arides se prête à l'utilisation de l'outil d'imagerie satellitaire du fait:

- de la grande extension des zones concernées (ici 92 000 km² pour la seule RH36) ;
- du manque de données récentes au niveau des ressources naturelles (eau, sol, végétation) ;
- de la bonne qualité et répétitivité des scènes due à la faible nébulosité ;

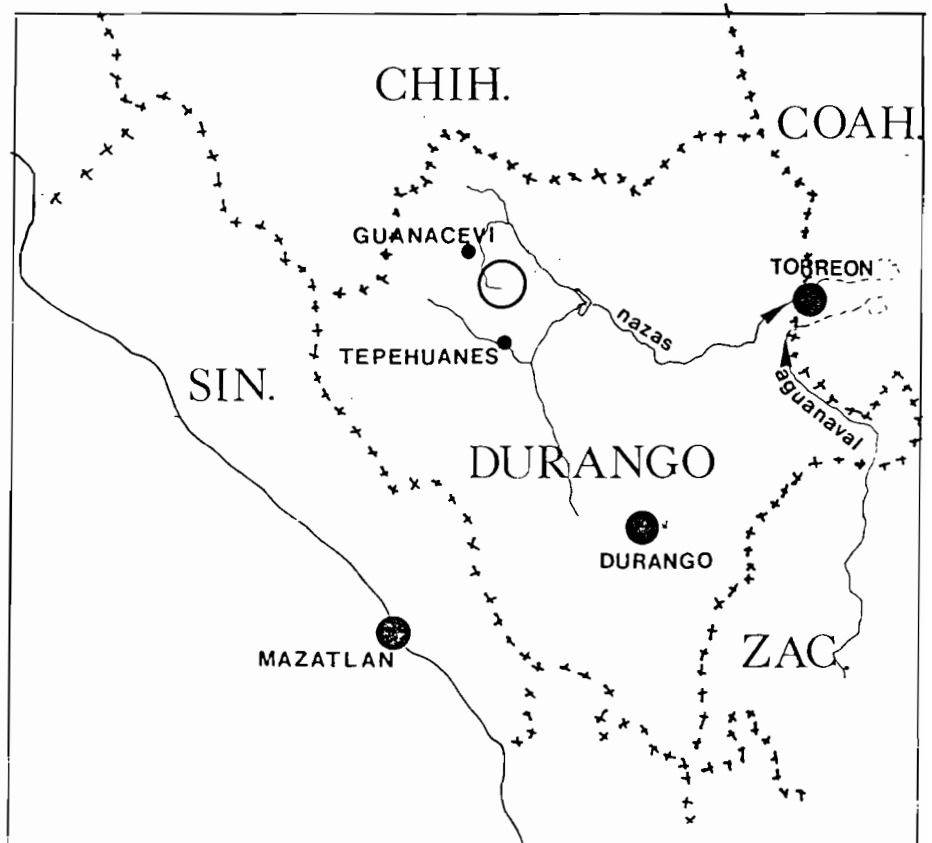
La RH36 est un grand bassin endoréique dont les eaux de ruissellement sont intégralement utilisées pour l'irrigation ; une surexploitation de l'aquifère y a déséquilibré le bilan volume disponible/volume utilisé et une meilleure connaissance de l'un comme de l'autre s'avère indispensable.

Le volume total annuel moyen d'eaux renouvelables utilisables est de $1,3 * 10^9 \text{m}^3$ dont $1 * 10^9 \text{m}^3$ d'eaux superficielles et $300 * 10^6 \text{m}^3$ d'eaux souterraines. La consommation (à 98% agricole) est de $2,5 * 10^9 \text{m}^3$ dont $1,5 * 10^9 \text{m}^3$ d'eaux souterraines, ce qui correspond à 5 fois le volume de la recharge annuelle des aquifères. Le niveau de la nappe s'abaisse donc de 1,75 mètre par an depuis les années 50. C'est dire qu'une meilleure gestion des eaux de surface s'avère indispensable. Comme, à l'heure actuelle, le volume écoulé annuel est déjà intégralement utilisé (grâce au stockage dans le barrage-réservoir de El Palmito, qui retient 4 années d'écoulement moyen), l'optimisation ne peut venir que de la gestion des eaux, non de la recherche de plus d'eau (les bassins versants voisins sont loin d'être excédentaires, la seule solution éventuelle d'importation d'eau serait de la capter sur le versant Pacifique de la Sierra Madre Occidentale).

I) DETERMINATION DES UNITES DE VEGETATION POUR L'ETUDE DU RUISSELLEMENT

Le but du projet étant la détermination des ressources en eau de ruissellement, l'imagerie satellitaire sert à la définition de zones supposées homogènes vis-à-vis du ruissellement ; sur ces zones sont ensuite installées des bassins-versants et parcelles de mesure du ruissellement dont les résultats peuvent être extrapolés grâce aux zones définies par télédétection. L'installation des bassins-versants hydrologiques représentatifs a été commencée en avril 1994 et s'est achevée en juin 1995 : 13 bassins versants ont été équipés, pour toute la RH36 (Région Hydrologique 36, voir fig.1), dont 5 dans la Sierra Madre Occidentale, partie la mieux alimentée en eaux de ruissellement (voir fig.2). Afin de connaître le comportement hydrique de zones plus homogènes, mais de bien plus petite taille, des parcelles (de un demi-mètre carré et de 40 mètres carrés) ont été installées en 1994 et 1995 pour étudier les paramètres qui sont forcément intégrés dans les bassins

FIG.1 et 2 : LOCALISATION DE LA RH36 ET DU SECTEUR ETUDIE



versants : pente, végétation (y compris déboisement et surpâturage), profondeur du sol, lithologie, localisation dans le versant, exposition, comportement hydrique du sol. L'étude des relations entre ces divers paramètres et le ruissellement sera l'objet d'une deuxième étape ultérieure (voir III).

D'autre part, l'évolution de la couverture végétale sur plus de 20 ans (depuis le lancement de premiers Landsat MSS) est mise en parallèle avec les données hydrométriques existantes du réseau mexicain, afin de connaître l'impact du surpâturage et du déboisement sur les écoulements.

C'est la raison pour laquelle l'évolution de la végétation a été entreprise en premier lieu ; le but est de connaître le mieux possible les caractéristiques spectrales des formations végétales, des espèces et de leur densité pour pouvoir cartographier leur évolution. La première cartographie, présentée ici, concerne uniquement les formations végétales ; ont été comparées les situations de 1972 et de 1992 : deux classifications barycentriques sur la même zone de 9500 km², avec une simple correction géométrique et un gommage de l'opposition de versant pour la scène de 1972, prise en décembre (fig. 3 et 4).

Il apparaît dans la comparaison de ces deux cartes une évolution des superficies couvertes par chaque type de formation, résumée dans le tableau 1. Mais il y a deux types de phénomène que ne laisse pas apparaître l'imagerie satellitaire, qui se traduisent néanmoins par un affaiblissement de la densité végétale (et donc de l'indice de végétation), et qui auront peut-être eu une influence hydrique du Haut Bassin du Rio Nazas :

- d'une part, les parties les plus hautes de la Sierra Madre Occidentale font l'objet d'une intense activité forestière, du fait que ce n'est qu'au dessus de 2600 mètres que la forêt de pin (la principale espèce exploitée ici) est suffisamment dense pour permettre une exploitation rentable : les secteurs correspondant à cette exploitation ne changent pas forcément de catégorie, car l'exploitation ne se fait pas par coupe à blanc : elle est sélective, ce qui n'empêche d'ailleurs pas que certains secteurs soient visiblement surexploités ; là où il y avait 4 arbres en 1972, il n'y en a souvent plus que 1 ou 2. Ceci étant, au niveau hydrique, il est évident que ce type d'exploitation a bien moins d'impact qu'une coupe totale.

- d'autre part, dans l'étage dit des "savanes" d'altitude (entre 2000 et 2400 mètres d'altitude), le surpâturage s'est généralisé de manière drastique, et se poursuit : dans le centre du secteur délimité, certains pâturages supportent des charges de bétail à l'hectare de 2 à 5 fois supérieures à la charge théorique maximale : de grandes plages de sol nu apparaissent, les touffes de graminées s'espacent de plus en plus ; cela a probablement des conséquences sur le ruissellement. Mais dans le même temps, le surpâturage a provoqué une "dégradation verte des pâturages" : les jeunes pins (espèce conquérante sur les savanes à chênes), non appétants, n'entrent plus en concurrence avec la strate herbacée de plus en plus inexistante : les savanes à chênes sont de plus en plus envahies par de jeunes pins, les pousses de chênes continuant à être broutées par le bétail. De ce fait, les pâturages sont de moins en moins nutritifs et la savane devient une forêt claire de plus en plus envahie par les pins et d'autres broussailles non appétantes.

FIG. 3 : LA VEGETATION EN 1972

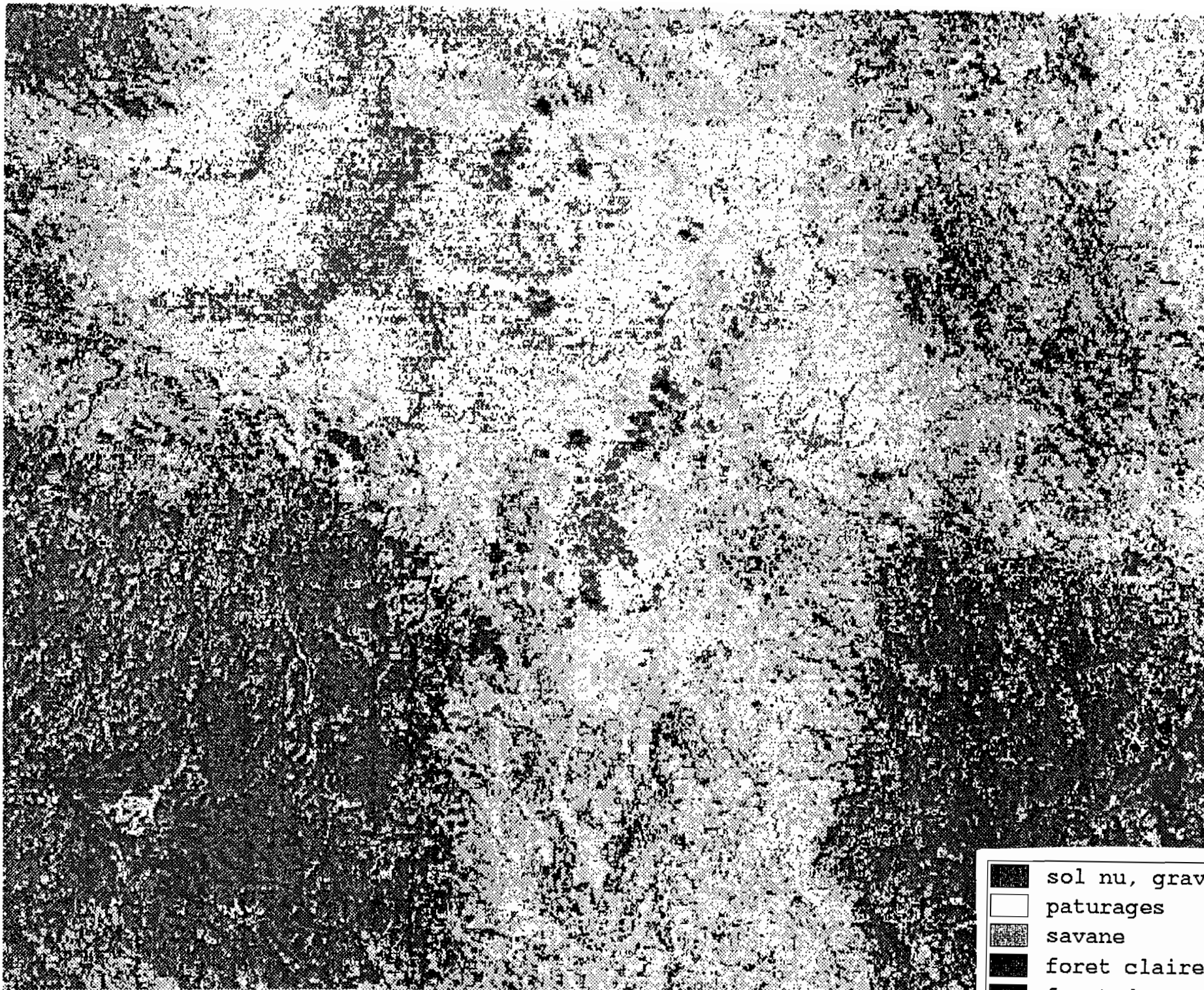
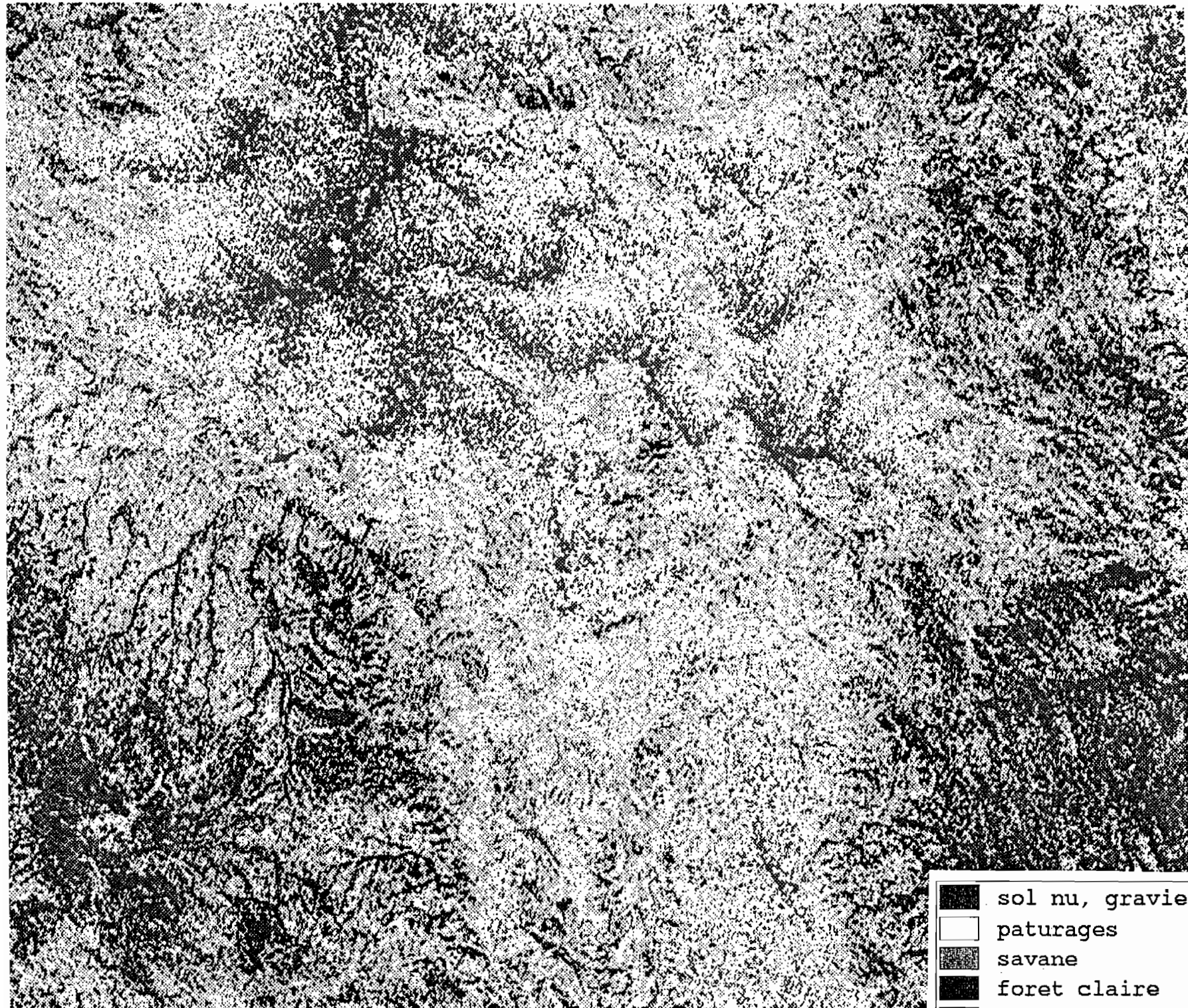


FIG.4 : LA VEGETATION EN 1992



- | | |
|---|------------------|
| ■ | sol nu, graviers |
| □ | paturages |
| ■ | savane |
| ■ | foret claire |
| ■ | foret dense |

TABLEAU 1 : EVOLUTION DE LA VEGETATION PAR CATEGORIES

ZONES N'AYANT PAS CHANGÉ	SUPERFICIE en km ²	%
Sans végétation	454	4,77
Pâturages	1657	17,42
Savanes	1065	11,2
Forêt claire	815	8,57
Forêt dense	105	1,1
ZONES AYANT CHANGÉ		
DEGRADATION		
de pâturages à sans végétation	759	7,98
de savanes à pâturages	851	8,95
de forêt claire à savane	860	9,04
de forêt dense à forêt claire	286	3,01
TOTAL	2756	28,97
PROGRESSION		
de sans végétation à pâturages	512	5,38
de pâturages à savane	656	6,9
de savane à forêt claire	406	4,27
de forêt claire à forêt dense	99	1,04
TOTAL	1673	17,59
ZONES AYANT CHANGÉ FORTEMENT		
DEGRADATION		
de savane à sans végétation	127	1,34
de forêt claire à sans végétation	18	0,19
de forêt claire à pâturages	251	2,64
de forêt dense à savane	113	1,19
TOTAL	511	5,37
PROGRESSION		
de sans végétation à savane	176	1,85
de pâturages à forêt claire	162	1,7
de savane à forêt dense	33	0,35
de sans vegetation à forêt claire	61	0,64
de pâturages a forêt dense	14	0,15
TOTAL	455	4,79

Il est probable que le surpâturage a des conséquences sur le comportement hydrique des sols, accélérant le ruissellement en accélérant la formation des filets d'eau. Par contre, l'envahissement des pâturages par les jeunes pins a peut-être l'effet inverse. Cela sera à déterminer dans la deuxième étape de mesures de terrain.

Dans le tableau 1, on a intégré dans la rubrique "zones ayant changé" les pixels qui sont passés d'une catégorie à une autre voisine dans l'ordre signalé dans la première rubrique "zones n'ayant pas changé". Si un pixel passe d'une catégorie à une autre qui ne la suit ou ne la précède pas directement dans cet ordre, il appartient aux "zones ayant changé fortement". Le nombre important de pixels ayant changé de catégorie est en partie du au procédé de classement utilisé : il y a beaucoup de changement en bordure des classes. Néanmoins, on constate que la dégradation brute (soustraction des surfaces en progression aux surfaces en dégradation) atteint tout de même 12% de la surface totale $((28,97 - 17,59) + (5,37 - 4,79))$. L'évolution n'est donc pas si rapide, mais par contre, pour la classe "forêt dense", leur surface a été divisée par 2 entre 1972 et 1992.

II) PRESONES ET EAUX SUPERFICIELLES

La multitude des retenues collinaires de petite taille ("presones") rend leur inventaire difficile : leur repérage sur scène SPOT et l'essai d'extrapolation sur des scènes Landsat MSS, bien moins coûteuses et pouvant couvrir toute la zone, permet de localiser la plus grande partie d'entre eux (le plus souvent par l'auréole surpâturée qui les entoure). Cette opération doit être réalisée à partir de l'hiver 1995-1996.

III) PROSPECTIVE : RUISSELLEMENT ET TELEDETECTION

Dans une optique plus prospective, ce projet doit aussi être mis à profit pour tenter de définir des démarches scientifiques destinées à mettre en évidence les corrélations existant entre les radiométries et les facteurs du ruissellement, ainsi que toute caractéristique hydrique du bassin-versant. Dans le cadre d'un SIG, l'imagerie satellitaire (landsat MSS et SPOT) doit servir à étendre les données acquises sur BVRE (bassin versant représentatif expérimental) sur toute la zone de même géoclimat (soit 18 000 km²), permettant d'affiner les régionalisations obtenues par superposition des cartes de l'INEGI (Institut Géographique Mexicain). C'est cette troisième étape qui constitue le principal usage de la Télédétection dans le projet RH36. Elle commencera courant 1996, après que deux étapes intermédiaires auront été franchies :

- la vérification de la classification de la végétation, afin d'étendre la cartographie à tout le haut bassin (et ultérieurement à toute la RH36) ;
- des campagnes de simulation de pluie qui doivent permettre de compléter les résultats hydrologiques obtenus sur les BVRE pour connaître les coefficients de ruissellement des unités de paysages sélectionnées grâce à la télédétection.

BIBLIOGRAPHIE

BARRAL H. et ANAYA E. : "Evolución de los pastizales en la RH36" ; rapport ORSTOM, Gomez Palacio, 60 pp., 1995 ;

DESCROIX L. et MORIAUD S. : Evolución de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental (Norte de Mexico), de 1972 a 1992 ; Congrès de la SELPER (Sociedad des Expertos Latinoamericanos de Percepción Remota), Puerto Vallarta, Mexique, 5-10 nov. 1995 ;

VIRAMONTES D. : "Estudio de la vegetación y de los suelos de dos pequeñas cuencas de la Sierra Madre Occidental" ; rapport ORSTOM, 50pp., Gomez Palacio, 1995.

A 2

GESTION DES RESSOURCES
Approche locale

WATER MANAGEMENT
local approach

DE L'AERIEN AU SATELLITE :ESTIMATION DES RESSOURCES EN EAU

From plane to satellite : estimating water resources

Christian PUECH *, Joël CARETTE **

* LCT CEMAGREF /ENGREF, 34000 Montpellier

** consultant. 91000 EVRY

Résumé

Même en Afrique, la télédétection peut s'entendre avec des capteurs multiples, et les informations utiles à l'aménageur peuvent (et doivent) dépasser les seules données satellitaires, souvent difficiles à utiliser au niveau local. Notre exposé est basé sur un ouvrage de synthèse portant sur l'utilisation de données spatiales en Afrique de l'Ouest pour la connaissance de petits bassins versants en vue de leur aménagement. Réalisée pour le compte du Ministère de la Coopération, cette synthèse s'appuie sur plusieurs projets, de la Mauritanie au Niger, utilisant des données spatiales de divers supports : photo aérienne de type amateur ou professionnelle, ou images de satellites à haute résolution.

Une première partie pose les bases de la réflexion : l'utilisation rationnelle de ces outils passe en effet par une réflexion préalable sur les échelles de travail en fonction des objectifs testés. Les images satellites et les photographies aériennes se situent aux deux bouts de la chaîne de vision actuellement disponible : les échelles de travail vont du 1/100 000 (schéma directeur, niveau régional où l'imagerie satellitaire devient très efficace.) au 1/5000 (aménagement local pour lequel les photographies aériennes sont précieuses). Ces documents deviennent très utiles pour les zones d'accès difficile, par leur rapidité d'obtention et comme outils de communication. A eux seuls généralement insuffisants, ils tirent tout leur intérêt de la complémentarité externe avec les informations traditionnelles, et interne par utilisation des différentes échelles.

Quelques d'exemples d'application pour une meilleure connaissance des bassins versants en Afrique de l'Ouest illustrent ces réflexions : cartographie globale, érosion, plans d'eau, plaques de sol nu ...

Abstract

Even in Africa, useful remote sensing data for management are not only satellite images : they also include others sensors. At local stage, studies uses with difficulty satellite data due to its too big resolution. A synthetic work has been done about uses of remote sensing in West Africa for a better knowing of small catchments. Done for French Cooperation Ministry, this study is based on a few projects for management of catchments from Mauritania to Niger, using various sensors : professional or not aerial photographs and high resolution satellite imagery.

In a first part we present some preliminary considerations and controls : rational uses of these tools in management from global to local stage needs interrogations about scales and objectives to adapt one to each other. For these objectives, useful scales vary from 1/5000 to 1/100 000. Interesting objectives also vary gradually : local one with a great interest of aerial photographs to regional one where satellite images are OK. All these data are useful in areas with difficulty of access, where usual means are expensive. A great interest is the rapidity of taking data. Alone, RS data are generally not useful, but became of great interest when combining with others ground data and using various scales. Some examples of applications illustrate these possibilities of uses in Western Africa catchments : for global cartography, erosion, ponds, bare soils areas, ...

INTRODUCTION

Cette communication a pour objet de rappeler que, même en Afrique, la télédétection peut s'entendre avec des capteurs multiples et qu'il est important d'adapter la vision au problème considéré. Elle est basée sur deux documents rédigés pour le compte du Ministère de la Coopération et concernant l'utilisation de photos aériennes et d'images satellite pour la connaissance des bassins versants en Afrique de l'ouest [1], [2].

L'origine est un ensemble de projets réalisés sur toute la frange sahélienne à partir de différents types de capteurs photo ou satellite. Il a donné naissance à un document de synthèse [2] qui aborde trois aspects :

- des considérations générales sur les capteurs en fonction du type d'objectif et d'échelle ;
- quelques aspects de techniques de base pour utiliser photos aériennes et image de télédétection ;
- des exemples d'application simples où la télédétection, sous toutes ses formes, apparaît opérationnelle et utile.

Les types de projets dont il est question ici sortent du cadre de la recherche pour être à la fois plus simples et plus opérationnels. Les résultats obtenus sont donc à la fois simples mais facilement récupérables par des équipes de techniciens et ingénieurs sur le terrain.

II CONSIDERATIONS GENERALES

2.1 Echelles de travail et aménagement

En simplifiant on peut caractériser 3 niveaux de préoccupations d'aménagement (identification, faisabilité et réalisation) correspondant à 3 niveaux d'objets d'étude (région, bassin versant, site).

Bien entendu les échelles d'approche ainsi que les tailles des zones dépendent de ces trois niveaux (Cf. ordre de grandeur tableau I).

Les moyens aériens et satellite intéressent surtout les niveaux région et bassin versant, le niveau site devant être étudié avec des moyens au sol.

Deux remarques sont importantes :

- d'une part les données recueillies ne sauraient, sauf exception se passer d'observations de contrôle au sol. De même il

est souvent intéressant de combiner plusieurs types de capteurs : les moyens ne sont pas exclusifs ;

- à chaque niveau d'étude l'aspect spatial peut être combiné à l'aspect temporel, les images de télédétection apportant un plus certain dans l'étude des évolutions, à travers une "mémoire cartographique".

Objet d'étude	Actions	Echelle moyenne	Taille de la zone
Région	Identification	1/100 000	> 1000 km ²
Bassin versant	Faisabilité	1/20 000	10 à 1000 km ²
Site	Réalisation	1/5 000	< 50 km ²

Tableau 1 : les 3 niveaux d'approche

2.2. Différents capteurs

A chacun de ces niveaux on peut associer les différents capteurs disponibles, de la photo au satellite:

- photo aérienne amateur
- photo aérienne professionnel
- images des satellites à haute résolution.

Ne sont référencées ici que les techniques simples et d'utilisation courante. Les images des satellites radar ou les scanners embarqués dans les avions ne sont pas évoqués ici.

Il est intéressant d'associer aux différents supports un ordre de grandeur de l'échelle cartographique équivalente

Photos aériennes par missions spécifiques : dépend du type d'objectif et de l'altitude du vol.

On peut espérer faire facilement des cartes entre le 1/1000 et le 1/10000.

On est maître du choix de la date et de la comparaison multodate.

Photos aériennes des missions officielles, par couverture systématique de type Institut Géographique : les échelles classiques commencent au 1/5000 jusqu'au 1/50000

La qualité et la précision des clichés sont variables surtout pour des missions anciennes.

Leur intérêt tient souvent dans la possibilité des missions de dates éloignées où sont observables les évolutions dans l'occupation

du sol : érosion, domaine cultivable ou construit.

Une limite est la saison d'acquisition de ces images sur laquelle on n'a aucune possibilité de choix..

Image satellite (Spot XS 20 m Panchromatique à 10 m ou Landsat TM à 30 m, MSS à 80m).

L'intérêt est inverse : possibilité de choix de dates pour des images récentes.

L'utilisation de plusieurs canaux permet une approche plus efficace de l'occupation du sol.

Mais ces données manquent de durée, bien que l'on soit à plus de 20 ans d'archives sur le capteur MSS.

Les échelles cartographiques équivalentes sont de l'ordre de :

- 1/50000 pour SPOT XS (à la rigueur 1/25000)

- 1/100000 pour LANDSAT TM (à la rigueur 1/50000)

III TECHNIQUES SIMPLES D'UTILISATION

Le document explicite certaines techniques d'utilisation des photos aériennes (mosaïque, choix de la focale et de l'altitude du vol, choix de l'émulsion, stéréoscopie ...).

IV EXEMPLES D'APPLICATION

2.2 Thèmes discernables.

Dans le domaine touchant les ressources en eau et l'aménagement des bassins versants on peut utiliser ces informations pour les domaines suivants :

-Etats de surface

Zones d'érosion

Potentiel d'érosion

Cartographie de la végétation

Cartographie des sols

- Bassin versant

Limites du bassin versant

- MNT, courbes de niveau ou carte des pentes

A partir de photos aériennes

A partir d'images satellites

(particulièrement utile en zones avec manque de cartographie précise)

- Ecoulement

Zones écoulement

Lit mineur

Lit majeur

Lit d'inondation

- Plans d'eau

Inventaire,

Surface

Courbes hauteur-surface-volume

Qualité de l'eau (turbidité)

Dans le document [2] les exemples d'application ont été classés du local au régional, avec les capteurs les plus adaptés pour chaque niveau.

Nous donnons ci-après trois exemples d'application, un pour chacun des capteurs envisagés.

Références :

[1], PUECH C., CARETTE J., 1989

Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique Soudano Sahélienne. Stage AFVP. 165 p

[2], CARETTE J., PUECH C., 1994

Fiches méthodologiques d'utilisation de la télédétection satellitaire et aérienne pour l'aménagement de petits bassins versants en Afrique de l'Ouest. Min Coopération. Paris., 144p

FICHE 1 : UTILISATION DE PHOTO AERIENNE (MISSIONS SPECIFIQUES)

CARTOGRAPHIE DE BASSIN VERSANT

Aménagement intégré de Bassin versant de l'Oued Amour Mauritanie [2]

Objectif : réhabilitation de barrage servant pour les cultures de décrue, limitation de l'érosion

Particularités : absence de cartes, absence de mission aérienne.

Réalisation d'une carte au 1/10000 par mosaïque de 12 clichés aériens

Matériel avion : Cessna 150 ; Altitude 2000 pieds, Vitesse de vol 150 km/h

Matériel photo : format 24*36, focale 50mm, Ektachrome 200 ASA

La mission a été réalisée avec du matériel photo type "amateur" et un vol sur avion type "aéroclub", montrant l'efficacité et la faisabilité de ces approches même avec des coûts très restreints.

Photo-interprétation

Les travaux demandés consistent en la création d'une cartographie de la plaine en positionnant tous les éléments utiles au choix d'aménagement.

1/ Les 12 clichés sont d'abord assemblés en mosaïque et mis à l'échelle 1/10 000

Le travail de photo-interprétation consiste alors en :

- Détermination des axes d'écoulement de crue ;
- Tracé des limites de la plaine alluviale ;
- Identification des désordres : repérage des zones d'érosion ;
- Identification des désordres : repérage des zones d'ensablement ;

2/ A partir de cette carte, sont menées discussions et propositions d'aménagements anti érosifs et orientations des actions hydro-agricoles. De façon plus concrète, l'espace est découpé en zones à protéger contre l'érosion où est proposée l'implantation de diguettes de terre..

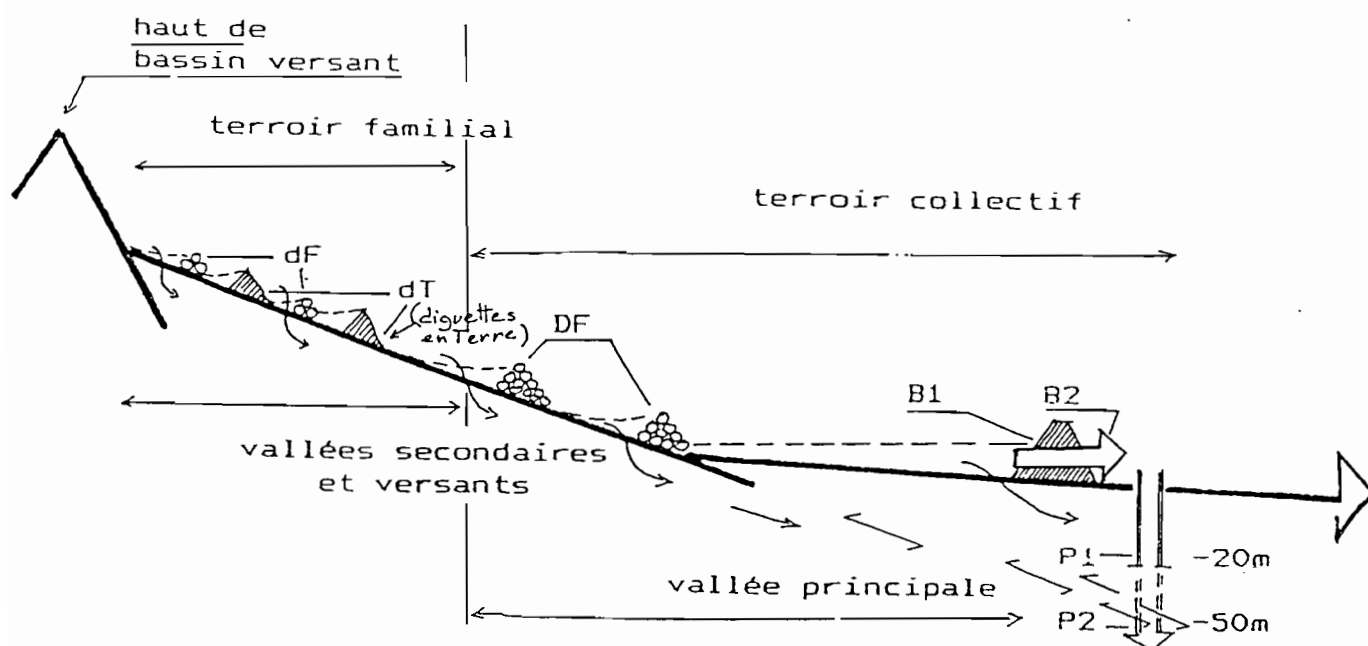
3/ Résultats : aménagements proposés (Cf. figure 1 pour une coupe type et figure 2 pour les résultats)

Sur le document résultat sont superposés les éléments issus des différents choix :

- Plan d'eau minimal / maximal
- limite de la zone cultivée
- Implantation de digues à construire par les villageois.

Ce document doit ensuite servir pour la communication avec villageois, pour l'implantation des travaux ...

AMENAGEMENT INTEGRE DU BASSIN VERSANT PAR MICRO-REALISATIONS



DIAGNOSTIC

ENVIRONNEMENT AMENAGEMENT

IDENBIA

1/10 000

le diagnostic est établi à partir d'une étude TELE GEOTECHNIQUE AERO-TERRRESTRE d'inventaire des contraintes physiques environnementales et des actuels aménagements de surface,

il permet d'identifier les désordres hydro-dynamiques (érosion/ensablement) et oriente des actions d'aménagements hydro-agricoles aptes à favoriser un ré-équilibre " NATURE / AMENAGEMENT "

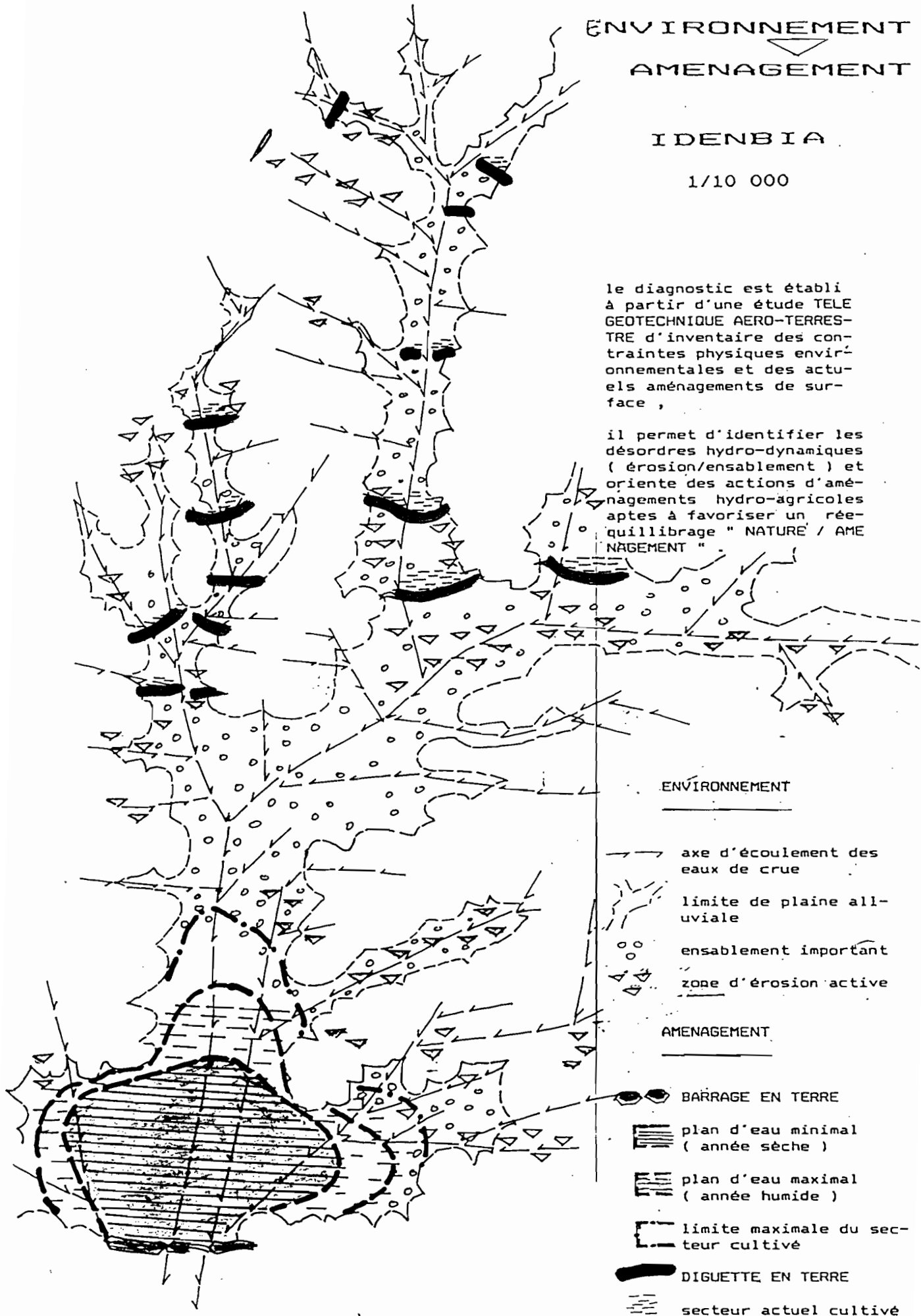


Figure 2

FICHE 2 : UTILISATION DE PHOTO AERIENNE (MISSIONS OFFICIELLES)

EVOLUTION DE TERROIR ENTRE DEUX DATES EROSION / OCCUPATION DU SOL

But : Schéma directeur d'aménagement de bassin versant [1]

Méthode comparaison photos aériennes 1952-1982

Site : Bassin versant du Baongo à Hitte (Titao, Burkina Faso)

Réalisation d'une carte générale des potentialités du bassin versant, pour envisager des aménagements.

Méthode

La méthode consiste en :

1/ Mosaïque de 5 photos IGB au 1/50000 pour chaque date d'acquisition.

Les photos sont avec recouvrement ce qui permet de travailler aussi en stéréoscopie.

2/ Photo-interprétation par carroyage de 5 ha.

Le bassin versant de 4000 ha est découpé en grille régulière de 5ha. Sur chaque carré élémentaire sont repérés les divers éléments jugés utiles pour le diagnostic à savoir :

- EROSION : affectation d'un indice 0/1/2 (érosion nulle, faible, forte) à chaque date.

La comparaison des évolutions résulte directement du double indice et l'on peut tirer facilement les zones d'évolution positive ou négative.

- OCCUPATION DU SOL. Ce plan est traité pareillement. Ici l'on note simplement l'appartenance ou non au domaine agricole. La figure 3 montre les cartes d'évolution de l'occupation du sol entre 1952 et 1982. On remarque la forte régression du domaine agricole entre ces deux dates.

- PENTES. Par analyse stéréoscopique on classe chaque carré élémentaire en pente faible (<2%), pente moyenne (2 à 5%), pente forte (>5%). Des observations sur le terrain au clisimètre permettent de calibrer les pentes, en particulier les seuils de 2 et 5%.

- GEOMORPHOLOGIE. Les classes définies sont les domaines alluvial, piemont, versant et plateau avec des zones mixtes.

Les 4 facteurs donnent une synthèse par carré de 5 ha des potentialités de la zone.

3/ Table de décision pour un aménagement

C'est la partie principale mais certainement la plus subjective. En fonction des 4 critères définis (et de leur évolution temporelle) sont décidées les affectations des différents sols. Elle est réalisée sur un mode d'expertise par une grille de décision. Certaines affectations sont évidentes (domaine agricole, sans érosion et en terrain plat). Dans l'exemple choisi ces affectations sont :

- des zones pures : domaine hydro-agricole, domaine pluvial, domaine pastoral

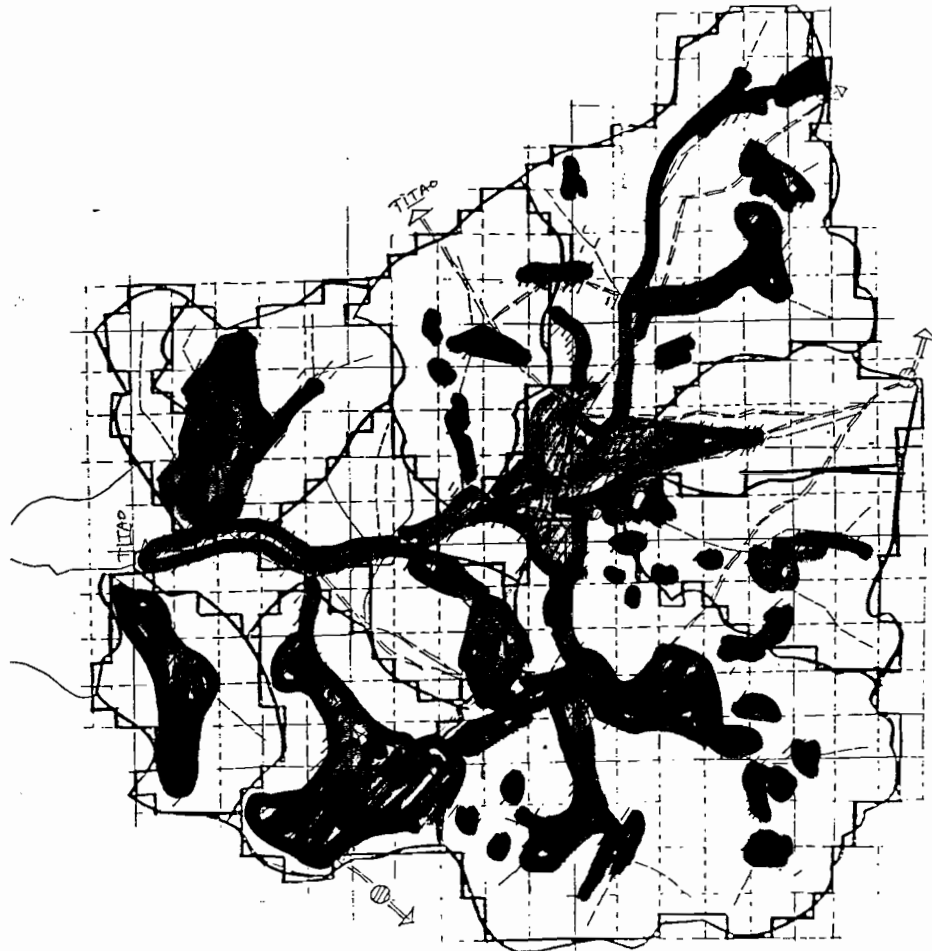
- des zones mixtes : hydro-agricole pure / pluvial, sylvo-pastoral

- des zones à problèmes de CES* : pluvial + CES, ou zones mixtes + CES.

Une carte de synthèse est réalisée (figure 4, résultat de la table de décision). C'est une base de travail pour d'éventuels aménagements du bassin versant.

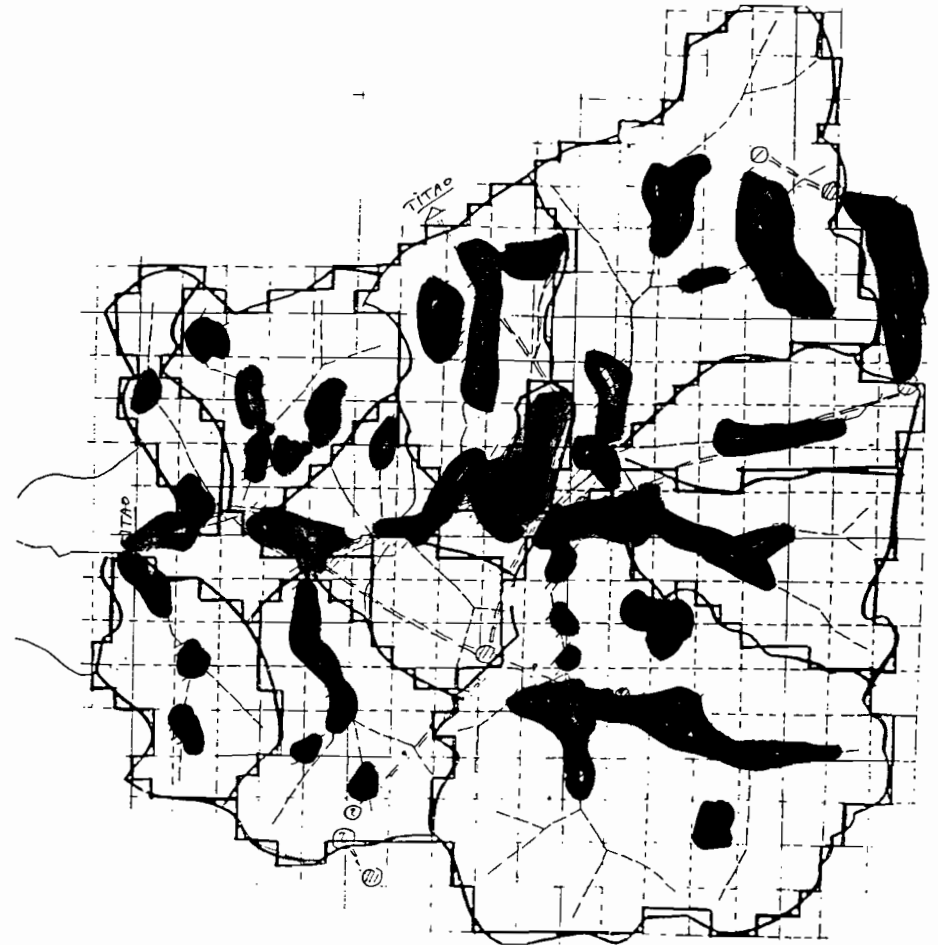
* CES = Conservation des eaux et des sols

OCCUPATION DU SOL EN 1952



- - Domaine agricole
- - Village
- — — Pistes

OCCUPATION DU SOL EN 1982



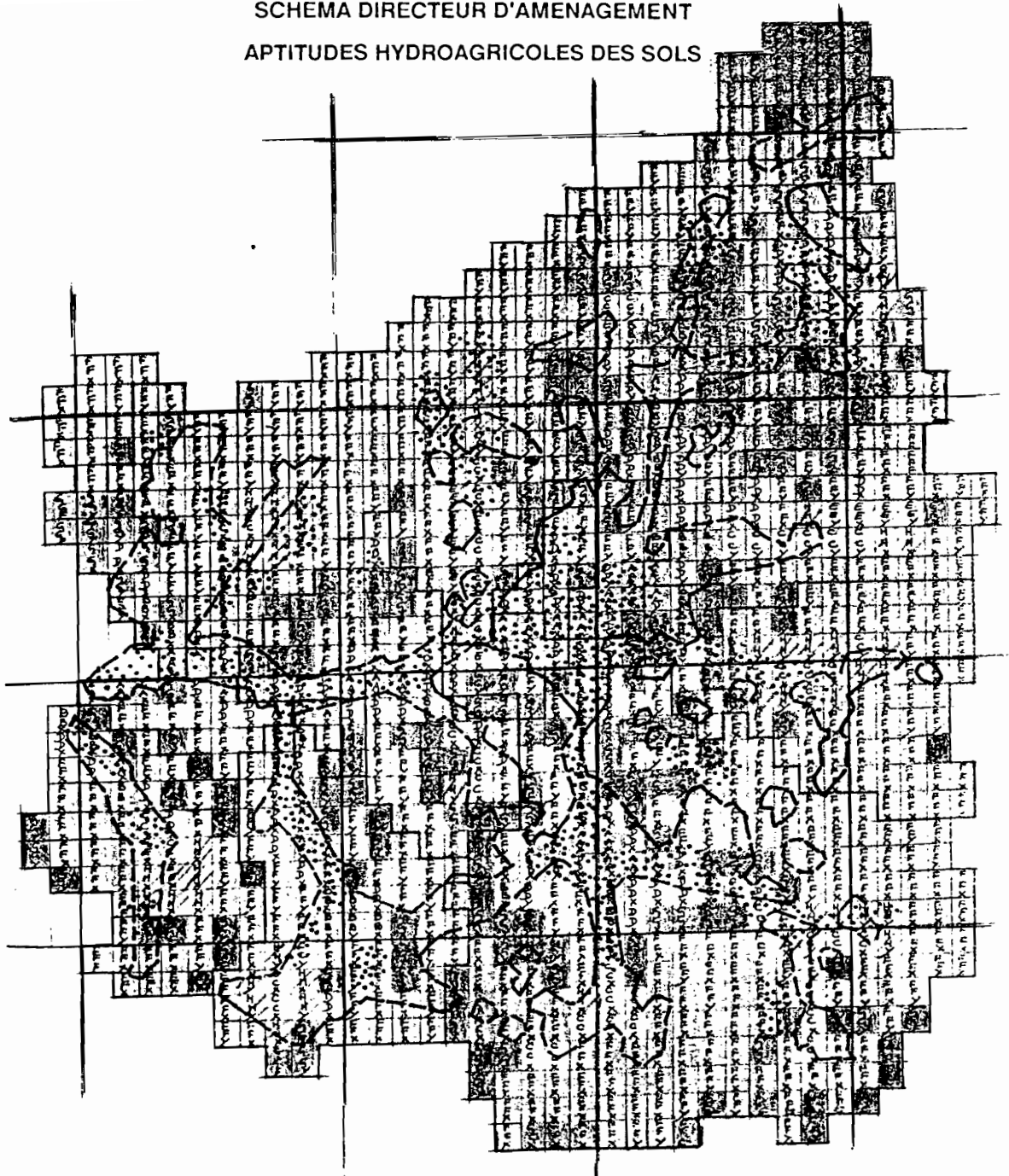
- - Domaine agricole
- - Village
- — — Pistes

BASSIN VERSANT DU BAONGO
HUTTE (BURKINA FASO)

Figure 3.

SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT
APTITUDES HYDROAGRIQUES DES SOLS

F12, à la
provenant du



- A - Hydroagricole
- B - Hydroagricole / Pluvial
- C - Hydroagricole / Pluvial + CES
(Conservation des Eaux et des Sols)
- D - Pluvial
- E - Pluvial + CES
- F - Pastoral
- G - Sylvopastoral
- H - Sylvopastoral + DRS
(Defense et Restauration des sols)



- Limite du domaine cultivé
-  1952
 -  1982 et 1988

Figure 4

FICHE 3 : UTILISATION D'IMAGE SATELLITE

CAPACITE DE PLANS D'EAU (COURBES HAUTEUR SURFACE VOLUME destinées à être utilisées en simulations de gestion.

But : schéma directeur d'aménagement de mares semi pérennes [2].

Lieu TILLABERY, NIGER

Capteur : Images SPOT XS de la même saison sèche

Méthode

La méthode est explicitée figures 5, 6 et 7

Elle est basée sur une équation simplifiée de bilan hydrique en saison sèche : on considère que la baisse du niveau d'eau dans une retenue est essentiellement liée à l'évaporation (il est possible de tenir compte d'un taux d'infiltration). Ceci est confirmé par les observations de variations de niveau qui présentent en saison sèche des parallélismes remarquables (figure 5)

Elle combine trois types d'informations :

- des données satellite (3 images de la même saison sèche donnant 3 surfaces en eau à 3 dates)
- des données d'évaporation, donnant la baisse des plans d'eau entre les dates d'observation
- des données sur le contexte régional, fournissant la courbe type reliant hauteur et surface ajustée au relief local.

Ces courbes sont de forme $S = S_0 \cdot (H - H_0)^\alpha$

S est la surface, H la profondeur.

α est un coefficient, constant régionalement (au Niger $\alpha \approx 1.25$)

S_0 et H_0 sont des paramètres de calage (H_0 représente la profondeur d'assechement)

Résultats, précision, intérêt

Le résultat est la fourniture de courbes hauteur/surface et hauteur/volume, outils à la base de la gestion des plans d'eau dans cette région

La précision est de l'ordre de 5% en surface et 30% en volume pour un plan d'eau de 10 ha (à partir d'images SPOT XS à 20 m de résolution)

Cette précision est jugée suffisante vu l'utilisation de ces courbes.

L'intérêt réside dans la rapidité d'obtention de l'information, son systématisme qui permet d'obtenir des informations pertinentes pour les plans d'eau candidats à l'aménagement sur une toute une région. Elle doit être opposée aux techniques traditionnelles d'obtention (bathymétrie, mesures au sol), techniques précises mais lourdes, coûteuses et très longues : possibilité de traiter un à deux plans d'eau par an avec les équipes actuelles de la DRE.

Elle ne saurait cependant être appliquée à l'étude d'un seul plan d'eau : le rapport qualité / prix ne serait plus en sa faveur.

On peut donc considérer que cette méthode est opérationnelle et intéressante si elle appliquée à plusieurs plans d'eau à la fois.

Mare 17, Region de Tillabery (Niger)



octobre 88



janvier 89



mars 89

Figure 5

Echelle 1/1500

. 10 -

SCHEMA TYPE D'EVOLUTION DE NIVEAU

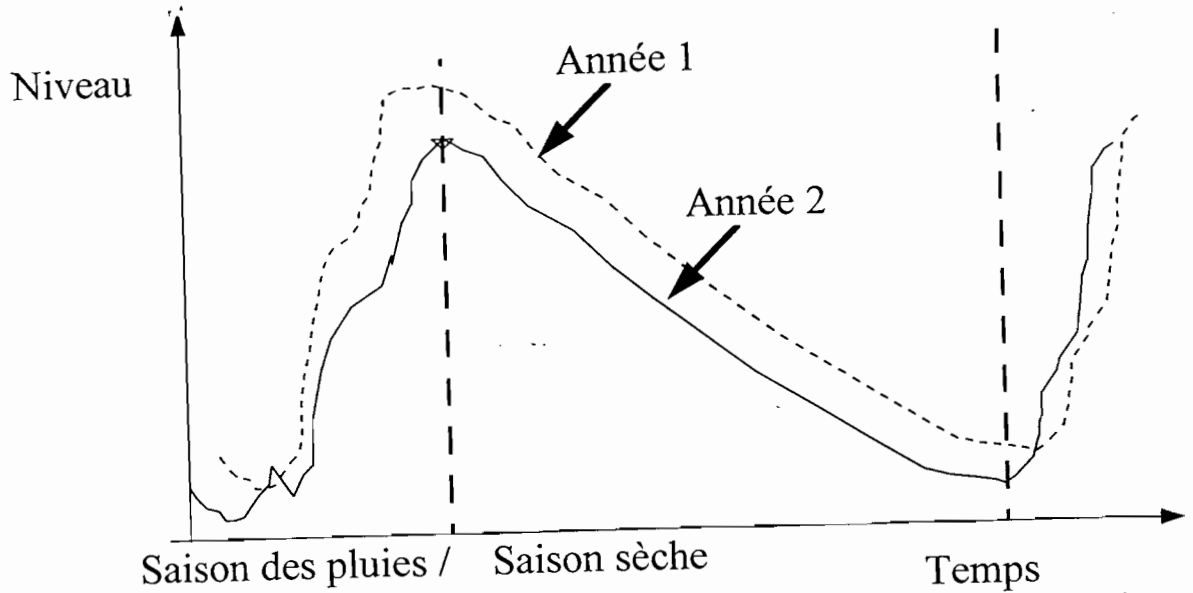
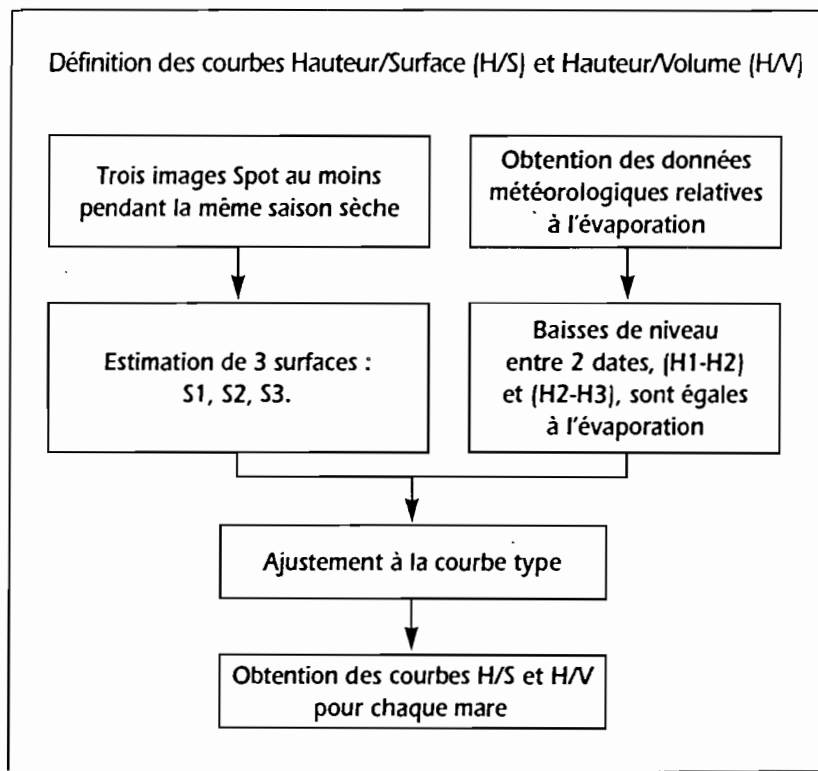
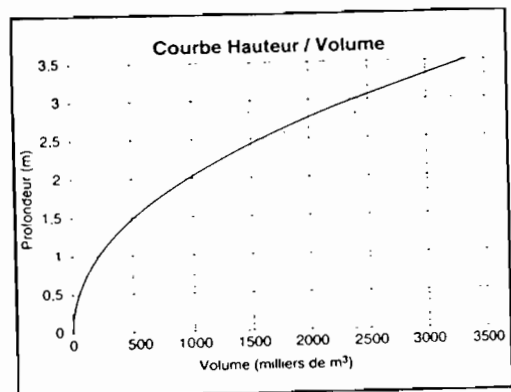
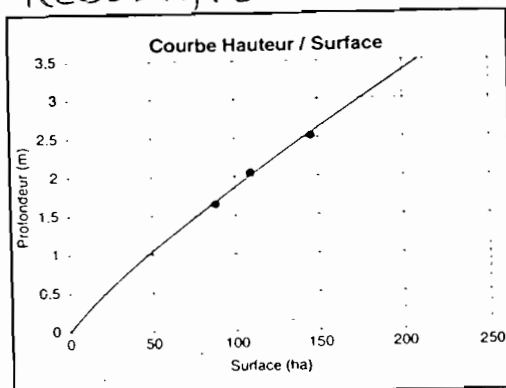


Figure 6

Mise en œuvre de la méthode



RESULTATS



TOWARDS A PRACTICAL, COST-EFFECTIVE APPLICATION OF REMOTE SENSING AND GIS FOR RURAL DEVELOPMENT IN SEMI-ARID AFRICA; MAPPING WATER HARVESTING SUITABILITY BY INTEGRATING REMOTE SENSING WITH INDIGENOUS ENVIRONMENTAL AND SOCIAL KNOWLEDGE

Eric C. PATRICK

Geography Depts., University College London + School of Oriental & African Studies,
Univ. of London

GEOGRAPHY, UCL, 26 BEDFORD WAY, LONDON WC1H, U.K.

Keywords: Research, Surface Water, Soils, Thematic Maps, Land Use, Local Level, Case Study

This paper presents a methodology currently under development which aims to provide a means by which to assess the potential of a given semi-arid area in terms of its suitability for water harvesting. Water harvesting is a promising soil and water conservation technique which multiplies effective rainfall by collecting it over a larger area than the receiving location alone. The rationale for using remote sensing and GIS are presented: the potential with remote sensing of relating features on imagery to corresponding units of distinctive surface hydrological behaviour on the ground, a possibility of particular value in drylands given the poor cost benefit ratio of conventional surveys in low productivity areas; and the ability of GIS to integrate the physical and human factors which have been shown to explain the success or failure of water harvesting projects in dryland Africa. The study site is the Lake Baringo area, Kenya.

INTRODUCTION

Semi-arid lands in developing countries are almost universally under ecological stress due to increased use by an expanding population, both local and migrants to the region (Critchley et al, 1992.) Semi-arid lands must thus be managed in more efficient, productive, and sustainable ways if rural livelihoods in these areas are to be safeguarded. Socio-environmental management requires appropriate data with which to inform the decision making process. The required physical data can potentially be acquired via remote sensing (satellite & aircraft,) and integrated via a GIS with complementary data gathered on the ground; human data, such as attitudes toward new technologies, collected using anthropological methods of participatory social investigation, and physical data such as a soil's susceptibility to producing runoff

WATER HARVESTING

A comprehensive review of dryland development options by the US Office of Technology Assessment (OTA, 1988) concluded that Rainfall Runoff Collection Irrigation [RCI], also known as Water Harvesting, is the single most promising development intervention for semi-arid Africa. RCI is based on the simple idea that the TOTAL quantity of rain falling in drylands is actually large enough to support a good crop yield, but is spread thinly. Therefore, if i) the rain which has fallen runs off overland rather than infiltrate into the soil, and if ii) the spatial pattern of runoff can be controlled by concentrating it into one location, then enough water can potentially be made available in that location to support larger crop or pasture or tree production, or make cropping possible where it would not otherwise be, &/or lower the threshold rain required to produce an economic yield; thus improving food security and rural well-being. As land in semi-arid areas is often beyond the physical &/or economic reach of the conventional sources for irrigation, namely permanent surface water or groundwater, RCI is a technique by which to maximize the use of that water source which *is* widely available, namely rainfall. Grain yields in Turkana, northern Kenya, were increased six fold by using RCI as opposed to non RCI rainfed agriculture (Pacey and Cullis, 1986.) 'Flash' floods are typical of semi-arid environments because the soil has little vegetation cover to protect it, causing the surface to

seal under the impact of the intense tropical rainstorms (de Lima, 1989.) If these floods can be impounded at a location with deep soil, then soil can be used to store the water over the growing season (thus mitigating the typical dryland problem of the temporal pattern of few, but often large, rain events; in between which moisture is lost to the high evaporation characteristic of semi-arid areas.)

REMOTE SENSING AND WATER HARVESTING

Farmers and pastoralists throughout history have taken advantage of natural flash floods (Pacey and Cullis, 1986,) but seldom have the underlying processes been actively managed to human advantage, as the processes were not well understood. By applying a scientific understanding of runoff processes, however, in conjunction with the overview of the landscape provided by remote sensing, one can now hope to quickly, accurately, and cost-effectively identify areas within drylands which are promising in terms of runoff potential *and* which are adjacent to areas of deeper soil suitable for storing the runoff *and* within economic walking distance of villages able and willing to attempt RCI, as determined by Rapid Rural Appraisal. Remote sensing has long been recognized to be of particular value in drylands, which are generally vast areas with low population densities and thus very expensive to survey by conventional means. However, very few researchers (notably Tauer and Humborg, 1992,) have so far applied the potential of remote sensing to RCI, but with very promising results.

STUDY SITE

The Njemps flats region south of Lake Baringo, Kenya, has been identified as an ideal location to develop an operational methodology of use to development agencies to quickly assess the potential of an area for RCI *while simultaneously* investigating the larger *contextual* question of the differential impacts of RCI on social groups. The Lake Baringo area is an ideal site for such a study because of the unusual concentration of RCI projects in the area, by different funders (United Nations agencies, the World Bank, local church groups,) with different approaches and agendas and representing different philosophies.

GIS AS AN INTEGRATING TECHNOLOGY

A low cost GIS suitable for use by NGO's in the field (Idrisi) is being employed to integrate the human and physical criteria believed—on the basis of a comprehensive literature review—to determine the suitability of an area for RCI, as a GIS can overlay different thematic maps and thereby identify sub-locations of high potential in *all* map layers, resulting in a final classification map of use to development agencies for planning purposes. Thus, a 'Potential for Runoff Generation' map of the physical environment is being created and will be merged with an 'Amenability to Adoption of New Technology' map of the human environment of the same area, the Njemps flats. The final classification map will link *available* resources, social organization, and attitudes toward innovation of each village to the corresponding *requirements* of a particular *type* (i.e. large or small scale, group or individual management) of RCI scheme, and to a recommended *application* of the water collected; i.e. range, crop, or tree production, again reflecting both community desires and abilities and physical suitability.

CONSTRUCTING THE HUMAN CRITERIA MAP LAYER

The human criteria map is being constructed on the basis of the criteria known to affect the adoption of RCI in rural Africa, on the basis of a literature review of RCI project reports in Baringo and elsewhere, augmented by local factors being uncovered by my own field investigations. These investigations utilize Participatory Rural Appraisal (PRA,) a suite of interview and observation techniques adapted from social anthropology and made more time-effective to suit development planning (Chambers, 1990.)

CONSTRUCTING THE PHYSICAL CRITERIA MAP LAYER

The physical criteria map is being constructed by relating homogenous areas in remotely sensed images to their corresponding positions on the ground by means of a Global Positioning System, in order to determine whether there is a consistent relationship between a distinct 'feature' on an image and a distinct hydrological behaviour at the corresponding land surface unit on the ground. If a 'catalogue' of such relationships can be built up which link runoff susceptibility of soils to corresponding features on imagery, then the imagery can potentially be used to *predict* runoff in all areas of the Njemp flats, which would both serve as a useful planning tool for that region as well as demonstrate the possible feasibility of the methodology for similar environments elsewhere.

There has been a long-standing French research program to predict ten year maximum floods in catchments in semi-arid West Africa, as an engineering parameter for dam design (Rodier, 1992.) Portable rainfall simulators began to be used in the 1970's in order to mitigate the difficulty of observing *actual* rainfall-runoff events, given the high temporal and spatial variability of rainfall in semi-arid environments. Once the factors which best explain runoff generation were identified from the simulation campaigns, it became clear that *surface* features, and particularly crusting, were the key control on and indicator of runoff potential in the study zone (Casenave and Valentin, 1989.) The concept of 'elementary surface type' ('EST') was elaborated; meter square units, homogeneous in surface composition and thus runoff behaviour. A catalogue of EST's was created, relating a visual description of each EST to its corresponding runoff value as determined by rainfall simulation. The next question was how to *upscale* from these known square meter values to catchment scale. The approach chosen was to survey the landscape for naturally recurring associations of EST's, analogous to soil associations. Thus, if an association is 50% EST type A and 50% EST type B, then runoff is assumed to be $0.5 \times \text{EST A's runoff value} + 0.5 \times \text{EST B's runoff value}$.

The challenge was now how to map these associations ('ESTA's') from remote sensing. An unsupervised classification in a channel combination which distinguishes vegetation from bare soil and is correlated to soil brightness ($\sqrt{(\tau^2 + i\tau^2)}$) was undertaken on a portion of a catchment which had *already* been manually surveyed and mapped in terms of ESTA's. The result of the classification was the delimitation of classic 'land facet types', such as dunes, rock outcrops, and dambos; *and these were found to correlate very well to the ESTA map*, both within the study subcatchment and when extended to the whole catchment (Casenave and Valentin, 1989.) Furthermore, it was found that the 'reflectance-ESTA key' could be successfully extended to a nearby catchment (within the same image) *and* that runoff predicted on the basis of a simple summation of the ESTA rainfall simulation values gave a regression coefficient of 0.80 with respect to measured runoff from the catchment.

Subsequent attempts to map ESTA's **directly** (Pueche and Laily, 1990,) however, were unsuccessful; only four of the twelve ESTA's occurring in the study area being distinguishable by image processing. This is likely due to the large number of variables incorporated into an ESTA. Returning, therefore, to mapping ESTA's *by 'proxy'*, it was found that seven out of seven *vegetation* classes (% cover) and six out of ten *soil* classes could be distinguished by remote sensing, and that there is a very close spectral relationship between these proxy measures and ESTA's (Pueche, 1994.) Crust features can, however, extend across soil boundaries, as they are not purely a function of soil properties. Although the study was undertaken within the region on which the standard ESTA catalogue had been constructed, there were many *local variants* of standard ESTA's, with deviation from predicted runoff by as much as 300% (Pueche, 1994); which implies the necessity of developing *site specific* reflectance-runoff keys; which in turn raises the question of the *cost-effectiveness* of creating each key *by large scale rainfall simulation campaigns*. Furthermore, *total* predicted runoff, contrary to the results of Casenave and Valentin (1989,) was found to be double--on average--measured runoff, across eight catchments; again within the region for which the ESTA catalogue was developed (Pueche, 1994.) Tauer and Humborg (1992) obtained overestimates of up to 600% in predicted

runoff using simple summation of ESTA's for another sahelian catchment, with the degree of overestimation increasing with rainfall depth. This can most likely be explained as the effect of ignoring the *partial contributing area* (PCA) phenomenon, which in humid zones is due to the saturation of channel areas and thus decreased storage capacity and correspondingly greater runoff in these areas, while in semi-arid environments (Ben-Asher and Berliner, 1994) is due to the short duration of rain events, which are thus unable to maintain water flow from remote areas of the catchment into the drainage network. Losses also occur due to detention losses en route, among many other processes, which are not significant at the square meter rainfall simulation scale. Moliner et al (1990,) working on bare soils in semi-arid Brazil, found that runoff decreased by five percent for every doubling of the surface area, a result consistent with findings in other semi-arid regions.

CONCLUSION; RESEARCH IN PROGRESS

The problem, then, is essentially one of *upscaling*. For **micro** RCI applications, which operate on areas of less than one hectare, the errors in upscaling are manageable. For **macro** RCI from catchments, however, methods for determining the PCA *a priori* must be developed, likely drawing on classic basin morphometry from air photos, coupled with digital terrain models for flood routing. The current research aims to explore the PCA delimitation problem on a small (0.3 km) heavily instrumented catchment in the study area, the Katorin, while simultaneously attempting to reduce ground measurements by *substituting* rainfall simulation with indigenous technical knowledge (ITK.) ITK has been shown to be a reliable and cost-effective source of information in soil survey (Tabor, 1993,) *within* the geographical boundary of the group being interviewed (Niemeijer, 1995). The present research, however, is attempting to *extend the spatial validity of ITK by linking it to remote sensing*, on the principle that similar soil units should be found within a semi-arid environmental, as *the same physical processes are at work*, even if the environmental knowledge acquired by a particular people group is restricted to their area of movement. Therefore, if the runoff behaviour observed over many years by local people in a given area on a range of soil units can be elicited by Participatory Rural Appraisal, and the corresponding reflectance values of these soil units by digital image processing, then a supervised classification can potentially indicate all other locations of similar runoff behaviour. Information derived from PRA is *validated* against rainfall simulations.

REFERENCES

- Ben-Asher, J. and Berliner, P.R. (1994) Runoff Irrigation. In, Tanji, K.K. and Yaron, B. (eds.) *Advances in Agricultural Sciences*. Vol 22. Springer-Verlag, Berlin.
- Casenave, A. and Valentin, C. (1989) *Les Etats de Surface de la Zone Sahelienne*. ORSTOM, Paris
- Chambers, R. (1991) Short cut methods of gathering social information for rural development projects. In, M.M. Cernea (ed.) *Putting People First: Sociological Variables in Rural Development*. Oxford University Press, Oxford.
- Chritchley, W., Reij, C., and Seznec, A., (1992) *Water Harvesting for Plant Production*, Volume 2. The World Bank, Washington.
- de Lima, J.L.M.P. (1989) *Overland Flow Under Rainfall*. Wageningen University, Wageningen.
- Gallacher, R.N. (1994) Evaluation and prospects for soil conservation and water harvesting. In, FAO, *Water Harvesting For Improved Agricultural Production*. FAO, Rome.
- Niemeijer, D. (1995) Indigenous soil classifications: complications and considerations. *Indigenous Knowledge and Development Monitor*. Vol. 1: Jan. 1995. Ciran, The Hague
- Office of Technology Assessment (1988) *Enhancing Agriculture in Africa*. US GPO, Washington, D.C.
- Pacey, A. and Cullis, A. (1986) *Rainwater Harvesting*. ITDG, London.
- Pueche, C. (1994) *Du M2 Au Bassin Versant: La Difficulte Du Passage D'Echelle*. Journee Hydrologique de l'ORSTOM 09.1994. ORSTOM, Paris.
- Pueche, C., and Lailly, B. (1990) *Utilisation de la Teledetection Satellitaire pour la Caracterisation Hydrologique de Neuf Bassins Versants au Burkina Faso*. Projet PNUD BFK 88/002. CEMAGREF, Montp.
- Rodier, J. (1992) *Du Simulateur de Pluie aux Bassins Representatifs Saheliens*. ORSTOM, Paris.
- Tabor, A. (1993) Soil Surveys and Indigenous Classification. *Indigenous Knowledge and Development Monitor*. Vol 1: Jan 1993. Ciran, The Hague.
- Tauer, W. and Humborg, G. (1992) *Runoff Irrigation in the Sahel Zone*. CTA, Wageningen

POSITIONNEMENT, PRODUCTIVITÉ ET GESTION DES FORAGES EN MILIEU FISSURÉ DE CÔTE D'IVOIRE PAR TÉLÉDÉTECTION ET SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Biémi J¹ ; Jourda J.P¹ ; Deslandes S² et Gwyn H².

1- Université Nationale de Côte d'Ivoire

2- CARTEL, Université de Sherbrooke, Québec

RÉSUMÉ

Les traitements numériques des images satellitaires du bassin de la Haute Marahoué ont porté sur les techniques de rehaussement, les composantes principales, le rapport de bandes TM7-TM4 / TM7+TM4 et la combinaison TM6+TM7 pour l'interprétation visuelle. Les données obtenues ont été intégrées et interprétées à l'intérieur d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale (SIHRS); ce qui a permis d'identifier le complexe volcano-sédimentaire du sillon intracratonique de Boundiali et la masse du granite circonscrit de Séguéla, dont la forme n'a pu être décrite jusqu'à ce jour par les méthodes classiques. La confection d'un bloc diagramme dans le SIHRS a servi à l'étude des limites inférieures des fractures ouvertes; et, du profil d'altération dans le socle cristallin capté par de nombreux forages dans la région. Une carte de fracturations, couvrant sur une superficie de 12 500 km², illustre assez bien des mégafactures d'importance régionale dans le socle et d'orientation: N170-190; N30-60; N80-100 et N120-160, caractéristiques de la tectonique cassante en Afrique de l'Ouest. Une étude sectorielle des relations entre les accidents et le réseau hydrographique a révélé que les principaux cours d'eaux circulent essentiellement dans les axes tectoniques.

Les écoulements et les possibilités de formation des réservoirs d'eaux dans les milieux fissurés, peuvent être appréhendés, grâce à l'étude des perméabilités induites par les fractures. Cependant, jusqu'à maintenant, les résultats obtenus par cette technique sont restés tributaires de l'importance et surtout de la densité des fractures susceptibles d'être visualisées sur les photographies aériennes classiques. Les images Landsat TM, du bassin versant de la Haute Marahoué, traitées numériquement et interprétées à l'intérieur du SIHRS, ont considérablement amélioré cette approche, grâce à une assez forte densité de fractures (62 fractures en moyenne par 1,44 km² de surface), repérable sur les images satellitaires réhaussées. En effet, les valeurs de perméabilités induites, obtenues par ce procédé, varient de 0,11 à 0,66.10⁻⁴ m/s; contre des valeurs de 10⁻⁸ m/s par les méthodes classiques. Par conséquent, elles sont voisines des perméabilités réelles des terrains fissurés affectés par l'altération.

Les relations possibles entre les quatre principales directions d'accidents relevées sur les images (N-S, NE-SO, E-O et NO-SE) et l'emplacement de 103 forages en exploitation et la détermination des profils de productivité associés aux directions préférentielles des linéaments montrent que dans le bassin, 68% des forages sont implantés à l'intérieur d'un rayon de 200 mètres des linéaments, avec 27% des forages creusés directement sur un linéament. Tous les forages en exploitation dans le bassin présentent une position plus ou moins idéale par rapport à au moins une direction majeure de linéaments, la distance maximum d'éloignement étant de 1,1 km pour les quatre directions. Les accidents NO-SE sont les plus productifs, avec 63% des débits élevés (6 < débit < 14 m³/h) contre 25% pour ceux orientés N-S; ces deux directions interviennent respectivement pour plus de 62% des cas dans le guidage du choix du site des ouvrages.

1- INTRODUCTION

En 1972-73, la Côte d'Ivoire fut confrontée à une sécheresse assez aigue dont Les conséquences désastreuses n'ont épargné aucun pays d'Afrique de l'Ouest, marquée par un tarissement généralisé de la majorité des points d'eau de surface; et, une baisse souvent importante du niveau piézométrique des nappes phréatiques, mettant du coup à sec, tous les puits creusés dans les profils d'altération au toit du socle cristallin. Devant cette menace cyclique contre la vie des populations, nombre des états du continent, se sont dotés, à partir de 1973, de moyens puissants pour l'exécution des forages d'eau sur leur territoire respectif. Dans le cas de la Côte d'Ivoire, à la fin de 1983, plus de 13.000 ouvrages de captage d'eau sont

creusés sur son territoire national. Malheureusement, ces forages d'eau ont été réalisés avec une précipitation assez grande et pour cause: la sécheresse était là, les populations avaient besoin d'eau pour survivre; tant et si bien que l'urgence des besoins humains à couvrir justifia les insuffisances souvent constatées: tâtonnements fréquents et pertes énormes de temps, d'argent et de matériels. C'est pourquoi, en 1985, le gouvernement de Côte d'Ivoire incita les chercheurs à approfondir les connaissances scientifiques sur les potentialités en eau des aquifères de fissures du socle précambrien, qui représente, à lui seul, 97% du territoire national.

Le bassin versant de la Marahoué a été choisi comme secteur témoin pour une étude test. Il présente toutes les caractéristiques typiques des régions subsahariennes, les plus touchées par les problèmes de manque d'eau en Côte d'Ivoire. En effet, en 1984-1987, les observations de terrain, faites lors des missions de reconnaissance, ont révélé que, sur 212 forages mis en exploitation dans le bassin: 22,6% étaient régulièrement en panne mécanique; 8,4% abandonnés pour le mauvais goût de leur eau ou pour leur situation dans un bois sacré destiné à des cultes rituels; 18,39% complètement sans eau. Au total, ce sont environ 50% des ouvrages réalisés qui n'étaient pas constamment fonctionnels pour une raison ou une autre, exposant les populations à des besoins importants en eau.

Le secteur d'étude s'inscrit entièrement au Sud du cadran NW de la Côte d'Ivoire, à l'intérieur d'un rectangle de 240 km de long et 50 km de large (soit environ 12.500 km² de surface) dont il occupe toute la partie diagonale (**Figure 1**). Ce bassin est limité par les latitudes 7°40' et 9°30' N et les longitudes 6° et 7°W.

2- METHODOLOGIE

Trois scènes Landsat Thematic Mapper se recoupent sur le bassin versant de la Haute Marahoué: les quadrants 2 et 4 de la scène 198-54, le quadrant 1 de la scène 197-55 et le quadrant 3 de la scène 197-54. Ces images ont été acquises en l'absence de nuages, au coeur de la saison sèche, les 7 et 16 janvier 1986. La création de la mosaïque a nécessité un calibrage radiométrique (ajustement de la moyenne et de l'écart-type entre les secteurs de recouvrement). La correction géométrique comporte un rééchantillonnage de la taille des pixels à 50 x 50 mètres, compte tenu de la grande superficie du bassin. Les bandes 3 (rouge), 4 (proche infrarouge), 5 (infrarouge moyen), 6 (infrarouge thermique) et 7 (infrarouge lointain) ont été retenues. La base de données comprend également les images du champ magnétique total résultant d'une mission aéroportée effectuée au cours des années 1974 et 1975 par la Kenting Earth Sciences Ltd. Ces données, interpolées et géocodées, ont été acquises de la Commission Géologique du Canada. La taille des pixels est de 125 m x 125 m. A ces images, s'ajoutent les cartes topographiques (1:200 000) et les informations géologiques préexistantes ou recueillies (Millary, 1964; DCH, 1982; SODEMI, 1971-72 et études géologiques à l'affleurement).

Les traitements d'images ont porté sur la recherche d'une meilleure combinaison d'images déjà rehaussées, susceptibles de favoriser une la discrimination des ensembles lithologiques et une perception des linéaments sur les compositions colorées. Les opérations de réhaussement comprennent: les composantes principales, le rapport TM7-TM4 / TM7+TM4, la combinaison TM6+TM7 et les filtres directionnels de Sobel utilisant une matrice de 7 x 7.

Les images satellitaires rehaussées et celle du champ magnétique total, couplées avec les données géologiques, ont été intégrées numériquement au système d'information à référence spatiale (SIHRS) où l'on a produit, par superposition et interprétation des images, la carte des réseaux de linéaments du bassin. Les différentes données intégrées dans le SIHRS sont: les courbes altimétriques ayant servi à la confection du bloc diagramme, les nombreuses données de base comme les dérivées des images satellitaires rehaussées (classification géologique, cartes linéamentaires, etc.); les données géocodées du champ magnétique total de Kenting Sciences acquises en 1974 et 75; les cartes d'interprétation géologique des données aéromagnétiques de la Société Paterson, Grant et Watson 1977 à 1/200.000, les principaux cours d'eau, le réseau routier et la localisation des villes et villages (recueillies sur des cartes topographiques au 1: 200 000). A partir de cette dernière, il a été entrepris l'étude des perméabilités induites par les fractures et des principaux couloirs souterrains de circulation d'eau.

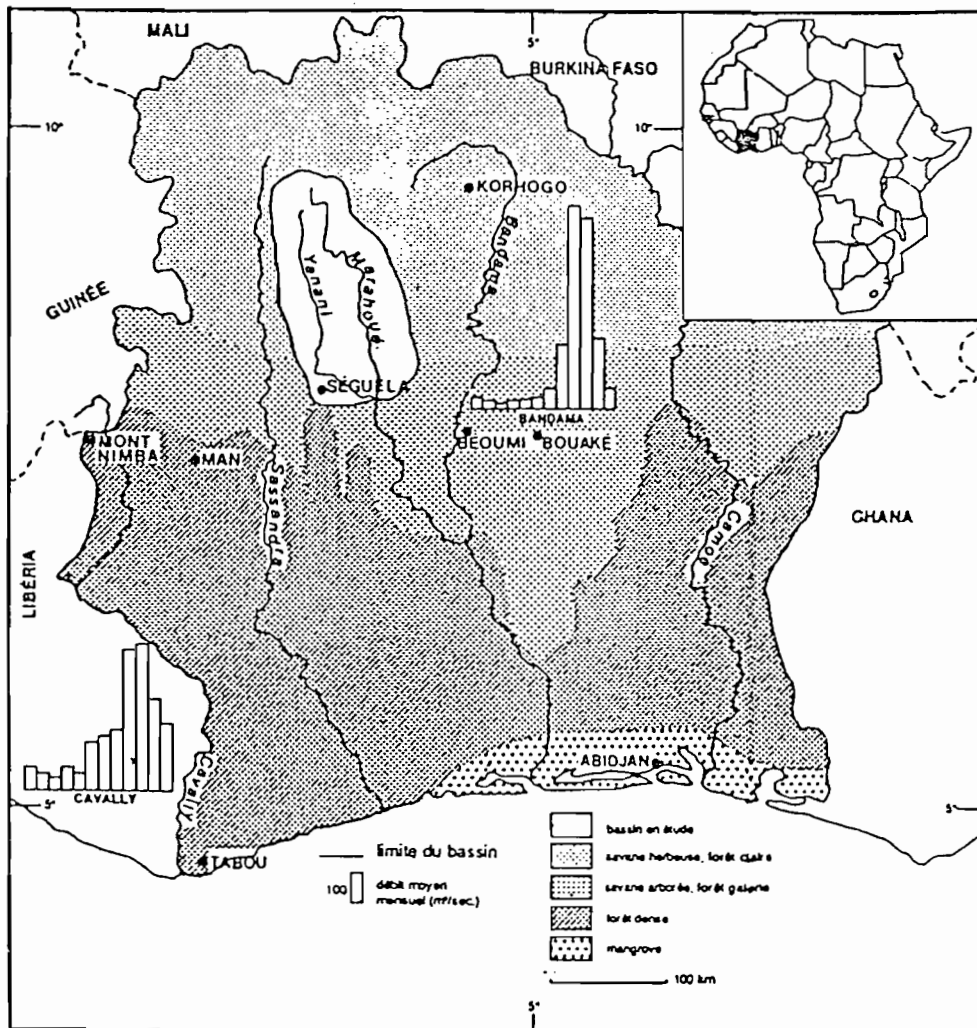


Fig. 1. - La Côte d'Ivoire et le bassin versant de la Marahoué (The Ivory Coast and the drainage basin of the Marahoué River)

Pour les perméabilités induites par les fractures, la méthode de Francis n'est applicable qu'aux régions où le socle est affecté par des fractures voisines de la verticale; comme c'est le cas dans le bassin de la Haute Marahoué, où les structures cassantes présentent, dans 80% des cas, des pendages généralement supérieurs à 80°. Le calcul de perméabilités induites par les fractures a nécessité, au laboratoire, un maillage du bassin de la Haute Marahoué, d'une superficie de 12 500 km², en 103 cercles de 12 000 mètres de diamètre, inscrit chacun à l'intérieur d'un carré dont le côté est égal au diamètre du cercle correspondant. A l'intérieur de chaque cercle, il a été calculé: le nombre total des fractures; la longueur individuelle et totale des fractures; et l'orientation cas par cas des fractures.

Au préalable, des mesures effectuées à l'affleurement ont permis d'estimer deux variables indispensables au calcul des perméabilités induites: la conductivité hydraulique (K_i) de la région et le coefficient empirique de proportionnalité entre l'ouverture et la longueur des fractures (C). La conductivité hydraulique (K_f) est assimilable à la perméabilité moyenne apparente caractérisant toute la surface étudiée. A partir de l'expression de la transmissivité dans une zone fracturée traversée par un forage:

$$T_i = K_i e_i$$

avec:

$$\begin{aligned} T &= \text{transmissivité de la zone (m}^2\text{/s)} \\ e &= \text{épaisseur de la zone (m)} \\ K_i &= \text{conductivité de la zone (m/s)} \end{aligned}$$

• Cette variable est donnée par la relation: $K_f \text{ (m/s)} = \left(\sum \frac{T_i}{e_i} \right)$

Dans les forages à arrivées d'eau multiples, l'épaisseur de la zone fracturée peut être estimée à partir de la différence de profondeur entre la première et la dernière arrivée d'eau. Les valeurs de la transmissivité ont été calculées à partir des essais de pompage réalisés sur 80 forages, par les méthodes d'approximation de Jacob, Cooper-Jacob, Gringarten et Thiery. Dans le cas de la variable (C), le problème de la mégafracture visible en image satellitaire peut être envisagée à deux dimensions parce que l'épaisseur de la croûte terrestre fracturée est très négligeable par rapport à son étendue. En général, cette épaisseur ne dépasse guère 100 m pour 10 Km² de surface, autrement dit elle varie dans un rapport <10⁻⁵. En conséquence, l'épaisseur de la zone broyée peut être considérée comme une fonction linéaire empirique de la longueur apparente de la mégafracture telle que :

$$e = cL$$

avec:

$$\begin{aligned} e &= \text{épaisseur de la zone broyée (m)} \\ L &= \text{longueur apparente de la mégafracture mesurée en photographie aérienne (m)} \\ c &= \text{coefficient de proportionnalité empirique (sans dimension)}. \end{aligned}$$

La variable (C) a été déterminée empiriquement en mesurant les longueurs et les ouvertures sur environ 2000 fractures affectant le socle et en faisant le rapport entre ces deux paramètres. Ainsi, après une détermination des valeurs de la conductivité hydraulique du bassin (K_f = 3,51.10⁻⁵ m/s) et du coefficient de proportionnalité empirique entre l'ouverture et la longueur des fractures (C = 0,0036), la carte des réseaux de linéaments, initialement réalisée dans l'environnement EASIPACE de PCI, a pu être mieux exploitée. Les valeurs de perméabilités induites ont été calculées à partir de la formule (Francis, O., 1970):

$$l(\text{max}, \text{min}) = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{2K_{NW}}{K_{WN} - K_{NN}}$$

$$\text{et: } K \left(\begin{matrix} \text{max} \\ \text{min} \end{matrix} \right) = \frac{1}{2} (K_{WW} + K_{NN}) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(K_{WW} - K_{NN})^2 + 4K_{NW}^2}$$

avec:

$$\begin{aligned}K_{NN} &= CL \cos^2 \lambda \\K_{WW} &= CL \sin^2 \lambda \\K_{NW} &= -CL \sin \cos \lambda\end{aligned}$$

3- RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSIONS

3-1 CADRE GÉOLOGIQUE

L'esquisse géologique du bassin met en évidence l'importance des granito-migmatites d'extension régionale qui occupent 87,7 % de la superficie du secteur d'étude. Le complexe volcano-sédimentaire couvre 10,1 % de la superficie du bassin et s'associe au sillon intracratonique birimien de Boundiali. Ce sillon présente un rétrécissement dans sa partie inférieure puis, une interruption, avant de disparaître totalement peu au nord-ouest de la ville de Séguéla (**Figure 2**). Sur le plan géologique, la télédétection et le système d'information hydrogéologique à référence spatiale ont contribué à l'identification des faits suivants:

- la manifestation du contour exact du granite de Séguéla, qui apparaît comme un granite circonscrit en forme d'embryon tourné vers le Nord-Est, jamais soupçonné auparavant par la géologie classique;

- et au Sud-Ouest de la carte, la forme effilée du sillon birimien de Boundiali entre les granites et les granito-migmatites et, en particulier, ses rapports avec le granite circonscrit de Séguéla dont l'intrusion brutale, dans les dépôts du sillon, serait à l'origine de la disparition de celui-ci à la hauteur de Séguéla.

3-2 LIMITE INFÉRIEURE DES FRACTURES OUVERTES DANS LE SOCLE

Un bloc diagramme du bassin versant de la Haute marahoué, confectionné grâce aux multiples fonctions du SHIRS, permet de suivre, l'évolution apparente des arrivées d'eau et des débits optimaux; ainsi que la progression en profondeur, du front d'altération, dont l'épaisseur assez faible au Nord du bassin (10 à 20 m), gagne en importance dans le secteur Sud où elle avoisine les 70 m (**Figure 3**).

En Afrique, les spécialistes en sciences de l'eau admettent généralement que les arrivées d'eau décroissent en nombre et en importance avec la profondeur du socle sain traversé. Certains auteurs fixent à 50-60 mètres, la limite inférieure d'existence des fissures ouvertes. Dans le bassin de la Haute Marahoué, des résultats similaires, observables dans le bloc diagramme, laissent plutôt planer un doute. Car, ici, la majorité des forages ne dépasse pas 50 m de profondeur; tant et si bien que la regression du nombre des arrivées d'eau que l'on constate au-delà de 100 m, est peut être aussi la conséquence d'une insuffisance en nombre des forages atteignant une profondeur de 90 à 100 m dans la région.

3-3 RÉSEAU DE LINÉAMENTS

La carte du relevé détaillé des linéaments comporte près de 16 000 segments assimilables à des fractures (**Figure 4**). Les linéaments ont été identifiés sur les images TM décrites plus haut, en exploitant les possibilités du SHIRS, permettant l'affichage de compositions colorées et l'édition de fichiers vectoriels. Une carte présentant les linéaments d'importance régionale, associés aux accidents majeurs dans le socle, a été préparée à l'aide, principalement, de la combinaison TM6+TM7. **Les mégafractures d'importance régionale** apparaissent comme de grandes failles ou des couloirs de cisaillement dans les quatre principales directions tectoniques d'Afrique (**Figure 5**). **La direction N170-190°** correspond au grand couloir de cisaillement de Séguéla (N180°) et aux failles de Massala (N180°), Yérétyélé (N195°) et Karamokola (N170°). **Dans la direction N80-100°**, les accidents est-ouest sont plus discrets. Ils s'expriment par les failles de Kondogo-Ouakro (N90°), Souasso-Forotoutou (90°) et Kénégbé-Bayani (N80°). **La direction N30-60°** est la direction la plus pourvue en accidents majeurs. On y distingue les couloirs de cisaillement de Morondo (N35°), Gbominasso (N50°), Kani (N40°) et Bobi (N73°); et les failles de Djibrossa (N75°), Faraba (N40°), Douala (N60°) et Nandala (N55°). **Enfin, la direction**

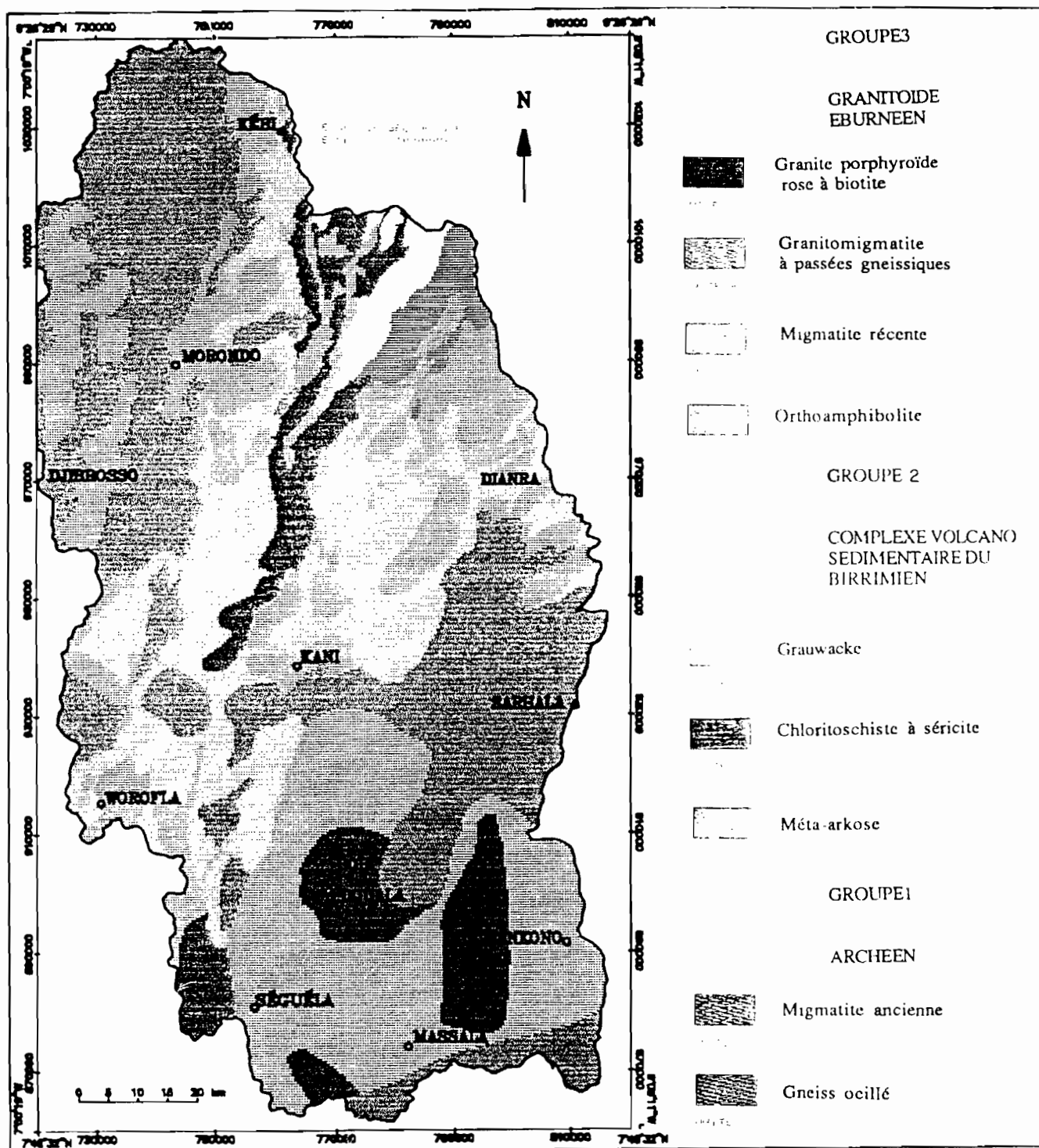


Figure 2 Esquisse géologique du Bassin versant de la Haute Marahoué: carte des principales unités pétrographiques établie à l'aide des images de LANDSAT TM rehaussées et des données géocodées du champ magnétique total interprétées à l'intérieur du SIHRS

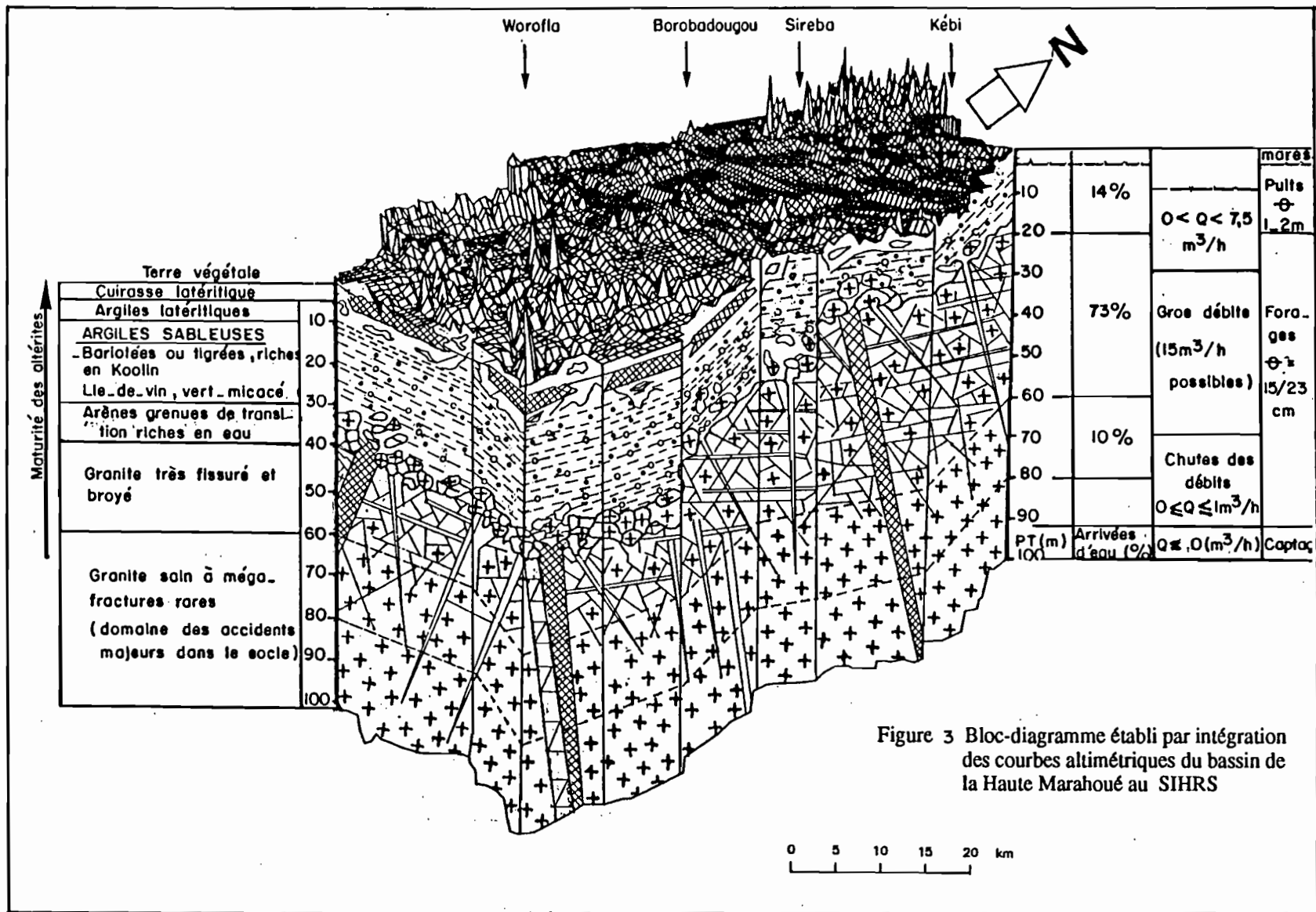
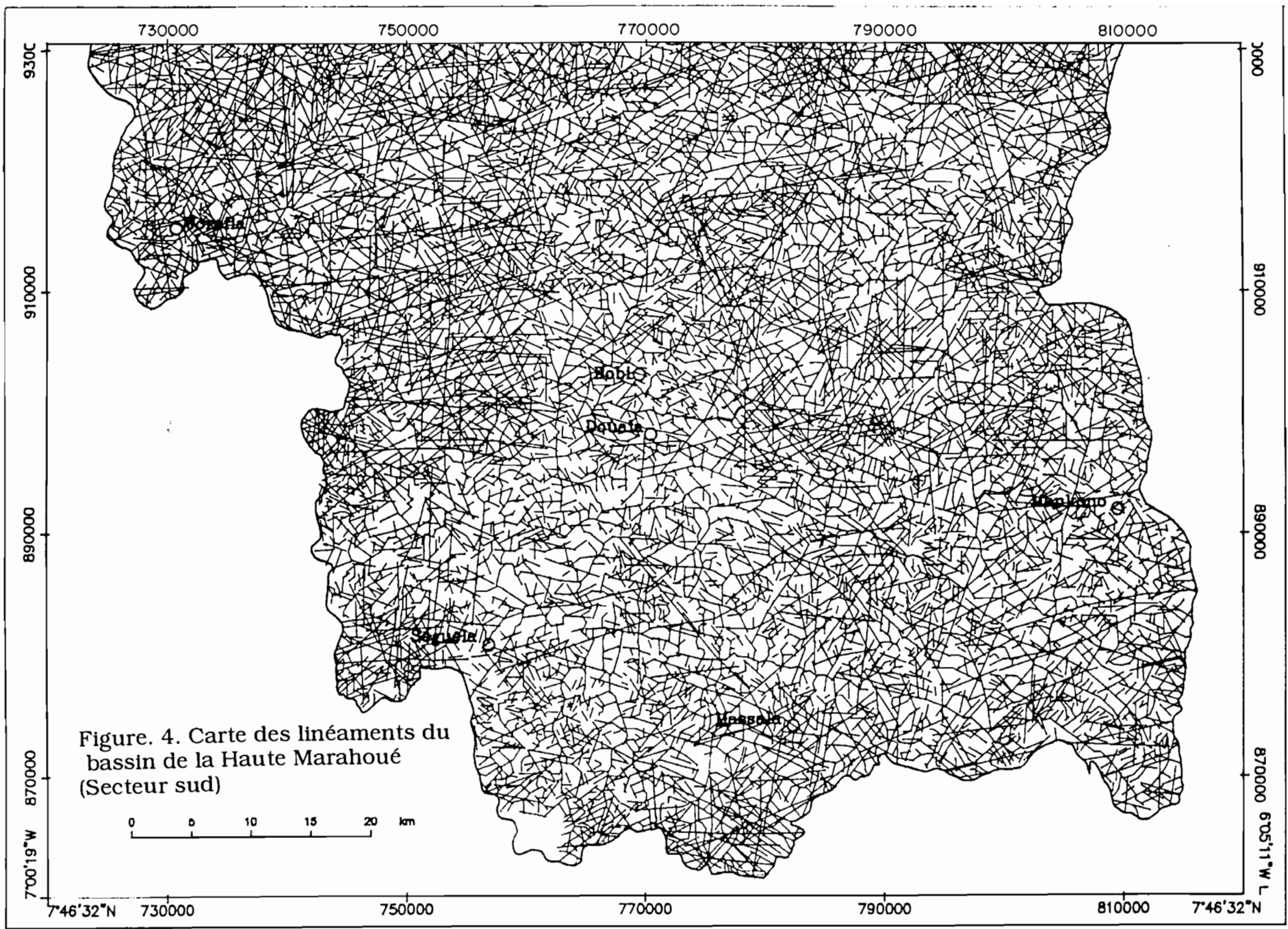


Figure 3 Bloc-diagramme établi par intégration des courbes altimétriques du bassin de la Haute Marahoué au SIHRS



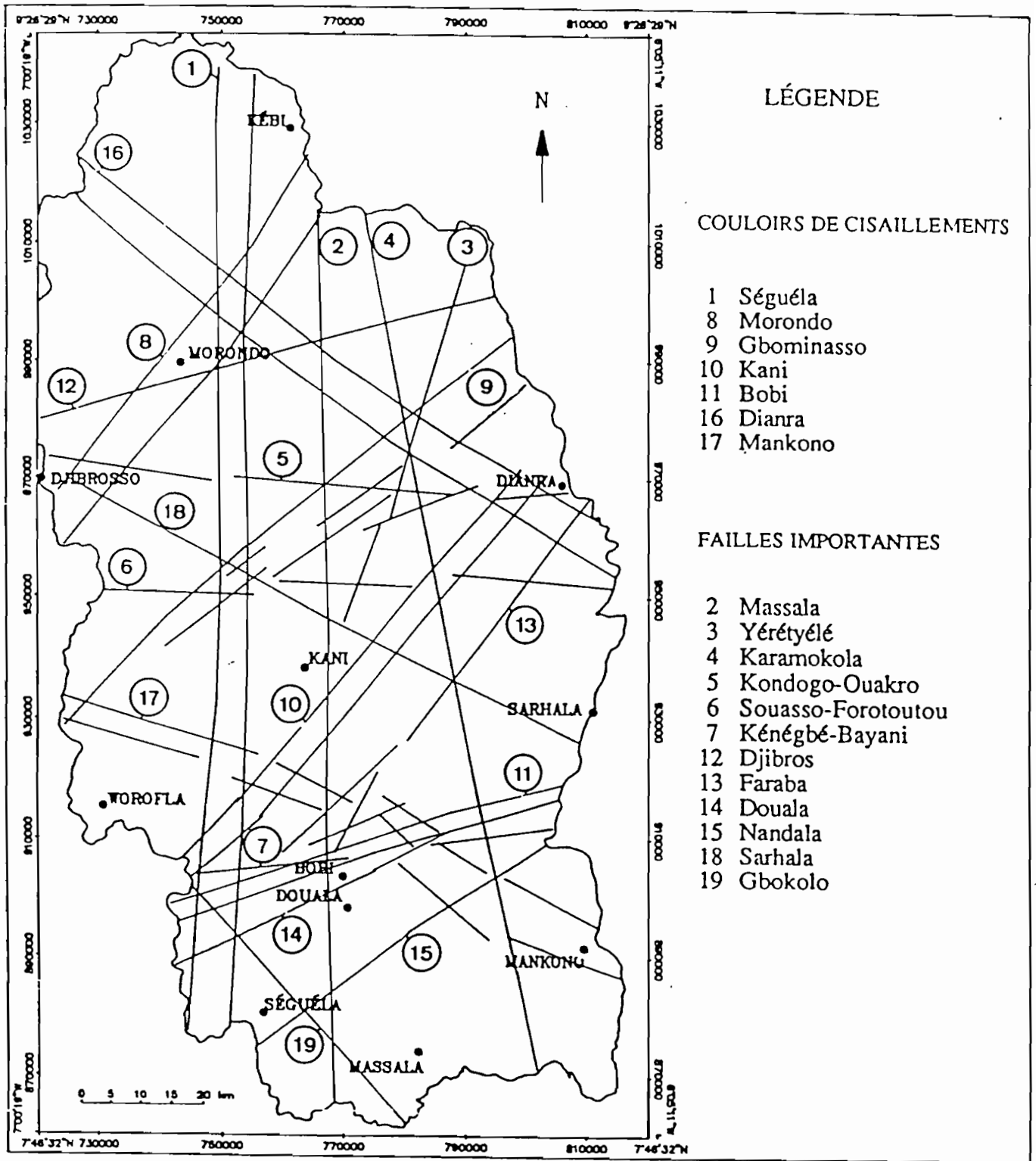


Figure 5 .Carte des accidents majeurs du bassin versant de la Haute Marahoué, établie à l'aide des images Landsat TM réhaussées , interprétées à l'intérieur du SIHRS

N120-160° caractérise les couloirs de Dianra (N123°) et de Mankono (N120°) et les accidents de Gbokolo (N140°) et de Sarhala (N120°).

D'une façon générale, ces accidents s'intègrent parfaitement à la tectonique cassante de la Côte d'Ivoire. Les couloirs de cisaillement correspondent à des directions majeures dans le socle africain si bien que les traces de certains, comme le couloir de Séguéla, sont visibles depuis l'Océan (au Sud) jusqu'au Mali (au Nord) (**Pifugre 6**). Des manifestations périodiques des tremblements de terre d'importance encore mineure, et liés à ces accidents, sont souvent enregistrées en Côte d'Ivoire et en Afrique de l'Ouest; à l'exception du séisme de Gaoual en Guinée en décembre 1983, d'amplitude 6,4, qui a été largement ressenti dans le Golfe de Guinée. Le foyer sismique de ce tremblement de terre est situé sur un faisceau d'accidents NW-SE qui se prolonge en Côte d'Ivoire par le couloir de cisaillement de Dianra-Niakaramadougou. Les traces du couloir de Dianra-Niakaramadougou sont visibles depuis la Guinée jusqu'au Ghana dans les monts Akuapem qui constituent également une zone à haut risque de sismicité au Ghana. De même, les traces du couloir de Séguéla, sont reconnaissables sur plus de 1500 km, depuis l'Océan Atlantique, jusqu'au Burkina Faso en passant par la région de Sikasso au Mali.

Dans le secteur d'étude, tous les bras de cours d'eau coulent dans une fracture affectant le granite, ce qui donne une assez bonne similitude entre le réseau hydrographique et celui des linéaments satellitaires (**Figure 7**). Ces résultats sont conformes à l'état des connaissances acquises en Côte d'Ivoire et d'une manière générale en Afrique de l'Ouest, sur le rôle joué par les accidents dans le guidage des cours d'eau. En effet, les principaux fleuves s'installent toujours, tout au moins en grande partie, dans les axes dominants de drainage des eaux superficielles que sont les grandes fractures dans le socle.

3-4 PERMÉABILITÉS INDUITES PAR LES FRACTURES ET COULOIRS SOUTERRAINS D'ÉCOULEMENT

À l'intérieur du SIHRS, les variations des valeurs de perméabilités induites maximales dans les 103 cercles du bassin sont illustrées dans la **figure 8**. La présence d'un axe principal, à fortes valeurs de perméabilités, d'orientation sensiblement Nord-Sud et de quatre autres axes secondaires associés, est reconnaissable dans cette Figure. L'axe principal débute dans la pointe Nord-Est du bassin, dans le cercle de Kanyéné (D15) qui présente la valeur de perméabilité la plus forte (**$K_1 = 0,8722 \text{ m/s}$**). Il passe ensuite par les cercles de Filamana (C14), Sétoumo (C11), F9, F8, G7, G6 et E5, Kouroufla (F4), Tonhoulé (F3) et à l'exutoire (G2). A l'aval, la seconde valeur de perméabilité la plus forte, après celle de Kanyéné, est enregistrée dans le cercle F3 à Tonhoulé (**$K_1 = 0,8215 \text{ m/s}$**).

Le deuxième et le troisième axe de fortes perméabilités induites s'observent à l'Ouest du bassin, entre Worofla et Souasso. L'axe 2 est orienté E-W et limité par les cercles de Bangana, Gbéma et Kassatou (au Nord). Il recoupe le premier à Niéou et se caractérise par des valeurs de K_1 comprises entre **0,2327 et 0,3091 m/s**. Le troisième axe, d'orientation NW-SE, part de Karaba-Souasso pour rejoindre les deux premiers à Niéou après Katogbo et Tabakoroni (**$0,2284 < K_1 < 0,3007 \text{ m/s}$**).

Enfin, le dernier axe de fortes perméabilités induites est assez réduit et limité aux cercles de Dianra village, sur la bordure orientale du bassin. Il est orienté E-W et présente des valeurs de K_1 de 0,2712 à 0,3183 m/s. Entre ces différents axes de fortes valeurs, prennent place des îlots de perméabilités assez faibles:

- **au Nord-Ouest**: dans le secteur s'étendant de Djibrossa à Tra, en passant par Siréba ; où K_1 varie de 0,1261 à 0,1952 m/s.
- **au Sud**: Tégouéla, Dyoroté, Kouassikro et Touloukoro (**$0,1687 < K_1 < 0,1944 \text{ m/s}$**)
- **à l'Est**: sur toute la bordure orientale entre l'exutoire et Dianra; à Tyébé et à Kébi (**$0,1559 < K_1 < 0,1789 \text{ m/s}$**).

Il ressort de ces observations que la bordure orientale du bassin est moins dotée en fractures ouvertes que la bordure occidentale. L'étude des couloirs de circulation des eaux souterraines a été réalisée en superposant, dans un même plan, à l'intérieur du système d'information hydrogéologique à référence spatiale (SIHRS), la carte des variations spatiales des perméabilités induites et le réseau hydrogéographique. Ce travail fait ressortir une parfaite concordance entre le tracé des cours d'eau en surface et celui des différents axes de fortes perméabilités. Les deux fortes valeurs de perméabilités:

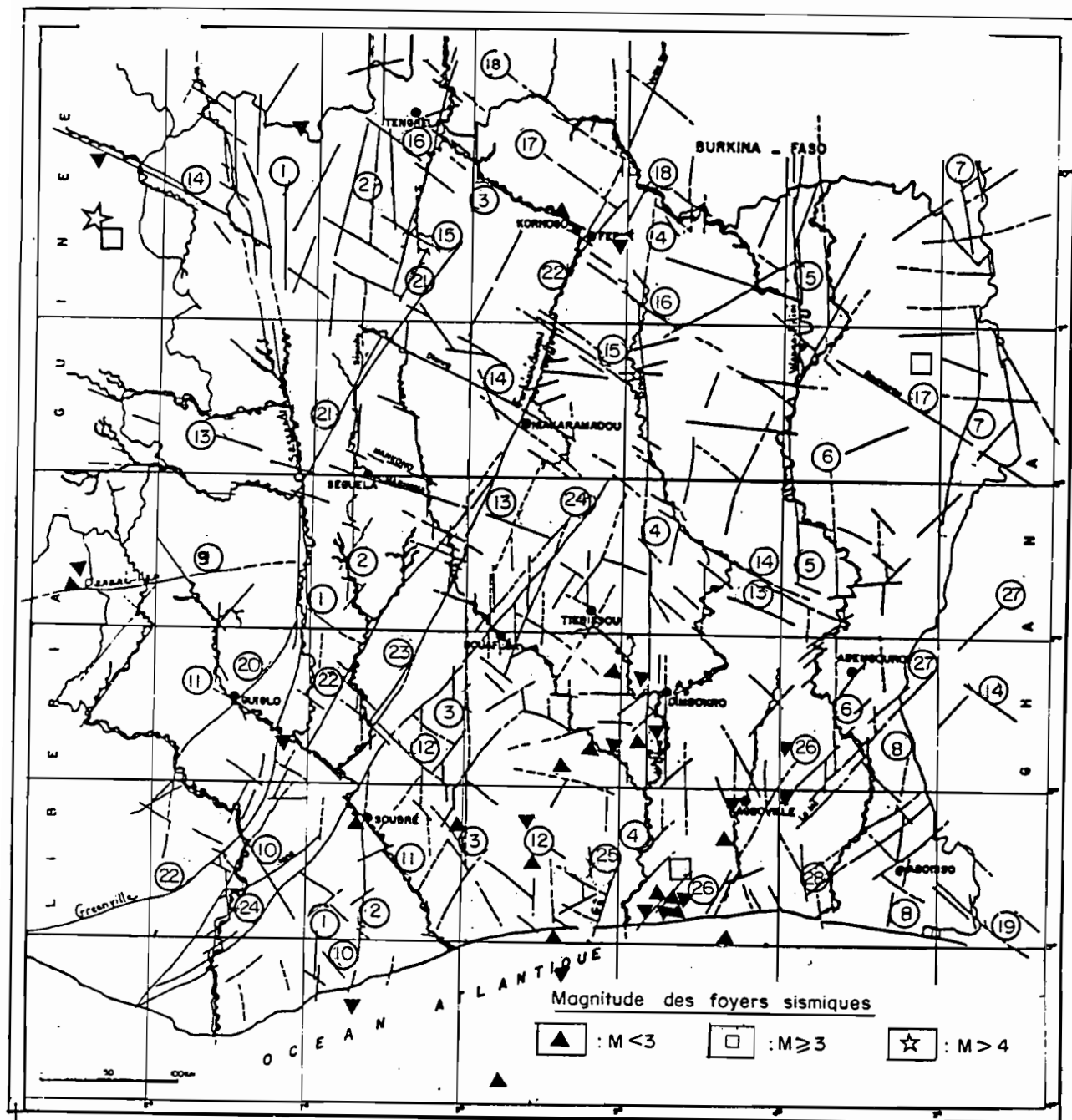
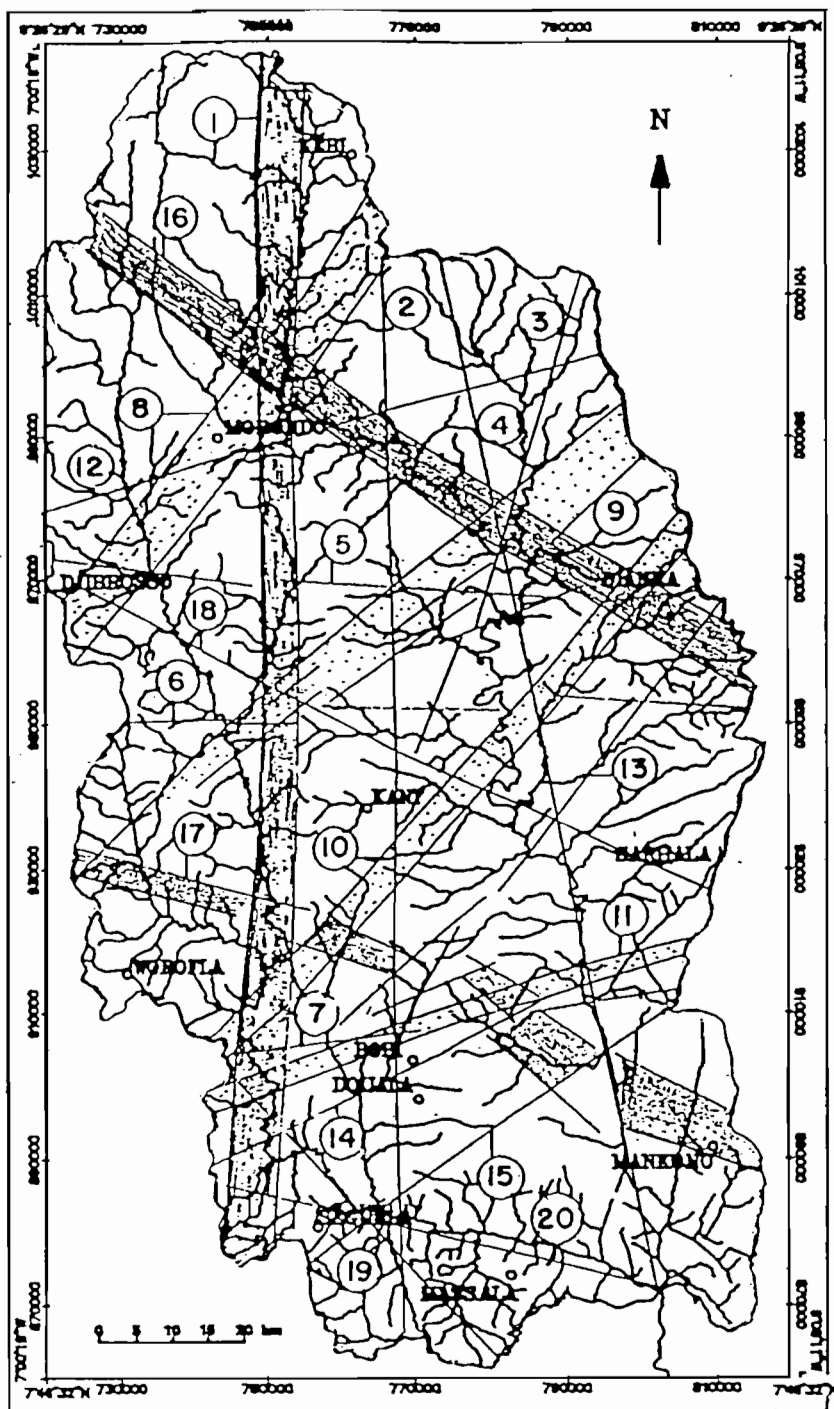


Figure 6 Relations entre réseau hydrographique, accidents majeurs et principaux foyers sismiques en Côte d'Ivoire

Failles Nord-Sud (1: Sassandra; 2: Séguéla; 3: Gagnoa; 4: Ndouci-Dimbokro-Brobo; 5: Wango-Fitini; 6: Abengourou; 7: Bouna; 8: Ayamé); **Failles Est-Ouest** (9: Danané-Man); **Failles NW-SE** (10: Taï; 11: Soubré; 12: Guibéroua; 13: Marhana; 14: Dianra-Niakaramadougou; 15: Boundiali; 16: Tengréla-Ferkessédougou; 17: Mt Boutourou; 18: Ferké; 19: Aboisso); **Failles NE-SW** (20: Guiglo; 21: Morondo; 22-23: Greenville- Niakaramadougou-Ferkessédougou; 24: Bouaflé; 25: Gô; 26: Agboville; 27: La Mé; 28: La Bia).



Couloirs de cisaillement

- 1-Séguéla
- 8-Morondo
- 9-Gbominasso
- 10-Kani
- 11-Bobi
- 16-Dianra
- 17-Mankono

Failles importantes

- 2- Massala
- 3- Yérétyélé
- 4- Karamokola
- 5- Kondogo-Ouakro
- 6- Souasso-Forotoutou
- 7- Kénégbé-Bayani
- 12-Djibros
- 13-Faraba
- 14-Douala
- 15-Nandaala
- 18-Sarhala
- 19- Gbokolo
- 20- Marhana

Fig. 7 - Relations entre réseau hydrographique et réseaux d'accidents majeurs affectant le socle cristallin du bassin de la Haute Marahoué (Relationship between the hydrographic network and the networks of major faults affecting the crystalline bedrock of the Upper Marahoué Basin)

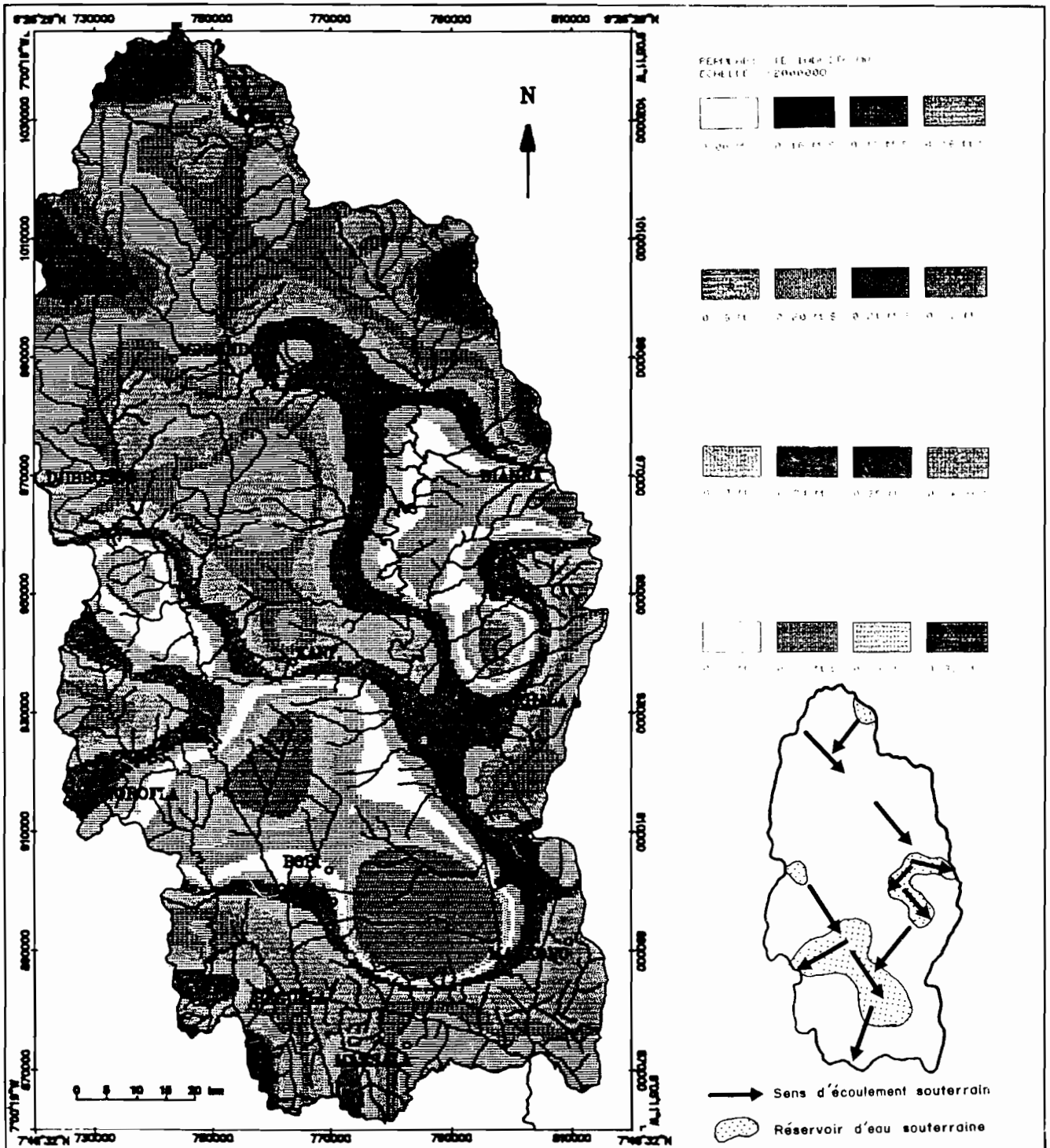


Figure 8 . Couloir souterrain de circulation d'eau et axes préférentiels d'alimentation des nappes déterminés par interprétation des valeurs de perméabilités induites par les fractures à l'intérieur du SIHRS

0,8722 et 0,8215 m/s correspondent l'une, à la source de la Marahoué, située à Kanyéné; et, l'autre, au bassin souterrain d'accumulation des eaux, situé à Tonhoulé, à proximité de l'exutoire du fleuve.

La Marahoué se superpose presque exactement à l'axe principal Nord-Sud, de fortes perméabilités, signalé plus haut. Quant au Yarani, son affluent, il coule essentiellement dans les axes de fortes perméabilités de la bordure occidentale du bassin. Au contraire, les domaines de faibles perméabilités induites, correspondent respectivement à des chaînes d'inselbergs du Nord-Ouest, du Sud et à la bordure Nord-Est du bassin. Ainsi, entre Morondo et Dianra village, la modification observable dans le tracé de la Marahoué qui passe du NS à NW-SE, caractérise de façon assez nette la déviation subie par l'axe principal de fortes perméabilités induites dans ce secteur, qui n'est qu'une conséquence de la manifestation du grand couloir de cisaillement NW-SE de Dianra-Niakaramadougou, décrit plus haut. Les quatre axes de fortes perméabilités induites constituent donc des zones préférentielles d'alimentation en eaux souterraines du bassin. Par conséquent, ces résultats confirment clairement les résultats obtenus plus haut et selon lesquels:

- il existerait une étroite relation entre les écoulements superficiels et souterrains; en particulier le long des principaux axes de drainage que constituent les mégafactures dans le bassin;
- la bordure occidentale du bassin est plus riche en fractures ouvertes qui favorisent les écoulements souterrains plus que la bordure orientale.

3-5 POSITIONNEMENT, PRODUCTIVITE ET GESTION DES FORAGES

Si l'on tient compte des critères d'implantation des forages dans le socle qui sont: être dans le croisement de fractures, les plus longues, les plus nettes et si possible les plus nombreuses; être en un point topographiquement bas; être en aval d'un bassin versant le plus large possible et être à proximité d'un marigot permanent, on doit admettre que chaque forage réalisé dans le socle est positionné par rapport à au moins un accident appartenant à une direction tectonique déterminée. Par conséquent, l'étude des relations entre forages et fractures peut s'avérer intéressante pour expliquer le rôle hydraulique de certaines directions d'accidents.

La carte du relevé détaillé des linéaments, initialement réalisée dans l'environnement EASIFACE (PCI inc.), a été transférée dans le SHIRS où l'on a produit les surfaces d'interpolation de la densité des linéaments (nombre et longueur) et du nombre d'intersections entre les linéaments sur une grille d'échantillonnage de 4 x 4 km. Le SHIRS a servi à classer les fractures selon quatre directions principales (**Figures 9 et 10**): N-S, NE-SO, E-O et NO-SE. Par superposition de la base de données sur les forages à la carte des linéaments, on a mesuré la distance séparant chacun des 103 forages de la fracture la plus proche dans chacune des quatre directions précitées (**Tableau 1**).

Le calcul des pourcentages d'ouvrages liés à chaque direction tectonique, au moment de l'implantation des ouvrages, permet de classer les accidents en fonction de leur influence dans le positionnement des forages dans le bassin. On constate que les pourcentages de forages liés aux accidents sont de 37; 27 ; 23 et 18 % pour les directions D2, D4, D3 et D1, ce qui correspondra à l'ordre d'importance des accidents dans l'implantation des forages : **NE-SO > NO-SE > E-O > N-S**. Les accidents NE-SO et NO-SE, qui s'associent aux directions éburnéennes et libériennes d'Afrique, sont les mieux visibles sur les photographies aériennes utilisées par les foreurs. En effet, pour chaque direction tectonique, quand on calcule les pourcentages des forages captant directement ces fractures on obtient 9, 8, 7 et 4 % respectivement pour les accidents de directions NO-SE, NE-SO, E-O et N-S, soit au total, pour les quatre directions, 27 % des ouvrages situés sur les accidents. Au contraire, les fractures N-S sont toujours négligées par les foreurs au moment des travaux d'implantation des forages soit parce qu'elles sont moins visibles en photographies aériennes, ou parce qu'elles ne sont pas productrices. Or, il reste à savoir si les autres fractures (NW-SE et NE-SW) les plus fréquemment visées par les foreurs ivoiriens sont, de ce fait, les plus productrices.

Pour étudier l'indice de productivité des fractures, on reporte chaque direction de fractures et les distances d'éloignement des forages associées sur les axes des coordonnées. On obtient ainsi des diagrammes de dispersion de la position des forages par rapport aux couples d'orientations de linéaments: D1/D2, D2/D3, D3/D4 et D1/D4. Ces diagrammes permettent de visualiser les forages implantés à proximité et au croisement d'accidents d'orientations définies. La "croix de survie" est construite en regroupant les quatre diagrammes sur un même graphe (**Figure 11**). Elle présente en son centre les

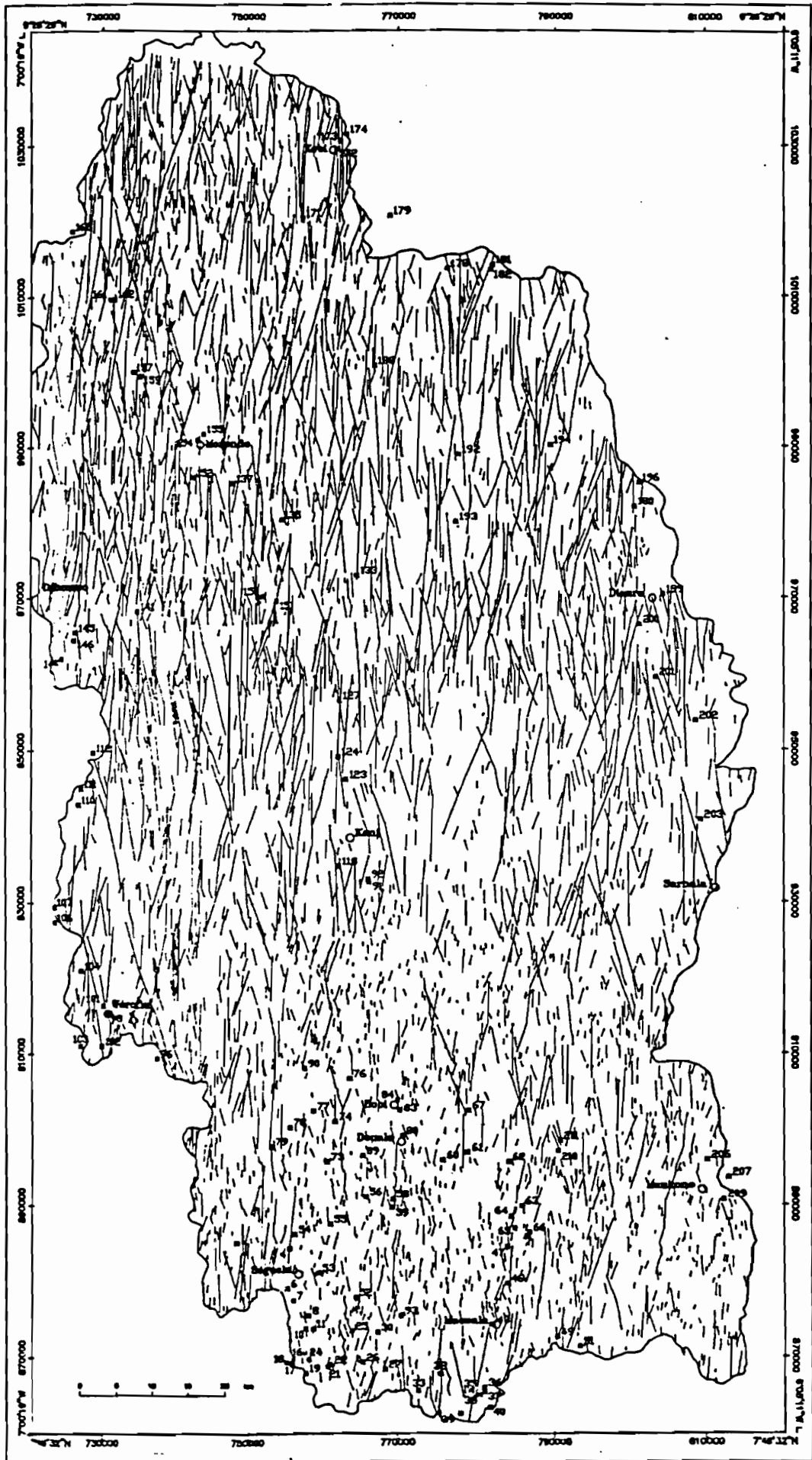


Figure 9 .Superposition dans un même plan ,à l'intérieur du SIHRS, des réseaux de fractures Nord-Sud et de la carte de localisation des forages du bassin de la Haute Marahoué

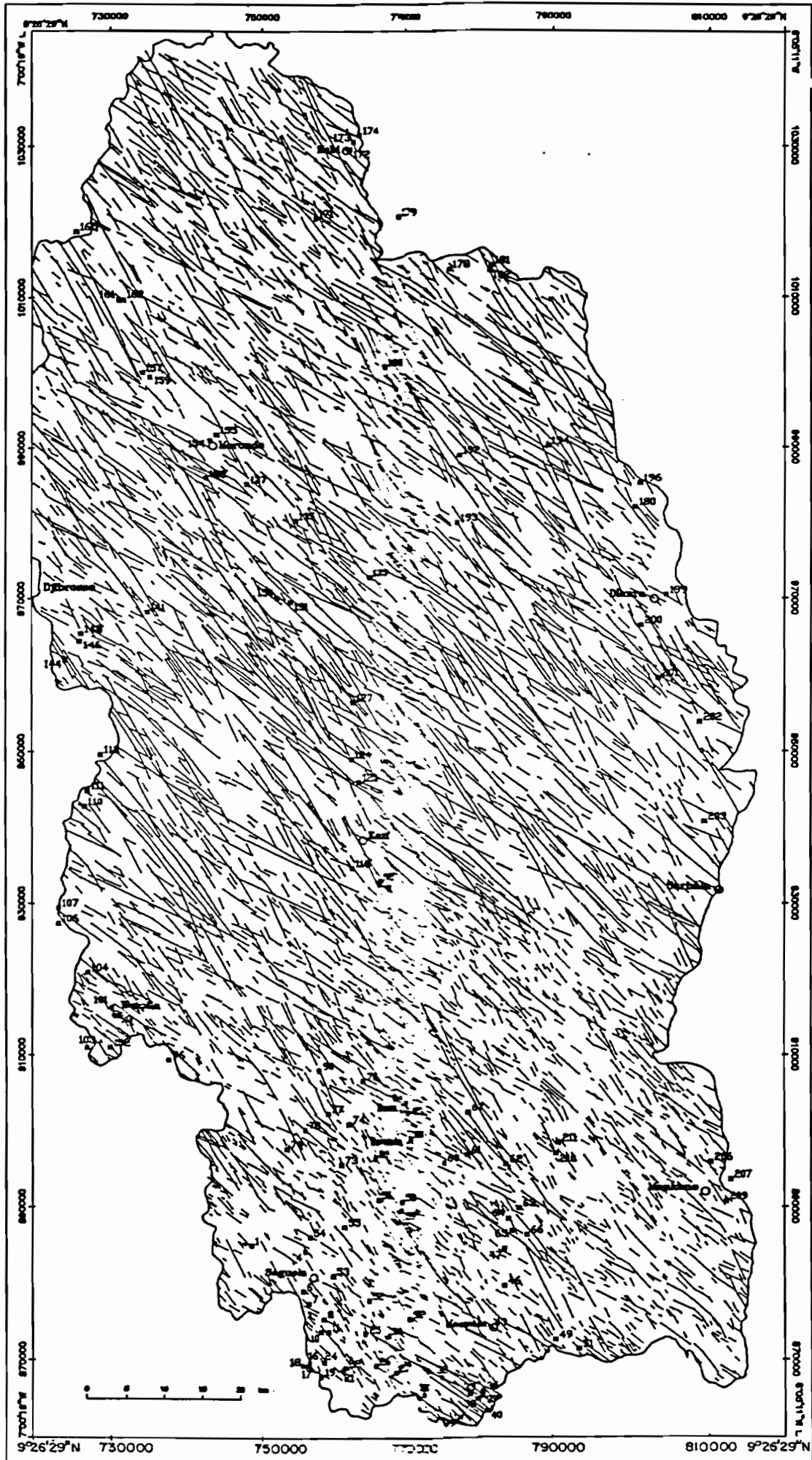


Figure 10. Superposition dans un même plan à l'intérieur du SIHRS des réseaux de fractures

Tableau 1 Distances d'éloignement des forages par rapport aux quatre principales directions de fractures dans le bassin de la Haute Marahoué

1	Localité	NDST	D1(N-S)	D2(NE-SW)	D3(E-W)	D4(NW-SE)
2	SIKASSO	1	0,684	0,36	1,061	0,272
3	BENA	4	0	0,381	0,169	0,294
4	SOKOURALA	6	2,697	1,646	0,366	0,205
5	KAMANA	7	2,428	0,323	0,763	0,38
6	GBALO	8	1,042	0,144	0,509	0,129
7	GBOHOU	10	0,283	0,084	0,115	0,659
8	DIARABALA	11	0,978	0,086	0,018	0,56
9	SOBA	16	1,277	0,691	0,511	0,085
10	SAGOUASSO	19	2,538	0,64	1,132	1,014
11	TEGUELA	21	0,374	0,161	0,065	0,091
12	TEGUELA	22	0,095	0,138	0	0,481
13	TEGUELA	23	0,268	0	0,164	0,329
14	LENGUEKRO	24	0,514	0,215	0	0,499
15	GBONA	25	0	0,297	0	0,321
16	KENEGBE	26	0,997	0,227	0,045	0,492
17	SENA	27	0,158	0	0	0,149
18	FLALA	30	1,19	0,579	0,372	0,498
19	DJIGUILA	32	0,126	0,076	0,595	0
20	SAMINA	33	0,086	0,159	0,193	0,608
21	TYEMASSOBA	36	1,421	1,081	0,231	0,231
22	TYEMASSOBA	37	1,349	0,499	0,094	0,109
23	BANHANA	38	1,466	1,81	0,193	0,129
24	DYENFE	39	0,178	1,347	0,86	0,073
25	MASSALA	43	0,449	0,118	0,53	0,256
26	KOUROUKORO	46	0,066	0,24	0,45	1,305
27	DJENIGBE	47	0,102	0,658	0,279	0,186
28	BOUILLA	49	0,253	0,366	0,579	0,651
29	MARHANA	51	0,47	0,235	1,093	0,13
30	BEKORO	52	0,435	0	0,677	0,155
31	FIZANGORO	53	1,013	1,013	0	0,897
32	GENGORO	54	0,565	0,863	0,436	0,166
33	MAMOUROULA	55	0,292	1,07	0	0,702
34	SUINLA	56	1,042	0,588	0,298	0,333
35	SIANA	58	0,122	0,179	0,126	0
36	SUINLA	59	0,776	0	0,327	0,342
37	SOMANA	60	0,983	0,238	0,269	0,688
38	SANDALA	61	0,05	0,092	0,112	0,107
39	NANDALA	62	0,178	0,518	0,786	0,31
40	TONHOULE	63	0,33	0,159	0,091	0,104
41	GBALO-M	65	0,705	0,055	0,426	0,381
42	SOULOUMANA	66	0,186	0	0,689	0,061
43	LINGUEKORO	67	0,461	0,082	0,457	0
44	OUSSOUGOULA	73	0	0,193	0,666	0,106
45	FORONA	74	1,125	0,183	0,373	0,877
46	DIARABANA	76	1,961	0,09	0,381	0,58
47	MASSALA-ASS	77	0,71	0,112	0,431	0,164
48	KENEGBE	78	0,641	0,346	0,978	0,076
49	MANGBARAN	79	0,356	0,056	0,167	0,126
50	DOUALA	80	0,919	0,228	0,076	0,408
51	BOBI	84	0,203	0,698	0,024	0,223
52	SOKOURALA-E	89	0,556	0,604	0,576	0,458
53	NIONGORO	90	0,412	0,092	0,442	0,484
54	TABAKORONI	92	1,15	0	0,201	0,126
55	DONA	93	0,288	0,566	0,466	0,254
56	WOROFILA	98	0,199	0,38	0,07	0,772
57	WOROFILA	101	0,705	0,326	0,27	0,464
58	BOGOBA	102	0,1	0,258	0,304	0,171
59	MASSALA-W	104	0,15	0,186	0,326	0
60	KOGNIMASSO	107	1,332	0,264	0,942	0,171

Tableau 1 (suite)

61	GBEMASSO	110	1,541	0,05	0,213	0,172
62	SOJASSO	112	0,212	0,703	0,65	0
63	KABELEKORO	118	0,231	1,088	0,097	0,95
64	SOBA(KANI)	124	0,148	0,564	0	0,346
65	MASSASSO	127	0,186	0,186	0,67	0,102
66	BAFRIETOU	133	0,092	0,114	0,158	0,162
67	LIPARA	135	0,904	0,008	0,074	0,022
68	FINGOLO	137	0,232	0,428	0,262	0
69	MADJI	141	0,014	0,203	0	0,185
70	BOROBADOUGC	144	0,662	0,139	0,067	0,055
71	DIOROFA	145	0,362	0,03	0,409	1,041
72	DIOROFA	146	0,324	0,207	0,204	1,27
73	BATOGO	150	0,171	0,75	0,157	0,172
74	BATOGO	151	0,368	0,233	0,105	0,069
75	KORODJIMONO	152	0,299	0,369	0,236	0,155
76	MORONDO	154	0,17	0,033	0,121	0,175
77	MORONDO	155	0,336	0,187	0,175	0,383
78	NOTOU-E	157	0,205	0,403	0,367	0,893
79	NOTOU-W	159	0,116	0,336	0	0,065
80	GBONGAHA	161	0,106	0,198	0,195	0,111
81	GBONGAHA	162	0,076	0,125	0,032	0,337
82	FALIGAHA	171	0,12	0,052	0,178	0,348
83	KEBI	172	0,205	0,003	0,13	0,181
84	KEBI	174	0,156	0,026	0,165	0,607
85	KATIALI-K	178	0,587	0,078	0,716	0,058
86	KATIALI-D	180	0,478	0,179	0,437	0,482
87	SISSEHE	181	0,035	0,212	0,187	0,525
88	SISSEHE	182	0,293	0,082	0,554	0,411
89	KOROTOU	188	0,29	0,017	0,26	0,449
90	LOKOLA	192	1,08	0,247	0,131	0
91	NIONDJE	193	0,395	0,07	0,455	0
92	GBOMINASSO	194	0,219	0,243	0,574	0,568
93	SETIGUE	196	0,268	0,967	1,027	0,285
94	DIANRA-V	199	0,076	0,179	0,227	0,108
95	LESSOUMASSC	200	0,185	0	0,098	0,126
96	FARABA	201	0,233	0,179	0,915	0,174
97	MAHAN	202	0,304	0,032	2,173	0
98	BIETOU-CARR	203	0,07	0,352	1,379	0,366
99	MADINA	204	0,402	0	0,214	0,677
100	KARAMOKOLA	206	0,933	0,133	0,754	0,504
101	KOGOLO-M	209	0,478	1,079	0,111	0,37
102	RANCH-1	210	0,13	0,276	0,054	0,058
103	RANCH-2	211	0,108	0,153	0,211	0,073

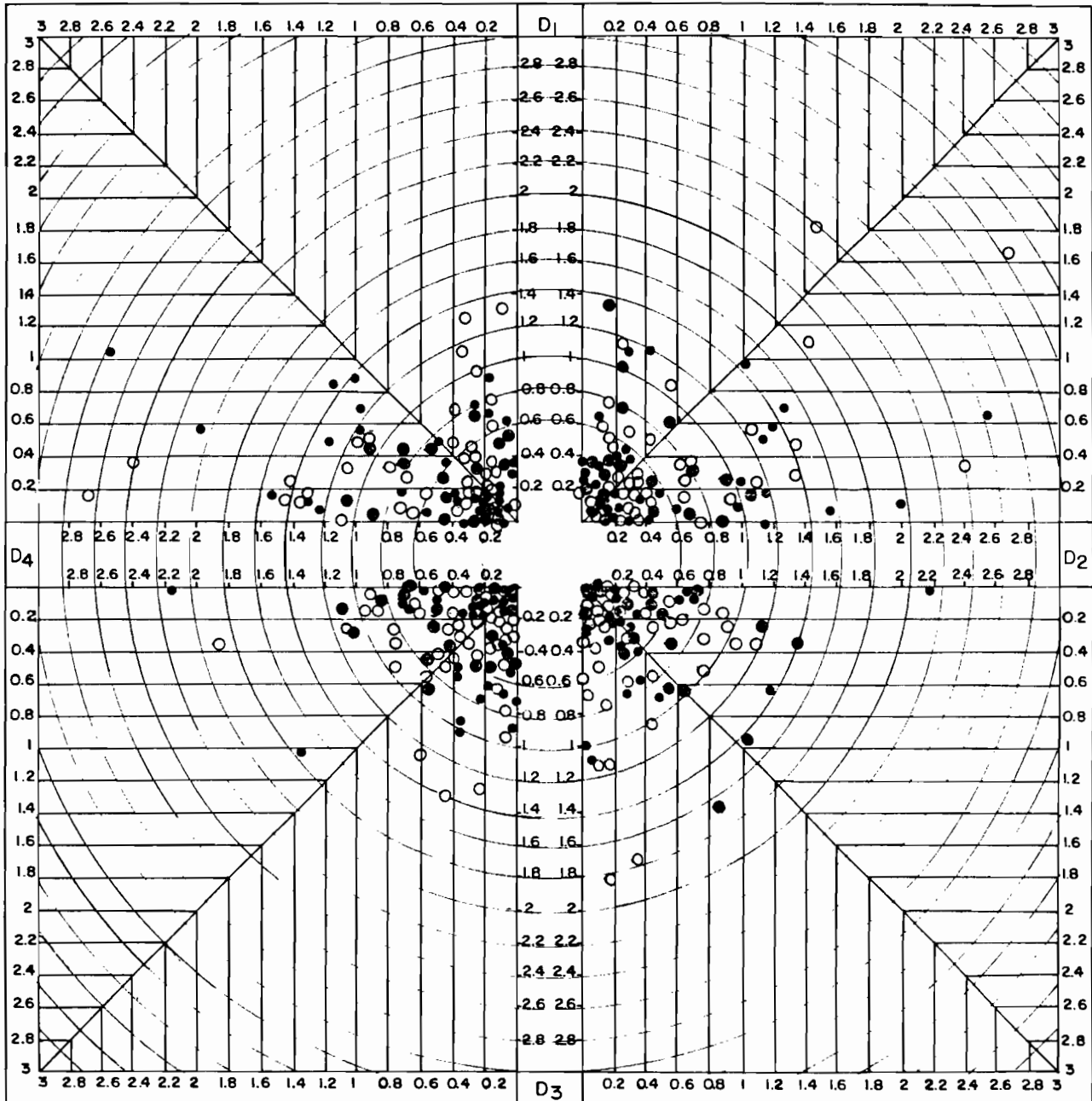


Figure 11 "Croix de survie des forages" en milieu de socle fissuré, réalisée à l'intérieur du SIHRS, grâce à l'intégration des distances d'éloignement des forages par rapport aux fractures dans le bassin de la Haute Marahoué

LÉGENDE

CLASSES DE DEBITS

- $0 < Q < 1 \text{ m}^3 / \text{h}$: très faible débit
- $1 < Q < 3 \text{ m}^3 / \text{h}$: faible débit
- $3 < Q < 6 \text{ m}^3 / \text{h}$: débit moyen
- $Q > 6 \text{ m}^3 / \text{h}$: gros débit

DIRECTIONS D'ACCIDENTS

- D₁ : N - S
- D₂ : NE - SW
- D₃ : E - W
- D₄ : NW - SE

forages pour lesquels la distance d'éloignement par rapport aux fractures est nulle. Cette zone symbolise la productivité, la pérennité et donc la survie des forages. A l'opposé, les quatre sommets les plus éloignés de l'origine des axes représentent les zones de négativité et de tarissement irréversible pour les ouvrages. L'étude de cette croix a montré que le couple D1-D4 est celui qui présente le plus haut profil de productivité. En effet, tous les forages à débit supérieur à 3 m³/h se concentrent dans un rayon de moins d'un kilomètre à partir de l'origine des axes. Au contraire, le couple D2-D3 se caractérise par une très grande dispersion des forages à gros débit dans le diagramme. Ce résultat montre clairement que ce sont plutôt les accidents NW-SE et N-S qui, du point de vue de la productivité, sont les plus importants comparativement à ceux d'orientation NE-SW et E-W. En effet, quand on étudie la répartition des gros débits suivant les quatre directions on constate que (**Tableau 2**):

- pour les débits variant de 6 à 14 m³/h/m: 63 % sont liés aux fractures NW-SE et 25 % à N-S contre 12 % pour E-W et 0 % pour NE-SW;
- l'influence des accidents NE-SW n'est remarquable que sur les débits moyens: 3 < QOP < 6 m³/h/m, en effet, dans ce cas, 43 % des ouvrages à débits moyens sont liés aux fractures D2 (NE-SW); 21 % aux accidents D4 et D1, et 14 % aux accidents D3.

La distribution des ouvrages, à l'intérieur des classes d'éloignement de 200 m en 200 m par rapport aux fractures, donne une courbe d'équation générale (**Figure 12**):

$$Y = 27 + 1089,79 X - 9339,6X^2 + 29607,37 X^3 - 45123,03X^4 + 33164,23X^5 - 9414,83 X^6$$

C'est un polynôme de degré 6 et de la forme générale:

$$Y = A_0 + A_1X - A_2X^2 + A_3X^3 - A_4X^4 + A_5X^5 - A_6X^6$$

soit:

$$Y = A_0 + \sum (A_i X^i) - \sum (A_p X^p)$$

où : i = indice ou exposant impair non nul (1, 3, 5); et p = indice ou exposant pair non nul (2, 4, 6)

Graphiquement, la courbe est divisible en trois parties :

- **une droite des implantations idéales d'abscisses 0 m**, localisée sur l'axe des ordonnées, entre 0 et 27% et qui renseigne sur le nombre de forages captant directement les fractures et donc sur les techniques utilisées par les foreurs;
- **un pic** entre les abscisses 0 et 200 m, correspondant à des ordonnées qui débutent à 27 et culminent à 68% et qui montre qu'à défaut de capter directement les fractures, compte tenu des difficultés liées à la netteté des photographies aériennes et des imprécisions inhérentes aux cartes topographiques, le maximum d'ouvrages est distribué dans un couloir de 200 m autour des accidents;
- enfin, **une courbe de décroissance** rapide entre 200 et 1100 m, limite à partir de laquelle les pourcentages des ouvrages les plus éloignés des fractures tombent généralement à 0.

CONCLUSION

Une interprétation géologique des images Landsat TM et des données du champ magnétique total à l'intérieur du système d'information à référence spatiale, a permis d'établir les cartes des principales unités géologiques et des axes structuraux majeurs du bassin versant de la Marahoué. Les linéaments régionaux épousent, de façon relativement équitable, les orientations N170-190°, N80-100°, N30-60° et N120-160°. A l'intérieur du SIHRS, les variations spatiales des valeurs de ces perméabilités induites montrent que: l'alimentation des aquifères, qui se fait à travers les axes de drainage bien développés, est plus intense sur la bordure Ouest que dans la partie orientale du bassin; et, les accidents majeurs logent les principaux cours d'eau de la région; en particulier, le tracé de la Marahoué se superpose au principal axe de drainage des eaux souterraines d'orientation Nord-Sud; elle prend sa source dans une nappe importante

Tableau 2 .Relations entre gros débits, distances minimales d'éloignement des forages par rapport aux fractures et directions d'accidents associés dans le bassin de la Haute Marahoué

1	Localité	NDST	QOP(m3/h)	DEF.mini(m)	Direction
2	Téguéla	22	6	0	D3
3	Dyénfé	39	7,884	0,073	D4
4	Linguékoro	67	7,812	0	D4
5	Sokourala	89	6,804	0,458	D4
6	Souasso	112	6,011	0	D4
7	Fingolo	137	12,204	0	D4
8	Sétigué	196	14,004	0,264	D1
9	Dianra-Villag	199	7,488	0,076	D1
10	Gbalo	8	3,1	0,129	D4
11	Séna	27	5,85	0	D2
12	Massala	43	3,52	0,118	D2
13	Bouilla	49	5,85	0,253	D1
14	Marhana	51	3,2	0,13	D4
15	Siana	58	3,1	0	D4
16	Gbalo/M	65	3,1	0,055	D2
17	Souloumana	66	4,392	0	D2
18	Douala	80	3,398	0,076	D3
19	Worofla	101	3	0,27	D3
20	Lipara	135	3,996	0,008	D2
21	Sisséhé	182	3,996	0,035	D1
22	Biétou/carref	203	3,55	0,07	D1
23	Ranch1	210	5,4	0,054	D2

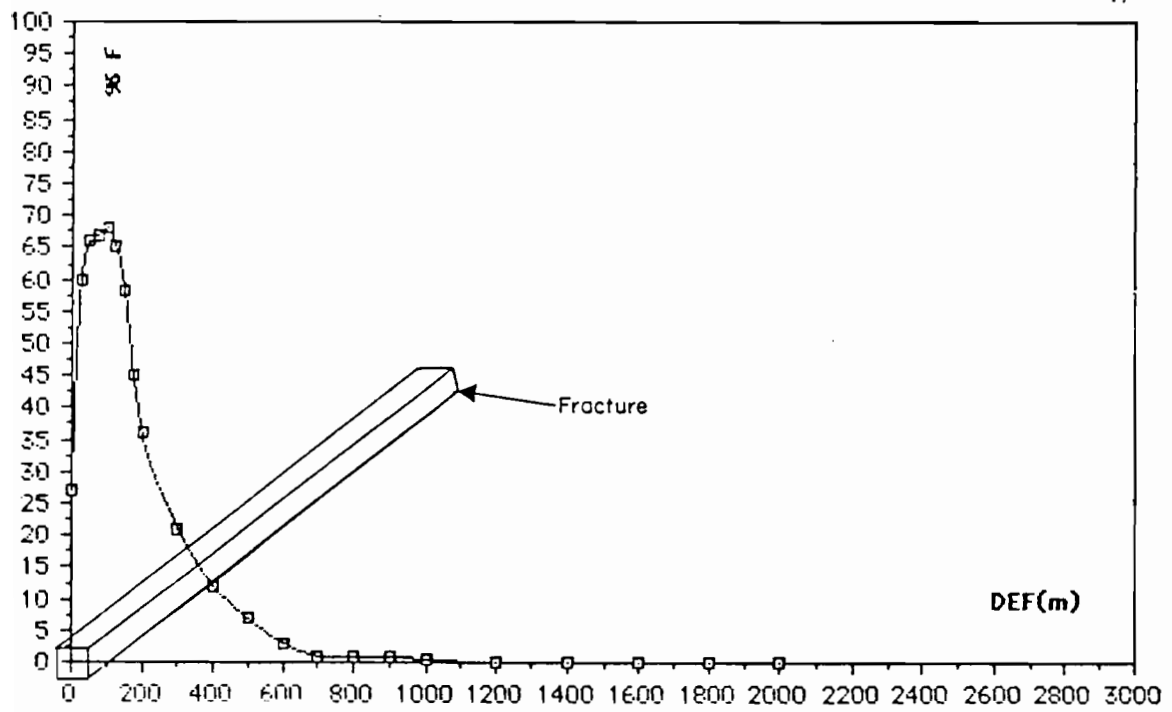


Figure 12 . Courbe de décroissance des pourcentages de forages en fonction des distances d'éloignement par rapport aux fractures dans le bassin vde la Haute Marahoué

où K_{max} présente la plus forte valeur (0,8722 m/s) et aboutit à un bassin d'accumulation situé à Tonhoulé non loin de l'exutoire; où la deuxième plus grande valeur de K_{max} atteint 0,8215 m/s).

L'interprétation des phénomènes de fracturations et des profils d'altération dans un bloc diagramme confectionné à l'aide de la télédétection numérique et d'un système d'information à référence spatiale, montre que l'épaisseur du front d'altération est assez faible dans le secteur Nord (10 à 20 m); alors qu'à l'opposé, elle gagne en importance dans le Sud où elle avoisine les 70 m. L'évolution des débits optimums, des arrivées d'eau et des pourcentages des fractures en profondeur, tend à mettre en évidence, à partir de 90 à 100 m, l'existence d'une limite inférieure apparente des fractures ouvertes dans le socle; à condition que cela ne provienne d'une insuffisance en nombre des forages profonds dans la région.

L'utilisation simultanée des techniques de traitement numérique d'images satellitaires et d'un système d'information à référence spatiale a permis de rehausser les fractures affectants le socle cristallin du bassin de la haute Marahoué et de déterminer les distances séparant les forages en exploitation des fractures. Au total, 27% des ouvrages du bassin captent directement les fractures et 68% en sont proches à l'intérieur d'un couloir de 200 m au-delà duquel les pourcentages des forages diminuent considérablement et s'annulent à 1100 m. La direction d'accidents qui favorise davantage la circulation des eaux souterraines est la direction libérienne d'Afrique (NO-SE) qui est, de ce fait, la plus recherchée dans l'implantation des forages dans le socle. Elle intervient pour 42 à 62% des cas dans le guidage du choix des sites et influence, à elle seule, 63% des débits élevés ($6 < Q < 14 \text{ m}^3/\text{h}$). Les accidents N-S, avec 25% des débits élevés, occupent la seconde place parmi les plus productifs. Cependant, ils sont paradoxalement les plus négligés dans les travaux de foration: soit parce qu'ils sont les moins visibles en photographies aériennes ou parce que leur productivité a été jusqu'ici méconnue. A l'opposé, les directions NE-SO et E-O, les plus fréquemment visés par les captages, sont malheureusement les moins productives. Elles n'influencent que de 0 à 12% des débits élevés.

Enfin, l'exploitation des ressources du SIHRS a permis de mettre au point un moyen efficace de contrôle des programmes d'hydraulique villageoise, la "croix de survie" des forages en milieu de socle fissuré, pouvant intervenir dans les études de faisabilité des forages dans le socle.

BIBLIOGRAPHIE

Issar Arie and Dror Gilad (1982).

Groundwater flow systems in the arid crystalline province of Southern Sinai,
Hydrological Sciences Journal, Vol 27, No 3, pp. 309-325.

Odeyemi I.B., Malomo S. and Okunfarasin Y.A., (1985)

Remote sensing of rock fractures and ground water development success in parts
of South Western Nigeria
Natural resources forum, Vol. 9, No. 4, pp 311-315.

Savadogo Alain Nindaoua (1984)

Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta, Étude régionale du
bassin de la Sissili
Thèse de doctorat, Université scientifique et médicale de Grenoble, 351 p.

Savadogo Silminoaga (1982)

Contribution de la télédétection à l'étude de la fracturation. Application à
l'hydrogéologie du socle en milieu intertropical (Haute-Volta)
Thèse de doctorat, U.E.R. Sciences fondamentale et appliquées, Université
d'Orléans, 238 p.

Rheault M., Simard E., Garneau C. and Slaney V.R. (1991)

SAR Landsat TM-Geophysical data integration utility of value-added products in
geological exploration.
Canadian Journal of Remote Sensing, Vol 17, No 2, Avril 1991, pp.185-190.

BIÉMI, J. (1992)

Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire)
Thèse Dr d'Etat, Univ. Nat. de C.I., février 1992

Biémi J., Gwyn H., Deslande S. et Jourda J.P. (1991)

Géologie et réseaux de linéaments régionaux du bassin versant de la Marahoué, Côte d'Ivoire: Cartographie à l'aide des données Landsat TM et du champ magnétique total. 7ème congrès de l'AQT, Québec, 23 au 25 octobre, 1991.

Biémi J., Gwyn H., Deslande S. et Jourda J.P. (1991)

Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire): apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale.
7ème congrès de l'AQT, Québec, 23 au 25 octobre, 1991.

Fabre, R. (1985)

Les effets tectoniques des décrochements N-S sénextries dans les formations volcaniques birimiennes de la région du Yaouré, centre de la Côte d'Ivoire.
C.R. Acad. SC. Paris, t. 300, Série II, n° 19, 1985

Buckley D.K. and Zeil P. (1984)

The character of fractured rock aquifers in Eastern Botswana, Challenge in African Hydrology and Water Resources.
Proceedings of the Harare Symposium, July 1984, IAHS Publ no. 144, pp 25-36.

Bard, J.P. (1974)

Les grands accidents du craton Ouest-Africain en Côte d'Ivoire. Des décrochements post-éburnéens C.R. Acad. Sci., P 278, 2609-2611, Paris, 1974

Carlsson, A. et Olsson, T. (1980)

Caractéristiques de fracturation et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède
Bull BRGM, Section III, série n° 3, PP 215 à 233, 1980-81

Tagini, B. (1971)

Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire essai de géotechnique régionale
Thèse à la Faculté des sciences de l'Univ. de Lausanne (Suisse), Bulletin n°5 de la Direction Mines et géol. de Côte d'Ivoire, Publication SODEMI, Abidjan, 1971

Vidal, M. (1987)

Le réseau linéamentaire du Nord-Est de la Côte d'Ivoire d'après des images Landsat - Implication en géologie structurale et recherche minière
Colloque international de télédétection, Yamoussoukro, du 4 au 8 mai 1987

**SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET GESTION DE RESSOURCES EN EAU
D'UN BASSIN VERSANT AFRICAÏN
Cas du bassin versant du Massili au Burkina Faso.**

Madira NGUETORA *

* EIER, BP7.023, Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé

Notre étude a pour objectif la conception d'un SIG pour la gestion des ressources en eau en milieu semi-aride africain. Cette approche doit permettre de mettre en place un outil d'aide à la décision permettant la programmation des actions de mobilisation ou d'aménagement des eaux. Cet outil doit en outre permettre de simuler différents scénarios afin de prévoir et de faire face aux crises nées de l'insuffisance des ressources pendant les années de faible pluviométrie.

Le bassin versant retenu est celui du Massili situé au centre-est du Burkina Faso. Celui-ci a une superficie de 4.460 km², ce qui permet une étude cohérente et exhaustive. Il est aménagé et compte plus d'une quinzaine de petits et micro-barrages dont le plus important (Loumbila, 35 millions de m³) est principalement destiné à l'alimentation en eau de la ville de Ouagadougou

La télédétection satellitaire sera utilisée comme outil d'inventaire de certains usages de l'eau. Son intérêt dans notre étude est de permettre :

- une délimitation plus précise du bassin versant étudié
- une mise en évidence du réseau hydrographique accompagnée d'une évaluation de sa dégradation
- un inventaire des bas-fonds, zones inondables et éventuellement leur exploitation
- l'établissement d'une carte d'occupation des sols
- éventuellement une correction ou une mise à jour des informations digitalisées sur les cartes (les aménagements nouveaux ou ceux ayant disparu)
- l'établissement d'un inventaire des retenues d'eau (mares et micro-barrages) et une éventuelle évaluation de leur cubature et durée de vie annuelle [
- la mise en évidence de l'usage des eaux des retenues pour l'irrigation
- la mesure de l'importance des éventuels piratages d'eau sur tête-morte des canaux d'irrigation

1. Problématique générale et objectif de notre étude

Les pays africains des zones tropicales arides ou semi-arides sont caractérisés par une insuffisance notoire en eau, situation devenue parfois dramatique depuis les sécheresses des années 70. Ces pays connaissent un taux d'accroissement de la population parmi les plus élevés dans le monde. Cette croissance, alliée à la politique d'autosuffisance alimentaire, implique des besoins en eau de plus en plus grands. Il s'avère alors nécessaire de mener une politique rigoureuse et cohérente de gestion de l'eau.

Le caractère vital de l'eau la place directement au cœur de plusieurs activités économiques, avec pour corollaire une multitude d'intervenants appartenant très souvent à des administrations différentes. Les actions de développement sont souvent menées de manière disparate et ponctuelle même si les préoccupations se recoupent parfois. Les impacts sur l'hydrologie du bassin versant et partant sur l'écologie ne sont pas évalués. La circulation de l'information entre les différentes administrations est très faible sinon nulle. Il existe beaucoup d'interventions d'aménagement des sols ou des eaux dont les résultats ne sont pas centralisés. L'information est parfois perdue quelque part dans un tas de papier. Le milieu naturel est généralement mal connu et les potentialités offertes par le bassin versant sont parfois méconnues ou négligées.

Il est alors nécessaire de mettre à la disposition des décideurs et acteurs du développement une autre approche de la gestion des ressources en eau. Cette nécessité est d'autant plus urgente quand on sait que la ressource est rare et que le site est particulièrement fragile.

Une nouvelle approche de gestion qui remplace l'eau sans cesse dans son environnement global, celui du bassin versant. Les outils informatiques actuellement disponibles offrent la possibilité de se départir de la vision figée de type "photographie" (cartographie traditionnelle) en permettant une mise à jour plus fréquente de l'information et une prise en compte des informations de diverses natures. C'est l'approche SIG.

Les SGBD (Systèmes de Gestion de Bases de Données) traditionnels sont limités quand un critère spatial doit intervenir dans une analyse faite sur la base de données. Les SIG leur apportent un plus en prenant en compte la dimension cartographique de l'information dans les analyses. Un autre avantage très intéressant des SIG est la possibilité qu'ils offrent d'établir une cartographie thématique rapide en fonction des besoins.

Notre étude a pour objectif la conception d'un SIG pour la gestion des ressources en eau en milieu semi-aride africain. Cette approche doit permettre de mettre en place un outil d'aide à la décision permettant la programmation des actions de mobilisation ou d'aménagement des eaux. Cet outil doit en outre permettre de simuler différents scénarios afin de prévoir et de faire face aux crises nées de l'insuffisance des ressources pendant les années de faible pluviométrie.

Un prototype du SIG sera réalisé sur le Burkina Faso. Ce pays étant très vaste (247.000 km²), l'étude n'est pratiquement envisageable que sur un site beaucoup plus petit et le plus représentatif possible des réalités du pays. C'est ainsi que nous avons retenu le bassin versant du Massili situé au centre-est du pays. Celui-ci a une superficie de 4.460 km², ce qui permet une étude cohérente et exhaustive. Ce choix a été guidé par la nécessité de mettre en évidence tous les problèmes (ou du moins le maximum des problèmes) liés à la disponibilité et à l'usage de l'eau.

Le bassin versant du Massili est aménagé et compte plus d'une quinzaine de petits et micro-barrages dont le plus important (Loumbila, 35 millions de m³) est principalement destiné à l'alimentation en eau de la ville de Ouagadougou.

Les caractéristiques géométriques (relations hauteur/volume/surface) de la plupart de ces retenues sont inconnues [GOULA BI TIE, 1993]. De plus, les superficies exploitées grâce aux eaux stockées sont elles aussi souvent ignorées.

2. La gestion de l'eau par l'approche ressources/besoins

La gestion de l'eau peut se comprendre en termes de :

- protection contre les inondations
- protection de la quantité (débit d'étiage, rabatement maximum, etc.)
- protection de la qualité des eaux
- conservation des eaux et des sols
- satisfaction des besoins exprimés en fonction des ressources disponibles

- etc.

Les pays du Sahel, confrontés à une pénurie d'eau, abordent plutôt le problème de gestion des eaux par une approche ressources/besoins.

Une gestion de l'eau vue sous cet angle repose sur deux principaux facteurs:

1. Un inventaire quantitatif et qualitatif des différentes ressources en eau (de surface et souterraine) mobilisées ou non. Cette connaissance des ressources en eau doit s'accompagner d'un suivi de leur dynamique,
2. Une identification de tous les besoins (besoins des villes en eau, hydraulique villageoise et pastorale, irrigation, hydroélectricité, etc.) avec une définition des priorités.

Une bonne gestion des ressources en eau passe donc par la bonne connaissance des ressources disponibles et des besoins. De la finesse de cette connaissance dépend l'efficacité de la gestion.

L'inventaire des ressources en eau implique une bonne connaissance des différents facteurs conditionnant la disponibilité de ces ressources. Cette connaissance devra permettre la prise en compte d'une éventuelle modification d'un de ces facteurs, lesquels facteurs peuvent être naturels ou d'origine anthropique.

Pour les ressources en eau de surface, ces facteurs sont :

- les caractéristiques physiques du bassin versant (forme et dimensions, topographie, pédologie et occupation du sol, etc.)
- le climat (pluviométrie, température, etc.)
- existence d'ouvrages hydrauliques (barrages de retenues ou de dérivation) sur le bassin versant,
- prélèvements et pertes d'eau dans les retenues ou les cours d'eau
- le mode d'exploitation du bassin versant et son impact sur le ruissellement.

Pour les ressources en eau souterraine, ces facteurs sont :

- nature des aquifères et leurs éventuelles communications
- caractéristiques de chaque aquifère (épaisseur, perméabilité, condition de réalimentation, qualité chimique de l'eau, potentialités d'exploitation)
- la situation d'exploitation et de réalimentation de la nappe.

Une ressource en eau est caractérisée par différents paramètres quantitatifs et qualitatifs. Sa connaissance et son suivi passent donc par une mesure de ces paramètres suivant des protocoles bien définis. Ces mesures reposent sur:

- les méthodes de mesure des données hydrologiques tant pour les eaux de surface (pluviométrie, pluviographie, limnimétrie, limnigraphie, débitmétrie, etc.), que les eaux souterraines (piézométrie, transmissivité, etc.).
- les techniques d'inventaire et de suivi des ressources en eau de surface et souterraines (géophysique, forage, télédétection, cartographie, etc.),
- les méthodes d'analyses chimiques et biologiques des eaux.

3. Pas de temps et pas d'espace

Le pas de temps tout comme celui d'espace sont fonction de l'objectif qui sont fixé pour une étude.

Pour les besoins de planification, le pas de temps d'un an nous paraît convenable. Mais, pour une bonne compréhension du fonctionnement du bassin versant, certains phénomènes (tels que l'évolution des besoins ou la disponibilité en eau de surface par exemple) doivent être abordés à un pas de temps plus petit. Le mois nous semble être le pas de temps de calcul adéquat pour les objectifs de planification et de prévision que nous nous sommes fixés.

Le site comporte un certain nombre de retenues d'eau en cascade (donc des bassins versants emboîtés) ou non. La ressource en eau de surface doit être étudiée dans son domaine naturel qui est le bassin versant ou le sous bassin versant. Le site d'étude qui est lui-même un bassin versant sera décomposé en sous bassins versants dans lesquels les entités nécessaires à la compréhension du fonctionnement seront identifiées. Cette hiérarchisation spatiale conduit à choisir quatre différents niveaux d'espace qui ne sont pas pourtant indépendants les uns des autres:

1. Le niveau 1 caractérisé par chaque une retenue et son bassin versant
2. Le niveau 2 correspondant à un regroupement fonctionnel d'éléments de niveau 1
3. Le niveau concerne tout le bassin versant

4. Le niveau 4 correspond aux limites du bassin versant national regroupant les bassins versants de niveau 3. Ce niveau se situe donc à l'aval de notre étude mais conditionne les décisions prises au niveau 3.

On pourra envisager un autre niveau plus grand qui correspondrait alors à un bassin versant international. A ces pas de temps et d'espace correspondent aussi des niveaux d'organisation de gestion du territoire et des ressources en eau.

4. Les problèmes particuliers de l'hydrologue de la zone tropicale africaine

Les préoccupations exprimées sur le plan hydrologiques concernent essentiellement le calcul des débits des crues et celui du ruissellement moyen. Le premier calcul permet de protéger les constructions hydrauliques tandis que le second permet d'évaluer le remplissage des retenues.

Ces calculs font intervenir des modèles hydrologiques qui demandent des données d'entrée liés aux caractéristiques physiographiques du bassin versant et au climat.

Le problème qui se pose avec le plus d'acuité à l'hydrologue des zones arides et semi-arides des pays de l'Afrique tropicale est celui lié à la disponibilité des données hydrologiques.

S'il existe parfois des séries de longue durée sur la mesure des pluies, les mesures de débits font très souvent défaut. Il est fait recours à l'utilisation des bassins représentatifs dont les résultats de mesures sont exportés sur des bassins versant non jaugés [PUECH et CHABI GONNI, 1983]; [RODIER et AUVRAY, 1965] et [RODIER et RIBSTEIN, 1988].

L'accès aux postes hydrométriques est difficile, parfois impossible pendant la saison des pluies (périodes des mesures). Cette difficulté interdit l'installations de stations hydrométriques à certains points importants des cours d'eau tels que les confluences.

En plus des problèmes liés à la disponibilité des données, d'autres caractéristiques particulières des bassins versants et du climat viennent compliquer la modélisation hydrologique.

De très nombreux sols sont sujet à la formation des croûtes de battance qui les imperméabilisent, ce qui favorise le ruissellement de surface.

L'écoulement est très liée à la dégradation du réseau hydrographique dans les zones de faible pente. Cette dégradation caractérisée par l'absence de lit net des cours d'eau de l'amont à l'aval [RODIER, 1989] se traduit par l'existence de nombreuses plaines d'inondation ou de mares.

L'hétérogénéité des surfaces entraîne une hétérogénéité des capacités au ruissellement même sur un tout petit bassin versant [THEBE, 1987].

Les périodes de pluies dans ces zones sont concentrées sur une saison assez courte et les capacités des sols au ruissellement évoluent avec l'enherbement des surfaces.

Un autre problème est celui des averses couvrant des surfaces limitées à 20-100 km² [RODIER, 1989], superficie très en déca de la couverture en stations de mesure des pluies.

Les cartes topographiques existantes sont obsolètes et souvent à des échelles très petites. Par exemple pour le Burkina Faso, les cartes les plus précises couvrant tout le territoire national sont à l'échelle de 1/200.000^{ème} et la dernière mise à jour date de 1982 (dernière édition de 1984). En plus de dix ans beaucoup de choses ont changé (aménagement du territoire, dégradation des sols et des couvertures végétales, etc.).

Seules quelques zones spécifiques du pays sont couvertes par des cartes topographiques à l'échelle de 1/50.000^{ème}. Ce sont notamment les villes (exemple de Ouagadougou éditée en 1984) et les zones fortement exploitées (la vallée de la Comoé par exemple).

5. L'apport de la télédétection à notre étude

Nous avons signalé la nécessité d'une bonne connaissance des ressources en eau pour une bonne gestion de celle-ci.

Nous avons aussi cité quelques paramètres caractérisant la disponibilité en eaux de surface et en eaux souterraines.

Nous avons enfin énuméré quelques problèmes de l'hydrologie en Afrique tropicale aride et semi-aride dont celui de la cartographie du territoire.

L'évaluation des ressources en eau de surface se repose essentiellement sur la cartographie du territoire.

L'intérêt de la télédétection pour notre étude va au delà de la cartographie du bassin versant pour les

besoins de la modélisation de la ressource. La télédétection sera aussi utilisée comme outil d'inventaire de certains usages de l'eau.

Dans une communication sur l'hydrologie des zones arides et semi-arides en Afrique, RODIER (1989) disait à propos de la forte hétérogénéité des sols sur des petits bassins versants: "La prise en compte vraiment correcte de cette hétérogénéité exige une excellente cartographie des états de surface jumelée avec une quantification de la perméabilité et l'emploi de l'ordinateur dans un modèle matriciel. La première condition n'est guère remplie qu'avec l'emploi judicieux de la télédétection avec une bonne vérité-sol".

L'inventaire des ressources entre dans les usages traditionnels de la télédétection et ne pose a priori aucun problème.

Le problème se situe plutôt au niveau de l'usage de cet inventaire, notamment en ce qui concerne les occupations de sol et les états de surface, pour la modélisation hydrologique. Une étude de CASENAVE et VALENTIN (1988) s'est intéressée aux états de surface des sols sahéliens et de leur influence sur l'écoulement. La mesure de l'écoulement faite sur une superficie de 1 m² (simulateur de pluie de l'ORSTOM) pose des problèmes quand au changement d'échelle pour l'usage au niveau du bassin versant.

L'intérêt de la télédétection satellitaire dans notre étude est de permettre:

- une délimitation plus précise du bassin versant étudié
- une mise en évidence du réseau hydrographique accompagnée d'une évaluation de sa dégradation
- un inventaire des bas-fonds, zones inondables et éventuellement leur exploitation
- l'établissement d'une carte d'occupation des sols
- éventuellement une correction ou une mise à jour des informations digitalisées sur les cartes (les aménagements nouveaux ou ceux ayant disparu)
- l'établissement d'un inventaire des retenues d'eau (mares et micro-barrages) et une éventuelle évaluation de leur cubature et durée de vie annuelle [PUECH, note de cours au DEA National d'Hydrologie, 1995]
- mise en évidence de l'usage des eaux des retenues pour l'irrigation (information pas toujours disponibles auprès des administrations)
- mesure de l'importance des éventuels piratages d'eau sur tête-morte des canaux d'irrigation

6. Comment procéder?

Nous procéderons par une analyse multitemporelle des images dont au moins:

- une image à la fin de la saison des pluies au moment (octobre ou novembre). Cette image permet de déterminer les limites maximales des plans d'eau.
- une image en pleine saison sèche pendant les cultures de contre-saison (février ou mars). Cette image permet un inventaire des cultures de contre-saison, de mesurer l'évolution du stock d'eau et de classer la végétation (les herbacées sont devenues sèches avec l'absence de pluies).
- une image au début de la saison des pluies (mai ou juin). Cette image permet aussi de mesurer l'évolution du stock d'eau et de classer la végétation.

Un inventaire des unités homogènes de ruissellement sera entrepris sur toutes les images. Ces unités sont déterminées par les classes d'occupations de sol ou d'état de surface.

Et comme nous sommes en zone de socle, une recherche des grands linéaments géologiques sera entreprise pour évaluer les sites possibles de construction des points d'eau (puits et forages). Il serait par la suite intéressant de placer sur la carte des linéaments les puits et forages productifs existants pour vérifier la carte.

Dans une étude menée par YERGEAU *et al.* (1991) dans la région de Pissila (Burkina Faso), l'utilisation d'un SIG a permis de choisir les meilleurs sites d'approvisionnement en eau (eaux de surface et souterraines) en fonction de différentes priorités préalablement définies (autosuffisance alimentaire, irrigation, économie de marché, alimentation humaine ou animale). Cette étude a utilisé l'imagerie satellitaire pour l'inventaire des ressources en eau par l'étude de l'hydrographie et des occupations des sols avec les capacités au ruissellement pour les eaux de surfaces et la recherche de linéaments géologiques pour les eaux souterraines (zones de socle). Cette étude a permis de réaliser différents scénarios permettant de définir les ressources en eau à mobiliser pour satisfaire chacune des priorités.

7. Conclusion

Notre étude n'a pas pour ambition d'élaborer un modèle pour les calculs hydrologiques signalés plus haut. Elle s'intéresse plutôt à l'élaboration d'un nouveau concept de gestion des eaux en milieu déficitaire avec l'usage des outils nouveaux. Dans l'optique de ce concept de gestion, elle procédera à la collecte des données et à leur mise en forme de manière à être utilisées par un ou plusieurs modèles hydrologiques tout en laissant une porte ouverte aux nécessaires améliorations qui ne manqueront d'être faites dans l'approche hydrologique des zones arides et semi-arides africaines.

B 1

**MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET
DETERMINATION DE PARAMETRES
Caracteristiques hydriques des sols**

**HYDROLOGICAL MODELLING
AND
DETERMINATION OF PARAMETERS
Soils hydric characteristics**

TELEDETECTION, ETATS DE SURFACE ET OBSERVATIONS AU SOL

Jean-Marie LAMACHERE*, Christian PUECH**

*Laboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

**L.C.T. CEMAGREF / ENGREF, 500 rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5 - France

Résumé

En Afrique de l'Ouest, on pense généralement que l'amélioration de l'estimation des ruissellements à l'échelle des petits bassins versants viendra d'une meilleure connaissance des aptitudes des sols au ruissellement (Rodier et al., 1984). Les travaux des hydrologues et pédologues de l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest (Casenave et Valentin, 1989) ont montré que l'aptitude des sols au ruissellement dépendait fortement de l'état de surface des sols, notion qui cumule l'observation de la végétation, du sol et de son organisation superficielle.

Or la télédétection satellitaire haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 20 m (SPOT XS) ou 30 m (LANDSAT TM). La détection est limitée aux couches superficielles de la surface du sol en l'absence de nuages. L'accès aux couches inférieures ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs en surface de la texture et de la structure du sol. L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface nécessite donc la réalisation d'observations au sol permettant de préciser, aux échelles d'observation de l'appareil embarqué à bord du satellite, les principales caractéristiques des états de surface. Pour ce faire, nous présentons dans cet article une méthode d'observations au sol des états de surface bien adaptée à l'interprétation et à l'analyse numérique des images satellitaires.

La méthode proposée consiste, pour des bassins versants de superficie supérieure à 10 km², à réaliser la description au sol des états de surface par blocs contigus de 100*100 m, sur des distances de 2 à 3 km. Les repérages au sol sont effectués par l'emploi d'un GPS (Global Position System). Les observations sont ensuite normalisées et reportées sur des tableaux récapitulatifs permettant leur utilisation dans le traitement numérique des images. Pour des bassins versants de superficie inférieure à 10 km², les observations au sol sont effectuées sur des bandes rectilignes longues de 300 à 500 m, larges de 20 m qui procurent un taux de sondage équivalent et une meilleure précision dans la description des états de surface.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, pour améliorer l'estimation des apports et des crues des petits bassins versants des zones sahéenne et tropicale sèche en Afrique de l'Ouest, les nouvelles méthodes cartographiques, par analyse numérique d'images satellites, ont été associées à la caractérisation hydrologique des états de surface.

En effet, on pense généralement que l'amélioration de l'estimation des ruissellements de la zone sahéenne viendra d'une meilleure connaissance de l'aptitude des sols au ruissellement (Rodier et al., 1984). Une des manières de mesurer cette aptitude a été d'utiliser, dans toute l'Afrique de l'ouest, le simulateur de pluies sur des surfaces élémentaires (1 m²). Une description minutieuse de l'organisation superficielle des sols et de leur couvert végétal a permis de réaliser une typologie des surfaces élémentaires en y associant des relations hydro-pluviométriques issues des opérations de simulation de pluie. Un ouvrage intitulé "Les états de surface de la zone sahéenne" (Casenave et Valentin, 1989) synthétise l'ensemble des résultats.

Une autre réponse possible, complémentaire à la précédente, consiste à utiliser les nouveaux outils de représentation spatiale et en particulier la télédétection à haute résolution sur les petits bassins versants des zones sahéenne et tropicale sèche.

Dans cet article, nous développerons plus particulièrement une méthode de description au sol des états de surface, proche de celle proposée par Casenave et Valentin (1989), mais adaptée à l'analyse numérique et à la photo-interprétation des images satellites (Lamachère et Puech 1995). Dans un autre article, complémentaire à celui-ci, nous développerons la cartographie des états de surface par utilisation des images satellitaires. La cartographie des états de surface ouvre la voie à la modélisation du comportement hydrologique des sols à l'échelle d'un bassin versant.

TELEDETECTION ET HYDROLOGIE

La télédétection satellitaire haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 20 m (SPOT XS) ou 30 m (LANDSAT TM). Chaque élément de l'image (pixel) est connu par sa radiométrie respectivement selon 3 ou 7 bandes spectrales. Dans le spectre visible, la détection est limitée à la surface du sol en l'absence de nuages. L'accès aux couches pédologiques ou géologiques inférieures ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs, en surface, de la nature du sol ou du sous-sol.

Les informations satellitaires, potentiellement utilisables en hydrologie, concernent d'une part la répartition spatiale des types de surface à une date donnée et d'autre part la connaissance de l'évolution de l'état des surfaces au travers d'images multitudes. Le traitement des images consiste à définir soit des classes radiométriquement homogènes, auxquelles les pixels sont rattachés individuellement, soit des unités cartographiques formées d'agrégats de pixels différents organisés en structures identifiables à l'œil.

En zone sahélienne

En zone sahélienne, la pluviométrie moyenne interannuelle varie entre 600 et 200 mm. Cette zone peut être considérée a priori comme favorable à l'utilisation de la télédétection. On y note en effet :

Un contexte géographique et climatique caractérisé par :

- une bonne visibilité sur de longues périodes, due à la rareté du couvert nuageux, même en saison des pluies,
- une végétation peu abondante et dispersée qui limite l'extension des feux de brousse et permet d'observer la nature des sols.

Un contexte hydrologique marqué par :

- des pluies violentes et de courte durée qui conduisent à la formation de sols nus encroûtés, générateurs de forts ruissellements,
- des crues fortes où le ruissellement constitue l'essentiel des écoulements des marigots.

De la zone sahélienne humide (400 à 600 mm) à la zone sahélienne sèche (200 à 400 mm), le couvert végétal se raréfie et l'organisation pédologique superficielle des sols (croûtes) prend de plus en plus d'importance dans la détermination de l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. Dans ce contexte, le lien entre télédétection et hydrologie va donc se faire sur le constat que les états de surface, et plus particulièrement les organisations superficielles des sols, sont primordiaux pour la connaissance du ruissellement et la prédétermination des apports à l'échelle des petits bassins versants.

En zone tropicale sèche

En Afrique de l'Ouest, la zone tropicale sèche est comprise entre les isohyètes interannuelles 600 et 1000 mm. Moins favorable que la zone sahélienne à l'utilisation de la télédétection, elle présente néanmoins un certain nombre d'atouts :

Un contexte géographique et climatique caractérisé par :

- une longue période sèche (novembre à mars) avec une bonne visibilité sur cette période, mais une visibilité plus faible qu'en zone sahélienne au cours de la saison pluvieuse (avril à octobre),
- une végétation herbacée abondante en saison des pluies qui permet, en saison sèche, le développement des feux de brousse et leur propagation,
- des pourcentages de terres cultivées très variables d'une région à l'autre, qui peuvent être localement très importants (50 à 60 %).

Un contexte hydrologique marqué par :

- des pluies violentes et de courte durée, qui conduisent à la formation de sols encroûtés générateurs de forts ruissellements, mais aussi des pluies plus fréquentes et de faible intensité qui favorisent la croissance du couvert herbacé,
- des crues plus fréquentes qu'en zone sahéenne et des écoulements où l'importance du débit de base, dû à la remontée des nappes aquifères, commence à influencer significativement le régime des cours d'eau, principalement en fin de saison des pluies.

Le pourcentage de couverture végétale et de mise en culture sont ici les principaux facteurs explicatifs du ruissellement et de l'infiltration. Le couvert herbacé est susceptible de fortes variations sous l'effet des feux de brousse et de la sénescence périodique. Pour une pluviométrie annuelle inférieure à 800 mm, la couverture végétale ligneuse étant généralement de faible densité, la surface du sol et sa couverture herbacée sont directement accessibles à l'observation satellitaire. Dans le contexte tropical sec, le lien entre télédétection et hydrologie va donc se faire sur le constat que les états de surface, plus particulièrement le couvert végétal herbacé et la mise en culture des sols, sont primordiaux pour la connaissance du ruissellement. En ce qui concerne la prédétermination des apports à l'échelle des petits bassins versants, des informations sur l'écoulement de base des marigots devront compléter celles qui concernent le ruissellement.

Caractéristiques communes aux zones sahéenne et tropicale sèche

La faiblesse du relief est une caractéristique commune, en Afrique de l'Ouest, aux zones sahéenne et tropicale sèche. Elle entraîne une grande homogénéité climatique sur l'ensemble des deux zones et peu de déformations géométriques sur les images satellites.

Le contexte cartographique général est peu précis. Il existe encore très peu de cartes topographiques au 1/ 50 000, ce qui peut justifier l'achat d'images spatiales à haute résolution. La couverture aérienne est rarement renouvelée, ce qui légitime l'achat d'images satellites récentes.

METHODOLOGIE DE LA DESCRIPTION DES ETATS DE SURFACE

Dans les zones sahéenne et tropicale sèche, le paysage, souvent très humanisé, est un amalgame complexe d'entités dont la taille, la densité et la répartition varient de façon continue, ou discontinue, sur de faibles distances. Rares sont les endroits où les limites précises d'ensembles homogènes sont observées. On y rencontre des zones naturelles composées de savanes plus ou moins arborées, des zones de culture à faible couverture ligneuse, ou des ensembles à densité de végétation variable. Les zones totalement homogènes sur les images satellites (plans d'eau, dunes vives, brûlis, forêts denses) y sont rares.

Prétraitement de l'image satellitaire et choix de l'échantillon

L'image satellitaire et la carte topographique, associée à cette image, servent de guide au choix de l'échantillon des points, des lignes ou des sections pour la description de la surface des sols d'un bassin versant.

Un prétraitement de l'image permet de définir des classes radiométriquement homogènes, issues du traitement numérique des images, ou des unités cartographiques résultant d'une photo-interprétation. Cette opération conduit généralement à la définition de 10 à 20 unités cartographiques différentes qui seront échantillonnées en fonction de leur importance locale ou régionale. Les pistes et les chemins sont rarement visibles sur les images satellitaires. Pour se repérer avec précision sur les images satellitaires, on réalise un tirage sur film transparent de la carte topographique de la zone à cartographier, à la même échelle que l'image.

Le type d'échantillon retenu dépend du mode cartographique et de la précision souhaitée dans la description au sol. Pour une cartographie par analyse numérique des images satellitaires, on choisira l'échantillon sous la forme de lignes ou des sections. Pour une cartographie manuelle, l'échantillonnage par points suffit.

La description au sol des classes radiométriques ou des unités cartographiques doit tenir compte de la grande variabilité spatiale de la végétation et de l'occupation du sol. Elle comprendra donc l'estimation des proportions des différentes composantes de l'état de surface : strates arborée, arbustive et herbacée, types de sols, types d'organisation superficielle du sol et occupation du sol avec son état cultural.

Choix méthodologiques

Pour transformer une description de la surface du sol en une lame ruisselée, plusieurs démarches sont possibles. Elles sont basées sur le choix préalable de l'échelle de modélisation hydrologique en relation avec la possibilité de transformer l'information spatiale en information de ruissellement. Elles suivent les étapes suivantes :

- 1 Choix d'un **modèle hydrologique** de fonction de production et de son échelle élémentaire d'application,
- 2 **Cartographie** des zones homogènes d'application d'une même fonction de production,
- 3 Choix d'un **modèle de transfert** permettant de reconstituer les volumes ruisselés et les hydrogrammes à l'exutoire du bassin versant.

Le mètre carré est l'échelle d'application des relations hydro-pluviométriques associées à la typologie des états de surface établie en Afrique de l'Ouest par Casenave et Valentin (1989). Nous avons donc choisi le mètre carré comme échelle élémentaire d'application des fonctions de production.

Le terme "état de surface" désigne, selon Casenave et Valentin, un système de surfaces élémentaires à un instant donné, système qui constitue un ensemble homogène au sein duquel les différentes parties entretiennent des relations fonctionnelles quant au ruissellement et à l'infiltration. L'état de surface servira donc d'unité pour la cartographie hydrologique à l'échelle des bassins versants.

Pour chaque état de surface, on peut définir une **fonction de production**, somme des lames ruisselées aux échelles élémentaires. Ce type de fonction de production ne définit pas le ruissellement qui sera réellement observé, mais plutôt un **potentiel de ruissellement** qui sera généralement inférieur au ruissellement réel.

Il importe donc, pour établir la fonction de production de chaque état de surface, de connaître avec une précision suffisante sa composition en surfaces élémentaires. La description des états de surface se fera donc sur le terrain avec ce souci permanent.

En ce qui concerne le modèle de transfert permettant de reconstituer les écoulements à l'échelle des bassins versants, ce problème sera abordé par Christian PUECH dans l'article *"Télédétection et hydrologie : quelle vision, quelle échelle, quels processus ?"*

La description des surfaces élémentaires

Le catalogue des états de surface de la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989) fournit un inventaire exhaustif des différents types de surfaces élémentaires rencontrées à l'ouest du continent africain au sud du Sahara. Il fournit également une méthodologie détaillée pour leur description. Nous ne reprendrons ici que l'essentiel nécessaire à la compréhension du déroulement des opérations de terrain. Pour améliorer l'efficacité des descriptions d'états de surface d'un bassin versant ou d'un groupe de bassins versants, **il est indispensable de créer, pour chaque région étudiée, un inventaire des types de surfaces élémentaires rencontrés.**

La surface élémentaire (1 m^2) est définie comme un ensemble homogène constitué par le couvert végétal, la surface du sol et son organisation superficielle. L'organisation pédologique superficielle résulte de transformations subies par la surface du sol sous l'effet de facteurs météorologiques, phyto-écologiques, fauniques ou anthropiques.

Le couvert végétal

A l'échelle des surfaces élémentaires, seuls le couvert herbacé et le couvert cultural peuvent être observés facilement.

On distingue, en pourcentage de recouvrement, le couvert épigé, vert ou desséché, de la litière. Le complément à 100 du couvert végétal total représente le pourcentage de sol nu exposé directement à l'impact des gouttes de pluie.

Le microrelief

Le microrelief, d'amplitude comprise entre 5 et 50 cm, et le nanorelief, d'amplitude inférieure à 5 cm, sont évalués en fonction de leur degré d'obstruction par rapport au ruissellement. Ils interviennent principalement dans la classification des sols cultivés.

La mésofaune

L'activité mésofaunique influe sur la porosité des sols. On note essentiellement le pourcentage de la surface occupée par les turricules de vers, déjections rejetées à la surface du sol par les vers de terre, ou par les placages de termites, petits chenaux en terre construits par les termites en quête de nourriture, pour se prémunir de la lumière.

Le sol

On note la granulométrie du sol dans les 5 à 10 premiers centimètres de profondeur en estimant au toucher le pourcentage des cinq classes granulométriques suivantes : les blocs, cailloux et graviers de taille supérieure à 5 mm, les gravillons (2 à 5 mm), les sables grossiers (0,2 à 2 mm), les sables fins (50 à 200 microns), les limons et argiles de taille inférieure à 50 microns. La couleur du sol est notée à l'état sec et à l'état humide.

La porosité

On distingue :

- la porosité tubulaire résultant d'une activité biologique végétale ou animale,
- la porosité de fissure : fentes de dessiccation qui se referment après humectation,
- la porosité vésiculaire, formée de petites cavités sphériques enfermant des bulles d'air.

Contrairement aux deux autres, la porosité vésiculaire limite considérablement l'infiltration. Elle occupe donc une place de choix dans la description des organisations pédologiques superficielles.

Les principaux types de surfaces élémentaires

La typologie des surfaces élémentaires établie par C. VALENTIN correspond sensiblement à celle des microhorizons superficiels ou croûtes de surface. Leur clef de détermination est fournie à la figure 1.

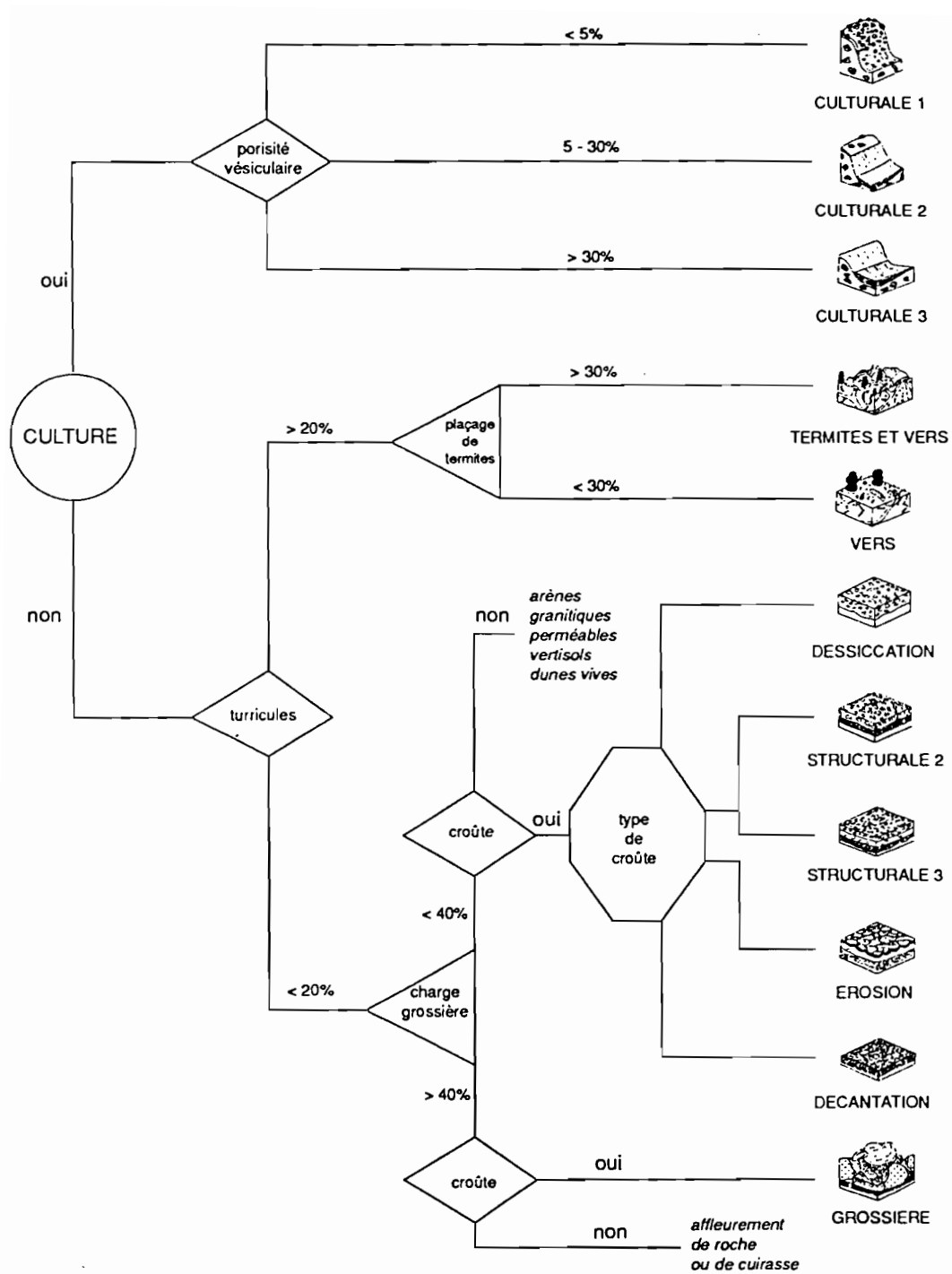


Figure n° 1 : Clef de détermination des surfaces élémentaires (A. Casenave et C. Valentin, 1989)

La description des états de surface

Deux types d'observations sont effectuées :

- *Les observations primaires*, qui sont constituées par la nature et la densité de la **végétation**, le type et la couleur des **sols**, ainsi que par l'**occupation du sol**. Ces observations servent au décodage primaire des images en 3 plans élémentaires : "végétation", "sols" et "occupation du sol".

- *Les observations secondaires*, qui sont constituées par les **pourcentages de recouvrement en surfaces élémentaires types**. Elles servent à déterminer la composition statistique des unités cartographiques en surfaces-types élémentaires.

Pour les bassins de taille supérieure à 10 km², nous proposons que les observations au sol soient effectuées par blocs contigus de 100*100 m, sur des sections longues de 2 à 3 km. On étudie de 10 à 20 sections par bassin versant, soit un taux de sondage de 10 à 1 % pour des bassins de 20 à 400 km².

Pour des bassins versants de superficie inférieure à 10 km², nous proposons d'effectuer les observations au sol sur des bandes rectilignes longues de 300 à 500 mètres, larges de 20 mètres, qui procurent un taux de sondage équivalent et une meilleure précision dans la description des états de surface. Les observations sont alors faites sur des blocs contigus homogènes de longueurs variables.

Le repérage au sol des observations

Le positionnement des lignes et des sections est facilité par l'emploi d'appareils de positionnement par satellite (GPS, Global Position System). On repère l'origine et la fin des lignes ou des sections par leurs coordonnées géographiques. La direction générale de la ligne est lue à l'aide d'une boussole; des jalons servent à y séparer les blocs homogènes et les longueurs des blocs y sont mesurées à la chaîne d'arpenteur. Sur les sections, les directions de chaque bloc de longueur 100 m sont prises à la boussole. Les observations sont réalisées à partir de pistes carrossables pour des véhicules tout terrain, par des arrêts tous les 200 m repérés au compteur hectométrique du véhicule.

Le couvert végétal

On observe successivement la strate arborée, la strate arbustive, la strate herbacée puis le tapis végétal et les résidus végétaux à la surface du sol. Les strates arborée et arbustive sont observées de manières différentes selon la densité du couvert. La strate herbacée est observée par son taux de recouvrement et son type (dense, dispersé, en touffes ou en plaques). Les observations complémentaires portent sur les espèces végétales dominantes, la hauteur et le diamètre du couvert, les distances entre individus, touffes ou plaques.

Le relief

L'observation du mésorelief, d'amplitude supérieure à 50 cm, vient s'ajouter à celle du microrelief et du nanorelief effectué à l'échelle élémentaire. Le mésorelief est constitué de bombements, de dépressions, de pointements rocheux ou cuirassés, de ravines ou de grandes termitières. On note chaque type de relief, son diamètre basal pour les formes circulaires, sa longueur et sa largeur pour les formes rectangulaires, sa hauteur et sa profondeur par rapport à la surface du sol qui l'entoure, la distance moyenne entre les formes, sa répartition spatiale (bandes, stries, réseaux, répartition aléatoire) et leur degré d'obstruction par rapport au ruissellement.

L'érosion

L'érosion éolienne se manifeste par la présence de microrides d'éolisation et par le déchaussement de ligneux. A l'échelle des lignes ou des sections, l'érosion hydrique se manifeste par des micromarches, produites par le ruissellement en nappe, des protogriffes, des griffes ou des ravineaux formés par le ruissellement concentré. L'intensité de l'érosion sera estimée en fonction de la nature et de l'amplitude des traces d'érosion.

Le sol et son organisation superficielle

Les proportions granulométriques du sol sont estimées à l'oeil et au toucher en humectant l'échantillon avec une pissette. La fraction limoneuse est souvent associée à la fraction argileuse. Les affleurements rocheux sont notés à part avec leur taux de recouvrement. Les profondeurs du sol sont estimées à partir de profils relevés dans les ravines, les marigots, les fosses ou les puisards villageois.

La répartition des types de surfaces élémentaires est notée par segment homogène de longueur variable sur les lignes, par segment de longueur fixe (100 m) pour les sections. La reconnaissance des surfaces élémentaires est associée à la description du couvert herbacé, du couvert minéral et du microrelief. Lorsque la distribution spatiale des surfaces élémentaires revêt un caractère particulier, propre à influencer sur le ruissellement, il est recommandé de schématiser cette distribution en dégagant le motif élémentaire et son mode de reproduction (damiers, îlots, couronnes, bandes).

Les activités humaines et biologiques

L'activité humaine se manifeste principalement par la mise en culture et les travaux culturaux : défrichage, labour, billonnage, sarclage, récolte. Elle se manifeste également par des aménagements hydro-agricoles : diguettes en terre ou en pierres, haies, bandes végétalisées. Hors des champs, elle s'exprime par les brûlis, la coupe de bois d'oeuvre ou de chauffage, la construction de cases, d'écoles, de pistes, de routes ou de terrains de jeux.

Le matériel nécessaire à l'observation des états de surface

Quatre types de matériel sont nécessaires pour réaliser une observation des états de surface d'un bassin versant : un matériel cartographique, un matériel de repérage sur le terrain, un matériel pour la description des états de surface et un matériel de vie en brousse.

Le matériel cartographique

- Les photographies aériennes et les cartes topographiques correspondant à la taille du bassin versant. Pour un bassin versant de superficie inférieure à 100 km² on utilisera des cartes topographiques au 1/50 000^{ème}. Jusqu'à 400 km² on pourra utiliser les cartes topographiques au 1/100 000^{ème}.
- Une composition colorée d'une image satellitaire à la même échelle que la carte topographique.
- Des crayons gras rouge et bleu pour écrire sur les photographies aériennes, des crayons de couleur, des crayons à mine en graphite, une gomme, un aiguiser-crayon.
- Une règle graduée pour les repérages sur cartes et photographies aériennes, un rapporteur.

Le matériel de repérage sur le terrain

- Un véhicule tout terrain avec un compteur hectométrique (précision d'une centaine de mètres).
- Un G.P.S. permettant un repérage au sol avec une précision d'une dizaine de mètres.
- Une boussole, une montre, un carnet de route.
- Un décamètre, une chaîne d'arpenteur ou un topo fil, une vingtaine de jalons, un niveau de géomètre (ou un tachéomètre) avec son pied et sa mire et un carnet topographique pour les levés topographiques de précision si ces levés sont prévus dans le cadre des observations.

Le matériel de description des états de surface

- La partie du catalogue des états de surface de A. Casenave et C. Valentin consacrée à la description des surfaces élémentaires et des états de surface, sous pochettes en plastique transparent.
- Une flore locale pour nommer les arbres, les arbustes et la strate herbacée.
- Un marteau de pédologie, un couteau à large lame, un pinceau, une pissette.
- Plusieurs cahiers d'écolier avec gomme, crayons.
- Un appareil photographique.

Le matériel de vie en brousse

- Un matériel de campement: lit de camp, sac de couchage, moustiquaire et accessoires, tables, chaises, lampes à gaz, torches.
- Un matériel de cuisine : réchaud, bouteilles de gaz, caisse popote, bidons d'eau, ravitaillement.
- Une pharmacie avec les produits indispensables aux premiers soins.

PRESENTATION DES OBSERVATIONS

Dans le dépouillement des observations de terrain et leur présentation, on retient celles qui sont susceptibles d'être utilisées dans les travaux de cartographie et dans l'établissement de la légende de la carte des états de surface.

Le dépouillement

Les observations au sol sont dépouillées relativement au mode d'échantillonnage : points, lignes ou sections :

- Les points sont des aires dont la superficie correspond à des cercles de 10 à 20 mètres de rayon et correspondent approximativement à un seul pixel d'une image satellitaire.
- Les lignes sont des bandes rectilignes longues de 300 à 500 mètres, larges de 20 mètres qui couvrent des groupes de 15 à 25 pixels.
- Les sections correspondent à des bandes brisées longues de 1,5 à 2 km, larges de 100 m couvrant des ensembles de 300 à 400 pixels.

Les observations de terrain utilisables dans les travaux de cartographie et de légende des unités hydrologiques sont d'une part le repérage des points, des lignes ou des sections, avec la direction des lignes et les changements de direction des sections, et, d'autre part, les informations suivantes pour chaque point, chaque segment de ligne (2 à 50 m) et chaque bloc de section (100m) :

- les taux de recouvrement du couvert végétal (strates arborée, arbustive et herbacée),
- les types de sol avec leurs composantes granulométriques et leurs couleurs,
- Le taux de recouvrement des cultures et les modes d'occupation du sol,
- la répartition des types de surfaces élémentaires.

Des tableaux, dont les modèles sont fournis en annexe de cet article, regroupent l'essentiel des observations : tableau 1 pour les lignes, tableau 2 pour les sections. Les symboles utilisés sur le tableau 2 sont regroupés sur une même page qui suit ce tableau.

La synthèse

La synthèse des observations de terrain vise à rendre ces informations utilisables dans la cartographie des états de surface et dans la modélisation hydrologique à l'échelle des unités cartographiques ou des unités radiométriques de l'image satellitaire.

L'expérience acquise en Afrique de l'Ouest nous permet de proposer comme **principaux critères de classification**, dans l'ordre de leur présentation et par zone climatique :

- **en zone sahélienne**, le type de sol, les sols nus et le taux de couverture herbacée,
- **en zone soudano-sahélienne**, le type de sol, le taux de mise en culture, les sols nus et le couvert ligneux,
- **en zone soudanienne** le type de sol, le taux de mise en culture et le couvert ligneux.

Pour réaliser cette classification, il faut tout d'abord procéder à la rédaction de **résumés sur les lignes et les sections**, ou par groupe de points présentant des caractéristiques à peu près identiques. Les sections étant rarement homogènes sur toute leur longueur, il sera souvent nécessaire de couper les sections en ensembles homogènes. Pour chaque ligne et chaque section homogène, ou chaque groupe de points, on réalisera un résumé regroupant l'essentiel des observations avec le détail de la répartition des surfaces élémentaires. Deux exemples de résumés sont associés à la description de la ligne n° 2 et de la section n° 4 dans la région de Manga au Burkina Faso.

Des tableaux regroupent ensuite les observations à l'échelle des régions et des bassins versants et fournissent la répartition des types de surfaces élémentaires pour chaque état de surface en fonction des principaux critères de la classification retenue. Un exemple de ce type de tableau est fourni pour les sols sableux fins et grossiers de la région de Manga (Tableau 3).

Un tableau de synthèse regroupe l'ensemble des lignes et sections d'une même région dans la classification générale des états de surface. Le tableau 4 ci-joint regroupe ainsi l'ensemble des lignes observées dans la région de Manga en fonction des deux critères principaux qui sont le type de sol et le pourcentage de sol cultivé.

Tableau 1 : Région de Manga Ligne n° 2 Observations du 27/02/1990

Limites	Distances	Couvert ligneux		Couvert herbacé		Types de surfaces élémentaires				
		Arbres en m ²	Arbustes en m ²	Herbes en %	Litière en %	C 1 en %	DES 1 en %	VERS en %	GRO 1 en %	GRO 2 en %
1 - 2	47	155	78	0	10	100				
2 - 3	34	154	12	100	100		100			
3 - 4	18	0	16	100	100			100		
4 - 5	17	20	28	100	100		100			
5 - 6	20	0	6	70	80				100	
6 - 7	17	0	0	80	90		100			
7 - 8	25,5	0	64	90	90		43		57	
8 - 9	31	50	56	60	60				70	30
9 - 10	26	50	0	20	20					100
10 - 11	40	118	0	100	100			100		
Totaux	275,5	547	260							
Moyennes		10	4,7	67	69	17	29	21	20	13

Région de Manga

RESUME

Ligne n° 2

Savane arborée claire sur sols sableux gravillonnaires avec un couvert herbacé très dense.

Couvert arboré : 10 % Couvert herbacé : 67 % Cultures : 17 %
 Couvert arbustif : 5 % Litière : 69 %

Répartition des surfaces élémentaires

C 1 : 17 % GRO 1 : 20 % DES 1 : 29 % VERS : 21 %
 GRO 2 : 13 %

Tableau 2 : Région de Manga

Section n° 4

Observations du 12/04/1990

Distances	Azimut	G	Couvert végétal			Occup.	Pente	Type	Couleur	Type
			Arbres en %	Arbustes en %	Herbes en %					
000 - 100	155		1	1	Gh 20	Nat 20 Cu 80	↑	3(30)+4(35)+5(35) Fentes 2 à 5 mm	2(100)	C 2.1(80) DES 1 (20)
100 - 200	145		1	10	Rh 70	Nat 90 Cu 10	↑	1(25)+2(10)+3(30) +4(20)+5(15)	1(50) 4(50)	DES 1 (100)
200 - 300	140		2	1	Rh 80	Nat 100	+ ↑	1(10)+3(30)+4(30) +5(30)	1(100)	DES 1 (100) Fe. 2-5 mm
300 - 400	135		8	0		Nat 50 Cu 50	- ↑	1(15)+2(10)+3(30) +4(20)+5(25)	1(100) 2(50) 4(50)	DES 1 (50) Fe. 2-5 mm C 3 (50) Bi.
400 - 500	147		8	0		Cu 100	+ ↑	1(5)+2(15) 3(30)+4(40)	2(50) 4(50)	C 3 (100) Billons
500 - 600	160		12	0		Cu 100	↑	1(5)+2(30) 3(40)+4(25)	2(50) 4(50)	C 2 1 (100) Billons
600 - 700	162		13	0		Hab 10 Cu 90	- ↑	1(15)+3(25) 5(60)	2(50) 4(50)	C 1 (50) Bi. C 3 (50) Sa.
700 - 800	175		5	0	Pa. 30	Hab 10 Cu 90	- ↑	1(15)+3(25) 5(60)	2(50) 4(50)	C 3 (100) Sar. à plat
800 - 900	175		12	0	Gh 10	Cu 100	- ↓	1(5)+3(50) 4(30)+5(15)	2(100)	C 3 (70) . C 1 (30) Bi.
900 - 1000	175		1	3		Nat 60 Cu 40	- ↓	1(30)+2(30)+3(10) +4(15)+5(15) 1(30)+2(20)+4(25) +5(25)	4(50) 5(50) 5(100)	GRO 1 (60) C 1 (40) Billons
1000 - 1100	175		21	1		Nat 100 BF 20	↔	1(40)+2(20)+4(20) +5(20) 1(5)+3(15)+5(80)	4(50) 5(50)	DES 2 (100) Fe. 2-5 mm Term. (20)
1100 - 1200	180		6	25		Nat 100 BF 10	- ↑	1(40)+2(20)+4(20) +5(20) 1(5)+3(15)+5(80)	4(50) 5(50)	DES 2 (100) Fe. 2-5 mm Term. (20)
1200 - 1300	180		6	15		Nat 70 Cu 30	+ ↑	1(15)+2(5)+3(20) +4(20)+5(40)	4(50) 5(50)	C 3 (30) Bu. DES 2 (70)
1300 - 1400	160		3	7		Cu 100	- ↑	1(20)+2(10)+3(10) +4(30)+5(30)	4(50) 5(50)	C 2.1 (50) C 3 (50)

SYMBOLES ET ABREVIATIONS UTILISES

Sur les tableaux récapitulatifs décrivant les sections on utilise les codes, symboles et abréviations suivants :

Colonne n° 6 : h : herbes Li : litière Gh : grandes herbes Rh : herbes rases
Pa : paille

Colonne n° 7 : Nat : zone naturelle Cu : zone de culture Ja : jachère Hab : habitations
Jar : jardins Mar : marigot Car : carrière B F : bas-fond Bru : brûlis

Les taux d'occupation du sol sont exprimés en pourcentage de la surface du segment : Nat (50)

Colonne n° 8 : Les symboles utilisés sont assez explicites : ↑ = montée ↓ = descente
+ ↓ = descente à pente moyenne - ↓ = descente à pente faible
++ ↓ = descente à pente forte ↔ = terrain plat

Colonne n° 9 : Types de sols. 0 : affleurement rocheux 1 : blocs, cailloux, graviers
2 : gravillons 3 : sables grossiers 4 : sables fins 5 : limons et argiles

$1(15) + 2(30) + 3(30) + 4(25) =$ Sol à 15 % de cailloux et graviers, 30 % de gravillons, 30 % de sables grossiers et 25 % de sables fins.

Colonne n° 10 : Couleur du sol en surface 1 : blanc 2 : rose à brun clair
3 : rouge brique 4 : brun foncé, rouille 5 : noir 6 : vert
 $2(50) + 4(50)$ Sol brun clair et brun foncé en égales proportions.

Colonne n° 11 : Type de surface. Les abréviations figurant dans cette colonne correspondent à celles qui ont été définies au paragraphe intitulé "*Les types de surfaces élémentaires*", pages à , ou lors de la description des surfaces élémentaires du bassin versant étudié. Quelques abréviations supplémentaires peuvent être utilisées : Bi : billons, Bu : buttes de sarclage, To : toiture en tôle, Co : cour de concession, etc..

REGION DE MANGA RESUME Section n° 4

Cultures sur sols sableux fins et grossiers sous un faible couvert arboré et arbustif.

Couvert arboré : 7 % Cultures : 56 % Habitat : 1 %
Couvert arbustif: 4,4 % Jachères : 43 %

Sols argileux dans les dépressions et les petits bas-fonds.
Couvert arbustif et arboré très inégalement réparti.

Répartition des surfaces élémentaires

C 1 : 08 % DES 1 : 21 % GRO 1 : 04 %
C 2.1 : 15 % DES 2: 18 % C 3: 34 %

Tableau 3 : Etats de surface des sols sableux fins et grossiers de la région de Manga

Types de surfaces élémentaires	Sols sableux fins et grossiers cultivés							
	à plus de 75 % de leur surface			entre 50 et 75 % de leur surface			entre 25 et 50 %	
	KS 1	KS 2	KS 14	KS 4	LS 4	LS 11	KS 10	KS 13
C 1.1	2						1	
C 2.1	73	42	16	20	23	63	2	11
C 3.1	20	55	60	38	34		37	23
DES 1	3		4			37	5	33
DES 2				5	18			
DES 3		3	18	22	21		36	15
GRO 1				1				
GRO 3					4			
ST 2							1	
ERO	2		2	2			3	5
VERS 1				12			15	13
Couvert ligneux	7	6	3	8	11	12	4	9
Jachère	4	3	33	42	43	30	60	68
Couvert cultural	96	97	77	58	56	45	40	32

Tableau 4 : Classification générale des lignes et sections observées dans la région de Manga.

Superficie cultivée	Sols gravillonnaires à graveleux		Sols sableux fins et grossiers	Sols sablo- limoneux	Sols limono- argileux	Sols argileux vertiques
	sableux	argileux				
Supérieure à 75 %	KS 13 LL 17		KS 1, KS 2 KS 14			LS 6
Entre 50 et 75 %	LS 1		KS 14, LS 7 LS 4, KS 4 LS 9, LS 14	KS 12, KS 9 LS 10, LS 3 LS 13	LS 18	KS 11
Entre 25 et 50 %		KS 3, KS 7 LS 5	KS 10 KS 13	LS 3	LS 8 KS 8	LL 1 LS 2
Entre 0 et 25 %	KS 6, KS 13 LL 2	KL 7 LS 14		KL 16, KS 16 LS 16	KL 4, KS 5 KL 15, LL 12	

CONCLUSION

L'observation des sols et de leurs états de surface est une phase descriptive indispensable au développement de nouvelles technologies utilisant, à des fins hydrologiques, la télédétection et les nouveaux outils de représentation géographique que sont les Systèmes d'Information Géographique.

Par état de surface, il faut comprendre la couverture végétale, le type de sol, son organisation pédologique superficielle et son état d'humectation. La procédure d'observation des états de surface proposée, inspirée des travaux d'A. Casenave et C. Valentin (1989), a été normalisée et adaptée à une utilisation pour la cartographie numérique des images satellites, cette cartographie devant elle même permettre de caractériser la réponse des sols aux chutes de pluie.

L'expérience acquise en Afrique de l'Ouest (CIEH et al., 1992) nous permet d'émettre quelques recommandations pour la réalisation de ces observations.

Les observations pédologiques ne peuvent être effectuées correctement qu'en saison sèche, tant pour les profils pédologiques que pour les organisations superficielles. Sur les sols cultivés, celles-ci doivent être complétées par des observations de l'évolution des surfaces, pendant la saison des pluies, au cours du cycle cultural. A défaut d'observations en saison des pluies, on procédera à des enquêtes sur les techniques culturales et sur le calendrier des travaux agricoles.

Les observations de la couverture végétale devraient être effectuées à différentes périodes végétatives, de manière à quantifier les modifications de la strate herbacée en fonction de sa localisation dans le paysage. Elles sont généralement couplées avec les observations pédologiques et effectuées en cours de saison sèche. Cependant, les observations effectuées en saison sèche ne suffisent pas à donner un aperçu de la variabilité temporelle du couvert herbacé, variabilité qui peut être très forte en zone tropicale sèche suffisamment humide (800 à 1000mm).

Au cours de la saison des pluies, l'humidité des sols varie en fonction de la chronique des pluies et de la position topographique du sol sur le versant. Elle est rarement observée mais il serait utile qu'elle le soit, plus particulièrement dans les bas-fonds susceptibles d'engorgement, par submersion pour les bas-fonds sahéliens, par remontée des nappes aquifères pour les bas-fonds soudaniens.

Enfin l'état de surface d'un sol est rarement figé une fois pour toute. Pour être utilisée à des fins de modélisation hydrologique, la cartographie des états de surface, généralement établie à partir d'observations effectuées en saison sèche à une date donnée, devra être complétée par des informations portant sur la variabilité des états de surface au cours de la saison des pluies, ou au fil des ans sous l'influence des hommes. Cette variabilité qui devra être introduite dans la modélisation hydrologique.

BIBLIOGRAPHIE

Casenave A. & Valentin C. (1989) - Les états de surface de la zone sahélienne. Ed. ORSTOM, Collection Didactiques, 227 p.

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM, BUNASOLS (1992) - Etude hydrologique avec traitement d'images de neuf bassins versants de petits barrages au Burkina Faso.

Tome 1 : Rapport général, 1^{ère} partie, 71 p. et 54 annexes.

Tome 2 : Rapport général, 2^{ème} partie : 72-107, 74 annexes.

Tome 3 : Annexes méthodologiques : 191 p.

Lamachère J.M. et Puech C. (1995) - Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord-soudanicenne. In : Régionalisation en hydrologie, application au développement; édit. scient. L. Le Barbé et E. Servat. Actes des VIII^{es} journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 22-23 septembre 1992; ORSTOM Editions, colloques et séminaires : 205-228.

Rodier J., Meunier M., Puech C. (1984) Le point sur les méthodes de calcul des débits de crues décennales en Afrique de l'Ouest et Centrale. Bull. de liaison du CIEH n°58, Ouagadougou, 2-9.

TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

Jean-Marie LAMACHERE*, Christian PUECH**

*Laboratoire d'hydrologie, Centre ORSTOM, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

**L.C.T. CEMAGREF / ENGREF, 500 rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5 - France

Résumé

L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface permet d'envisager aisément une extension spatiale de la caractérisation de l'aptitude des sols à l'infiltration et au ruissellement en Afrique de l'Ouest. Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées dans cette région ont en effet montré l'influence déterminante de trois facteurs principaux sur le comportement hydrique des sols : le type de sol, le couvert végétal et l'organisation superficielle du sol (Casenave et Valentin, 1989).

A partir des observations de terrain décrivant les états de surface, la procédure cartographique proposée (Lamachère et Pucch, 1995) consiste à réaliser deux décodages des images satellites.

Un décodage primaire définit trois plans thématiques :

- un plan *végétation* élaboré sur la base de classes de densité du couvert végétal,
- un plan *sols*, différenciant les sols par leur granulométrie superficielle,
- un plan *occupation du sol*, séparant les zones cultivées des zones non cultivées.

Un décodage secondaire permet de caractériser chaque classe radiométrique, résultant du traitement numérique des images, par leur composition en surfaces élémentaires types. Pour chaque classe radiométrique, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en surfaces types élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain.

Le croisement, dans un Système d'Information Géographique, des trois plans thématiques issus du décodage primaire permet également, selon une procédure analogue au décodage secondaire, la cartographie d'unités hydrologiques homogènes caractérisées, grâce aux observations de terrain, par leurs compositions en surfaces élémentaires. L'hypothèse forte selon laquelle les critères secondaires (composition en surfaces types élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires doit être validée. Au cas où elle ne le serait pas par la prise en compte des trois critères primaires, il faudrait y ajouter un autre critère suffisamment discriminant, par exemple le relief.

INTRODUCTION

A l'issue de la phase de description au sol des états de surface, nous disposons d'un échantillon de points, de lignes ou de sections décrivant, à une date donnée, l'ensemble des zones apparaissant identiques sur l'image satellitaire. La description au sol de la répartition des surfaces élémentaires types va nous permettre de modéliser le comportement hydrologique des états de surface à partir de la connaissance acquise sur le fonctionnement des surfaces élémentaires grâce aux opérations de simulation de pluie menées en Afrique de l'Ouest par les hydrologues et les pédologues de l'ORSTOM (Casenave et Valentin, 1989).

La phase suivante consiste à réaliser une carte des états de surface, avec sa légende, opérations pour lesquelles nous proposons une procédure bien adaptée à l'utilisation de l'imagerie satellitaire et à la cartographie numérique, mais qui peut également être utilisée pour la photo-interprétation. La cartographie est en effet une opération totalement manuelle, entièrement numérique ou réalisée par un panachage des deux méthodes.

Nous présentons successivement la cartographie des états de surface par photo-interprétation, en prenant comme exemple le bassin versant de la mare d'Oursi au nord du Burkina Faso (Lamachère 1987), puis la cartographie par traitement numérique des images satellitaires en prenant comme exemple le bassin versant du barrage de Louré dans la région de Manga au centre-sud du Burkina Faso (CIEH et al. 1992).

La cartographie entièrement numérique aboutit à la création de classes radiométriquement homogènes. Chaque pixel de l'image satellitaire appartient à l'une des classes définies par l'analyse numérique. L'aspect de la carte des états de surface présente, dans ce cas, un aspect pointilliste. La légende de la carte et le fonctionnement hydrologique des états de surface sont alors définis pour chaque classe radiométrique.

La cartographie manuelle, même si elle s'appuie sur une analyse numérique préalable des images satellitaires, aboutit à la définition d'unités cartographiques ou d'unités hydrologiques "homogènes". La légende de la carte et le fonctionnement hydrologique des états de surface sont alors définis pour chaque unité cartographique.

Dans les deux cas, la modélisation hydrologique des écoulements à l'échelle des versants et des bassins versants pose des problèmes de saut d'échelle que nous aborderons dans la conclusion.

PRINCIPES FONDAMENTAUX

La procédure cartographique

Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées en Afrique de l'Ouest ont mis en évidence l'influence déterminante de trois facteurs principaux sur le comportement des sols à l'infiltration et au ruissellement (Casenave et Valentin, 1989) : le type de sol, le couvert végétal et l'organisation pédologique superficielle.

En zone de savane humide ($800 < P < 1\ 600\ mm$)

La couverture pédologique, la strate herbacée et les organisations superficielles du sol jouent des rôles équilibrés sur l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. Le fonctionnement hydrique des sols y est donc complexe, sujet à des variations saisonnières importantes.

La couverture végétale étant souvent abondante, la cartographie des types de sols se fera souvent à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

En zone de savane sèche ($400 < P < 800\ mm$)

La strate herbacée et les organisations superficielles du sol semblent seules déterminer le comportement hydrodynamique superficiel des sols. Le pourcentage de couverture végétale est le principal facteur explicatif du ruissellement et de l'infiltration. Pour une pluviométrie inférieure à 800 mm, la couverture végétale étant de faible densité, la cartographie des sols pourra être établie sans utiliser un MNT.

En zone sahélienne sèche ($200 < P < 400\ mm$)

Le couvert végétal herbacé se raréfie; à la fois moins dense et plus fugace, il perd son rôle primordial au profit des organisations pédologiques superficielles.

En zone subdésertique ($P < 200\ mm$)

Seules les organisations pédologiques superficielles conditionnent l'infiltrabilité des sols.

Quelle que soit la zone considérée, la cartographie des états de surface consiste finalement à réaliser dans un premier temps trois cartes distinctes :

- une carte des sols,**
- une carte du couvert végétal,**
- une carte de l'occupation des sols.**

Dans une seconde étape on procède à la caractérisation du fonctionnement hydrologique des classes radiométriques ou des unités cartographiques en réalisant un **décodage secondaire de l'image**. Ainsi, pour chaque pixel de l'image satellite, ou pour chaque unité cartographique définie par le traitement de l'image, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en surfaces types élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain. Ce faisant, nous partons de l'hypothèse que les critères secondaires (composition en surfaces types élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires dans le contexte du bassin versant étudié. Cette hypothèse forte doit être validée. Au cas où elle ne le serait pas, un autre critère suffisamment discriminant devra être utilisé, par exemple le relief.

Les états de surface et leur comportement hydrologique

La cartographie des états de surface d'un bassin versant a pour objectif la modélisation hydrologique et la reconstitution des apports et des crues des marigots formant le réseau hydrographique du bassin. La légende cartographique doit associer une description normalisée de la surface des sols aux mesures de ruissellement réalisées par des expériences de simulation de pluie, entreprises en Afrique de l'Ouest, au cours de la décennie 1980-1989, par les hydrologues et les pédologues de l'ORSTOM.

La maniabilité du mini-simulateur de pluies a permis en effet de mesurer le ruissellement sur des parcelles élémentaires (1m^2), sur un grand nombre de sites expérimentaux localisés en zones sahélienne et soudanienne au Sénégal, au Burkina Faso, au Niger, en Côte d'Ivoire et au Togo. L'ouvrage intitulé "Les états de surface de la zone sahélienne", réalisé par A. Casenave et C. Valentin (1989), fournit une clef de détermination des principaux types de surfaces élémentaires avec leur description ainsi que les relations hydro-pluviométriques qui leur sont associées.

La fonction de production à l'échelle élémentaire

La formulation générale de la fonction de production d'une surface élémentaire, proposée par Casenave et Valentin est la suivante :

$$Lr = (a + b IK) Pu + c IK - d \quad (1)$$

Avec : Lr : lame ruisselée (mm),

Pu : pluie utile (mm),

IK : indice des précipitations antérieures correspondant à un indice d'humectation,

a, b, c, d : paramètres caractéristiques du sol et de son état de surface.

Ce type de relation n'est utilisable que pour de fortes averses correspondant aux protocoles expérimentaux utilisés en simulation de pluie. Pour les averses aux intensités pluviométriques complexes, inférieures puis supérieures à la capacité d'infiltration du sol, nous proposons d'utiliser la notion d'intensité de pluie limite du ruissellement pour définir la pluie utile (Pu) de la relation n° 1. La pluie utile (Pu) est définie comme la hauteur pluviométrique de l'averse correspondant à des intensités (IP) supérieures à l'intensité de pluie limite du ruissellement (Il).

$$Pu = \sum_{\Delta t} (IP) \quad \text{pour } IP > Il \quad (2)$$

L'intensité de pluie limite du ruissellement varie entre une valeur maximale (Il_0) lorsque le sol est sec ($IK = 0$) et une valeur minimale (Il_{\min}) lorsque le sol est saturé sur une certaine profondeur ($IK > 50$ mm). Les valeurs minimales sont souvent très proches, pour les sols non encroûtés, des valeurs de la conductivité hydraulique des sols à saturation (Ks). Les valeurs maximales et minimales de l'intensité de pluie limite du ruissellement sont fournies dans le catalogue des états de surface de la zone sahélienne.

Agrégation à l'échelle des unités cartographiques

A l'échelle des unités cartographiques, on définit le **potentiel de ruissellement** de cette unité comme la somme des lames ruisselées à l'échelle élémentaire. En tenant compte de la possibilité d'existence de plusieurs pluviomètres sur le bassin versant, la formulation mathématique du potentiel de ruissellement prend la forme de la relation n° 3.

$$PR_u = \sum_{n,i} (\alpha_{n,i,u} * Lr_{n,i,u}) \quad (3)$$

Avec : $Lr_{n,i,u} = Lr_{n,i}$ de la relation (1)

PR_u est le potentiel de ruissellement de l'unité hydrologique u ,

$Lr_{n,i,u}$ est la lame ruisselée de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n sur l'unité hydrologique u ,

$\alpha_{n,i,u}$ est le coefficient de pondération de la surface élémentaire i .

Pendant une durée variable au cours de la saison des pluies (une à plusieurs semaines) on peut associer à chaque unité hydrologique une liste de surfaces élémentaires et leurs coefficients de pondération qui correspondent à la composition des unités hydrologiques en surfaces élémentaires types. La composition en surfaces élémentaires types d'une même unité hydrologique est en effet susceptible d'évoluer au cours de la saison des pluies. Dans ce cas, on modifie la liste des types de surfaces élémentaires et leurs coefficients de pondération en fonction du développement de la végétation et du calendrier cultural (Lamachère, 1994).

La formulation proposée ci-dessus (relations 1 à 3) est donc très générale. Elle permet, par le calcul de la pluie utile, de ne faire intervenir que des intensités pluviométriques susceptibles de ruisseler. Elle permet également, si on dispose de plusieurs pluviomètres sur le bassin versant, de rattacher les états de surface aux différents pluviomètres en fonction de leurs localisations.

Ainsi calculée, la lame ruisselée doit être considérée comme une moyenne pondérée des ruissellements à l'échelle élémentaire. On opère ici un changement d'échelle du comportement hydrologique puisqu'on passe d'une référence implicite de 1 m^2 (taille de la mesure en simulation de pluies), au comportement hydrologique d'une surface beaucoup plus grande, celle d'un versant ou d'une partie de versant. La lame ruisselée à la nouvelle échelle n'est pas la somme des lames ruisselées élémentaires. La plupart du temps elle lui sera inférieure, d'où son appellation de potentiel de ruissellement.

CARTOGRAPHIE PAR PHOTO-INTERPRETATION

La cartographie des états de surface par interprétation des photographies aériennes a été développée par C. Valentin sur de nombreux bassins versants d'Afrique de l'Ouest. Il y consacre huit pages du *catalogue des états de surface* (pages 147 à 154). La cartographie des états de surface par photo-interprétation des images satellitaires a été développée par J.M. Lamachère (1987) dans la région d'Oursi, au nord du Burkina Faso, en zone sahélienne sèche. Celui-ci a établi manuellement la carte des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols de la région d'Oursi, avant de procéder à une analyse numérique des images SPOT.

La représentation cartographique nécessite l'identification d'unités définies par leurs caractéristiques, celles-ci devant être communes à plusieurs points, plusieurs lignes ou plusieurs sections. La première phase consiste donc à regrouper les points, les lignes ou les sections en fonction de critères correspondant à l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. La seconde phase consiste à tracer les limites de chaque unité cartographique.

La classification des observations

L'expérience acquise en Afrique de l'Ouest (CIEH et al., 1990) nous permet de retenir l'ordre hiérarchique suivant :

- **En zone sahélienne** : le type de sol (1), les sols nus (2) puis la mise en culture (3) et le taux de couvert herbacé (4).
- **En zone soudano-sahélienne** : le type de sol (1), le taux de mise en culture (2), les sols nus (3) et le couvert ligneux (4).
- **En zone soudanienne** : le type de sol (1), le taux de mise en culture (2) et le couvert ligneux (3).

Chaque unité cartographique doit être définie en fonction des surfaces élémentaires qui la composent. Les tableaux de synthèse des observations regroupent, dans des classes croisant les 2 à 4 critères précédents, dans l'ordre hiérarchique des zones géographiques, tous les points, lignes et sections présentant les mêmes caractères. Le regroupement des observations permet d'établir la composition moyenne d'une classe en surfaces types élémentaires. Cette composition moyenne équivaut à un diagramme de répartition. Cependant, pour qu'une classe ainsi définie corresponde à une unité cartographique, il est indispensable que cette classe puisse être identifiée sur les photographies aériennes ou sur les compositions colorées de l'image satellitaire.

Tableau 1 : Classification générale des lignes observées dans la région d'Oursi (zone sahélienne).

Géomorphologie		Buttes, crêtes et massifs	Glacis arénacés	Formations éoliennes	Glacis argileux	Bas-fonds
Sols nus encroûtés à	Couvert herbacé	Sols à éléments grossiers	Sols à sables grossiers	Sables fins	Sols argileux	Sols vertiques
moins de	0 à 10 %			Erg vif, C 2 C 3, C 4		
10 %	Sup. à 50 %			B6, B7, B9, B 10 O 1, O 2, O 10		B 4
de 10	30 à 50 %			O 7, D 1		
à 20 %	Sup. à 50 %			O 5, O 14, G 1		
20 à 30 %	30 à 40 %			O 11		
30 à 50 %	0 à 20 %			C 1, O 6		
50 à 60 %	30 à 40 %		B 3			
60 à 80 %	20 à 30 %		G 5, G 4	O 12	B 5	
80 à 90 %	10 à 20 %	K 11	G 2, D 2	B 8	K 3, K 2	
90 à 100 %	inf. à 10 %	O 13, K 12 D 10	D 5, B 2 D 7, D 8		K 6, G 3 B 1, D 3	

Le tracé des unités cartographiques

Le tracé des limites de chaque unité cartographique doit être possible à partir des seuls documents disponibles : relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, etc.. Il est facilité par les relations topographiques entre les différentes unités. Comme pour la couverture pédologique, la distribution des états de surface est spatialement ordonnée. La mise en évidence d'un tel ordre et sa compréhension phénoménologique limitent considérablement les risques d'erreurs.

Dans la phase de photo-interprétation, il est nécessaire de s'imposer certaines règles rigoureuses : à chaque groupe de points, lignes ou segments de sections, correspond un type de grisé sur la photographie aérienne ou une combinaison de couleurs sur l'image satellitaire.

Les relations établies entre les points d'observation, les lignes ou les sections, et les types de grisé ou l'agencement des couleurs de la composition colorée, doivent être énoncées. Cette clef d'interprétation permet de dresser le document cartographique.

Exemple du bassin versant de la mare d'Oursi

Le paysage de la région d'Oursi (figure 1) se subdivise en quatre grands ensembles géomorphologiques qui définissent le type de sol (critère 1):

- le système dunaire qui comprend l'erg ancien, l'erg récent et les jupes sableuses,
- les massifs rocheux, buttes cuirassées et inselbergs granitiques,
- les glacis qui se distinguent les uns des autres par leur recouvrement minéral,
- les bas-fonds, les thalwegs et les mares formant le réseau hydrographique.

L'examen visuel des images SPOT, prises dans la région d'Oursi au cours de l'hivernage 1986, montre que les grands ensembles géomorphologiques peuvent être décomposés en zones visuellement homogènes par leur composition colorée, la taille des éléments qui les constituent, leur texture et leur structure. Dix unités cartographiques ont été finalement définies par photo-interprétation de l'image SPOT du 4 septembre 1986 (Lamachère, 1987). Elles sont présentées sur la figure 2.

Unité 1 (H1) : Sable vif de l'erg récent et champs sarclés sur sables fins très épais. La couleur de l'image est jaune très clair à blanche sur les sables vifs et les champs sarclés.

Unité 2 (H2) : Sables fins très épais couverts à moins de 10 % de sols nus encroûtés, champs non sarclés. La couleur de l'image est jaune rosé avec de petites taches, rouges à grises, dispersées, représentant le couvert végétal ligneux réparti en petits îlots conférant à l'ensemble un aspect moutonné.

Unité 3 (H3) : Sables fins de l'erg ancien ou des jupes sableuses, couverts à plus de 10 % et moins de 25 % par des sols nus encroûtés. La couleur de l'image varie du jaune clair au rouge foncé selon la position topographique de la surface et l'abondance du couvert végétal herbacé. L'unité est caractérisée par une ébauche de réseau hydrographique et l'apparition de lignes rouges discontinues.

Unité 4 : Sables fins couverts à plus de 25 % et moins de 50 % par des sols nus encroûtés (H5), erg ancien ou jupes sableuses) et glacis recouverts à plus de 30 % par des sables fins bien enherbés (H6).

Sur l'erg ancien ou sur les jupes sableuses, la couleur dominante de l'image reste jaune rosé mais des plaques vertes apparaissent correspondant sur le terrain à l'existence de sols rubéfiés très encroûtés. Sur les glacis, la couleur de l'unité est verte parcourue de taches jaunes et roses nombreuses, réunies les unes aux autres.

Unité 5 (H7) : Glacis couverts entre 15 % et 30 % de sables fins bien enherbés. Sur les glacis arénacés, aux sols issus de la décomposition des granites, la couleur de l'image est jaune très clair légèrement teintée de rose ou parsemée de quelques taches roses discontinues. Sur les glacis argileux, aux sols issus de roches métamorphiques ou de roches vertes, la couleur de l'image est vert sombre, parsemée de quelques taches jaunes et roses discontinues.

Unité 6 (H8) : Glacis couverts à moins de 15 % de sables fins. Les taches roses sur les glacis arénacés, jaunes et roses sur les glacis argileux sont ici d'importance plus limitée que sur l'unité 5 et les couleurs de l'unité tendent à s'uniformiser vers le jaune clair pour les glacis arénacés, vers le vert sombre pour les glacis argileux et pierreux.

Unité 7 (H8) : Glacis argileux sur sols bruns sans végétation herbacée ou couvert à plus de 60 % par des gravillons ferrugineux enchâssés dans une pellicule structurale. La couleur de l'image est vert sombre uniforme, rayée de traits rouges et continus, marquant le réseau de drainage.

Unité 8 (H10) : Les massifs rocheux. La couleur est ici presque noire. Les formes sont massives et leurs bords festonnés.

Unité 9 (H9) : Les bas-fonds. La couleur de l'image est rouge foncé à gris foncé. Les formes sont linéaires et filamenteuses, de largeur croissante en direction de la mare d'Oursi près de laquelle elles s'épanouissent en larges bandes.

Unité 10 : La mare d'Oursi. La couleur de l'image est rouge foncé, localement noire ou bleue. La forme est compacte, allongée avec une orientation sud-ouest à nord-est.

Une légende est associée à la figure 2 et à la cartographie numérique de l'image SPOT (Figure 3) de septembre 1986. Cette légende fournit les relations hydro-pluviométriques moyennes correspondant à de fortes averses. Pour les averses plus faibles, il faudrait utiliser la notion de pluie utile, revenir aux relations établies à l'échelle des surfaces élémentaires et aux répartitions des surfaces élémentaires types sur les unités cartographiques.

CARTOGRAPHIE PAR TRAITEMENT NUMERIQUE

Méthodologie générale

Chaque objet au sol réfléchit, absorbe ou retransmet, une partie de l'énergie solaire qu'il reçoit. La télédétection passive analyse l'énergie lumineuse réémise par ces objets en fonction de leurs caractéristiques propres. Les capteurs des satellites d'observation de la terre transforment en niveaux de gris l'énergie échantillonnée en chaque point de l'image. Cette énergie dépend du domaine spectral de sensibilité de chaque capteur et chaque point élémentaire de l'image (pixel) représente une tache au sol dont la dimension est fonction de la résolution géométrique du capteur (100 à 400 m² pour le satellite SPOT, 900 m² pour LANDSAT TM).

Les différences d'émission des objets au sol, en qualité spectrale et en intensité radiométrique, permettent de les distinguer. **Par référence aux objets reconnus et localisés au sol avec précision, il est possible de réaliser une cartographie thématique en supposant que les mêmes objets provoquent le même type d'émission.** Une cartographie thématique peut ainsi être élaborée. Par exemple, des objets tels que le sol et la végétation présentent des réflectances (énergie rayonnée / énergie incidente) particulières selon la longueur d'onde incidente, leur état d'humidité, leur couleur et leur rugosité. En télédétection, le but du traitement d'image est d'utiliser au mieux les différences caractérisant chaque objet pour améliorer la lisibilité de l'image.

Une cartographie thématique doit s'astreindre au respect de certaines contraintes :

- une première contrainte d'**indépendance** de la méthode vis-à-vis de la région étudiée,
- une contrainte d'**optimisation** du traitement utilisant l'ensemble des informations disponibles,
- une contrainte de **validation** de la cartographie par la reconnaissance des objets au sol,
- une contrainte d'évaluation de la validité spatiale de la cartographie (précision et extrapolation hors de la zone à cartographier).

La contrainte de validation par la reconnaissance des objets au sol nous impose une localisation très précise, sur l'image satellitaire, des observations de terrain. Nous allons donc commencer par décrire cette première opération.

Localisation des lignes et sections

La carte topographique reste un document de base indispensable à toute cartographie par télédétection. Il convient donc de rassembler les cartes topographiques les plus récentes de la zone à cartographier. Lorsqu'une carte à grande échelle (1/50 000) n'existe pas, il est parfois nécessaire, pour les bassins versants de superficie inférieure à 50 km², d'en faire établir une par photo restitution. Les photographies aériennes sont elles mêmes très utiles pour la localisation des observations au sol.

Le protocole des observations de terrain est construit de telle sorte que les points et lignes soient localisées à proximité de pistes ou de chemins identifiables sur les photographies aériennes et dessinés sur les cartes topographiques. Les sections sont implantées sur des pistes carrossables dont certains tronçons peuvent être reconnus directement sur les images satellitaires.

Le début, ou la fin, d'une ligne ou d'une section est le plus souvent localisé à partir d'un repère facilement identifiable sur la carte topographique, la photographie aérienne et l'image satellitaire (croisement de pistes, d'une piste et d'un marigot, bâtiment, construction).

Après un calage de l'image satellitaire d'après la carte topographique, pour tenir compte de la déformation des pixels due à une inclinaison de l'angle de prise de vue et pour situer le nord géographique et le nord magnétique, il est possible, à partir des coordonnées géographiques relevées au GPS (Global Position System), et des directions relevées à la boussole, de faire tracer automatiquement les lignes et les sections sur l'image satellitaire. Traçages manuel ou automatique nécessitent un contrôle de la localisation des lignes et sections par confrontation avec la carte topographique et les photographies aériennes.

Décodage primaire des images

Technique

La technique de classification des images est maintenant très classique. Elle comprend les étapes suivantes :

- La création de néocanaux (indice de végétation, indice de brillance, indice de couleur des sols) permet d'éliminer les effets de paramètres perturbateurs tels que l'effet atmosphérique ou l'humidité. A partir des observations au sol, l'indice de végétation peut être directement relié au couvert végétal ou à la biomasse végétale (figures 4 et 5).

- La constitution de classes radiométriques ayant une signification thématique. Dans ce but, chaque section et chaque ligne sont caractérisées par leur signature spectrale à l'aide des néocanaux. Les classes radiométriques sont ensuite constituées en fonction du thème qui doit être dégagé. La vérification de la cohérence des classes est réalisée sur des nuages bidimensionnels (figures 6 et 7). La classification proprement dite est faite avec des logiciels de traitement d'image proposant diverses techniques (maximum de vraisemblance, nuées dynamiques, centres mobiles).

- La validation des résultats est effectuée sur des matrices de confusion. Cette opération critique peut conduire à une redéfinition des échantillons et à une nouvelle classification. Elle peut également conduire à une redéfinition des néocanaux.

Pour la cartographie des états de surface, on réalise successivement trois classifications thématiques qui définissent trois plans:

- un plan "végétation" élaboré sur la base de classes de densité du couvert végétal,
- un plan "sols" différenciant les sols par la taille et la nature des éléments à la surface du sol : cuirasses, affleurements rocheux, blocs, graviers, sables grossiers, sables fins, limons et argiles,
- un plan "occupation du sol" séparant les zones cultivées des zones non cultivées.

Le plan "végétation"

Il est généralement possible de définir 5 à 6 classes de couvert végétal. En zones sahélienne et tropicale sèche, le seuil de perception de la végétation est très bas. Dans ces régions, il est possible de subdiviser les faibles couverts végétaux (0 à 25 %) en sous-classes à très faible pourcentage de recouvrement (0 à 5 % et 5 à 15 %). Des classes complémentaires (eau, brûlis, massifs rocheux) doivent être définies pour tenir compte des pixels qui sortent de la classification générale propre à la végétation. Ainsi, pour le bassin versant du barrage de Louré, dans la région de Manga au Burkina Faso, nous avons défini (CIEH et al., tome 7, 1990) 13 classes différentes de recouvrement végétal :

- A1 avec un taux de recouvrement végétal inférieur à 2 %,
- A2 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 2 et 5 %,
- A3 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 5 et 15 %,
- A4 avec un taux de recouvrement végétal compris entre 15 et 40 %,
- A5 avec un taux de recouvrement végétal supérieur à 40 %,
- A6 et A10 correspondant au plan d'eau du barrage de Louré,

- A7 et A13 pour les zones de brûlis,
- A8 pour les sols nus, sans végétation,
- A9 pour les bas-fonds
- A11 pour la forêt et A12 pour le forêt claire.

L'image traitée est ici une image Landsat TM de début de saison sèche (18 décembre 1988). Pour la cartographie des états de surface, plusieurs classes ont été regroupées, ce qui permet de réduire le nombre des classes à 6.

Le plan "sols"

Les types de sols, au nombre de 6 d'après la codification utilisée pour la description des états de surface, décrivent essentiellement la granulométrie superficielle. Or, sur les relevés de terrain, la description de la granulométrie des sols, sur les lignes et les sections, se présente sous la forme de mélanges aux pourcentages connus (75 % de Sables fins et grossiers, 20 % de Limons et argiles, 5 % de Gravillons). Des groupes de types de sols ont donc été constitués en conservant les 2 éléments dominants de la description. Dans l'exemple précédent, la codification du groupe serait la suivante : 75 S - 20 L.

Sur les sections, l'homogénéité des sols a été recherchée sur des longueurs supérieures à 200 mètres avec des différences inférieures à 10 % dans les pourcentages granulométriques. La classification des observations de terrain conduit généralement à distinguer une dizaine de classes parmi lesquelles un certain nombre seront conservées à l'issue du traitement numérique de l'image.

La classification de l'image Landsat du 18 décembre 1988 sur le bassin versant du barrage de Louré a permis de distinguer 7 classes de types de sols avec 4 classes supplémentaires non reliées directement à un type de sol :

- 1 les brûlis,
- 2 le plan d'eau en amont du barrage de Louré,
- 3 les cultures irriguées,
- 4 la forêt,
- 5 les sols grossiers, à plus de 70 % de couverture grossière,
- 6 les sols limono-argileux,
- 7 les sols sablo-limoneux (S50 - L50),
- 8 les sols sableux à éléments grossiers (S50 - G50),
- 9 les sols gravelo-limono-argileux avec blocs de cuirasse (BLG),
- 10 les sols gravelo-limono-argileux sans blocs de cuirasse (GL),
- 11 les sols sableux à plus de 70 % de couverture sableuse.

Le plan "occupation du sol"

Dans la description des lignes et des sections, l'occupation du sol est caractérisée par trois termes différents : culture, jachère ou nature. La définition théorique des classes est réalisée en combinant ces trois termes deux à deux et en créant des classes à un seul terme si celui-ci couvre au moins 70 % de la surface du sol. On aboutit ainsi à définir 9 classes d'occupation du sol auxquelles on peut ajouter la classe habitat si celui-ci occupe des superficies importantes du bassin versant.

A l'issue de la classification numérique de l'image on ne retient généralement qu'un nombre limité de 4 à 5 classes différentes qui tiennent compte du type dominant d'occupation du sol. Sur le bassin versant situé en amont du barrage de Louré, 4 classes d'occupation du sol ont été retenues :

- 1 cultures,
- 2 nature,
- 3 brûlis,
- 4 plan d'eau en amont du barrage de Louré.

Décodage secondaire des images

Cette étape vise à caractériser la composition des classes radiométriques, résultant du traitement numérique des images, en types de surfaces élémentaires caractérisant le fonctionnement hydrologique superficiel des sols. En partant de l'hypothèse que les critères secondaires (composition en surfaces élémentaires types) sont corrélés de manière stable aux critères primaires (sol, végétation, occupation du sol), deux procédures peuvent être utilisées pour le décodage secondaire de l'image : une utilisation des classifications numériques en combinant les 3 plans élémentaires pixel par pixel ou une cartographie d'unités hydrologiques homogènes, en associant manuellement ou automatiquement les pixels aux propriétés hydrologiques très voisines.

Classification numérique

Pour chaque pixel de l'image, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en surfaces types élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain. Cette procédure conduit à caractériser le fonctionnement hydrologique de chaque pixel indépendamment des pixels qui l'entourent.

Cartographie des unités hydrologiques homogènes

Cette procédure diffère de la précédente en ce que l'opérateur définit des unités cartographiques spatialement homogènes. L'opération peut être réalisée manuellement; dans ce cas elle ressemble à une photo-interprétation. Elle peut aussi être réalisée en associant les trois plans "végétation", "sols" et "cultures" dans un Système d'Information Géographique (SIG). Des opérations de dégradation de l'information permettent ensuite d'éliminer les pixels isolés, ou les petits groupes de pixels, et de rassembler dans une même classe les unités dont le fonctionnement hydrologique est identique.

La figure 7 présente le schéma général de cartographie des états de surface (unités hydrologiques homogènes) à l'aide d'un S.I.G. et la figure 3 le résultat d'une cartographie numérique d'unités hydrologiques homogènes sur le bassin versant de la mare d'Oursi.

Les corrélations définies entre critères primaires et critères secondaires conduisent, à l'issue de cette étape, à associer une composition en surfaces types élémentaires à tout pixel ou à toute unité cartographique. La cartographie des états de surface peut alors être considérée comme terminée. Cependant, l'hypothèse forte selon laquelle les caractères secondaires sont corrélés aux caractères primaires doit être validée.

Validations

On peut effectuer deux types de validation :

- une **validation géographique** sur les parcelles d'entraînement, en vérifiant que chaque pixel des parcelles d'entraînement (lignes et sections) se trouve ou non dans la bonne classe,
- une **validation statistique** sur les parcelles d'entraînement en comparant les histogrammes des parcelles d'entraînement aux histogrammes des classes.

Une bonne validation géographique entraîne généralement une bonne validation statistique, l'inverse n'étant pas vrai. Lorsque l'échantillon des observations au sol est suffisant, on valide également la classification, ou la cartographie, sur des parcelles de contrôle, non utilisées comme parcelles d'entraînement. L'utilisation des parcelles de contrôle permet de juger des possibilités d'extension de la cartographie.

Tableau 2 : Matrice de confusion des classes de types de sols sur le bassin versant de Manga (Burkina Faso, zone tropicale sèche)

Thèmes	Composition	Pourcentages de pixels bien classés radiométriquement											Effectif
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	Brûlis	97,9	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	703
2	Eau	0,5	98,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	382
3	Cult. irri.	0,0	0,0	86,3	0,4	0,4	8,4	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	227
4	Forêt	0,0	0,0	0,0	92,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	6,0	2,0	50
5	G	0,0	0,0	0,7	0,7	16,1	10,9	36,5	22,6	2,9	6,6	2,0	137
6	L	0,0	0,0	6,1	0,0	2,4	77,4	3,0	2,4	1,2	6,7	0,6	164
7	SL	0,0	0,0	0,9	0,9	2,4	1,3	67,7	7,5	5,1	5,4	8,6	467
8	GS	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	3,2	4,8	87,1	0,0	1,6	1,6	62
9	BLG	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	1,4	16,4	1,4	53,4	16,4	4,1	73
10	GL	0,0	0,0	6,7	0,0	4,4	4,4	8,9	1,5	6,7	62,2	5,2	135
11	S	0,0	0,0	0,2	0,4	1,0	2,0	26,2	3,5	1,5	8,9	55,4	202

Cette matrice montre une excellente identification des unités 1, 2, 3, 4 et 8, une assez bonne identification des unités 6, 7 et 10 mais une définition difficile pour les unités 9 et 11, très difficile pour l'unité 5 qui se confond avec les unités 7 et 8.

CONCLUSION

Les résultats obtenus sur la validation des 3 plans "sols", "végétation" et "occupation du sol" montrent qu'en zone sahélienne, les taux d'erreur sont faibles sur les plans "sols" et "végétation". Par contre il peut subsister des confusions gênantes sur certains types de sols, comme les sols sableux fins éoliens et les sols sableux arénacés de la région d'Oursi, qui n'ont absolument pas les mêmes aptitudes au ruissellement et à l'infiltration. Sur le bassin versant de la mare d'Oursi, ceux-ci n'ont pu être séparés que par localisation visuelle des nuages de points dans l'espace des néocanaux à partir d'une image de fin de saison des pluies.

Lorsque la végétation est abondante, la confusion entre classes de végétation, dont le recouvrement est supérieur à 40 %, est forte; mais elle ne prête généralement pas à conséquence pour la reconnaissance des états de surface. En zone tropicale sèche, sur les bassins fortement cultivés, ce sont les plans "sols" et "occupation du sol" qui présentent les taux d'erreur les plus faibles. Sur les bassins peu cultivés, le plan "sols" n'est plus utilisable car le couvert végétal recouvre totalement les sols et il faut faire appel au relief, par l'utilisation d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain), pour la reconnaissance des sols.

La reconnaissance directe des états de surface, à partir d'une classification radiométrique des images, conduit, dans la plupart des cas, à des taux de confusion trop faibles pour que la classification soit utilisable. Afin de cartographier avec une bonne fiabilité les états de surface, il semble donc nécessaire de procéder, de manière systématique, à un décodage primaire des images satellites en trois plans : "sols", "végétation" et "occupation du sol". La fusion de ces trois plans permet généralement d'établir une carte des états de surface avec une bonne précision. En zone tropicale sèche, lorsque le couvert végétal est abondant sur le bassin versant, le recours au relief pour la cartographie des sols devient indispensable.

La cartographie des états de surface constitue la première étape d'une modélisation spatialisée des ruissellements à l'échelle d'un bassin versant. La seconde étape consiste à tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle des averses.

La troisième étape comprend la prise en compte de l'évolution temporelle saisonnière des états de surface : développement de la végétation herbacée, travaux culturaux et encroûtement des sols cultivés, engorgement des sols de bas de pente à proximité des bas-fonds. La dernière étape consiste à modéliser d'une part le transfert des ruissellements de l'amont des versants jusqu'aux drains et d'autre part l'écoulement et les pertes dans le réseau hydrographique.

Au vu des résultats déjà obtenus, on peut soutenir avec raisons qu'une meilleure compréhension et une meilleure modélisation des processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants viendra d'une part d'observations sur l'évolution des états de surface et de leur comportement hydrodynamique, d'autre d'observations à l'échelle des versants aux sols relativement imperméables, perméables et très perméables et de l'analyse des conditions de rétention, d'écoulement et d'infiltration dans les réseaux hydrographiques. La généralisation du traitement des images satellites et l'emploi de modèles d'agrégation spatiale utilisant les SIG, devraient faciliter la modélisation de ces processus.

BIBLIOGRAPHIE

Casenave A. & Valentin C. (1989) - Les états de surface de la zone sahéenne. Ed. ORSTOM, Collection Didactiques, 227 p.

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM, BUNASOLS (1990) - Utilisation de la télédétection satellitaire pour la caractérisation hydrologique de neuf bassins versants au Burkina Faso.

Tome 1 : Bassin versant de Tiébélé.

Tome 2 : Bassin versant de Boukouma.

Tome 3 : Bassins versants de Gha et Sian.

Tome 4 : Bassin versant de Zeguedeguin.

Tome 5 : Bassin versant d'Ytenga.

Tome 6 : Bassin versant de Nagbangré et Oued Bila.

Tome 7 : Bassin versant de Louré (Manga).

CIEH, LCT CEMAGREF-ENGREF, ORSTOM, BUNASOLS (1992) - Etude hydrologique avec traitement d'images de neuf bassins versants de petits barrages au Burkina Faso.

Tome 1 : Rapport général, 1^{ère} partie, 71 p. et 54 annexes.

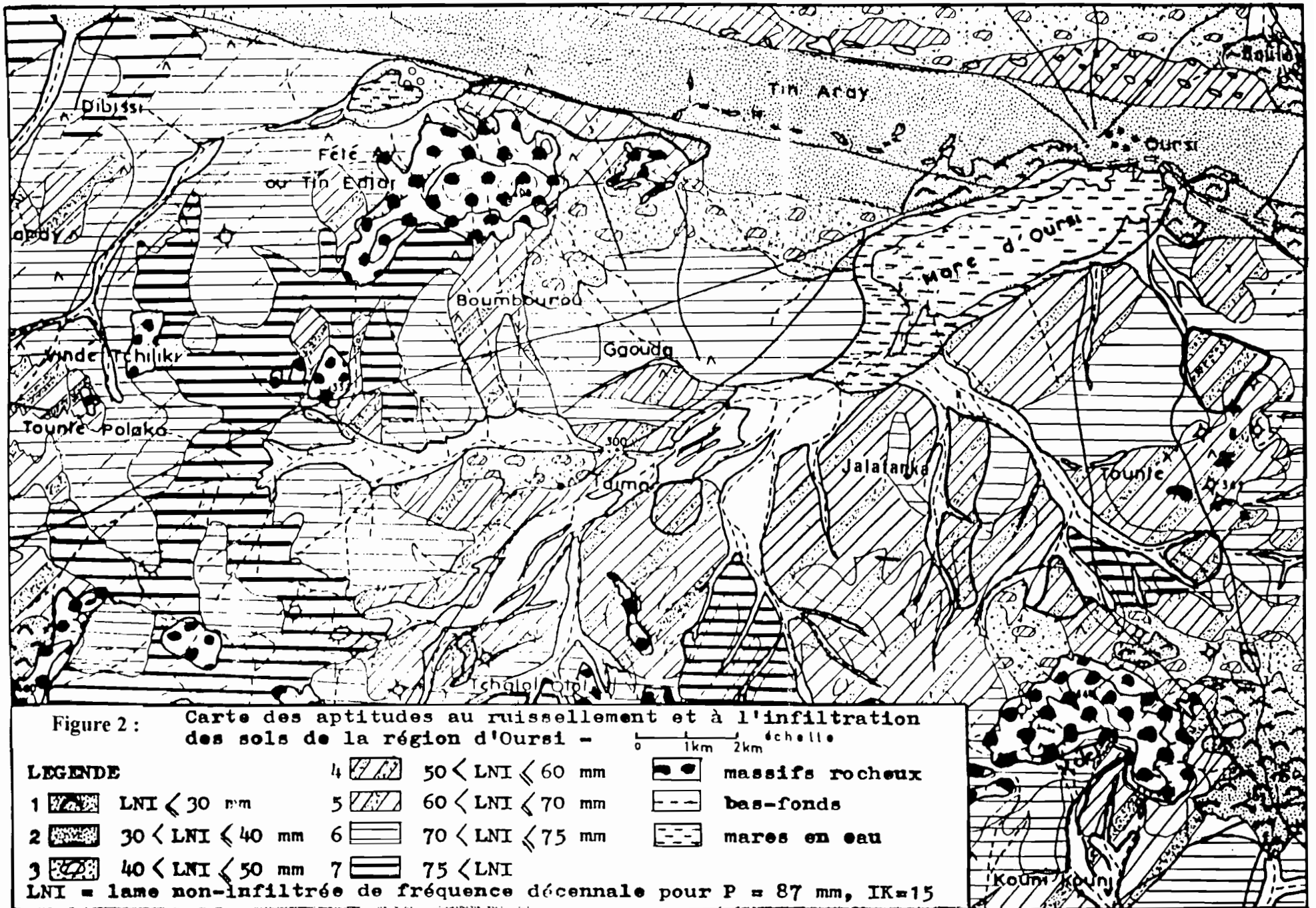
Tome 2 : Rapport général, 2^{ème} partie : 72-107, 74 annexes.

Tome 3 : Annexes méthodologiques : 191 p.

Lamachère J.M. (1987) - Cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols d'un bassin versant sahéen par interprétation des images SPOT : le bassin versant de la mare d'Oursi - Burkina Faso- In SPOT1 , utilisation des images, bilan, résultats, Paris novembre 1987, CEPADUES-EDITIONS : 41-51.

Lamachère J.M. (1994) - Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahéenne et soudanienne (Burkina Faso) : effets sur le ruissellement et sa modélisation. Communication aux neuvièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 13-14 septembre 1994, 11 p.

Lamachère J.M. et Puech C. (1995) - Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahéenne et nord-soudanienne. In : Régionalisation en hydrologie, application au développement; édit. scient. L. Le Barbé et E. Servat. Actes des VIII^{es} journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 22-23 septembre 1992; ORSTOM Editions, colloques et séminaires : 205-228.



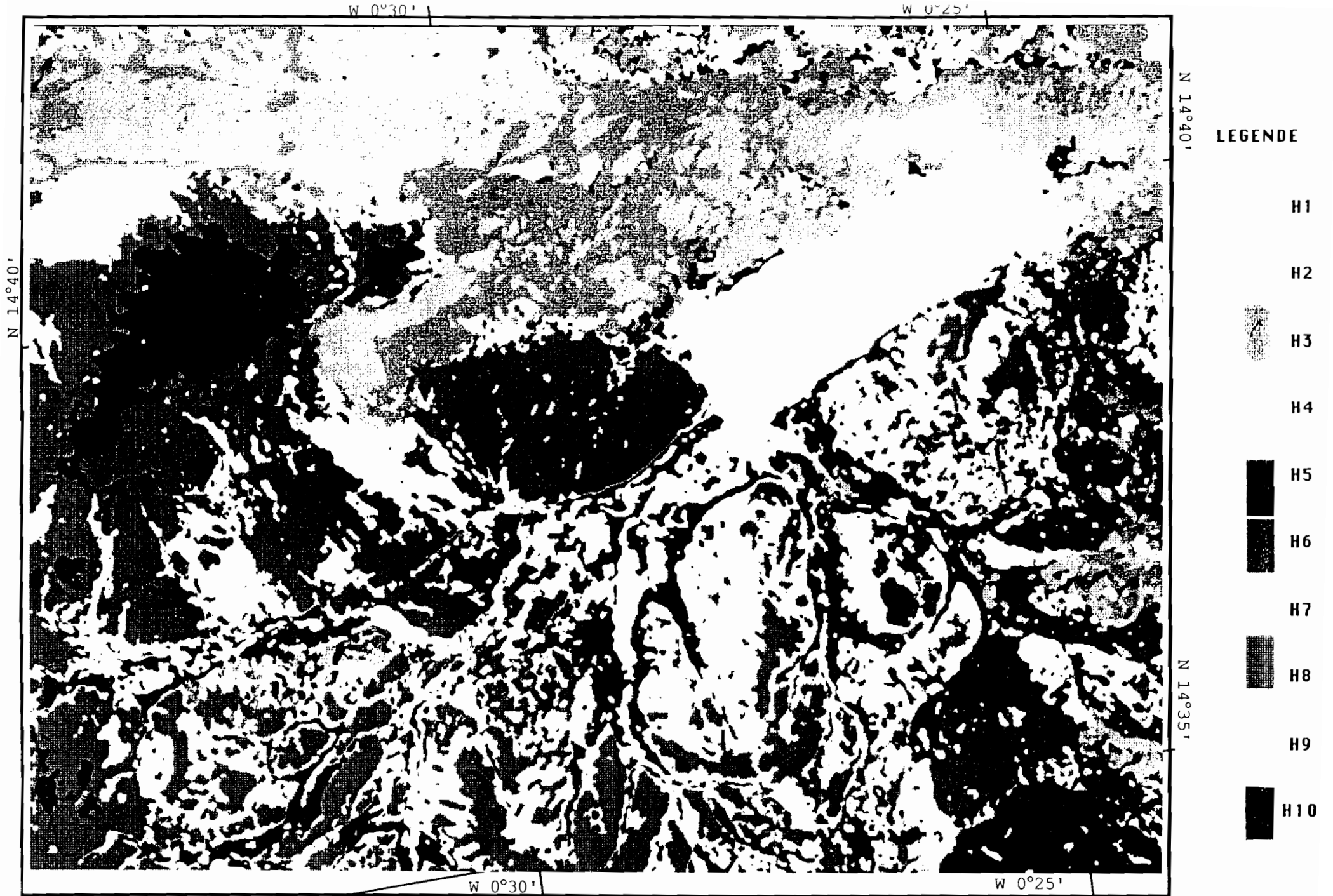


Figure 3 : Carte des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration de la région d'Oursi, traitement numérique.

0 2 3 km

LA CARTOGRAPHIE PAR ANALYSE NUMERIQUE DES IMAGES SATELLITAIRES

Cartes des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration de la région d'Oursi.

Légende

- H1 Erg vif et champs fraîchement sarclés sur sables fins épais.
-3
LR = $0,27P + 4,8.10^{-3} P.1K - 0,037 IK - 2,8$
Fréquence décennale LNI = 26 mm
Champs C2 et C4
- H2 Sables fins couverts à moins de 10 % par des pellicules plasmiques sans végétation.
-3
LR = $0,40 P + 3,5.10^{-3} P.1K + 0,009 IK - 5,1$
Fréquence décennale LNI = 34 mm
Champs C2, C3, C4 après 100 mm de pluies sur les sarclages
Lignes B6, B7, B9, B10, D1, G1, O1, O2, O10 et O14.
- H3 H4 Sables fins couverts à plus de 10 % et moins de 25 % par des pellicules plasmiques sans végétation.
-3
LR = $0,5 P + 3,2.10^{-3} P.1K - 0,008 IK - 4,0$
Fréquence décennale LNI = 44 mm
Lignes O5, O7, O11
- H5 - H6 Sables fins couverts à plus de 25 % et moins de 50 % par des pellicules plasmiques sans végétation.
Glacis recouverts à plus de 30 % de sables fins peu épais bien enherbés.
-3
LR = $0,60 P + 2,5.10^{-3} P. IK - 0,006 IK - 3,6$
Fréquence décennale LNI = 52 mm
Lignes O6, B1, B5, B5 champs C1
- H7 Glacis et jupes sableuses couverts à plus de 15 % et moins de 30% par la végétation herbacée ou par des sables fins bien enherbés.
-3
LR = $0,84 P + 0,9.10^{-3} P. IK + 0,16 IK - 9,7$
Fréquence décennale LNI = 67 mm
Lignes G3, G4, G5, K11, D2, B2
- H8 Glacis couverts à moins de 15 % par la végétation herbacée.
-3
LR = $0,91 P + 0,7.10^{-3} P. IK + 0,14 IK - 8,7$
Fréquence décennale LNI = 73 mm
Lignes D5, D10, D3, D7, K1, K2, G2
- H9 Bas-fonds humides en saison des pluies
Somme des pluies depuis le début de la saison supérieure à 150 mm
LR = $0,9 P.$
- H10 Massifs rocheux
LR = $0,25 P.$

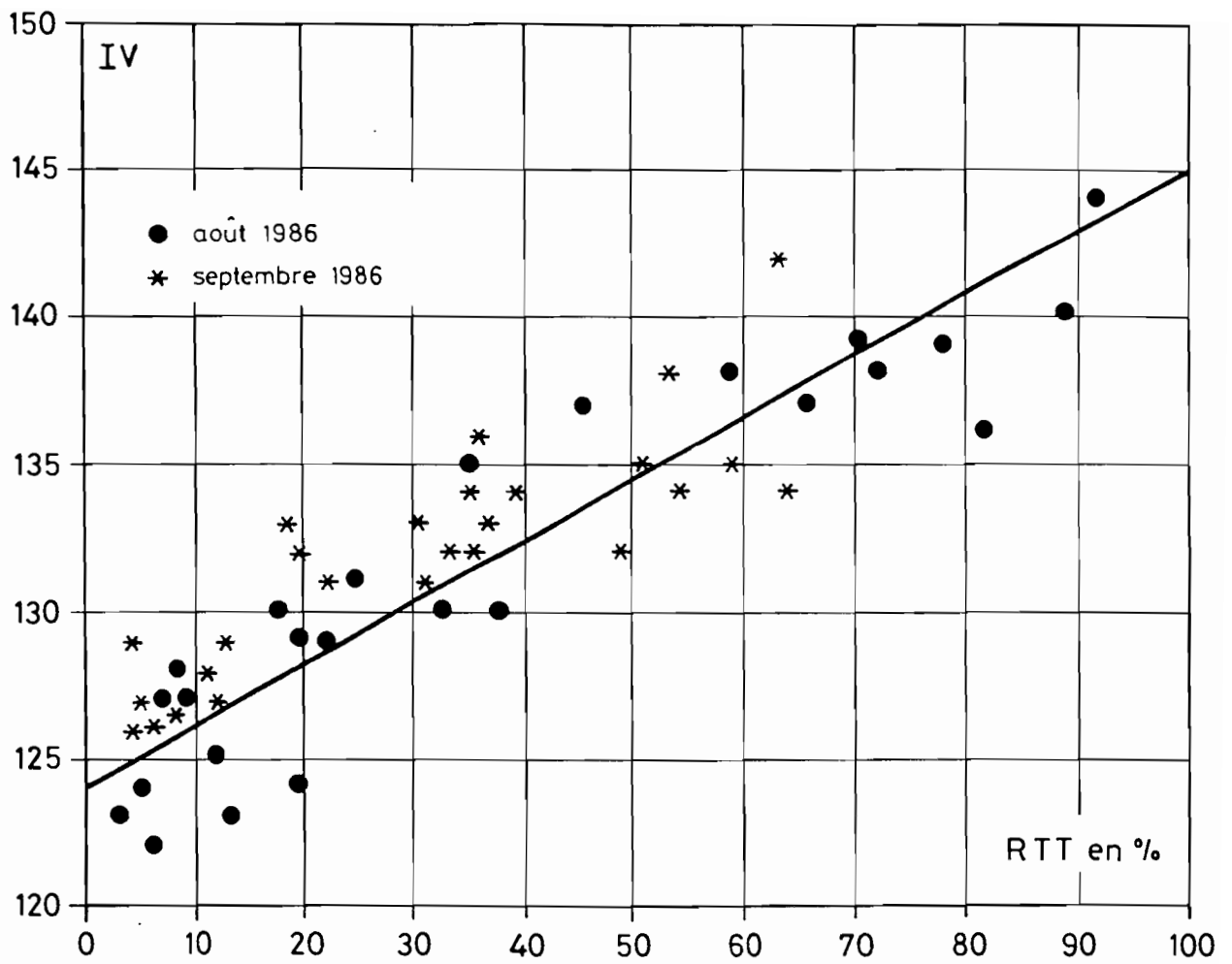


Figure : 4 Régression entre l'indice de végétation (IV) et le recouvrement total de la végétation (RTT)

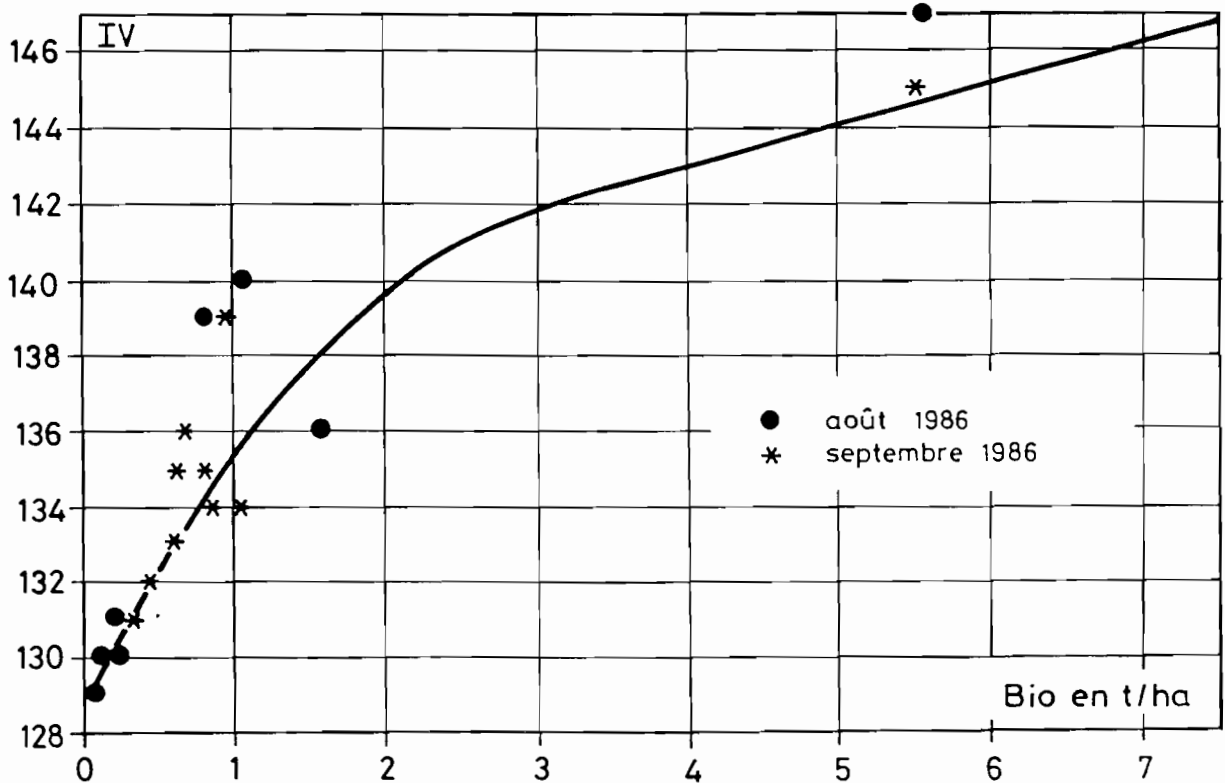


Figure : 5 Régression entre la phytomasse herbacée (Bio) et l'indice de végétation (IV).

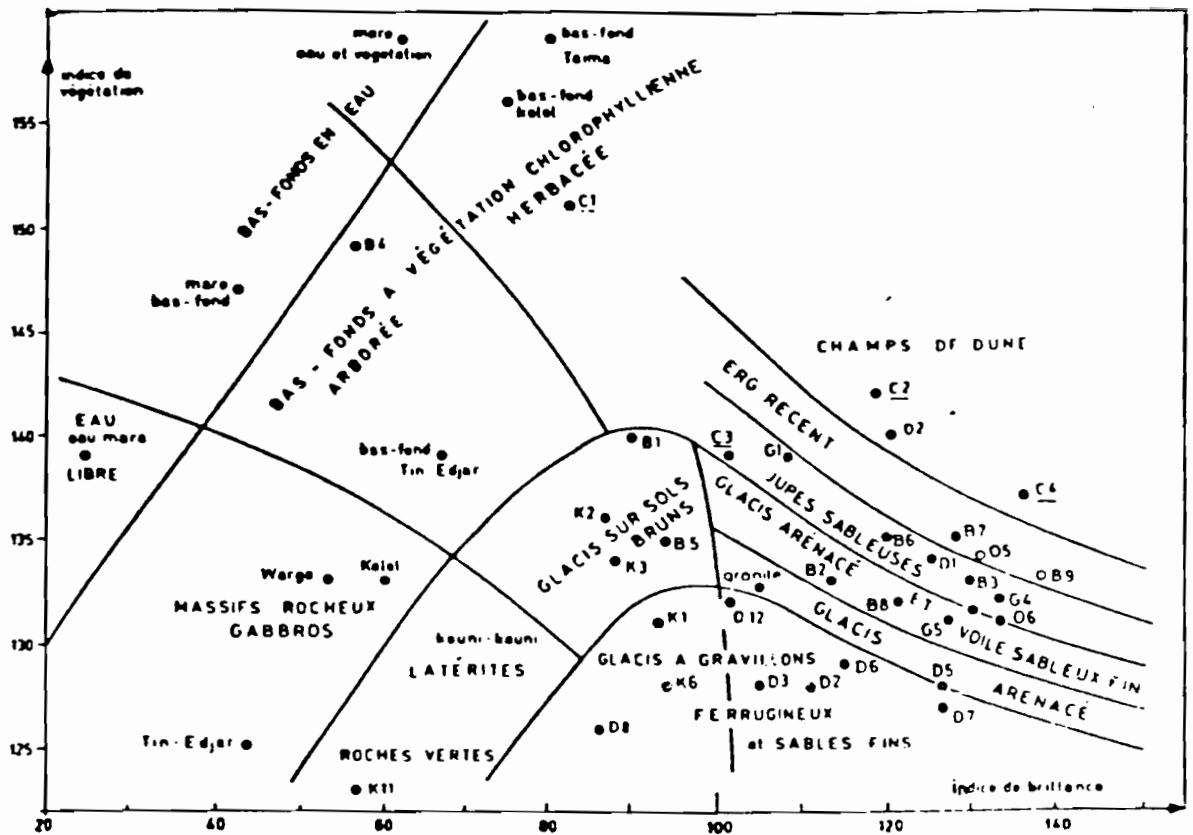


Figure 6 : Représentation numérique des lignes dans le plan des indices de brillance et végétation.

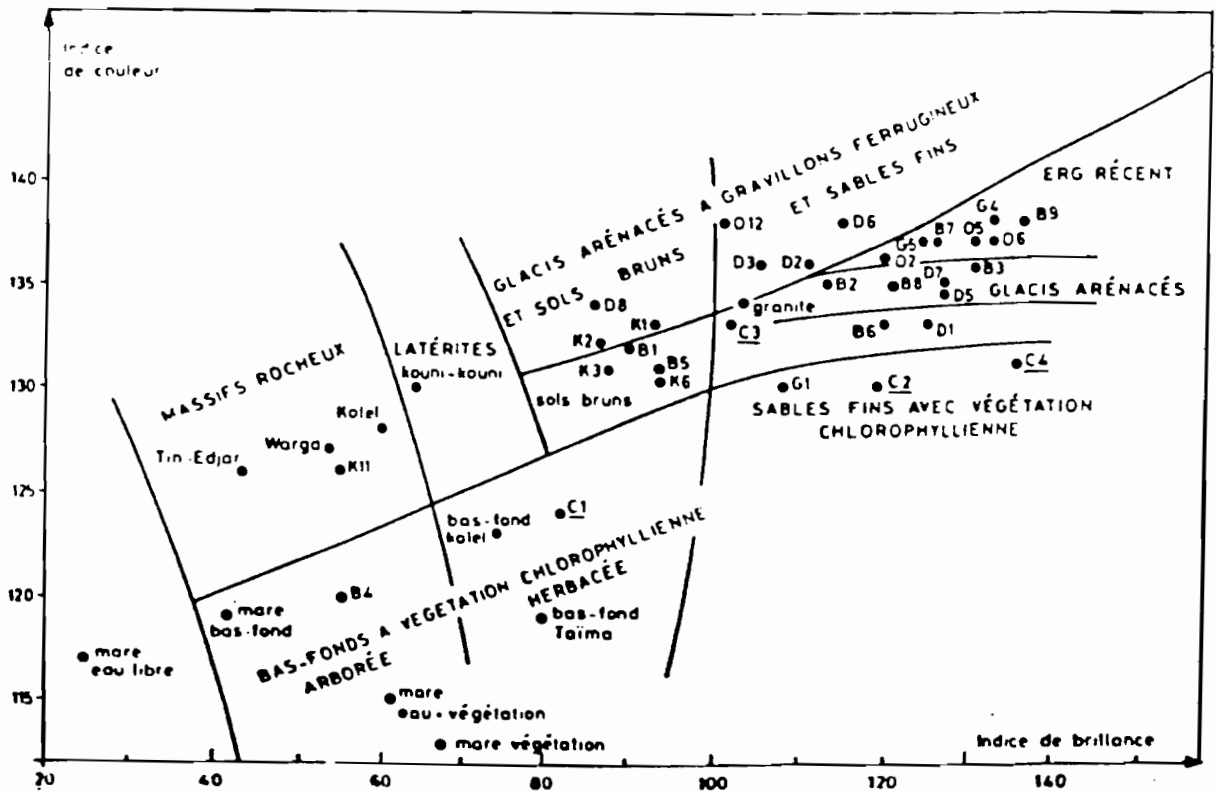


Figure 7 : Représentation numérique des lignes dans le plan des indices de brillance et de couleur.

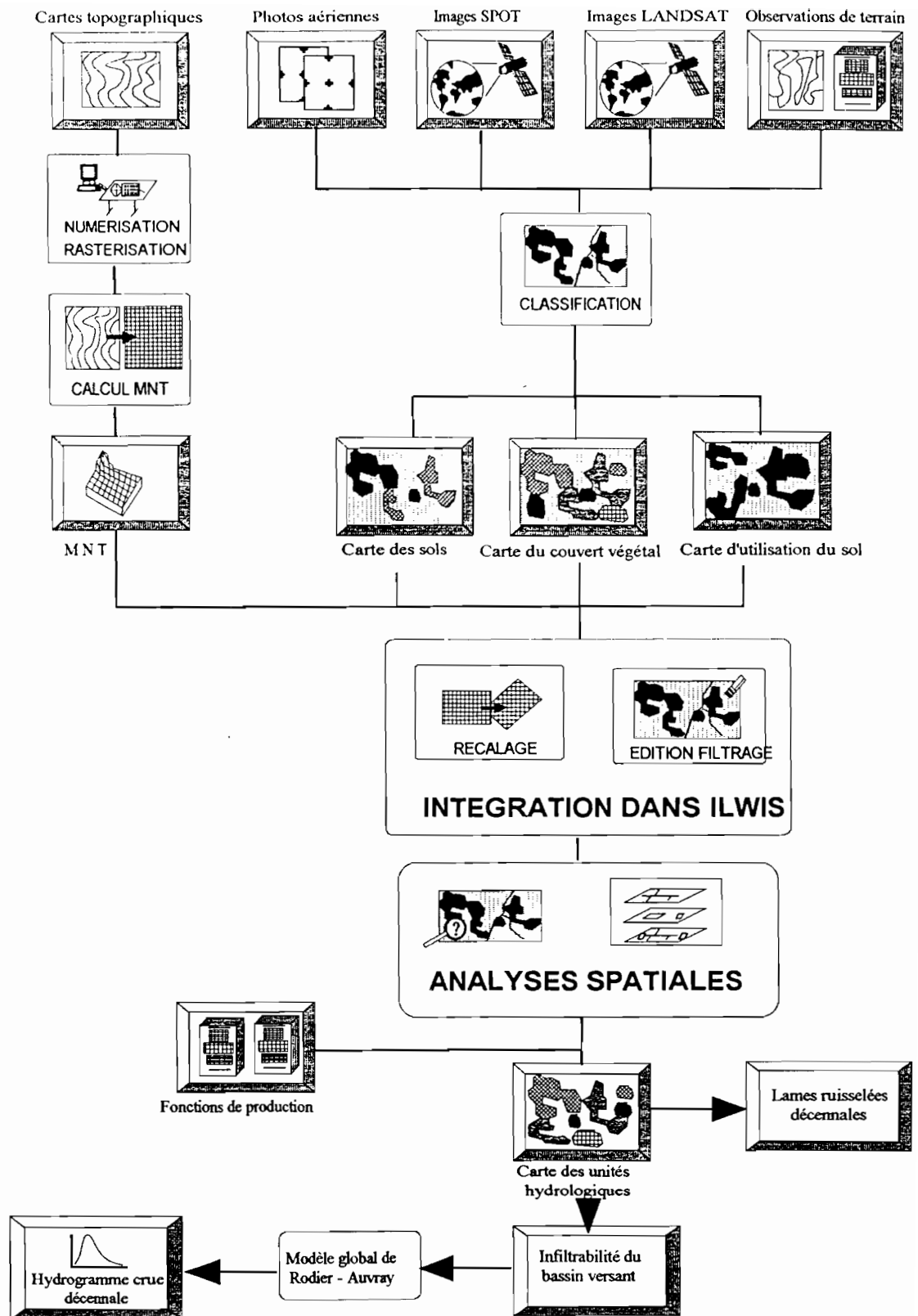


Figure 8 : Cartographie des états de surface et des unités hydrologiques par association, dans un S.I.G., de cartes des sols, du couvert végétal et des zones cultivées (M. Estèves).

REMOTELY SENSED DATA FOR HYDROLOGICAL ANALYSIS OF TWO SUB-CATCHMENTS OF THE MAREB RIVER (ERITREA)

COLOMBO R., SARFATTI P.

Istituto Agronomico per l'Oltremare, Via Cocchi 4, 50131 Firenze

ABSTRACT

The aim of the present work is to evaluate surface water resources in Eritrea, by means of remotely sensed data.

The study area is composed of two sub-catchments of the Mareb river, Shiketi and Emni-Tzellim, situated on the Eritrean highland.

The two watersheds have different morphological and land cover features, while they can be considered quite homogenous from a climatological point of view. They are both closed with an earth dam, built for irrigation purposes.

A simple model, proposed by the United States Soil Conservation Service (US-SCS), has been utilised to estimate watershed runoff volume. The appropriate Runoff Curve Number has been attributed using, for some factors, remotely sensed data together with "conventional" data.

The annual water budget for the two reservoirs has been calculated considering the water inflow, derived by the watershed runoff volume, and the losses, due to evaporation and infiltration. The results have been compared with sedimentation rates of the two reservoirs and with water requirements for irrigation.

INTRODUCTION

Lack of information about water resources is a main constraint for planning agricultural development in Eritrea. In order to allow an expansion of irrigation in the highlands, a programme of small dams construction has been undertaken in the past ten years. At the time of dams construction, estimates of catchment yield was not possible and the optimum reservoir capacity could not be determined (FAO, 1994). This has resulted, in some cases, in rapid sedimentation of the reservoir where the catchment was too large for the dam, or in the reservoir not filling if the catchment was too small.

Surface runoff depends on a great number of factors, such as rainfall characteristics, watershed morphometric characteristics, soil physical characteristics (depth, texture, structure, hydraulic conductivity), land cover and land use, soil moisture conditions prior to rainfall events.

There are many well known methods for predicting surface runoff either from empirical formulas or from deterministic models (Hudson, 1971).

In this work the Curve Number method of the US-SCS has been utilised in two different watersheds in Eritrea, testing the potential contribution of satellite data (SPOT XS Nov. 1993 and Landsat TM Nov. 1987) and aerial photos (1:50 000, Nov. 1964) to runoff estimation.

The study area is part of a larger area which had been previously surveyed and mapped with an integrated approach, describing in detail climate, geology, geomorphology, soils and land cover

(Ongaro and Sarfatti, 1995). Remotely sensed data have been used to estimate biomass (Viti et al.; 1995) and to calculate soil erosion (Colombo et al., 1995).

STUDY AREA

The study area is composed of two sub-catchments of the Mareb river, Shiketi and Emni-Tzellim, situated on the Eritrean highland (Fig. 1).

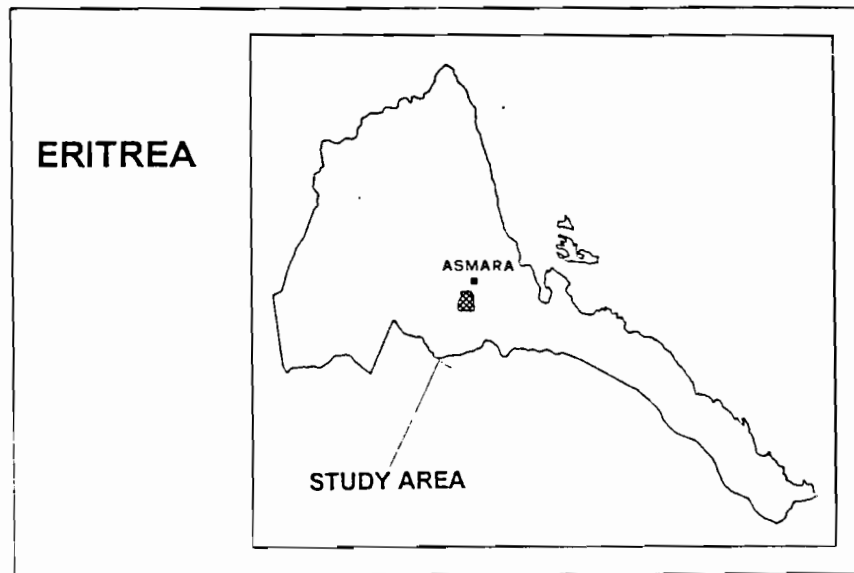


Fig. 1 Study area

Climate

The two watersheds have almost the same climate. Asmara is the nearest climatological station, located about 30 km north of the study area.

Mean annual temperature (16.3 °C) and potential evapotranspiration (770 mm) are relatively low, in comparison with other tropical areas, due the altitude above sea level (1800 - 2200 m).

Mean annual rainfall is 530 mm. There are two rainy seasons and a long dry season. The so-called small-rains (130 mm) fall between April-May-June; the so-called great-rains (400 mm) fall during July-August-beginning of September; during Fall and Winter there is a long period with very scarce rainfall (50 mm).

Regional Geology

After the processes that formed the Precambrian basement (Drury and Berhe, 1993), a long gap in time (about 400 My) come and Precambrian rocks were eroded and penneplained with formation of a regular, variable thick laterite crust. During Mesozoic a transgression phase (Stampf, 1991) covered a large part of Eritrea with deposition of sandstone and limestone (Mohr, 1962). Starting from Upper Eocene-Oligocene, Eritrea was interested by the development of a pre-rift related to the primitive formation of the Red Sea, that was already interrupted at Lower Miocene when it shifted (Voggenreiter et al., 1988) toward E to the active rift of Denkel. Many volcanic cycles are

recognised (Zanettin, 1992), and they consist, mainly, of fissural volcanic flows represented by transitional basalts.

Water Resources

Surface water resources are more exploited than groundwater resources. Streams are generally ephemeral since they carry water only during and immediately after heavy rains.

The volcanic rocks represent the main aquifer with a high general permeability. The alluvial-colluvial deposits have a variable permeability and a low to very low storage coefficient. In the plains, water-table is about 5 meters below the ground surface and near the surface along the main drainage lines.

Spring-lines follow the contact between the permeable volcanic rocks and the underlying impermeable laterite and have a little but constant discharge.

Land Cover

Rock outcrops is extremely variable (0 to 90% surface cover). Land cover is mainly an open formation of shrubs and small trees of *Acacia etbaica*, utilised for grazing and for fuelwood collection. Percentage of vegetation cover is very poor ranging from 5 to 30%. Main crops are wheat, barley, teff, maize, sorghum cultivated with traditional low inputs techniques (animal traction). Irrigated agriculture (mainly horticultural crops) is confined to small areas.

Most of the Shiketi catchment is covered by natural vegetation, while agriculture is confined in a small area on the volcanic plateau. In the Emni-Tzellim catchment arable land covers about 70% of the surface, while remnant is utilised for grazing. In the escarpment area vegetation cover is higher than in dissected hills of the western side.

Geomorphology and Soils of the Shiketi catchment

The catchment area is delimited between the co-ordinates of 15°12'04" and 15°10'10" latitude, and of 38°50'43" and 38°51'45" longitude, covering approximately 550 ha. Some morphometric parameters are in Table 1.

The Shiketi catchment include Late Proterozoic rocks (including metamorphic low-grade lithologies as chlorite shists, meta-flysch, quartz-muscovite and quartz-sericite shists) and Cainozoic volcanic products (including a thick sequence of typical massive aphyric flood basalt flow, grey-black in colour, with interlayered leucitic-rich flows, reddish-purple in colour), separated by a lateritic formations.

The Shiketi catchment is mainly represented by units of denudational and structural origin with steep to very steep rolling to hilly topography. Rock falls, debris slides, and gullies are the main active processes. Structural terraces in lateritic formation reproduce the oldest peneplain. Valley bottom is characterised by alluvial terraces buried under a variable thick of colluvial sediments.

Erosion rate has been estimated by dam sediments analysis and by the application of the modified Universal Soil Loss Equation, obtaining respectively 106 t/ha/year and 102 t/ha/year (Colombo R et al., 1995).

Soils have been described and classified according to the FAO system (1988). On the volcanic plateau, on colluvial areas and on laterite there are shallow soils, very gravelly loam to very gravelly sand, well to excessively drained (*Leptosols*). On volcanic slopes and escarpments there are moderately deep to deep soils, very gravelly loam to very gravelly sand, well drained (*Regosols*). On

alluvial terraces and fans there are moderately deep to very deep soils, gravelly sand to gravelly loam, well to somewhat excessively drained (*Fluvisols*). On cradle valleys there are deep black soils, clayey, moderately well to poorly drained (*Vertisols*). On the alluvial plain there are moderately deep soils, gravelly clay to gravelly loam, well to poorly drained (*Cambisols* in association with *Fluvisols* and *Leptosols*).

Geomorphology and Soils of the Emni-Tzellim catchment

The catchment area is delimited between the co-ordinates of 15°02'58" and 15°01'01" latitude , and of 38°42'47" and 38°47'06" longitude, covering approximately an area of 1172 ha. Some morphometric parameters are in Table 1.

The Emni-Tzellim catchment include Cainozoic volcanic products, consisting of typical leucitic flood basalts, outcropping along the western side of the area, and a thick sequence of welded pyroclastic flows with interbedded lava flow, commonly columnar, with great phenocrysts of augite, outcropping on the high plane above the Tzellim structural depression (graben).

The Emni-Tzellim catchment is represented by units of volcanic denudational origin, with steep terrain, and by units of alluvial-colluvial origin with relatively flat to gently sloping topography. Rock falls, gullies, sheets and rills erosion are the main active processes. Accumulation glacis with paleo-channels are originated above structural volcanic terraces. Old sheetflood plain is buried under the dissected accumulation glacis and residual alluvial terraces, remnant of an older fluvial landscape, outcrop in the Tzellim plain.

Erosion rate has been estimated by dam sediments analysis and by the application of the modified Universal Soil Loss Equation, obtaining respectively 96 t/ha/year and 47 t/ha/year (Colombo R et al., 1995).

On volcanic escarpments there are shallow to very shallow soils, very gravelly loam to very gravelly sand, well drained (*Leptosols* in association with *Regosols*). On volcanic slopes and footslopes there are moderately deep to deep soils, very gravelly loam, well drained (*Regosols*). On footslopes there are deep soils, loam to sand, well drained (*Fluvisols*). On older alluvial terraces and on sheetflood areas there are moderately deep to deep soils, gravelly clay to clay, poorly drained (*Vertisols*). Distributed over the whole area there are moderately deep to deep soils, gravelly loam, moderately to poorly drained (*Cambisols*).

TABLE 1: Some morphometric parameters of the two sub-catchments

<i>Parameters</i>	<i>SHIKETI</i>	<i>EMNI-TZELLIM</i>
Basin area (ha)	585	1172
Basin order (Strahler's system)	5	5
Drainage pattern	dendritic	subdendritic
Drainage density (km/km ²)	4.8	4.8
Bifurcatio ratio	3.9	3.5
Relief ratio	0.059	0.025
Gravelius Index	1.2	1.7
Concentration Time (min)	55	130

RUNOFF ESTIMATION

The Soil Conservation Service (SCS) method (U.S. Dept., 1985) has been used to predict the total volume of runoff that may come from a watershed during a design flood (25-year return period) and to predict the total annual runoff volume for daily rainfall, during a period of 28 years.

The SCS Runoff Curve Number (CN) is an empirical description for infiltration and rainfall excess. The SCS runoff equation is:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia) + S} \quad [1]$$

Where Q = runoff (mm); P = rainfall (mm); Ia = initial abstraction (mm); S = potential maximum retention after runoff begins (mm).

By removing Ia as an independent parameter:

$$Ia = 0.2 \times S \quad [2]$$

runoff is:

$$Q = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{(P + 0.8 \times S)} \quad [3]$$

The parameter S is related to soil and cover conditions of the watershed through the Curve Number:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad [4]$$

where CN = Curve Number

Runoff volume of the catchment has been calculated using the following formula:

$$Qv = 10 \times Q \times A \quad [5]$$

Where Qv = runoff volume (m³); Q = runoff depth (mm); A = catchment area (ha)

The Shiketi and the Emni Tzellim sub-catchments have been classified into homogeneous portions of land (land units) by satellite image processing and analysis and AP's interpretation.

Land cover and soil type have been evaluated for each land unit. The Runoff Curve Number has been calculated for each land unit, assuming the type II of antecedent soil moisture condition (AMC II).

CN adjustments table has been used in order to adjust the CN for wet (AMC III) and dry (AMC I) soils (Wanielista M. P., 1990).

The CN for the whole sub-catchment has been calculated weighting the values of each land unit.

Runoff of the two sub catchment has been estimated using maximum 24-hours rainfall with a return period of 25-years, using daily rainfall data of 28 years.

Determination of Runoff Curve Number

To select the appropriate CN the following factors have to be considered: cover type, hydrologic condition, hydrologic soil group, impervious area.

Cover type

As in other applications of the SCS-CN in developing countries (Purwanto, Donker, 1991), also in this case it was difficult to determine the correspondence between land cover types and CN, since the original method is based on land cover types common in North America.

Adapting the original tables to local conditions four main categories of land cover have been taken into consideration (Table 2).

Hydrologic condition

Hydrologic condition indicates the effects of cover type and treatment on infiltration and runoff and is generally estimated from density of plant and residue cover on sample area.

The average percentage of vegetation cover has been estimated for each land unit using SPOT Vegetation Index (VI):

$$VI = \frac{B2}{B3} \quad [6]$$

Where VI = SPOT Vegetation Index; $B2$ = SPOT Band 2; $B3$ = SPOT Band 3

The relationship between SPOT Vegetation Index and percentage of cover has been calculated in a preceding work (Viti M.L. et al., 1995):

$$C = 56.1289 \times VI - 50.879 \quad [7]$$

Where C = Cover (%) and VI = SPOT Vegetation Index

The cover percentage estimated for each land unit, was less than 50%, corresponding to poor hydrologic condition (Table 2).

Hydrologic soil group

Hydrologic soil group depends from soil physical characteristics as soil texture, soil structure, hydraulic saturated conductivity, soil depth and sealing susceptibility (U.S. Dept., 1993).

For each land unit has been possible to establish the appropriate hydrologic soil group by using, in conjunction, field information, laboratory analysis and remotely sensed data.

Soil structure and soil depth have been estimated during field survey; soil texture was determined by laboratory analysis and hydraulic conductivity by bibliographic tables relating soil structure with soil texture; sealing susceptibility was calculated using the following formula (Regione Emilia, 1991):

$$Ss = \frac{1.5 \times Sf + 0.75 \times Sc}{Cl + 10 \times OM} \quad [8]$$

Where Ss = Sealing susceptibility; Sf = Percentage of fine silt; Sc = Percentage of coarse silt; Cl = Percentage of clay; OM = Organic matter (%)

Several processing have been attempted to relate remotely sensed data with soil physical properties to evaluate the hydrologic soil group. A relationship between Soil Brightness, calculated as in Di Gregorio (1993), and clay topsoil content has been obtained:

$$Cl = 3.54 \times 10^6 \times SB^{-2.3895} \quad [9]$$

Where Cl = clay topsoil content (%); SB = Soil Brightness

This relationship ($r^2 = 0.74$) has been helpful to check soil variability of each land unit in relation with the assigned hydrologic soil group.

By using Table 2 it has been possible to evaluate the CN for the assigned hydrological soil group.

Impervious area

Rockiness has been considered as connected impervious area. For some land units, such as laterite terraces and volcanic hills, CN values have been corrected in relation of the percentage of impervious area using adjustments graphics (U.S. Dept., 1986).

TABLE 2: Runoff Curve Number for main Hydrological Soil Cover-Complexes of the study area (for AMC II)

Cover type	Hydrologic condition	Curve Number (CN) for Hydrologic soil group			
		A	B	C	D
Degraded areas (veg. cover < 5%)	Poor	77	86	91	94
Open shrubland (mainly <i>Acacia etbaica</i>)	Poor	68	79	86	89
Irrigated agriculture (furrow irrigation)	Poor	72	81	88	91
Rainfed agriculture (teff, barley, wheat, sorghum)	Poor	65	76	84	88

Curve Numbers of each land unit are reported in tables 3.

TABLE 3: Runoff curve number (CN) of land units

<i>SHIKETI</i>		<i>EMNI-TZELLIM</i>	
<i>Land Unit</i>	<i>CN</i>	<i>Land Unit</i>	<i>CN</i>
Alluvial Terraces	77	Alluvial plain	88
Cradle Valley	88	Alluvial Terraces	88
Alluvial fan	68	Lower Accumulation Glacis	76
Basement footslope	86	Higher Accumulation Glacis	76
Volcanic footslope	91	Sheetflood Plain	88
Volcanic Plateau	75	Cradle Valley	88
Plateau Escarpment	86	Structural Volcanic Escarpment	84
Volcanic high hills	82	Volcanic Ridge	90
Volcanic low hills	82	Structural Terraces on Slope	76
Surface of planation in Laterite	96	Dissected Accumulation Glacis	84
Laterite Structural terraces	96		
Basement Escarpment	84		

DAILY RUNOFF

In order to predict the volume of runoff for the maximum 24-hours rainfall with 25-years return period the following factors have to be considered: daily rainfall, Curve number and Antecedent Moisture Condition.

Mean duration of a storm is four hours and maximum duration is about seven hours (Griffiths J.F., 1972); July and August daily rainfall distribution is mostly concentrated in a range between 5 to 10 mm. Rainfall intensity has been estimated by Fletcher (1950) formula: rainfall intensity for 1 hour interval is 27 mm/h.

The following formula (Gumbel E. J., 1954) has been used to estimate the return period of the maximum 24-hours precipitation:

$$T = \frac{N + 1}{m} \quad [10]$$

Where T = return period in years; N = total number of statistical events; m = rank of events arranged in descending order of magnitude.

Using daily rainfall data (Fantoli, 1966), the annual maximum precipitation with 25-years return period is 102 mm, and it has been used as P in [3].

Watershed CN (Table 4) has been obtained weighting CN values of each land unit (Table 3), in function of their specific area.

TABLE 4: Curve Number (CN), Storage at saturation (S), Initial abstraction (I_a), Runoff (Q) and Runoff Volume (Q_v) obtained with a precipitation of 102 mm/24 hours (AMC II and III)

Catchment	CN		S (mm)		I_a (mm)		Q (mm)		Q_v (m ³)	
	AMC II	AMC III	AMC II	AMC III	AMC II	AMC III	AMC II	AMC III	AMC II	AMC III
Shiketi	82	92	56	22	11	4.4	56	80	327600	468000
Emni-Tzellim	81	91	59	25	12	5	54	77	632880	902440

ANNUAL RUNOFF

When surface runoff is to be stored in reservoirs, the total runoff volume for a period of several months, usually the annual volume, is of more interest than the runoff for a design storm.

For each month the average Antecedent Moisture Condition (AMC) has been calculated, obtaining: October to June type I; July and September type II; August, type III. The CN values have been consequently corrected in relation with the monthly AMC, before calculating the daily runoff.

The annual runoff volume has been obtained adding daily runoff, obtained by equation [3], of each month of the year. From October to June daily runoff has been obtained using Annual runoff volume has been calculated for a period of 28 years, using equation [5].

Mean, maximum, minimum and 75% probability of water volume inflow into the reservoir have been calculated (Table 5).

TABLE 5: Annual volume inflow into the reservoirs

Annual Volume Inflow (Q_v)	Unit	SHIKETI	EMNI-TZELLIM
Initial Reservoir capacity	m ³	256000	170269
Mean volume inflow	m ³	557550	939960
Maximum volume inflow	m ³	1397617	1671806
Minimum volume inflow	m ³	66416	38998
Volume 75% probability	m ³	299078	561461

Comparing results of annual runoff estimation with reservoir sizing it comes out that Shiketi dam is well dimensioned, while Emni Tzellim reservoir is far behind the potential water storage.

A dynamic annual water balance of the reservoirs has been calculated in order to evaluate the effective water volume available for irrigation.

Sedimentation rate into the two reservoirs (Colombo R et al., 1995) has been utilized to estimate their effective volume. Losses due to evaporation and infiltration from the reservoirs have been estimated roughly 10% of the total volume.

The irrigable area has been calculated considering an irrigation requirement of 1000 m³ of water pro hectare (Table 6).

TABLE 6: Reservoirs capacity and irrigable area

<i>Reservoir Capacity</i>	<i>Unit</i>	<i>SHIKETI</i>	<i>EMNI-TZELLIM</i>
Dam construction	year	1983	1987
Initial Reservoir Capacity	m ³	256000	170269
Sedimentation Rate in the reservoir	% year	3	11
Actual Capacity of the reservoir	m ³	156000	0
Actual Available water volume	m ³ year	141000	0
Reservoir Capacity after 10 years	m ³	180000	0
Initial Irrigable Surface	ha	25	17
Irrigable Surface after 10 years	ha	18	0

CONCLUSIONS

The SCS-CN method has been applied to estimate daily and yearly surface runoff volume.

Remotely sensed data have given a helpful contribution to CN approach (Table 7): land unit map has been derived from remotely sensed data, hydrologic condition has been obtained by SPOT Vegetation Index; Soil Brightness has proved to be useful to evaluate the hydrologic soil group.

TABLE 7: Parameters and methodology considered to compute CN

<i>SCS-CN Factors</i>	<i>Parameters used for estimation</i>	<i>Method</i>				
		Field data	Laboratory analysis	Emp. formula and bibliog.	Aerial photos	Satellite images
Hydrologic Soil Group	Soil Texture		X			X
	Soil Structure	X				
	Soil Depth	X				
	Topsoil Sealing susceptibility		X	X		
	Soil Hydrolog. conductivity	X	X	X		
Cover type	Land use and land cover	X			X	X
Management	Cultural practices	X				
Hydrologic condition	Vegetation cover	X				X
AMC	Daily rainfall			X		
Impervious area	Rockiness	X			X	X

As a confirmation, we have calculated the soil water balance after Thornthwaite (1948), assuming an available water capacity of 100 mm, obtaining a surface runoff of 91 mm/year; this figure can be considered in good agreement with data estimated by the SCS-CN method (95 mm/year for Shiketi and 84 for Emni-Tzellim).

In the present case, the CN method has proved to be an useful tool for runoff estimation.

A future development is the validation of results with a series of ground measurements. After such a campaign it will be possible to extend the results to other catchments of the Eritrean highland and to supply watershed management projects with reliable data.

BIBLIOGRAPHY

- COLOMBO R., MARTUCCI A., RODOLFI G., SARFATTI P., KAHSAY T., YOHANNES A. (1995) - Stima dell'erosione del suolo nell'alto bacino del fiume Mareb (Eritrea). Atti VII convegno nazionale AIT, Chieri (TO): 349-353.
- DI GREGORIO A. e CHERLET M. (1993) - Calibration and Integrated Modelling of Remote Sensing Data for Desert Locust Habitat Monitoring. RSC Series n. 64, FAO, Roma.
- DRURY S. A., BERHE S. M. (1993) - Accretion Tectonics in Northern Eritrea Revealed by Remotely Sensed Imagery. *Tectonics*, v.13: 1371-1380.
- FANTOLI A. (1966) - Contributo alla climatologia dell'altopiano etiopico - Regione Eritrea. Ministero degli Affari Esteri-Cooperazione scientifica e tecnica, Roma.
- FAO (1994) - Eritrea. Agricultural Sector Review and Project Identification. TCP/ERI/2353, FAO, Roma (3 vol.).
- FAO-UNESCO (1988) - Soil Map of the World. Revised Legend. Roma, FAO.
- FLETCHER R.D. (1950) - A Relation between Maximum Observed Point and Areal Rainfall Values. *Trans. Am. Geophys. Union*, 31: 344-348
- GRIFFITHS J. F. (1972) - Climates of Africa. World Survey of Climatology, vol 10. Edited by J. F. Griffiths. Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York.
- GUMBEL E. J.(1954) - Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. Applied Mathematics Series 33. U.S. Bureau of Standards, Washington, DC.
- HUDSON N. (1971) - Soil Conservation, Cornell University Press, Ithaca, New York.
- MOHR P. (1962) - Geology of Ethiopia. University College of Addis Ababa Press.
- ONGARO L., SARFATTI P. (1995) - Utilizzazione dei dati telerilevati e GIS per la produzione della carta delle unità di terre del bacino dell'alto Mareb (Eritrea). Atti VII convegno nazionale AIT, Chieri (TO): 361-366.
- PURWANTO E., DONKER N.H.W. (1991) - Semi-distributed Hydrologic Modelling of the Humid Tropical Upper Cimandiri Catchment (West Java) Using HEC-1 Model. *ITC Journal*, 4: 241-253.
- REGIONE EMILIA-ROMAGNA (1991) - Manuale per il rilevamento e la descrizione dei suoli. 2: guida alla descrizione delle serie e delle fasi. Ufficio Pedologico Servizio Cartografico Regione Emilia Romagna, Bologna
- STAMPFLY G., MARCOUX J., BAUD A. (1991) - Tethyan Margins in Space and Time. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 87: 373-409.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1985) - Soil Conservation Service: National Engineering Handbook. Section 4-Hydrology. Washington, DC.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1986) - Soil Conservation Service: Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. National Technical Information Service, Springfield, VA.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1993) - Soil Survey Division Staff: Soil Survey Manual n.18, Washington DC.
- THORNTHWAITE C. W.(1948) - An Approach a Rational Classification of Climate. *The Geographical Review*, 38:55-94.
- VITI M.L., DELLI G., ONGARO L. (1995) - Stima della biomassa legnosa dell'alto bacino del Mareb (Eritrea) utilizzando dati SPOT. Atti VII convegno nazionale AIT, Chieri (TO): 499-503.
- VOGGENREITER W., HOTZ H., MECHIE J. (1988) - Low-angle Detachment Origin for the Red Sea Rift System. *Tectonophysics*, 150: 51-76.
- WANIELISTA M.P. (1990) - Hydrology and Water Quantity Control. John Wiley & Sons, Inc.
- ZANETTIN B. (1992) - Evolution of the Ethiopian Volcanic Province. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei*, Roma, Serie IX, Volume I, Fascicolo 6.

CARACTERERISATION DES ZONES HOMOGENES POUR DES FINS DE MODELISATION HYDROLOGIQUE

(*) BERGAOUI ^{Med}.

() CAMUS H.**

RESUME

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des problèmes d'érosion en Tunisie à travers un bassin versant expérimental de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama-Tunisie Centrale). Vu les limites d'application offertes par le logiciel DEMIURGE, nous avons été amenés à extraire le bassin versant en question, et à déduire ses caractéristiques géomorphologiques et hydrométriques, à partir du modèle numérique de terrain du bassin versant qui le contient en l'occurrence celui de Oued El-Hissiane. Ainsi, nous avons pu obtenir par superposition des cartes de pentes et des indices de Beven, les zones hydrologiquement homogènes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud.

L'extraction du bassin versant de l'oued Ez-Zioud (Dejebel Semmama - Tunisie Centrale) et la déduction de ses caractéristiques géomorphométriques et hydrométriques à partir du modèle numérique de terrain du bassin versant de l'oued El-Hissiane qui le contient, ont permis d'obtenir par superposition des cartes de pentes et des indices de Beven, les zones "grossièrement homogènes" du bassin versant de l'oued Ez-Zioud.

Mots clés : Topographie, Numérisation, Modèle, Homogène.

ABSTRACT

In first time, we try to calculate the Digital Elevation Model (DEM) of Hissiane watershed with application program DEMIURGE. Thus, we proved the possibility to make henceforth topographic carte numeration at large scale.

The extraction of Ez-Zioud wadi watershed and the deduction of geomorphometrics and hydrometrics characteristics of this watershed from Hissiane watershed DEM help us to obtain after superposition of slop carte and saturation degree carte, some "identical zones"

Key words : Topography, Digital, Modele, Homogene.

* Enseignant Chercheur.

** Directeur de Recherche ORSTOM Tunis.

Introduction

L'étude hydrologique d'un bassin versant ne disposant que de très peu d'informations, peut reposer essentiellement sur des procédés cartographiques. L'utilisation de ces derniers peut être considérée comme un indicateur permettant, par le croisement des facteurs explicatifs de l'écoulement de surface (pentes et sens d'écoulement), de définir un ensemble de zones hydrologiques homogènes au niveau des caractéristiques hydrologiques (pentes moyennes, altitudes, rugosité etc...). Il s'agit principalement de mieux tenir compte des propriétés physiques des bassins versants et des phénomènes de non linéarité. Dans ce but un concept géomorphologique des bassins versants doit être utilisé et amélioré.

Toutes les disciplines rattachées aux sciences de la terre connaissent de profonds bouleversements depuis que l'on dispose de puissants moyens de calcul appliqués aux données localisées. La détermination des caractéristiques géomorphométriques et physiques du bassin versant de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama - TUNISIE Centrale) à partir du modèle numérique de terrain obtenu par DEMIURGE, nous aidera non seulement à quantifier certains paramètres physiques par unités susceptibles d'être homogènes et à expliquer le phénomène d'érosion hydrique qui est conditionné par le ruissellement de surface, mais aussi à extraire les cartes spécifiques :

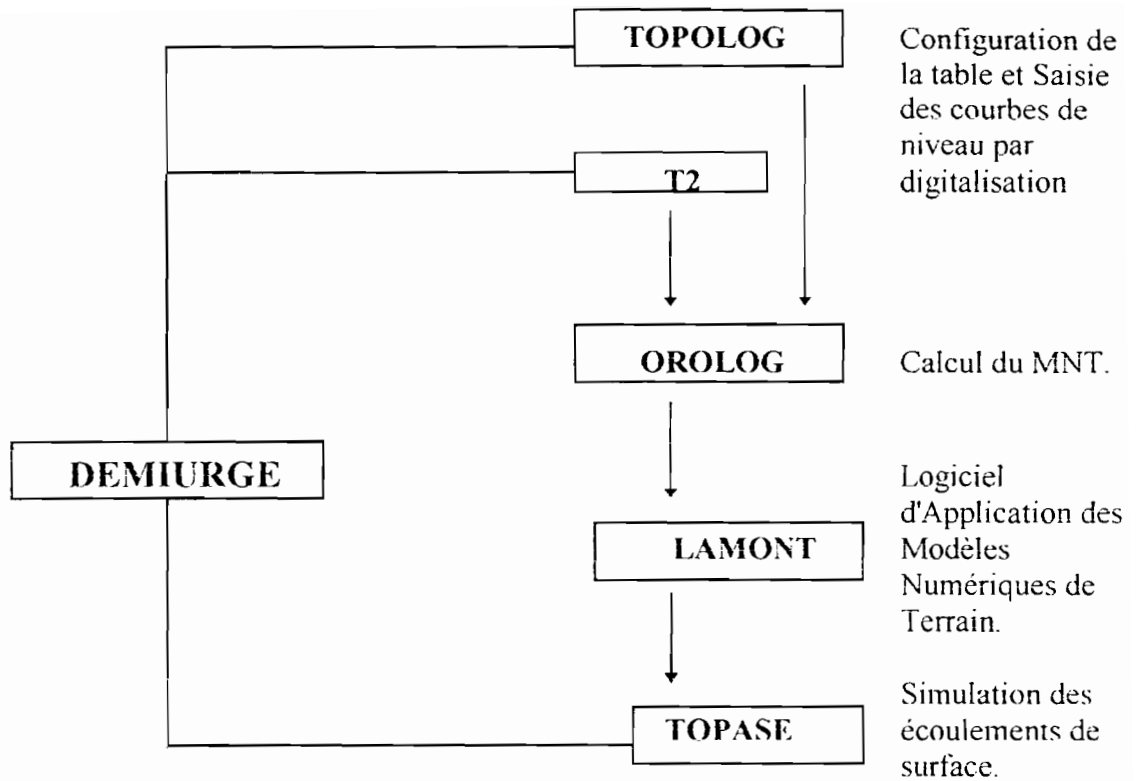
- de pentes (relief),
- du réseau hydrographique et ses dérivés,
- des indices de Beven ; pour ne citer que les principales.

La conjugaison des différentes classes de paramètres obtenues à partir de ces cartes va nous conduire à une carte qui, superposée à celles de la pédologie et de la végétation, permettra une délimitation des zones hydrologiquement homogènes.

Le but de ce travail est de fournir quelques éléments en vue d'arriver à une première approximation de la fragmentation du bassin versant de l'oued Ez-Zioud en zones hydrologiques pouvant être considérées comme similaires. Les résultats de cette étude permettront la constitution d'une banque de données qui pourra être utilisée pour une modélisation hydrologique à discrétisation spatiale (pluie - débit - transports solides) du dit bassin. Ce travail servira également de test aux limites des potentialités de DEMIURGE qui est un ensemble de logiciels didactiques à l'usage des chercheurs. De même, ce travail est réalisé dans le cadre de la validation des modèles numériques de terrain (MNT) calculés par DEMIURGE en faisant l'assemblage de plusieurs parties de la même carte.

1 - Les MNT de type DEMIURGE

DEMIURGE (Digital Model In URGEncy) est un logiciel, à plusieurs modules, de production et de traitement des MNT. Un logiciel de traitement d'image dédié à un type de données : le relief. Sa vocation n'est pas la cartographie automatique ni le système d'information géographique, mais plutôt un complément de la panoplie d'outils informatiques actuellement disponibles sur le marché. Ce logiciel étant publié aux éditions LOGROSTOM de l'ORSTOM [DEPARTERE C.1992], nous ne nous attacherons pas à en faire une présentation détaillée, mais nous essaierons de mettre l'accent sur les particularités des principales potentialités offertes par les logiciels qui le constituent et ceci à travers l'organigramme ci-après.



Organigramme des modules de DEMIURGE

Plusieurs travaux ont été réalisés sur les MNT de type DEMIURGE ([HYPERBAV 1990], [DEROUICHE A - 1994], [ONIBON H. - 1995]).

2 - Présentation du bassin versant de l'oued Ez-Zioud

Le bassin versant de l'oued Ez-Zioud, figure n°1, se trouve dans le Djebel Semmama en TUNISIE Centrale. D'une superficie de 7,74 Km². L'oued Ez-Zioud représente l'affluent rive gauche de l'oued El Hissiane. Plusieurs travaux ([CAMUS H. et al - 1987], [BARBERY J. et al - 1982]) résument les caractéristiques physiques, pédologiques, et autres de ce bassin.

Ce bassin versant expérimental fait l'objet d'une synthèse de données observées de 1974 à 1994 et du développement, au titre d'un objet de recherche d'un modèle distribué de type pluie débit transports solides.

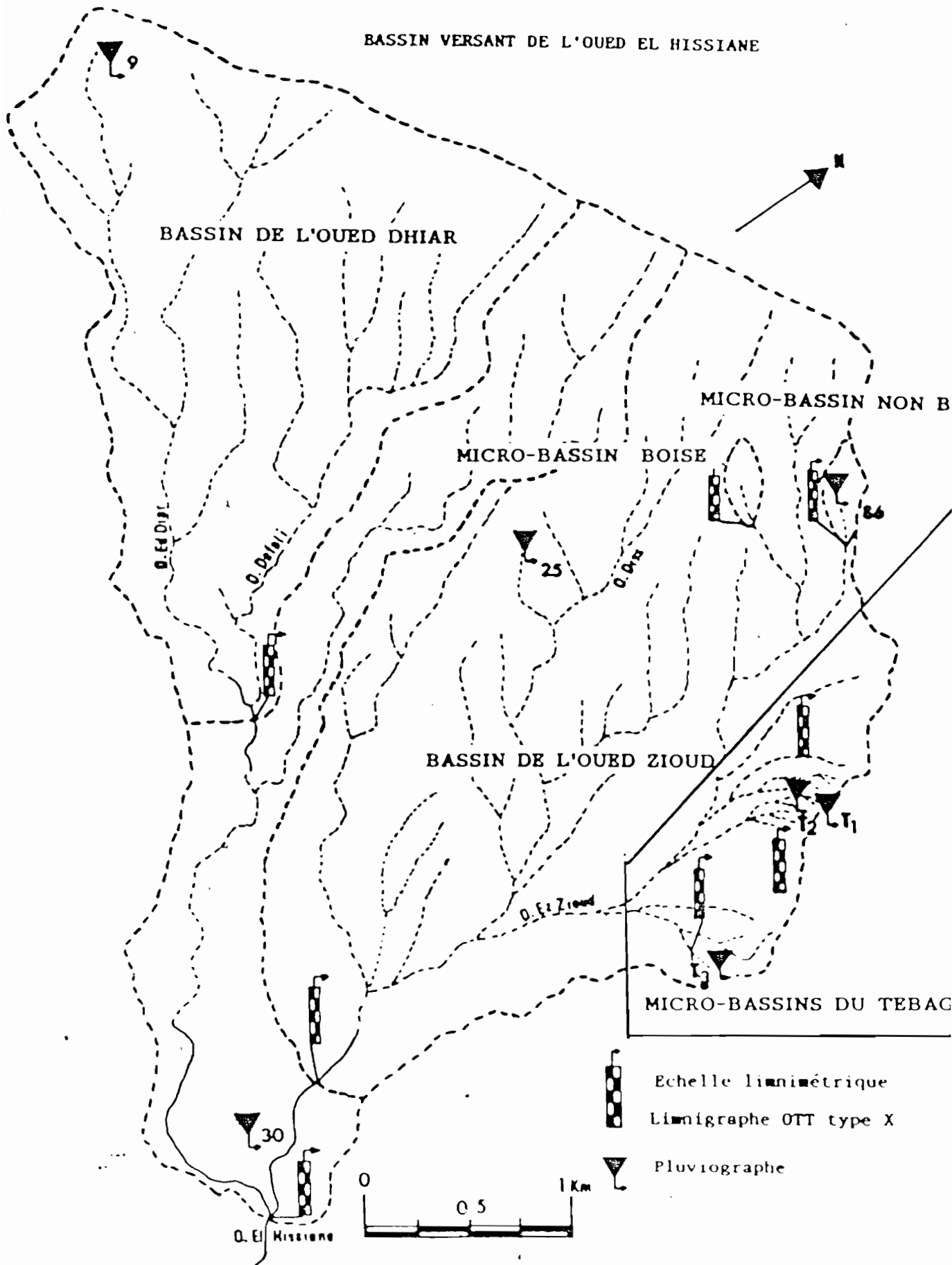


Fig. 1 - Le bassin versant de l'Oued EL HISSIANE

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques du bassin versant de l'oued Ez-Zioud.

Paramètres	Unités	Valeurs
Surface	Km ²	7,74
Périmètre	Km	12,3
Indice de compacité	Km	1,23
Longueur du rectangle équivalent	Km	4,32
Largeur de rectangle équivalent	Km	1,79
Altitude maximale	m	1250
Altitude minimale	m	772,5
Altitude moyenne	m	1011,2
Altitude circonscrite par 5% du bassin	m	1205
Altitude circonscrite par 95% du bassin	m	800
Dénivelée	m	225
Indice de pente globale	m/Km	59
Dénivelée spécifique	m	21,2
Indice de pente de roche	m	0,025

3 - Numérisation et calcul du MNT

Les bassins versants, bien que de petite taille, présentent de grandes hétérogénéités spatiales, au niveau des pentes, de la géologie, de l'occupation du sol et de transfert de l'eau sur le bassin. Pour tenir compte de cette hétérogénéité de manière simple, une description rigoureuse de la géomorphologie du bassin versant peut être envisagée. D'ailleurs plusieurs modèles de simulation de ruissellement couplés à la description géomorphologique du bassin versant ont été développés et adaptés, le modèle WASIIS développé par SINGH 1990 est un exemple parmi plusieurs autres modèles.

Les interpolations et extrapolations engendrées par le calcul des modèles numériques de terrain conduisent souvent à des limites de bassin versant différentes de la réalité (problème de géocode ouvert) [DEROUICHE A. 1994]; ce qui est à la base de modèles peu plausibles. C'est donc pour remédier à ces erreurs que nous sommes partis d'un fond topographique au 10000^{ème} du bassin versant de l'oued El Hissiane au coeur duquel se trouve le bassin versant de l'oued Ez-Zioud pour faire la numérisation. Cette stratégie nous sera très bénéfique dans la mesure où l'on pourra cerner les contours réels du bassin versant de l'oued Ez-Zioud qui seront par la suite extraites de l'ensemble pour le reste des opérations.

Au cours de l'assemblage et de calcul des MNT, plusieurs problèmes dont la liste mérite d'être exhaustive ont été rencontrés. Certes il serait intéressant de détailler les solutions qui ont été apportées à ces problèmes surtout que pratiquement, l'assemblage n'a jamais été réalisé. Mais ce sont des problèmes purement cartographiques et informatiques.

Après la réussite de l'assemblage avec DEMIURGE qui est un résultat très intéressant pour le grand objectif de notre travail, et la résolution des problèmes posés par les calculs des MNT [ONIBON II.1995], nous avons, en un premier temps, calculé les MNT des quatre feuilles prises séparément, et par la suite celui de la feuille assemblée c'est à dire le MNT du bassin versant de l'oued El Hissiane (figure 9).

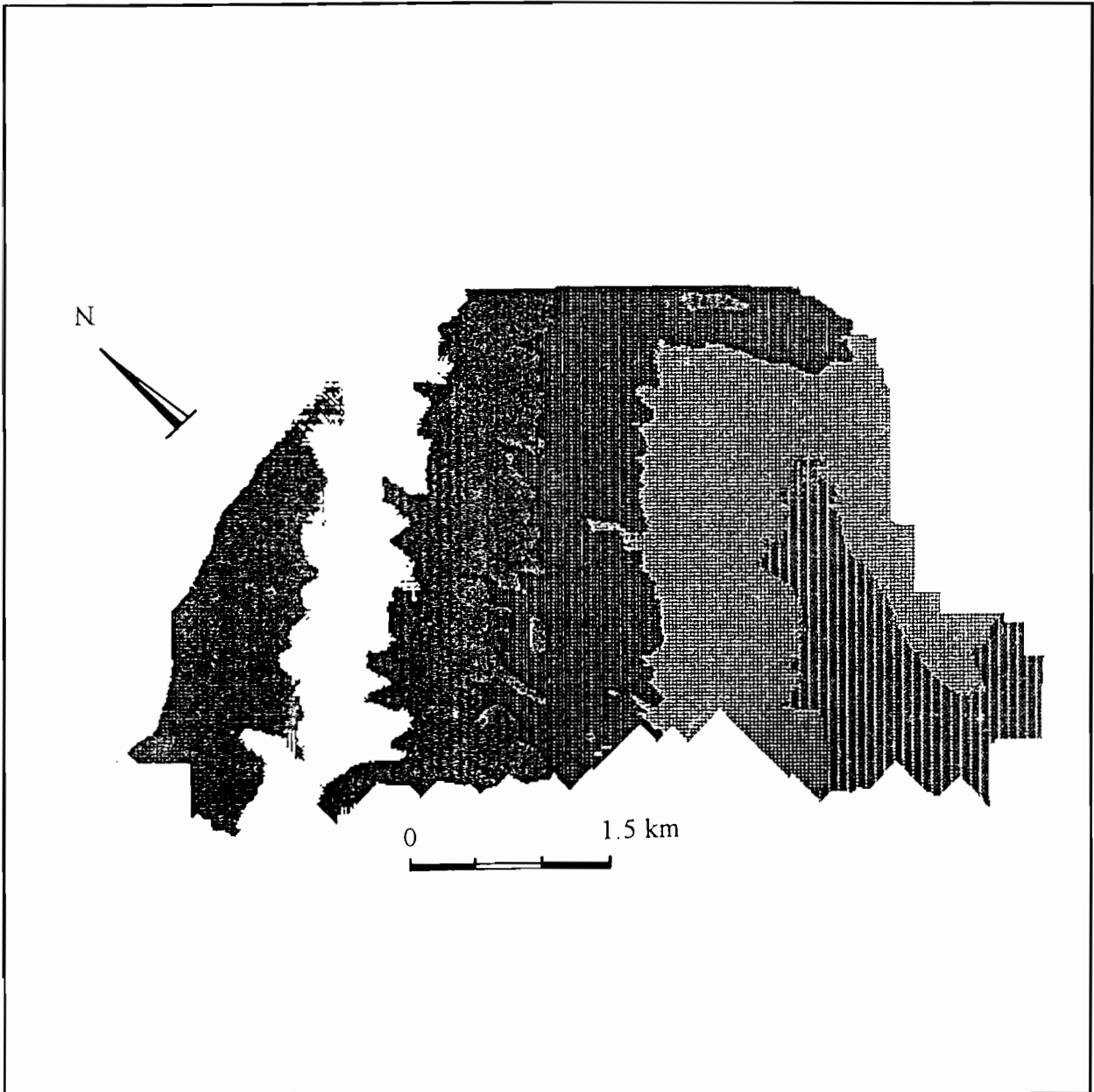


Figure 2: MNT du bassin versant de l'oued El Hissiane

4 - Etude du bassin versant de l'oued Ez-Zioud à partir du MNT calculé

Avant de se lancer dans cette étude, il faut d'abord extraire le bassin versant de l'oued Ez-Zioud de celui de l'oued El Hissiane. Pour ce fait, nous avons commencé par diviser le bassin d'El Hissiane en de sous bassins et on distingue (figure 3.1) l'ossature principale de Zioud qui occupe, à son extrémité Sud-Est, une partie d'El Hissiane ne lui appartenant pas. Pour essayer de comprendre cette anomalie, nous nous sommes évertués à calculer les surfaces drainées au niveau du bassin versant d'El Hissiane. Ainsi à travers la carte des surfaces drainées (figure 4.2) on a pu comprendre qu'il existe un lien étroit entre les talwegs principaux des deux bassins. Aussi, si on analyse un peu la partie Sud-Ouest de cette carte, on trouve une autre anomalie sur le réseau d'écoulement de l'oued El Dhiar qui forme avec l'oued Ez-Zioud l'oued El Hissiane. Cela est dû au fait que les courbes de niveau qui matérialisent le talweg principal de cet oued ne se forment pas sur la carte numérisée si bien qu'au cours du calcul des MNT, elles ont pris des directions non seulement différentes de la réalité, mais aussi loin d'être logiques. C'est l'une des erreurs qu'on a voulu éviter avec Zioud en partant d'Hissiane.

Pour cerner les véritables contours de Zioud nous avons procédé par des corrections interactives sur des mailles carrées de 12,5 m de côté (pas du MNT) et ceci, en allant contre la logique de l'écoulement suivant les courbes de niveau. Après la réussite de l'extraction, nous avons commencé l'étude géomorphométrique de Zioud. La carte des altitudes obtenue (figure 4.3) présente Zioud comme une plate-forme dont les altitudes divisées en six classes (tableau 4.1) varient sans ressaut ni cassure de 775 m à 1200 m. Nous avons poursuivi l'étude géomorphométrique en calculant les pentes (figure 4.3) qui ont été regroupées en cinq classes avec une forte représentativité des classes 0 - 5% et 5 - 15% (tableau 4.2). L'étude du lien entre ces deux paramètres permet de dire que dans leur variation, les pentes suivent les altitudes.

Tableau 4.1 : Classes d'altitudes

Couleurs	Classes en m	Surfaces en Km ²	Surfaces en %
Vert	775 - 854	2,914	18,8
Marron	855 - 919	4,588	29,6
Bleu	917 - 975	3,720	24
Rouge	956 - 975	2,246	14,5
Jaune	976 - 1037	1,193	7,7
Violet	1037 - 1200	0,837	5,4

Tableau 4.2 : Classes de pentes

Couleurs	Classes en %	Surfaces en Km ²	Surfaces en %
Vert	0 - 5	4,061	26,2
Jaune	5 - 15	9,703	62,6
Rouge	15 - 25	1,442	9,3
Bleu	25 - 35	0,279	1,8
Marron	35% et plus	0,155	0,1

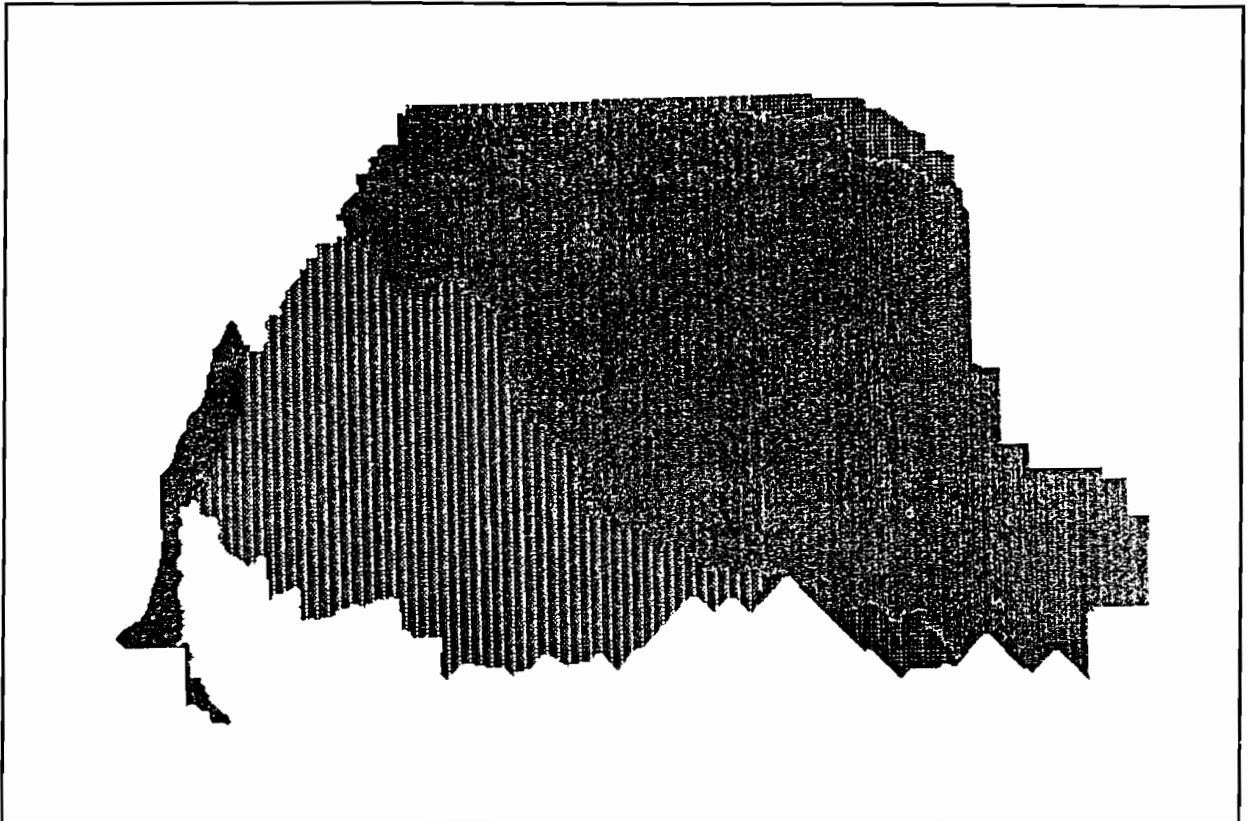


Figure 3.1: Sous bassins versants de Hissiane

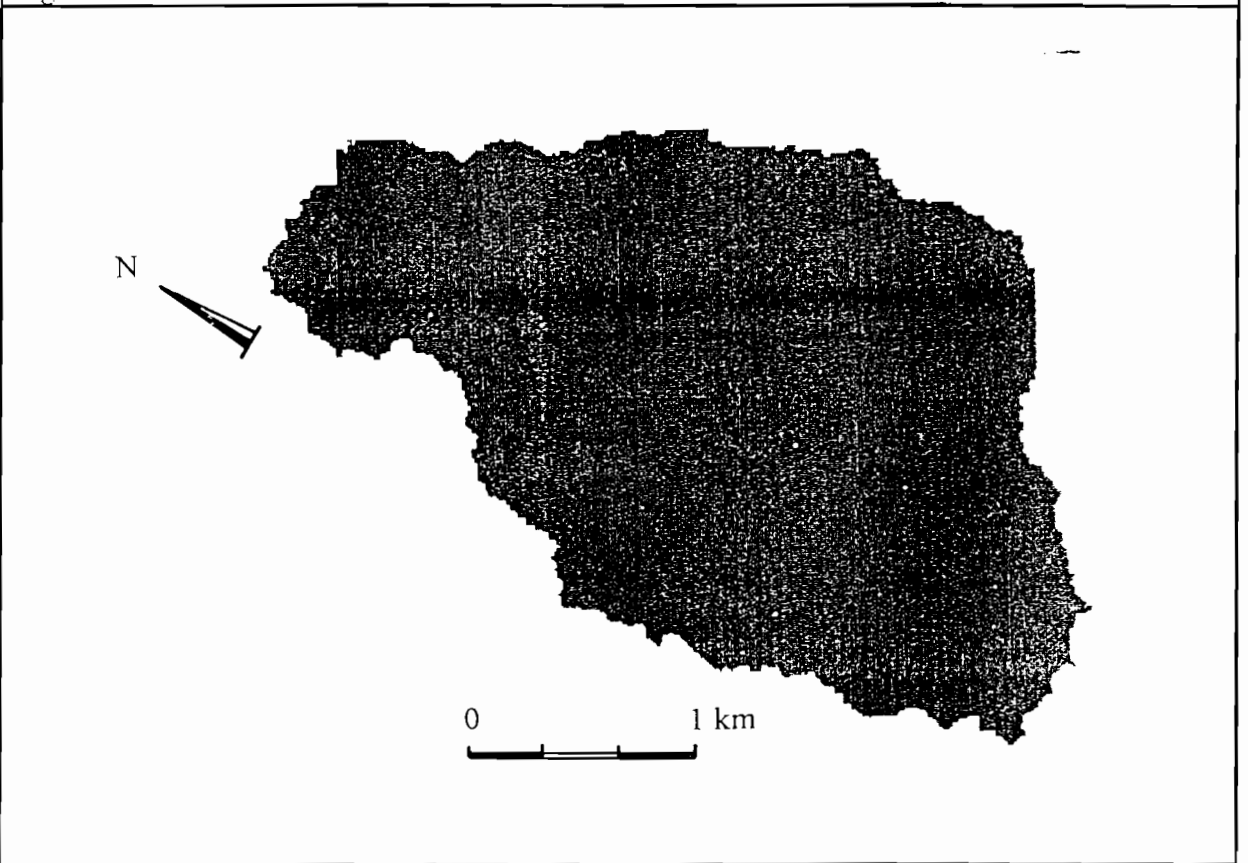


Figure 3.2: Bassin versant de l'oued Ez-Zioud

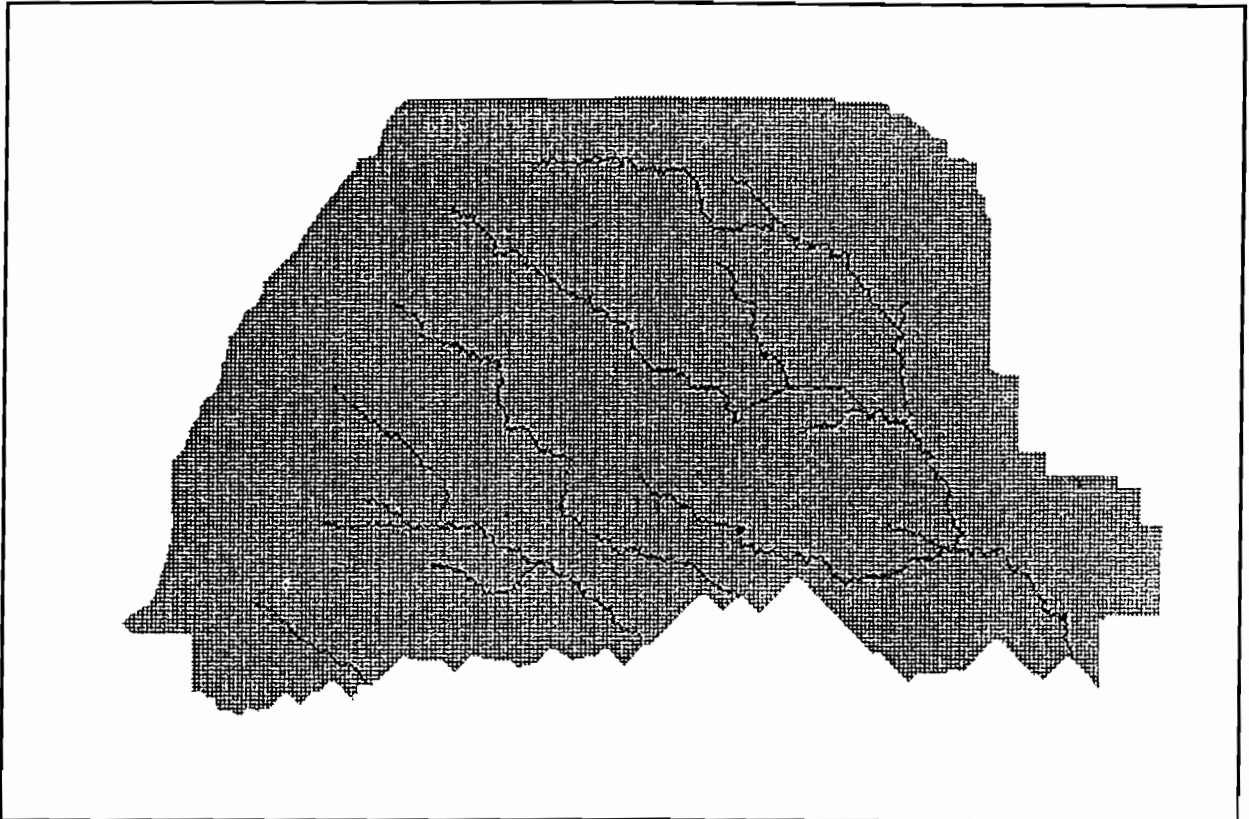


Figure 4.2 . : Surfaces drainées au niveau du bassin d'El Hissiane

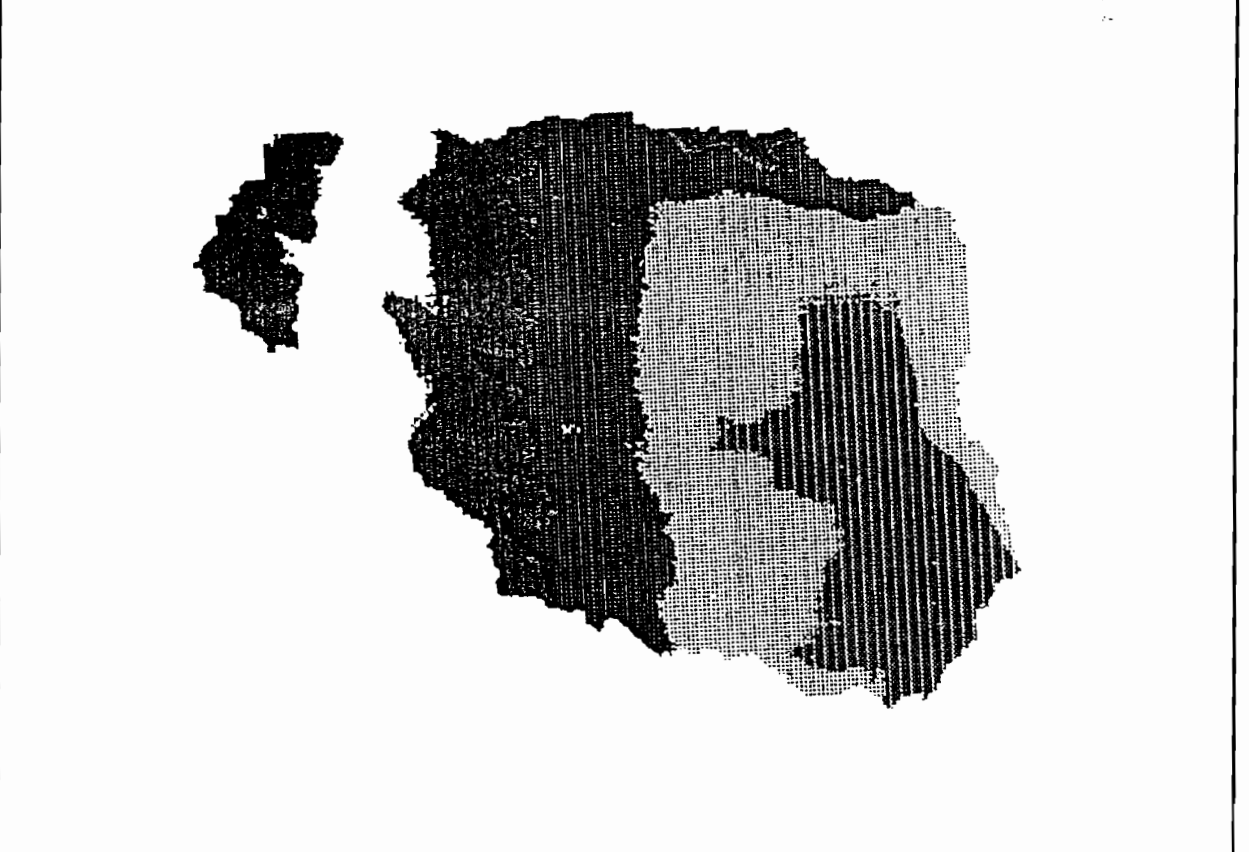


Figure 4.3: Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud



Figure 4.3bis: Carte des pentes

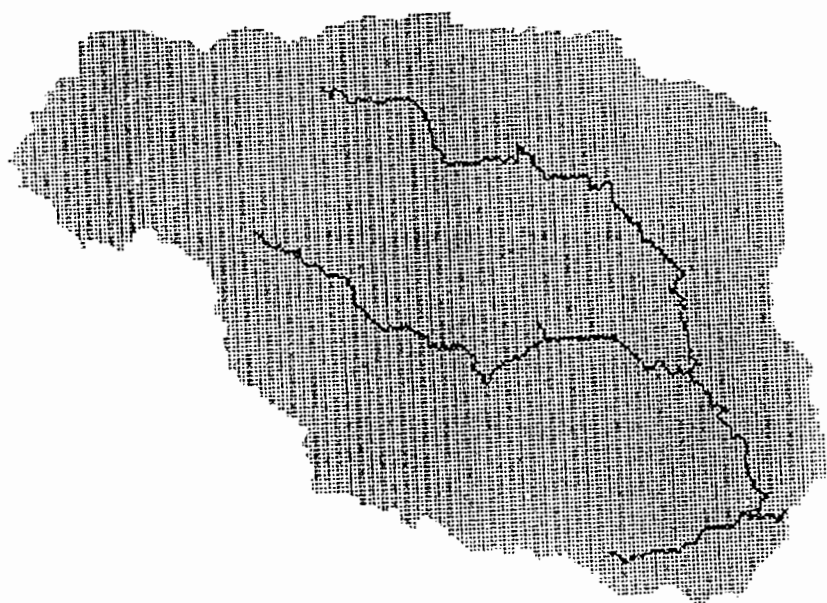


Figure 4.4: Réseau d'écoulement

Nous avons poursuivi l'étude géomorphométrique avec pour objectif la recherche du talweg principal en partant du réseau d'écoulement. Seulement, les deux branches issues de la bifurcation qu'on observe la figure 4.4 évoluent symétriquement vers l'amont ce qui ne nous permet pas de dire sans ambiguïté laquelle elle fait partie du talweg principal. Nous avons alors eu recours à TOPASE qui est en principe un logiciel de simulation des écoulements de surface mais qu'on a essayé d'utiliser à d'autres fins [ONIBON H. 1995]. Ainsi avec un seuillage assez poussé, nous avons étalé comme des nervures sur une feuille, le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Ez-Zioud qui nous a permis d'affirmer que c'est la branche est qui fait partie du talweg principal. Par suite, une étude de la corrélation entre le réseau hydrographique et la pente a révélé que la pente est une fonction linéaire des surfaces drainées.

L'étude a aussi concerné les indices de Beven qui permettent d'estimer en fonction de la morphologie du site, les risques de saturation. Pour éviter les erreurs introduites dans les résultats par les dépressions présentes sur le MNT, le fichier des altitudes a été lissé avec l'utilitaire de LAMONT LAM_LISS. Mais avant d'arriver à ce stade, nous avons dû réduire la taille du MNT car c'est une opération nécessitant non seulement une importante place en mémoire, mais elle n'est applicable qu'aux MNT de taille inférieure ou égale à 300 profils de 200 points chacun. Le tableau 4.3 résume la répartition des 5 classes d'indices de Beven représentées sur la figure 4.5 La détermination de cet indice nous aidera par la suite à quantifier en partie le ruissellement au niveau du bassin versant de l'oued Ez-Zioud. Les valeurs les plus fortes seront davantage propices à l'écoulement de surface (zone contributive) par rapport aux valeurs faibles. Un abaissement de cet indice stimule l'extension des zones saturées au cours d'une averse. A travers la carte de l'indice de Beven nous voyons que la saturation du sol est inversement proportionnelle à la pente. Ceci est tout à fait normal car plus la pente est forte, plus le ruissellement sera important, moins il y aura de l'eau stockée en surface. Ce paramètre pourra être pris en compte lors de la réalisation de certains travaux tels que les constructions des barrages, lacs colinéaires au niveau du bassin versant. Une étude approfondie des caractéristiques pédologiques du sol s'avère aussi nécessaire pour déterminer de façon plus convaincante l'indice de saturation du sol.

Tableau 4.3 : Classe des indices de Beven

Couleurs	Classes en m	Surfaces en Km ²	Surface en %
Bleu	-1541 à -682	0,977	6,3
Vert	-683 à 1097	7,393	47,7
Rouge	1098 à 2982	5,580	36,7
Jaune	2983 à 4650	1,023	6,6
Violet	4651 à 7764	0,403	2,6

5 - Zones homogènes

Les études précédemment réalisées vont nous permettre à partir de la superposition des différentes cartes de dégager des zones hydrologiques homogènes. Nous avons d'abord superposé les micros bassins versants au réseau hydrographique. Mais au niveau de quelques

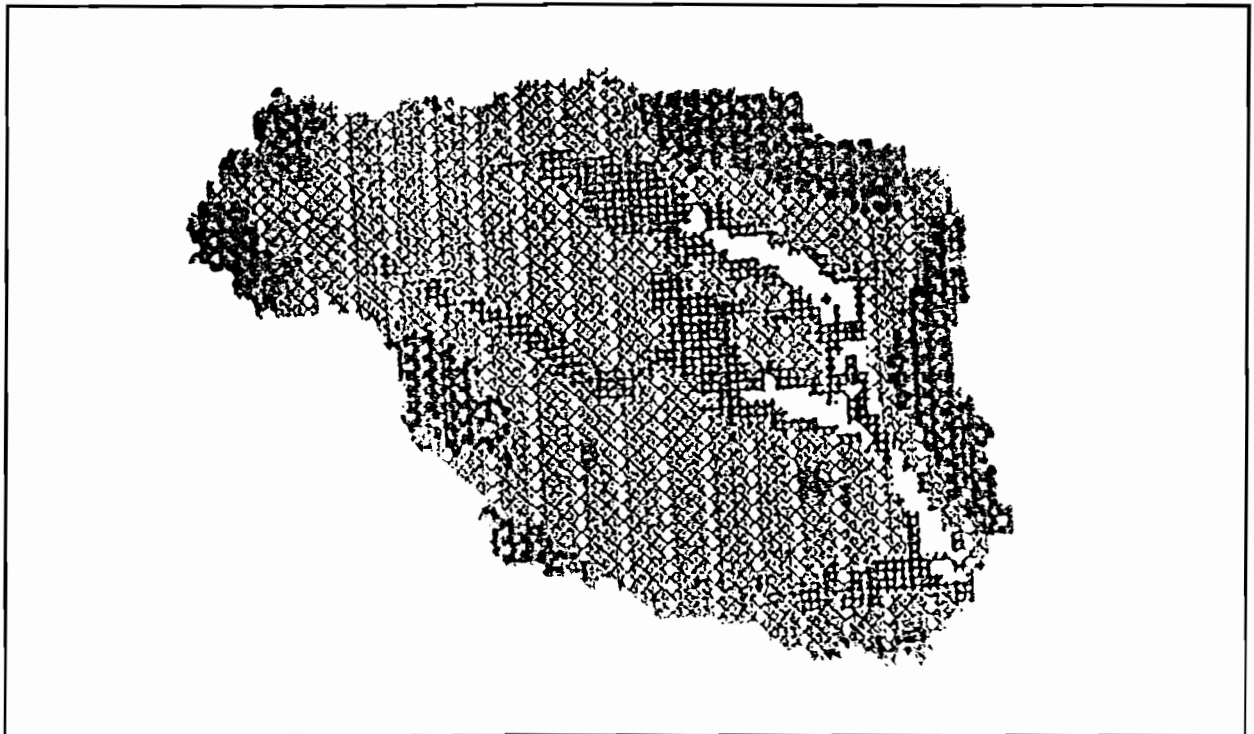


Figure 4.5 : Carte des indices de Beven

micros bassins (figure 5. .) il y a une anomalie due à la présence de deux exutoires. C'est l'une des limites de DEMIURGE. Nous avons alors décidé superposer les cartes des différents paramètres étudiés. Partant de la remarque que dans leur variation les pentes suivent les altitudes et qu'il en est de même pour les indices de Beven et le réseau hydrographique, nous avons trouvé judicieux de ne superposer que les cartes de pentes et des indices de Beven. Ceci nous a conduit à 13 types d'unités homogènes (figures 6. .) auxquelles il faudrait superposer les cartes de couvert végétal et de la pédologie. Rien qu'en superposant les 4 classes du couvert végétal à ces 13 zones, on se retrouvera avec environ 52 types de zones qui seraient non seulement difficiles à gérer, mais auraient des surfaces assimilables à celles d'une maille.

Autant commencer la modélisation. Or l'objet de notre étude ce n'est pas la modélisation, mais plutôt trouver les éléments nécessaires à une modélisation : c'est à dire une bonne discrétisation spatiale afin de définir des zones homogènes et avoir une idée plus claire sur la fonction de production d'une unité homogène et la fonction de transfert d'une maille à l'autre. Toute fois, nous avons un temps soit peu réfléchi sur le problème de la modélisation en particulier la modélisation à discrétisation spatiale. Ainsi Zioud a été divisé en des mailles de 200 m de côté qui superposées aux cartes de pentes, des courbes de niveau et du réseau hydrographique nous a aidé pour la détermination des sens d'écoulement par maille (figure 7.). Ceci sera d'une grande, utilité au (modélisateur) lors de la détermination de la fonction de transfert. Pour les mailles hétérogènes, nous suggérons à ce qu'elles soient divisées en des mailles homogènes. Plusieurs auteurs ont essayé de montrer l'importance de la discrétisation spatiale dans les problèmes de modélisation distribuée.

KIRKBY 1976 a montré l'importance de la topologie du réseau hydrographique sur l'écoulement de surface. La description géomorphologique de représenter le bassin versant par un ensemble de cascades, réservoirs, aidera le modélisateur dans sa fonction de transfert.

D'après LAGLAINE V. et al. 1993 deux modèles ont été proposées avec comme atout commun la prise en compte de la description géomorphologique du bassin versant. Ce sont les modèles WASHS « watershed Simulation modèle » utilisant l'hydrogramme unitaire géomorphologique (GUH) et le modèle de cascades non linéaire géomorphologique GNC. Les deux sont adaptés à la modélisation de crues extrêmes sur de petits bassins versants et la description géomorphologique du bassin versant qui permet de déterminer l'apport relatif des différentes unités homogènes.

Conclusion

" L'hydrologue travaille un peu à la manière du biologiste qui chaque fois qu'il souhaite affiner ses recherches augmente le grossissement de son microscope ". Cette phrase de J-F NOUVELLOT dans son ouvrage : " Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique Tropicale et Equatoriale " doit être notre leitmotiv ; d'autant plus que nous sommes conscients de l'impact que peut avoir une erreur d'un millimètre sur les résultats d'un MNT obtenu par numérotation d'une carte topographique à petite échelle. Pour ce fait, la réussite du calcul des modèles numériques de terrain à partir d'une carte topographique à grande échelle et ceci par la méthode d'assemblage des feuilles doit être considérée comme le premier acquis de nos travaux. Cette expérience est très capitale car il semblerait à notre connaissance qu'elle n'a jamais été réalisée.

L'idée de partir du bassin versant de l'oued Hissiane pour extraire celui de l'oued Ez-Zioud nous a permis de cerner les véritables contours de ce dernier.

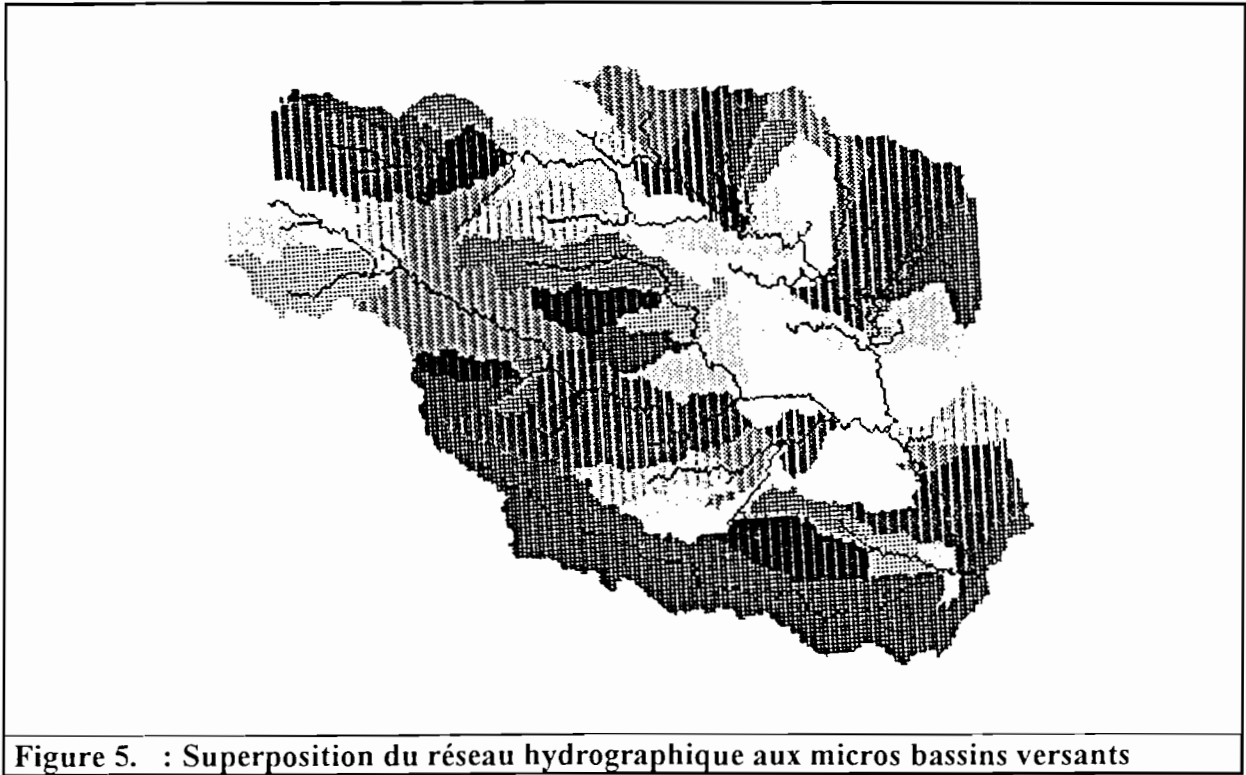


Figure 5. : Superposition du réseau hydrographique aux micros bassins versants

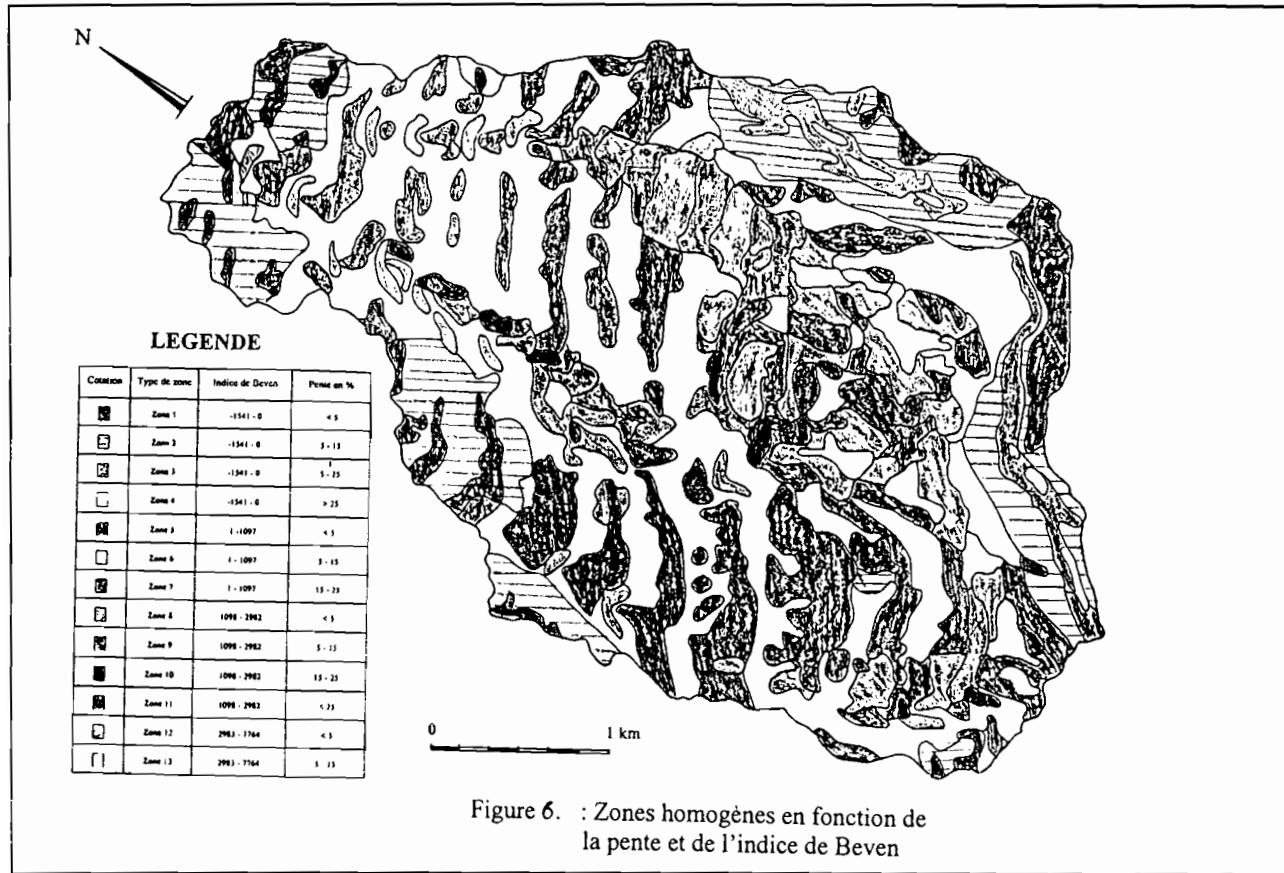


Figure 6. : Zones homogènes en fonction de la pente et de l'indice de Beven

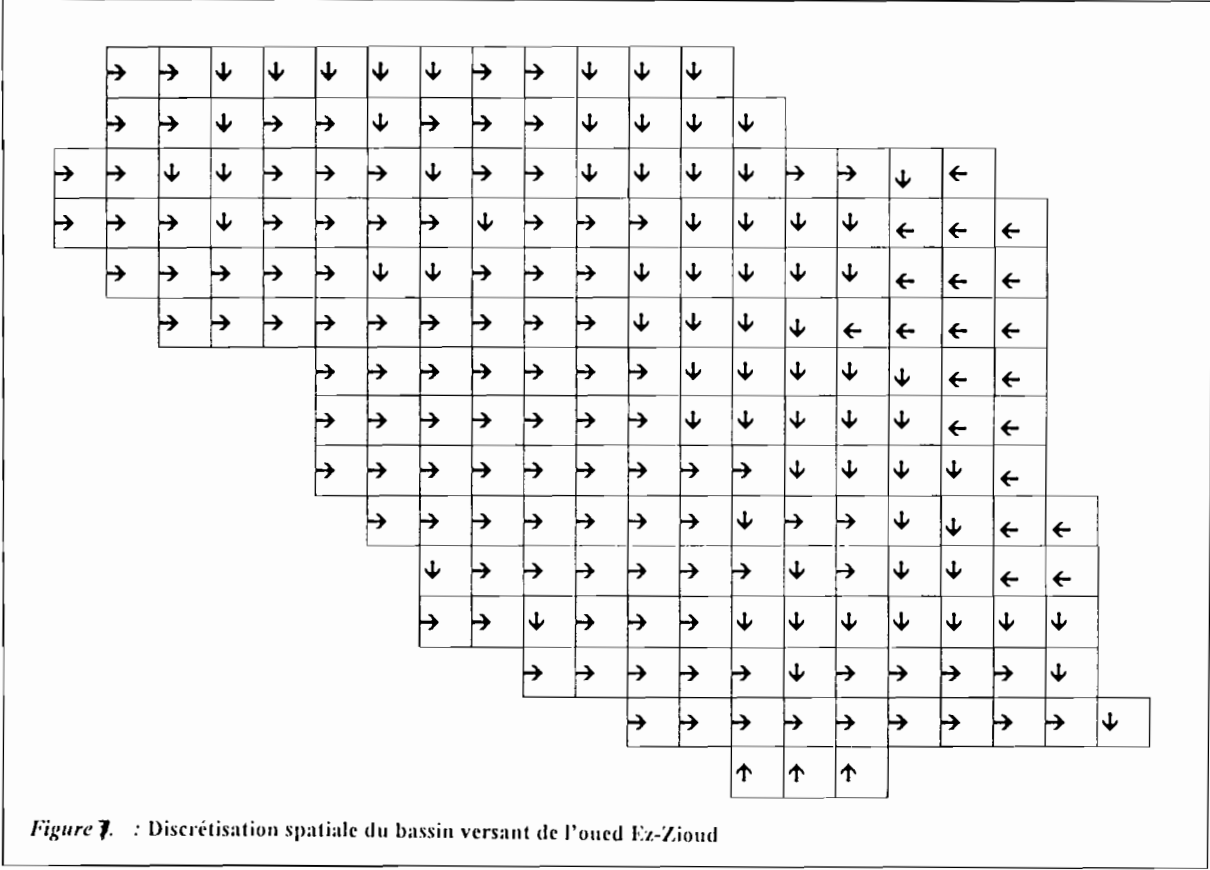


Figure 7 : Discretisation spatiale du bassin versant de l'oued Ez-Zioud

L'évaluation de partir des chaînes DEMIURGE des paramètres morphométriques et hydrométriques intervenant dans le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Ez-Zioud nous a permis d'obtenir les cartes de pentes, d'altitudes, du réseau hydrographique, des indices de Beven. L'étude qualitative de ces paramètres nous permet de dire qu'ils ont non seulement un rôle très complexe, mais aussi que leurs actions s'interfèrent et ne sont pas indépendantes et que l'organisation des mécanismes de l'écoulement se fait selon un schéma intimement lié à la morphologie.

Pour atteindre le véritable objectif visé, la carte des zones " dites homogènes " doit être superposée à celle de la pédologie et du couvert végétal. Les difficultés rencontrées lors des superpositions et l'intervalle des différentes classes de paramètres nous permettent d'affirmer qu'il serait absurde de dire sans ambiguïté qu'une zone est homogène. D'où l'usage de l'expression zones " dites " ou " sensiblement " homogènes s'avère plus adéquat.

Si nous ne sommes pas parvenus à déterminer en intégralité ces zones " dites "homogènes, il convient de souligner que le complément logique qu'il faudrait apporter à ce travail pour une bonne interprétation voire la compréhension du comportement hydrologique du bassin reste l'application de modèles mathématiques aux observations et expérimentations hydrologiques.

La signification physique des paramètres, leur lien avec des caractéristiques du bassin versant et un sujet de préoccupation essentiel pour la modélisation hydrologique.

Enfin, nous tenons à souligner que malgré tous ses mérites et sa remarquable contribution à l'étude des modèles numériques de terrain, DEMIURGE a toujours des limites d'application. L'exemple le plus frappant dans ce travail est l'extraction des sous bassins à partir du réseau hydrographique. Bien qu'il constitue un outil très puissant d'analyse, l'informatique ne peut suffire à lui seul pour résoudre tous les problèmes d'aménagement. Il faudrait des démarches complémentaires s'appuyant sur la réalité du terrain.

BIBLIOGRAPHIE

BARBERY Jean et DELHOUME Jean Pierre ; ORSTOM 1982 : Etude en milieu méditerranéen.

CAMUS H, DUMAS R, BEN YOUNES M ; ORSTOM Janvier 1987 : Analyse de l'écoulement sur le bassin versant de l'oued El Hissiane.

CAMUS H, DUMAS R, BEN YOUNES M : Recherche en milieu méditerranéen semi-aride (Djebel SEMMAMA). Rapport des campagnes 1974 - 75, 1975 - 76 et 1976 - 77.

CHEVALIER P., CLAUDE J., POUYAUD B, BERNARD A. : Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina-Faso) 1976-1981. Pluies et crues au Sahel.

DEPARTERE C. : Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain : DEMIURGE 2,0.

DEPARTERE C. : Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain : DEMIURGE 2,3. Module de numérisation T2 version 1,2

DEPARTERE C. : Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain : DEMIURGE. Module de simulation : TOPASE version 1,0

DEPARTERE C. : Notre introductive aux sessions de formation à l'utilisation de la chaîne de production et de traitement DEMIURGE . CNRE/ORSTOM Antananarivo mars 1983.

HYPERBAV (Equipe de l'ORSTOM) : Structure et fonctionnement hydropédologique d'un bassin versant en savane humide. Collection Etudes et Thèses de l'ORSTOM

KIRKBY M.J. 1976 test of the random network model and its application to basin hydrology - Earth surface Process 1,197 - 252.

LAGLAINE V., BEROD D., MUSY A. 1993 deterministic extrem flood modelling of a mountainous catchment with use of a geomorphologic description of the channel network.

NOUVELOT J-F : Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versant ruraux en Afrique tropical et équatoriale.

ONIBON H. : Caractérisation des zones homogènes du bassin versant de l'oued Ez-Zioud à des fins de modélisation hydrologique (ESIER/ORSTOM 1995)

SINGH V.P. 1989. A quasi conceptual linear with potential. Application to ungaged basins. Military hydrology. Report 17, U S Army corps of Engineers.

**ATELIER INTERNATIONAL : TELEDETECTION ET GESTION
DES RESSOURCES EN EAU
MONTPELLIER 29/11/95 . 1/12/95**

**Rôle de la télédétection dans l'évaluation et la
cartographie des épandages artificiels
des crues dans les hautes steppes tunisiennes**

DAOUD Abdelkarim Fac. Lettres S. Humaines Sfax (Tunisie)
Département de Géographie
TRAUTMANN J., CNRS CEREG, URA 95 Strasbourg.

Résumé

L'insuffisance et l'irrégularité des précipitations dans les hautes steppes tunisiennes rendent nécessaire le recours à des apports d'eau supplémentaires dans tout effort d'intensification de l'agriculture. Les différentes civilisations anciennes ont pratiqué des techniques ingénieuses de mobilisation des eaux de ruissellement, parmi celles-ci, l'épandage artificiel des crues. Mais, face aux besoins toujours croissants en eau d'irrigation, les agriculteurs des hautes steppes tunisiennes ont eu de plus en plus recours à l'utilisation des eaux des nappes phréatiques, captées par puits de surface équipés en moto pompes. Cette "modernisation" de l'agriculture a entraîné un abandon presque total des techniques traditionnelles de mobilisation des eaux, transmises et enrichies de génération en génération, et bien adaptées à ce milieu naturel fragile. L'exploitation effrénée de ces nappes a entraîné le rabattement inquiétant de leur niveau piézométrique. Outre ce phénomène, cette communication tente d'étudier, à partir d'exemples précis, le résultat du recours actuel à ces techniques anciennes d'épandage des eaux de crue, par la mise en place d'ouvrages modernes de dérivation sur les lits des oueds, dans le but d'irriguer des superficies supplémentaires dans les plaines d'épandage, et de favoriser l'infiltration des eaux aux dépens du ruissellement, pour la recharge artificielle des nappes phréatiques. En plus des enquêtes effectuées sur le terrain, la télédétection permet d'évaluer l'impact spatial des épandages artificiels, de le cartographier, et repérer les sites potentiels favorables à la mise en place de nouveaux ouvrages.

Introduction

Les plaines de Sidi Bouzid et d'Al Hichria appartiennent aux Hautes Steppes Orientales Tunisiennes. Les conditions contraignantes du milieu, caractérisé essentiellement par la faiblesse des précipitations et leur irrégularité interannuelles et intersaisonnières expliquent le recours à l'irrigation comme moyen d'intensification de la production agricole. Dans la première et la deuxième partie, ce travail tentera de présenter les conditions du milieu et d'analyser l'impact du recours démesuré à l'exploitation des nappes phréatiques, et les aménagements hydrauliques mis en place pour remédier à la baisse du niveau piézométrique des nappes en provoquant sa recharge par les épandages artificiels des crues. Enfin, dans une troisième partie, ce travail essayera d'analyser l'apport de la télédétection dans l'évaluation et la cartographie des épandages artificiels, et dans la recherche de nouveaux sites pour des aménagements futurs, afin d'assurer une exploitation rationnelle et judicieuse des ressources offertes par le milieu naturel.

1) L'eau, enjeu fondamental dans le développement de la région

1.1 Les contraintes du milieu

Les plaines de Sidi Bouzid et d'Al Hichria constituent deux larges cuvettes synclinales, entourées par des axes anticlinaux de faible altitude (Carte n°1). L'axe Nord-sud constitue la limite Est de ces deux plaines. Le Djebel Melloussi-Majoura limite la plaine d'Al Hichria par le Sud, le Djebel Al Kebar constitue sa limite Nord. Celui-ci limite donc la plaine de Sidi Bouzid par le Sud, elle-même limitée au Nord par les hauteurs de Bir-al Hafey. Entre les Djebels et les fonds de cuvettes, les glacis, aux sols de texture sablo-limoneuse ont généralement des pentes faibles. Les moyennes annuelles des précipitations sont généralement d'environ 250 mm. L'étude de leur répartition annuelle montre des pointes en automne et au printemps et une sécheresse absolue en été, pouvant parfois se prolonger en automne. Mais la sécheresse estivale peut parfois être brusquement rompue par des pluies orageuses, causant des inondations plus ou moins importantes. Ces pluies contribuent à gonfler le total annuel sans être pour autant complètement efficaces puisque l'équivalent de la moyenne saisonnière peut tomber en l'espace de quelques heures. Dans ces conditions, le recours à l'irrigation paraît indispensable.

1 2 L'irrigation : moyen essentiel d'intensification de la production agricole

Il apparait de ce qui a précédé que le milieu présente beaucoup plus de contraintes que d'avantages. Les conditions naturelles contraignantes rendent en effet l'irrigation nécessaire à tout effort d'intensification de la production agricole. Les besoins régionaux et surtout extrarégionaux des centres urbains littoraux en produits agricoles ne peuvent être satisfaits par la simple agriculture pluviale. L'insertion de plus en plus accentuée de la région dans l'économie de marché va entraîner une intensification progressive de la production et les cultures maraîchères irriguées vont devenir progressivement la spéculation agricole la plus importante, surtout par la valeur ajoutée qu'elles procurent. Le principal aspect de cette intensification, est l'exploitation des nappes phréatiques par puits de surface. Les conditions édaphiques des cuvettes de Sidi Bouzid et d'Al Hichria sont favorables à l'emmagasinement de l'eau infiltrée après les pluies ou les crues. La nappe phréatique de Sidi Bouzid peut, à juste titre, être considérée comme la plus importante nappe phréatique de toute la Tunisie (KOSCHEL R et ZARROUK M, 1976 ; DAOUD et TRAUTMANN, 1994). Bien individualisée par les anticlinaux de faible altitude qui l'entourent, la plaine de Sidi Bouzid couvre une superficie de 600 Km² environ. De très faible pente, cette plaine est drainée par l'Oued Al Fakka et son principal affluent, l'Oued Sarig Adh-Dhiba. La nappe de Sidi Bouzid a des possibilités annuelles évaluées à 25 millions de m³. De plus, les dépôts du Quaternaire, d'une épaisseur supérieure à 50 mètres dans la partie amont de la plaine, ont permis de constituer une très importante réserve d'eau, restée longtemps non exploitée. Quant à la nappe de Horchane-Braga, correspondant à la cuvette d'Al Hichria, elle se trouve au sud de la première, les lignes de crêtes du Djebel Al kebar constituent une ligne de partage des eaux entre deux bassins versants. Cette nappe est beaucoup moins importante que la première, puisque ses possibilités annuelles sont évaluées à environ deux millions de m³ seulement (GASSARA, A 1980). La plaine d'Al Hichria n'est pas drainée par des oueds importants, mais une multitude de petits ruisseaux et de torrents dévalent principalement du flanc SE du Djebel Al kebar qu'ils décèquent fortement, traversent les piemonts sablo-lioneux de faible pente, où leurs lits deviennent relativement larges et faiblement encaissés. Lors des crues qui suivent les averses, même celles de faible intensité, L'oued Oum-at téboul peut arriver jusqu'à Garet. En-Njila (Garaà : niveau de base local dans une dépression, constituant

un collecteur des eaux de ruissellement)

De toutes les transformations profondes subies par le paysage rural de notre zone d'étude depuis quatre décennies environ, l'irrigation par puits de surface peut être considérée parmi les plus importantes, par les transformations économiques et sociales qu'elle a induites et des déséquilibres écologiques qu'elle a engendrés.

I 3 Bref aperçu historique sur l'irrigation : d'une exploitation "écologique" à une exploitation minière des ressources en eau

Tout comme le reste des hautes steppes tunisiennes, la plaine de Sidi Bouzid et d'Al Hichria ont connu l'irrigation depuis longtemps. La région de "Gammouda", décrite par beaucoup de voyageurs et chroniqueurs arabes ayant visité la région au moyen âge, correspond à l'actuelle région de Sidi Bouzid. Celle-ci fut décrite comme possédant des vergers et jardins irrigués, particulièrement de part et d'autre de l'oued Al Fakka (ABDELAWAHAB H.H 1954). Cette irrigation était pratiquée à partir des puits de surface, mais surtout à partir de dérivations construites par les populations locales, dans le cadre des travaux communautaires dûs par les différentes fractions de tribus. Ces dérivations consistaient en des élévations de terre, renforcées par des branchages. Elles étaient mises en palce de chaque côté des berges de l'oued Al Fakka, en forme d'arêtes, de poisson. Leur rôle était de diriger les eaux des crues vers les champs pour provoquer leur submersion. Quelques jours après l'infiltration des eaux, les populations locales labouraient et semailent et attendaient les nouvelles pluies et les nouvelles crues pour que les épis soient de nouveau irrigués. Ces ouvrages de dérivation, appelés localement "M'goud" étaient fragiles, peu résistants aux grandes crues, mais faciles à reconstruire. Plusieurs M'goud étaient au début du siècle, aménagés sur l'oued Al Fakka (PENET, P; 1910). Cet auteur n'a pas caché son admiration pour ces aménagements qu'il décrit de façon précise. Malgré leur simplicité, ces aménagements ont permis aux sociétés traditionnelles qui occupaient cet espace, de faire face au manque d'eau et d'utiliser les crues à leur profit. De plus, ils ne mettaient pas en péril l'équilibre fragile de l'écosystème, bien au contraire, ces techniques simples mais bien maîtrisées, permettaient de le conserver. Si la plaine d'Al Hichria n'a pas connu les mêmes aménagements, on peut toutefois affirmer que l'irrigation est également un phénomène ancien, particulièrement autour du village de Mlikat. Les vestiges d'un ancien aqueduc romain existent encore dans la partie centrale du flanc SE du Djebel Al Kebar.

Si, au début des années soixante, la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid était captée par 300 puits de surface seulement, ayant en totalité un débit fictif continu de 22,2 litres/s, aujourd'hui, le nombre de puits a dépassé 2500 et le débit fictif continu 2000 l/s (DAOUD et TRAUTMAAN 1994). Dans certains secteurs de la plaine, comme ceux de Zaàfria, Sandoug, ceddaguia ou Oum laàdham, la densité dépasse 30 puits/km². Plus de 90% des puits sont aujourd'hui équipés en motopompes. De même, la plaine d'Al Hichria compte aujourd'hui plus de 1200 puits de surface, dont environ la moitié se trouve sur le piemont SE du Djebel Al Kebar. Ces puits de surface, captant la nappe de Horchane-Braga, sont presque en totalité équipés de motopompes. Le résultat de cette augmentation spectaculaire du nombre de puits de surface fut l'augmentation du volume d'eau pompée: S'il ne dépassait pas un million de m³ par an pour la nappe de Sidi Bouzid au début des années soixante, il est estimé aujourd'hui à plus de 54 millions de m³. Et compte tenu du fait que la nappe a des possibilités de 25 millions de m³ par an, on peut déduire que le taux de surexploitation dépasse 100%. Le phénomène de surexploitation de la nappe phréatique de Horchane Braga dans l'état actuel de nos connaissances ne peut pas être évalué correctement, mais dépasse largement le taux de 100% selon les services régionaux de l'Agriculture. Ainsi, le niveau piézométrique des nappes a sensiblement baissé, si bien que les irrigants sont obligés aujourd'hui, à chaque fois que ce niveau baisse, de creuser une sonde au fond du puits, et de l'approfondir toujours de plus en plus pour capter l'eau. Dans la plaine de Sidi Bouzid, le rabattement a atteint par endroits plusieurs mètres, entraînant l'intrusion d'eau salée, provenant de la bordure de la nappe.

II) Les épandages artificiels des eaux des crues : solution possible au déficit hydrique

II 1 limites des mesures coercitives

Les premières mesures prises par l'Administration de l'agriculture pour faire face aux problèmes posés par l'exploitation excessive des nappes phréatiques furent des mesures coercitives. En effet, dès la fin des années soixante dix, une série de mesures administratives furent prises. Parmi celles-ci, la création d'un "périmètre de sauvegarde" englobant la quasi-totalité de la plaine de Sidi Bouzid. La sauvegarde envisagée consistait dans l'obligation d'obtenir l'autorisation préalable du ministère de l'agriculture avant

toute opération de creusage ou d'équipement d'un puits de surface. De plus, un "périmètre d'interdiction" fut également institué, concernant les zones de la plaine où le rabattement est le plus spectaculaire et où l'intrusion d'eau salée est la plus inquiétante. Les résultats de ces mesures furent limités. Le creusage et l'équipement clandestins des puits se sont poursuivis parce que les irrigants ont toujours manifesté une volonté d'accroître leurs superficies irriguées. Dans le cadre d'une économie de marché, et compte-tenu des investissements consentis par les irrigants, il est clair que ce ne sont pas les paramètres de l'écologie qui prédominent et qui guident leur choix. Nos enquêtes sur le terrain (DAOUD A. 1987) ont montré que, si le premier investissement de l'épargne de l'irrigant allait vers la construction en dur, la seconde était, dans la plupart des cas, le creusage d'un deuxième puits, surtout si le premier était exploité en commun avec des frères ou dans le cadre du clan. L'individualisme prend en effet le pas dans ce domaine sur l'esprit communautaire et sur les survivances de la société segmentaire.

II 2 : Les épandages artificiels des crues : une technique ancienne longtemps oubliée ou délaissée.

Le passage d'une société tribale à une société paysanne (ATTIA, H 1977), accompagnant les profondes transformations économiques connues par toute la région, a entraîné l'abandon presque total des pratiques communautaires de gestion des crues. La petite hydraulique traditionnelle, basée sur les petits ouvrages de dérivation, va être progressivement délaissée pour céder la place aux solutions "techniques" et "modernes" : puits de surface équipés en groupes moto-pompes électriques ou diesel. Le pompage de l'eau à partir d'un puits de surface peut se prolonger jusqu'à 14 heures par jour avec un débit de 1,5 à 2 litres/s. C'est donc d'une véritable hémorragie qu'il s'agit, d'autant plus qu'une frénésie s'empara des agriculteurs pour le creusage des puits, surtout au milieu des années 70, au moment où le système de crédit offrait pour cela beaucoup de facilités et où l'Etat s'engageait à fond dans ce choix. Les réserves en eau des nappes phréatiques, constituées progressivement au cours du Quaternaire, vont être alors largement entamées. Outre l'irrigation par submersion, les ouvrages traditionnels d'épandage artificiel des crues favorisaient l'infiltration aux dépens du ruissellement et permettaient ainsi une recharge artificielle des nappes. L'absence ou l'abandon des ouvrages de dérivation en amont entraînaient le déversement de quantités substantielles d'eau des crues en aval, dans

les fonds des cuvettes plus ou moins salées (Sebkhat Al Akrech et Naggadha pour le cas de l'oued Al Fakka, Sebkahat An Njila par le cas de la plaine d'Al Hichria). Pour la plaine de Sidi Bouzid par exemple, la quantité d'eau écoulée par l'Oued Al Fakka et qui ne fait que transiter par la plaine pour se verser dans les sebkhat ou dans l'Oued Naggadha est estimée à 17 millions de m³ d'eau. (KOSCHEL, R. ZARROUK, M. 1976) Il est donc clair que l'épandage artificiel est un moyen efficace pour favoriser l'infiltration, et, par là-même, la recharge des nappes.

II 3 Localisation spatiale des principaux ouvrages modernes d'épandage des crues.

Ces ouvrages sont situés principalement dans la plaine de Sidi Bouzid, sur l'oued Al Fakka. Les ouvrages de Nouael, à l'intersection la route Tunis-Gafsa avec l'oued Al Fakka, et ceux de Zaafrica, un peu en amont du village du même nom, constituent un bon exemple illustrant la possibilité de remettre aujourd'hui en valeur les techniques anciennes d'épandage, mais par des procédés nouveaux (DAOUD. A. TRAUTMAAN. J. 1994) ; des ouvrages de dérivation, construits en béton, peuvent entraîner un épandage efficace des eaux des crues, irrigant ainsi des superficies considérables, et provoquant par la même la recharge de la nappe en évitant l'écoulement des eaux vers l'aval. Les ouvrages de Nouael et Zâafria sont prolongés par des canaux secondaires et tertiaires, devant jouer le rôle des anciens "Mgouds" et provoquer l'épandage artificiel des crues.

III) La cartographie des épandages artificiels:outil indispensable d'évaluation de leur Impact et d'aménagements futurs.

III.1 Le problème méthodologique.

Il est évident que les ouvrages modernes d'épandage ont contribué à accroître les superficies irriguées par épandage utilisées principalement pour les cultures de céréales ou de fourrages, parfois en intercalaire avec les plantations d'oliviers. Ils ont également favorisé l'infiltration des eaux des crues, entraînant par la même la recharge de la nappe. Mais le problème reste de savoir quel est le volume de cette recharge artificielle et quel est l'impact spatial des épandages réalisés. S'il est difficile actuellement de quantifier avec précision le volume d'eau gagné par la nappe par cette recharge artificielle, il est toutefois certain qu'après chaque crue, les irrigants remarquent une remontée du niveau piézométrique de la nappe. A la remontée du niveau de la nappe s'ajoute l'amélioration de

la qualité chimique de l'eau. L'apport de la télédétection est considérable dans l'estimation du volume infiltré, mais surtout dans la cartographie des zones irriguées par épandage artificiel et dans la reconnaissance des sites pouvant accueillir de nouveaux ouvrages d'épandage.

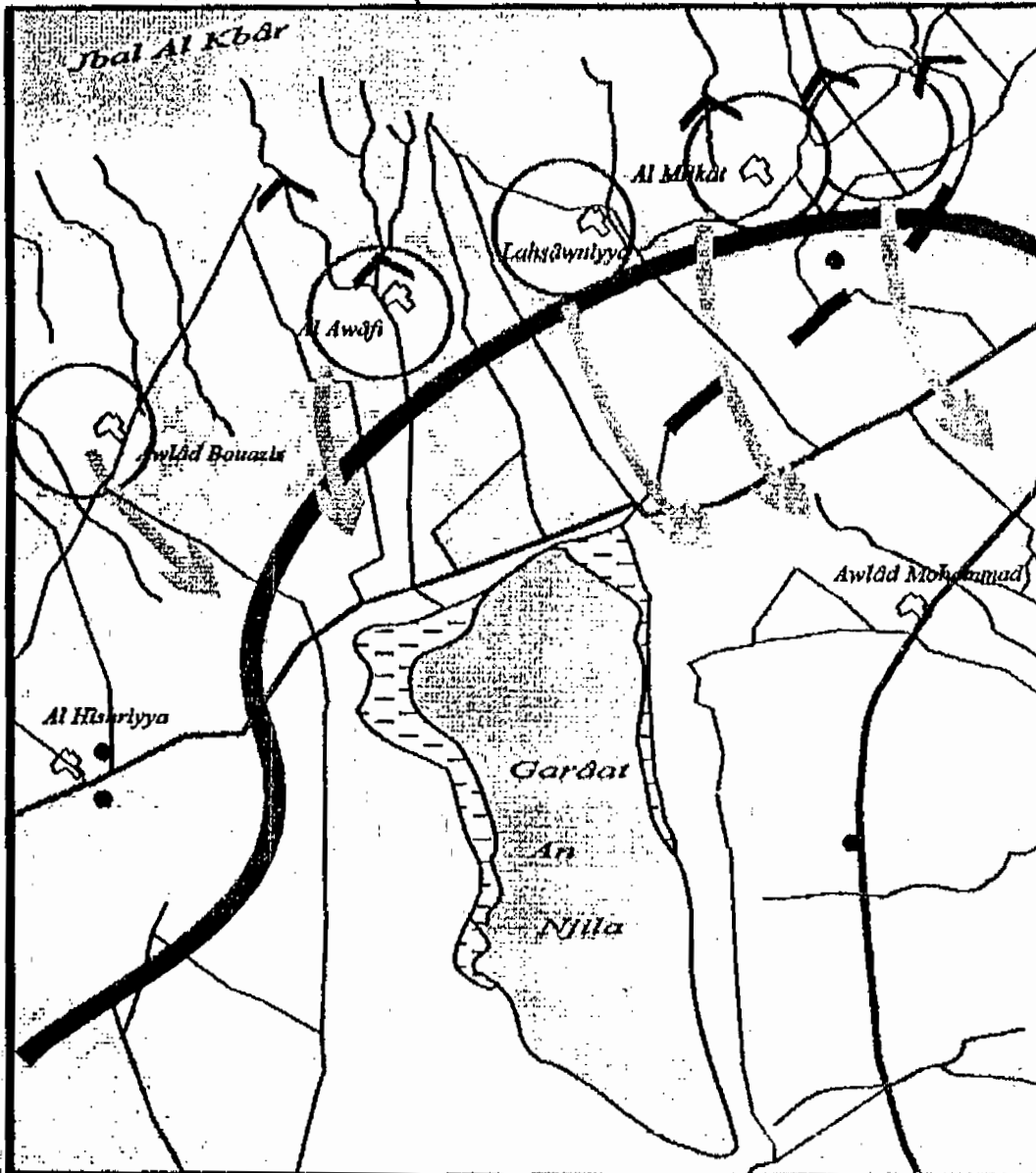
III 2 Apport de la télédétection : Exemples de la plaine d'épandage de l'oued El Fekka et de la plaine d'Al Hichria














Cet apport peut être appréhendé à partir de deux scènes SPOT (Scènes SPOT XS K64 J280) sur la région de Sidi Bouzid. La première, datant du 26 juin 88, caractérise une période de sécheresse. La seconde, datant du 3 Février 1990, fut prise quelques jours après les pluies exceptionnelles qui s'étaient abattues sur la région le 20 janvier 1990.

En ce qui concerne la plaine d'épandage de l'oued Al Fakka, l'analyse comparée des deux scènes permet de voir l'étendue spatiale des crues qui ont suivi les pluies du 20/01/90. Tous les ouvrages d'épandage de Nouael, de Zâafria, ainsi que ceux situés plus en amont, ont bien fonctionné. La carte n° 2 montre les zones particulièrement inondées par ces épandages surtout autour de petit village de Zâafria sur la rive gauche de l'Oued Al Fakka, et sur le territoire des Nouael et des Horchane dans la zone d'Al Mzâra, sur la rive droite. Plus en aval, l'image satellite permet de découvrir un phénomène de "capture" qui s'est produit entre l'ouvrage de dérivation de Zâafria rive gauche et l'oued Sârig Adh-Dhiba. Cet oued, qui descend du pioment N du Djebel Al Kebar, a coulé des débits considérables à la suite des pluies, comme en témoignent l'élargissement spectaculaire de son lit, et les dégâts causés à la route liant Sidi Bouzid à Bir El Hafay, et qui a été totalement emportée, sur une longueur d'environ 100 mètres. Outre son propre débit, cette capture l'a enrichi par des apports d'eau supplémentaires venant de la dérivation des eaux de l'oued Al Fakka. C'est à notre avis la raison des dégâts causés aux cultures et aux habitations dans la zone d'Al Gdâra et d'An-Nsayriyya. Il est clair donc que la dérivation de Zâafria rive droite a joué le rôle de véritable oued après les pluies de janvier 90. Il serait alors souhaitable, pour éviter que cette situation ne se répète, de mettre en place des canaux tertiaires, branchés sur les canaux secondaires de la dérivation.

Concernant la plaine d'Al Hichria, l'image SPOT du 3.02.90 a révélé l'étendue impressionnante du plan d'eau dans la Garèt An-Njila. En dehors des courtes périodes qui suivent les pluies, ce fond de cuvette est généralement à sec, comme le révèle la scène du 26.6.88. Les traces des écoulements qui ont suivi les pluies de Janvier 90

carte n°3 :
**AMENAGEMENTS HYDRO-AGRIcoles DU PIEMONT SE
 DU JBAL AL KBAR (HAUTES STEPPES TUNISIENNES)**



- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | Reliefs |  | Extension approximative de l'arboriculture (principalement oliviers) |
|  | Garaâ |  | Parcours-céréailculture |
|  | Sols et végétation halomorphes |  | Importante zone de cultures maraichères irriguées par puits de surface |
|  | Forage profond équipé d'une station de pompage pour l'irrigation |  | Limite aval de la nappe acceptable pour l'irrigation |
|  | Ouvrage d'épandage artificiel des crues possible |  | Sens de l'extension de l'irrigation par puits de surface |
|  | Nouveaux lits d'oueds créés par les écoulements exceptionnels de Janvier 1990, révélés par l'image SPOT XS K84 J.280 du 3 Fév. 1990 |  | Route ou piste |
| | |  | Village |

0

2.5 km

M. DURAS

sont encore visibles sur la scène du 3 Février 90 : l'oued Oum at-Téboul, qui descend du flanc SE du Djebel Al Kebar a un tracé bien individualisé sur cette scène qui montre clairement que cet oued s'est déversé dans la Garaà. Mais ce que révèle cette scène ce sont les traces d'importants écoulements ayant rejoint la Garaà par son extrémité NE, avec des méandres bien dessinés et de petits plans d'eau encore apparents, plus de dix jours après les pluies. Ce lit d'oued n'existe pas sur la carte topographique au 1/50.000 de la région (Feuille NI-32-XVI-4c Jbal Bou-Dinar). Il nous semble, d'après la comparaison de la carte topographique et de la scène SPOT, que ces écoulements sont nés de la jonction de deux petits oueds: l'oued Nasir et l'oued Ahmed, qui descendent du Djebel Al Kebar, entre les villages d'El Mlikat et d'Awlad Amor, et qui coulent ensuite vers le SW pour rejoindre Garaàt An-Njila. Il traverse donc en diagonale tout le piemont du Djebel Al-Kebar, à travers les plantations d'oliviers, sur sols sableux ou sablo-limoneux. C'est pour ces raisons qu'il nous semble qu'il serait judicieux de prévoir, dans l'aménagement futur des piemonts, la mise en place d'ouvrages de dérivation des eaux de crues, dans les parties amont des oueds Oum at-Téboul, Nasir et Ahmed, ouvrages dimensionnés de manière à permettre un épandage efficace des eaux ,qui puisse éviter leur écoulement vers la garaà, et favoriser par la même l'infiltration pour recharger la nappe phréatique. (carte n°3). D'après les calculs effectués à partir de la scène du 3 Fev 90, l'étendue du plan d'eau dans la Garat An-Njila avait une superficie de 1550 hectares. De plus, nous avons pu découvrir d'après nos enquêtes sur le terrain, que l'épaisseur de la lame d'eau approchait parfois du mètre. Ce volume d'eau, livré à l'évaporation, pourrait être, par ces aménagements, en grande partie récupéré pour une meilleure utilisation, d'autant plus que les population locales particulièrement les Azara et les Aouafi, ont montré une volonté particulière à étendre leurs superficies irriguées par puits de surface. Ainsi, outre leurs parcelles irriguées dans leurs territoires, ils exploitent des terres en métayage ou en location, situées beaucoup plus en aval, près de la garat Ain-Njila. Ces terres sont irriguées à partir de puits de surface possédés par les métayers ou les locataires à 3 ou 4 km plus en amont, étant donné que la qualité chimique de l'eau sur les exploitations en aval est de moindre qualité (eau plus salée). L'eau est conduite d'amont en aval, du puits vers les parcelles, par tubes PVC de 7 cm de diamètre. Ceci entraine un surcoût très important

pour les irrigants.

Conclusion

Il apparaît de ce qui a précédé que l'exploitation des nappes phréatiques des plaines de Sidi Bouzid et d'Al Hichria a répondu beaucoup plus aux critères économiques (satisfaire la demande régionale et extra-régionale en produits maraichers) qu'aux paramètres de l'écologie et de la nécessité de la préservation de l'équilibre entre ressources offertes par le milieu naturel et leur exploitation. Il est tout à fait clair que la région doit continuer à être un des principaux pourvoyeurs du pays en produits maraichers, que les irrigants continuent à améliorer leurs conditions matérielles de vie, et que les cultures irriguées dans la région doivent se développer davantage pour relever le double défi de l'emploi dans les campagnes et de la sécurité alimentaire. Pour cela, l'aménagement des ressources hydrauliques doit tenir compte de l'impératif de sauvegarde des milieux en équilibre, de réhabilitation des milieux ayant entamé le processus de déséquilibre. La télédétection peut, à notre avis, être un outil efficace parmi d'autres pour mieux appréhender et mieux gérer le milieu dont l'aménagement ne peut garantir le développement que s'il tient compte de tout un système, dans lequel s'imbriquent facteurs physiques, socio-économiques et politiques. Dans ces conditions, le "développement durable" ne serait pas un vain mot .

Bibliographie (par ordre alphabétique)

- ABDELWAHAB (H.H) 1954 "Les Steppes Tunisiennes (région de Gammouda) pendant le moyen-âge in cahiers de Tunisie n° 5-16.
- ATTIA (H) 1977. Les Hautes Steppes Tunisiennes. De la Société pastorale à la Société paysanne. Thèse d'Etat texte ronéo 700p.
- DAOUD (A) 1987 L'hydraulique dans la plaine de Sidi Bouzid. Texte non publié.
- DAOUD (A) TRAUTMANN (J); 1994. Les aménagements hydrauliques en milieu semi-aride . Exemple de la plaine de Sidi Bouzid (Hautes Steppes Tunisiennes) in "Développement et environnement au maghreb "colloque de la Fac. Lettres de Sfax Avril 1994
- DAOUD A. (1995) Les périmètres Publics Irrigués de la région de Sidi Bouzid (Hautes Steppes Tunisiennes) Politiques de l'Etat et Stratégies paysannes. Colloque de l'Institut de Recherche sur le Maghreb contemporaine IRMC
- GASSARA(A) 1980 Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de Horchane-Braga (Sidi-Bouzid). Thèse de Doctorat de 3e cycle. Université Pierre et Marie Curie.
- KOSCHEL (R) ZARROUK (M), 1976. Etude hydrologique préliminaire de la nappe phréatique de Sidi Bouzid. Ministère de l'agriculture, Direction des ressources en eau
- PENET (P) 1910 L'irrigation de la plaine de Gammouda Extrait du Bulletin de la Direction de l'Agriculture et de la Colonisation Tunis

B 2

**MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET
DETERMINATION DE PARAMETRES
Bilan hydrique**

**HYDROLOGICAL MODELLING
AND
DETERMINATION OF PARAMETERS
Water balance**

USING ONE OR TWO LAYER MODELS FOR DETERMINING EVAPOTRANSPIRATION WITH REMOTELY SENSED DATA.

E. Hurtado¹, V. Caselles² and M. M. Artigao¹

¹Department of Applied Physics, Agronomical School of Albacete, University of Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, Spain.

²Department of Thermodynamics, Faculty of Physics, University of Valencia, 46100 Burjassot, Spain.

Knowledge of evapotranspiration is useful for different aims like water budget calculations, climatological and meteorological studies. In arid regions evapotranspiration is a significant and often the dominant water flux leaving the Earth's land surface, nearly all the inputs in the form of rain is lost through evapotranspiration, therefore the importance of this parameter for controlling watering schedule and determining crops productivity. We have applied this methodology to the Barrax and Tomelloso (Albacete, Spain) areas, pilot experiment zones of the EFEDA project. (Bolle and Langer, 1991)

Attempting to determine the energy transport in sparsely vegetated rangelands requires methods such as those proposed by Shuttleworth and Wallace (1985) or Kustas (1990) that consider the soil and canopy as separate sources or sinks for latent and sensible heat fluxes. In these models the soil and canopy are each treated as a separate source (or sink) of energy which involves the assignation of temperatures and humidities for each one of the sources (or sinks) and for the atmosphere. A two layer model can be schemed by the figure 1.

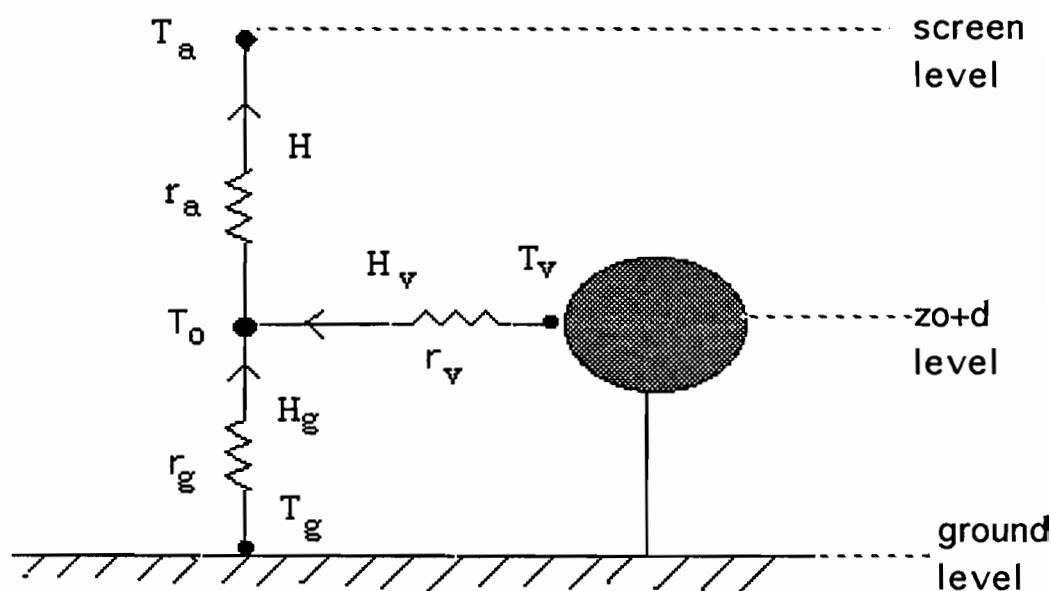


Figure 1

In this picture, T_v and T_g are the surface temperature of foliage and ground surface respectively. T_a is the air temperature at screen level and T_o is the canopy -air temperature at level $z=z_o+d$, i.e. the level of the sources/sinks of sensible heat, or of the hypothetical mean canopy air flow. H is the sensible heat flux.

From the partition of the total net radiation between two components, the absorbed by the vegetation and the ground respectively, a simple equation like the proposed by Jackson (1977) can be achieved:

$$ET_d - R_{nd}^* = B (T_a - T_s)_i \quad (1)$$

where ET is the actual evapotranspiration(mm), $R_n^* = R_n/L$ is the net radiation expressed in mm of water (mm), $(T_a - T_s)$ is the temperature difference between air and crop surface (K). The subscripts d and i indicate daily and instantaneous at midday values respectively. B is a semiempirical coefficient, which mean value is given by:

$$B = \left(\frac{R_{nd}}{R_{ni}} \right) < \frac{\rho c_p}{L r_{a^*}} > \quad (2)$$

where ρ is air density (kg m^{-3}), c_p the specific heat of air at constant pressure ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), r_{a^*} is the equivalent ground-vegetation-atmosphere system, that depends on individual resistances (s m^{-1}), and L the latent heat of vapourization of water (J K^{-1}). The symbol $< >$ means the average value over the growing season of the crop. The ratio R_{nd}/R_{ni} is reasonably constant for clear days, we have used 3 years for calculating this mean value.

So, evapotranspiration is estimated from net radiation measured at a meteorological station and $(T_a - T_s)_i$ where T_s is obtained from the satellite overpass coinciding with the approximate time of daily maximum temperature, i. e. , at about 13.00-14.00 solar time, and T_a from the daily maximum value of the meteorological shelter.

For applying equation (1) in an operative way we need previously to calculate the B values using climatic, crops parameters (h , LAI , w), and handheld radiometric surface temperatures (T_v , T_a , T_g). From these values and using a crop map elaborated from LANDSAT TM images we can obtain a B map. Afterwards we need a procedure for evaluating surface crop temperature from thermal NOAA-AVHRR images. Finally we need some meteorological parameters like T_a and R_n . Figure 2 shows the different steps that must be followed to apply this methodology.

We have applied this methodology to the Barrax area, located in the west of Albacete (Spain), 28 km from the town and where irrigated crops cover completely the soil (Hurtado, 1994), and to the Tomelloso area, located 100 km from the town, and where the main crops are vines, sparse crops. In the Barrax area, evapotranspiration can be obtained with reasonable precision (0.9 mm day^{-1}), using a single layer model, whereas for the Tomelloso area a two layer model must be used.

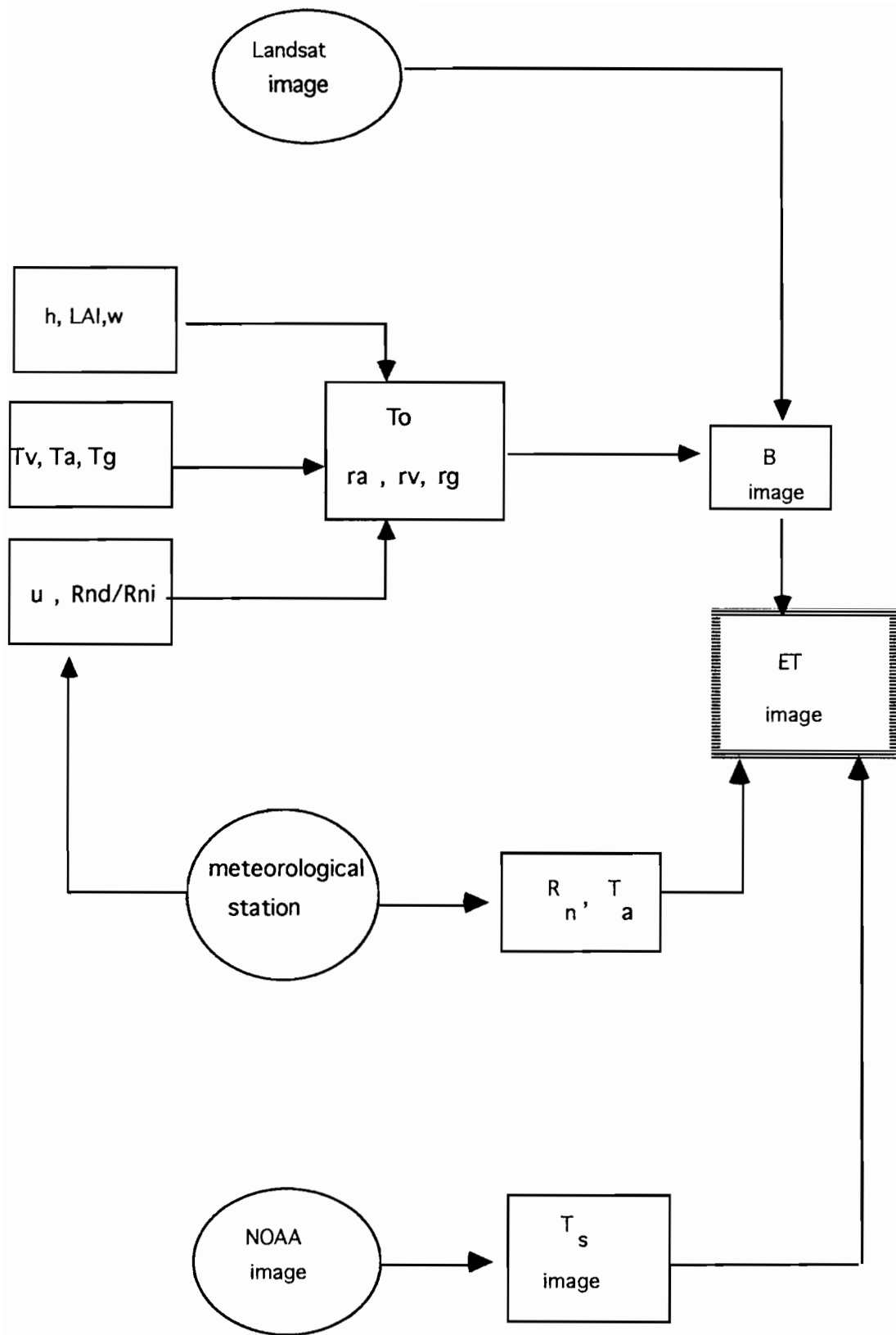


Figure 2

Bibliografía

- (1) Bolle, H. J., and Langer, I., 1991. Echival Field Experiment in a Desertification-Threatened Area (EFEDA). Field Experiment Plan. Meteorological Institute, Free University of Berlin, Germany.
- (3) Hurtado, E., Caselles V. and Artigao M.M. 1994. Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA AVHRR images in the Barrax (Albacete) region, Spain.. Societé Francaise de Photogrammétrie et Télédetection. Bull n° 137.
- (5) Jackson, R.D., Reginato, R.J. and Idso, S.B., 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. Water Resour. Res., 13, 651-656.
- (6) Kustas W. P., 1990. " Estimates of evapotranspiration with a one and two dimensional model of heat transfer over partial canopy cover". J. Appl. Meteorol. , 49: 135-153.
- (7) Shuttleworth J.and Gurney R. (1990) "The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops".Q.J.R. Meteorol. Soc.,116,. 497-519.

ESTIMATION OF REAL EVAPOTRANSPIRATION USING REMOTELY SENSED DATA

Chebouni A.¹, Qi J.⁴, Lo Seen D.², Dedieu G.³, S. Moran⁴,
Daubas M.³, Monteny B.M¹

¹- ORSTOM, Depart. TOA, 911 Av. d'Agropolis, B.P 5045, 34032, Montpellier, France.

²- NASA-JPL, MS 300-233, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, 91109, CA, USA.

³- CESBIO, 18 Av. E. Belin, 31055, Toulouse, France.

⁴- USDA- ARS ,Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona, USA.

ABSTRACT

Remotely sensed surface temperatures (i.e. radiative surface temperatures) have been widely used in estimating spatially distributed energy balance equation components. The general approach consists of estimating the sensible heat flux and available energy from micrometeorological and optical/thermal infrared remotely sensed data. Real Evapotranspiration is then derived as the residual term of the one-dimensional energy balance equation. The problem however is that remotely sensed variables do not exactly correspond to the variables needed by the energy balance model. One operational solution is to relate empirically remotely sensed parameters to those needed by the model, such as, radiative surface temperature to aerodynamic surface temperature; vegetation index to leaf area index and canopy height. This solution is limited by the fact that it is site specific. The objective of this study is to test the performance of method using data taken over a semi-arid site in Arizona. Comparisons between measured and remotely sensed surface energy fluxes is presented. Finally, a principle of new and robust approach of using remotely sensed data will be outlined.

1- INTRODUCTION

Recently, increased emphasis has been placed on understanding the interaction between regional climate and the hydrological cycle in arid and semi-arid regions (Kustas et al., 1991; Goutorbe et al., 1993). Accurate partitioning of available energy into sensible and latent heat flux is crucial to the understanding of surface-atmosphere interaction. However, this is very difficult in arid and semi-arid regions because neither the soil nor the vegetation totally dominates the exchange of water and heat with the atmosphere. The relative contributions to total sensible and latent heat flux from the soil and plant components may vary throughout the day and throughout the season.

Thermal infrared remotely sensed surface are increasingly being used in operational models to evaluate the spatial variation in the energy balance components. While this approach has been found to be successful over surfaces with near full vegetation cover, its performance has been questioned over sparsely vegetated surface. The problem has been that over partial cover conditions, the assumption that consists on assimilating aerodynamic surface temperature to remotely sensed surface temperature is not valid. Over such surfaces the difference between radiative and aerodynamic temperatures can reach 10 to 15 °C.

The objective of this analysis is to investigate the extend to which remotely sensed data in the visible, near-infrared, and thermal infrared in conjunction with ancillary meteorological data and one dimensional energy balance model for surface fluxes estimation in arid and semi-arid area. Data collected during Monsoon'90 experiment have been used. The advantage and limitations of this approach are investigated. Finally, a principle of new and robust approach of using remotely sensed data will be outlined.

2- MODELING

2-1 Available Energy

Net radiation (R_n), which represents the balance of short and long wave radiation reaching and leaving the surface can be expressed as :

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + \varepsilon_s \sigma (\varepsilon_a T_a^4 - T_r^4)$$

where R_s is the incoming short-wave radiation, σ is the Stephan-Boltzmann constant ($W m^{-2} K^{-4}$), and ε_e is the surface emissivity; ε_a is the sky emissivity defined as: $\varepsilon_a = 1.24(e_a/T_a)^{1/7}$, where e_a and T_a are air vapor pressure and air temperature respectively. α is the surface albedo which was obtained from red and NIR surface reflectances (see Kustas et al., 1994 for a review) as :

$$\alpha = 0.526red + 0.474NIR$$

where red is the surface reflectance in the red band and NIR is the surface reflectance in the near - infrared band.

The soil heat flux (G) is a significant component of net radiation in arid and semi-arid region. Field observations provide real evidence for a direct relation between R_n and G . It has been found that for bare soil, the relationship between R_n and G depends on the surface soil moisture, while for vegetated surface, the ratio G/R_n can be obtained from visible and near-infrared reflectances. In this analysis G was formulated in terms of the Modified Soil Vegetation index (MSAVI) as:

$$\frac{G}{R_n} = 0.50 \exp(-2.13MSAVI)$$

where MSAVI (Qi et al., 1994) is defined as:

$$MSAVI = \frac{red - NIR}{red + NIR + A} (1 + A)$$

where A is a self adjusting factor defined to adapt the soil noise correction to the proportion of soil seen by the sensor. A is given by the expression :

$$A = 1 - 2 \frac{NIR - red}{NIR + red} (red - 1.06NIR)$$

In this study we have considered MSAVI as the vegetation index to use since it was found to be less sensitive to soil brightness variations including shadows than other spectral vegetation indices (Chehbouni et al., 1994). This is of importance since the contribution of bare soil to scene reflectance is very significant for partially covered surfaces.

2-2 Sensible and Latent heat flux

From theoretical view point, sensible heat flux should be expressed in terms of aerodynamic surface temperature since it is aerodynamic temperature which determines the loss of sensible heat flux from a surface. Aerodynamic surface temperature is defined as the extrapolation of air temperature profile down to an effective height within the canopy at which the vegetation components of sensible and latent heat flux arise, say ($d + z_o'$), where z_o' is the roughness length for heat, and d is the zero-plane displacement height assumed to be the same for heat and for momentum (Kalma and Jubb, 1990). The problem is that the estimation of the roughness length for heat (z_o') is not trivial over sparsely vegetated

surfaces. To overcome this difficulty, it has been suggested that one can consider that the exchange of heat and moisture between the surface and the atmosphere takes place at an effective level located at the same height as the effective sink of momentum i.e. level $d+z_0$, which corresponds to the level where the logarithmic profile takes its surface value (zero). Then a new aerodynamic surface temperature can be defined as the extrapolation of air temperature profile down to this level. Sensible heat flux can be then formulated as:

$$H = \rho C_p \frac{T_o - T_a}{r_a}$$

where ρ is the air density (kg m^{-3}), c_p the specific heat of air at constant pressure ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), r_a (sm^{-1}) is the aerodynamic resistance, calculated between the level of the apparent sink for momentum and the reference height. T_a ($^{\circ}\text{C}$) is the air temperature at a reference height (z) above the surface, and T_o ($^{\circ}\text{C}$) is the aerodynamic surface temperature defined above.

Since aerodynamic temperature cannot be directly measured, it is often replaced by radiative temperature (T_r) in the formulation of sensible heat flux. The problem is that the derivation of exchange coefficient from Monin-Obukhov similarity theory does not apply when the surface radiative temperature is used instead of aerodynamic temperature in the surface heat flux formulation. Under dense canopy, the difference between aerodynamic and radiative surface temperatures is very small, which leads to small errors in heat flux prediction. Over sparsely vegetated surfaces, however, the difference can exceed 10°C , as a result sensible can be largely overestimated.

The approach suggested by Chehbouni et al. (1995a-b) consists of formulating a relationship between aerodynamic and radiative surface temperature, and They then defined the coefficient β as:

$$\beta = \frac{T_o - T_a}{T_r - T_a}$$

Numerical simulations (Chehbouni et al., 1995a) have shown that the multitemporal behavior of the coefficient β through the growing season is compared to the variation of Leaf Area Index, which lead to a parameterization of the coefficient β with respect to LAI as:

$$\beta = \frac{1}{\exp(L / (L - LAI)) - 1}$$

where L is an empirical factor that was set by least squares regression to a value of 1.5 (Chehbouni et al., 1995a). Previous studies have indicated that a modified Beer's law expression can accurately describe the general relationship between vegetation index and LAI (Asrar et al., 1984). In this analysis, an exponential type relationship was used to obtain LAI from remotely sensed MSAVI as:

$$MSAVI = 0.88 - 0.78 \exp(-0.6LAI)$$

By combining the last three equations, sensible heat flux can be expressed in terms of one remotely sensed surface temperature, MSAVI, and air temperature.

Finally latent heat flux can be formulated as the residual term of the energy balance equation as :

$$LE = Rn - G - H$$

For the remaining of the paper surface fluxes estimated as described above will be called remotely sensed surface fluxes.

3- EXPERIMENTAL DATA

3-1 Location and site description

The Monsoon '90 multidisciplinary field campaign was conducted over the U.S. Department of Agriculture's Agricultural Research Service Walnut Gulch experimental watershed in southeastern Arizona (31° 43'N, 110°W) during the summer of 1990 (see Kustas et al., 1991, and Kustas et Goodrich., 1994). The main objective of the experiment was to investigate the potential of using multispectral remotely sensed data in conjunction with hydrological models to quantify spatial and temporal variability of surface energy and water fluxes in Arid and semi-Arid regions. The study sites were located in an area comprising the upper 150 km² of the Walnut Gulch drainage basin and situated about 1300 m above mean sea level..

The annual precipitation in this region ranged from 250 to 500 mm/yr., with approximately two thirds of the rainfall occurring in the monsoon season (July-August). The surface soil texture was mainly sandy loam with high fraction of rocks. The vegetation in the western half of the watershed was shrubs dominated, while the eastern half is grass dominated. The analysis in this paper is limited to the shrub dominated site (Lucky Hills), where spatial heterogeneity between shrub clumps and adjacent bare soil was higher (Kustas and Goodrich, 1994). The shrubs was about 0.6 m height and covering about 0.26 % of the surface (see Weltz et al., 1994). The surface leaf area index was about 0.3-0.4 which implies that the clump leaf area index of the shrubs ranged between 1.15 and 1.54.

3-2 Surface measurements

The four components of the energy balance equation used in this study were measured using a 2 m tall roving eddy correlation tripod : ROVEC. Net radiation was measured with a REBS Q6 net radiometer at a height of 1.6-1.7 m. The soil heat flux was measured using a soil heat flux plates (MELCOR, CP 1.4-71-06-L). Latent and Sensible heat flux were measured with the eddy correlation method, using a single axis sonic anemometer, a krypton hygrometer, and a 12.7 mm-diameter thermocouple, all manufactured by Campbell Scientific, Inc. Measurements of wind, humidity and temperature fluctuations at 2 m height were made at 10 Hz, and 10 mn means were used to compute covariances.

In addition to those measurements, the four components of the radiation budget were taken with Eppley Precision Spectral Pyranometers (PSP) and Precision Infrared Radiometers (PIR). The PIR's were equipped with thermistors to measure dome and case temperatures so that the measured long-wave radiation could be corrected for temperature gradients between the dome and case. Vapor pressure gradients were determined by measuring dew-point temperature at two heights using Campbell Scientific, Inc. single-cooled-mirror hygrometer. The measuring heights were 1.25 m and 2.25 meters above the soil surface. Air is alternately drawn through intakes at each height and routed to the cooled mirror; a single pump aspirates the system. Air temperature was measured at the same two, heights, using 76 mm diameter unshielded non-aspirated chromel-constantan thermocouples. In addition to these measurements, soil surface temperature was measured using an Everest Interscience (IR) sensor, model 4000 with a 15° filed of view, mounted 2 m above the soil surface. At this height the sensor viewed an area of bare soil about 0.45 m in diameter. Canopy temperature was measured with an Everest Interscience IR sensor model 110 or model 4000 with a 3° field of view. It was mounted about 30 cm above the top of the canopy. Since no measurement of the shaded soil temperature was made, it was assumed for this analysis that shaded soil temperature is the average of the temperatures of the unshaded soil and the canopy. However other formulations for deriving soil under the shrubs temperature were also tested. Wind speed was measured at 1.25 and 2.25 m above the soil surface using photo-chopper anemometers with a threshold of 0.2 ms⁻¹. These sensors were samples at 10 seconds intervals and the data averaged over 20 minute periods. For this study, all the data were averaged over one hour periods.

Additionally, ground-based surface reflectances were measured from a height of 2 m above the ground surface, using yoke-based radiometers (Exotech with spectral filters covering bleu, green, red and NIR) and a calibrated reflectance panel (See Moran et al., 1994a,b). These data were taken over a ground

target of approximately 120 m by 120 m in size, during several day of the experiment. For this study red and NIR reflectances were used to compute short wave albedo, and the vegetation index .

4- RESULTS

Data described above has been used to estimate surface energy balance components during 13 days (DOY 209 to DOY 221). Comparison between observed and remotely sensed net radiation is presented in Figure 1. In general, net radiation estimation compared well with the observations (RMSE of about 50 Wm^{-2}). However, there is a slight discrepancy which may be due to the limitation of the expression used to estimate incoming long wave radiation under cloudy sky conditions (Brutsaert, 1975). Figure 2 is a comparison of the data-derived and the model- derived soil heat flux. The RMSE was about 40 Wm^{-2} for values ranged between 0 and 250 Wm^{-2} . It must be emphasized however that the expression between R_n and G used here is developed for clear sky conditions only. Furthermore, this expression does not take into account the time lag between G and R_n (Moran et al., 1994). additionally, it may be possible that the relationship between net radiation and soil heat flux does not depend only surface type (bare versus vegetated surface) but also depends on the distribution of the vegetation within the surface (Chehbouni et al., 1995c). These reasons may explain the scatter between measured and remotely sensed soil heat flux.

In Figure 3, eddy correlation based sensible heat flux is compared to that estimated using remotely sensed surface temperature and vegetation index. The model tends to underestimate H when measured values ranged from 50 to 150 Wm^{-2} . This may be due to the error associated with the formulation of β coefficient or to that associated with the estimation of LAI from MSAVI which does not take into account the effect of solar angle variation. However, the root mean square error (RMSE) between observed and simulated sensible heat was about 44 Wm^{-2} for measured values ranged between 0 to 300 Wm^{-2} . Additional studies are needed to test the universality of β parameterization, and to investigate how the L parameter changes with vegetation type and structure.

Figure 4 presents a comparison between measured latent heat flux and that obtained as the residual term of the energy balance equation. The model estimates of latent heat flux are reasonable, the RMSE is about 54 Wm^{-2} .

5- CONCLUSION

It can argued that the simplicity of this approach combined with the availability of remotely data, makes this approach very attractive for operational monitoring of surface fluxes in arid and semi-arid areas. The major problem with this approach is that the relationship between remotely sensed variables and those needed for process formulation are empirical. In this regard, such relationships are site specific. This represents a major handicap for generalizing such approach. Furthermore, if one always needs to redo calibration for each individual site, one can legitimately challenge the effectiveness of this approach. One alternative approach of using remotely sensed data for quantitative purposes could be to combine SVAT type model with radiative transfer model. The principle of this method is to use the SVAT output such as surface temperature and soil moisture as input to radiative transfer models. The radiative transfer models will simulate in a given waveband the spectral signature of the surface as it can be observed by a remote sensor. By minimizing the differences between measured and simulated remote sensing variable, on can assume that the resulting surface fluxes are correct. This approach is certainly more robust, but it needs accurate SVAT and radiative transfer models, which are not readily available at this time.

Acknowledgments. Thanks to Dr. D. Stannard and Dr. D. Nichols for providing us with the data. Thanks to T. Valero for his comments. Funding for this study was provided by French PNTS and ORSTOM. The Data used here were taken during the Monsoon '90 Experiment: NASA Interdisciplinary Research Program in the Earth Sciences (IDP 88-086). The first author was supported during the experiment by the NASA Earth Observing Program (NAGW2425). The authors are particularly grateful to USDA-ARS personnel in Tombstone for their support during the experiment.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1: Comparison between measured and remotely sensed net radiation

Figure 2: Comparison between measured and remotely sensed soil heat flux

Figure 3 : Comparison between measured and remotely sensed sensible heat flux

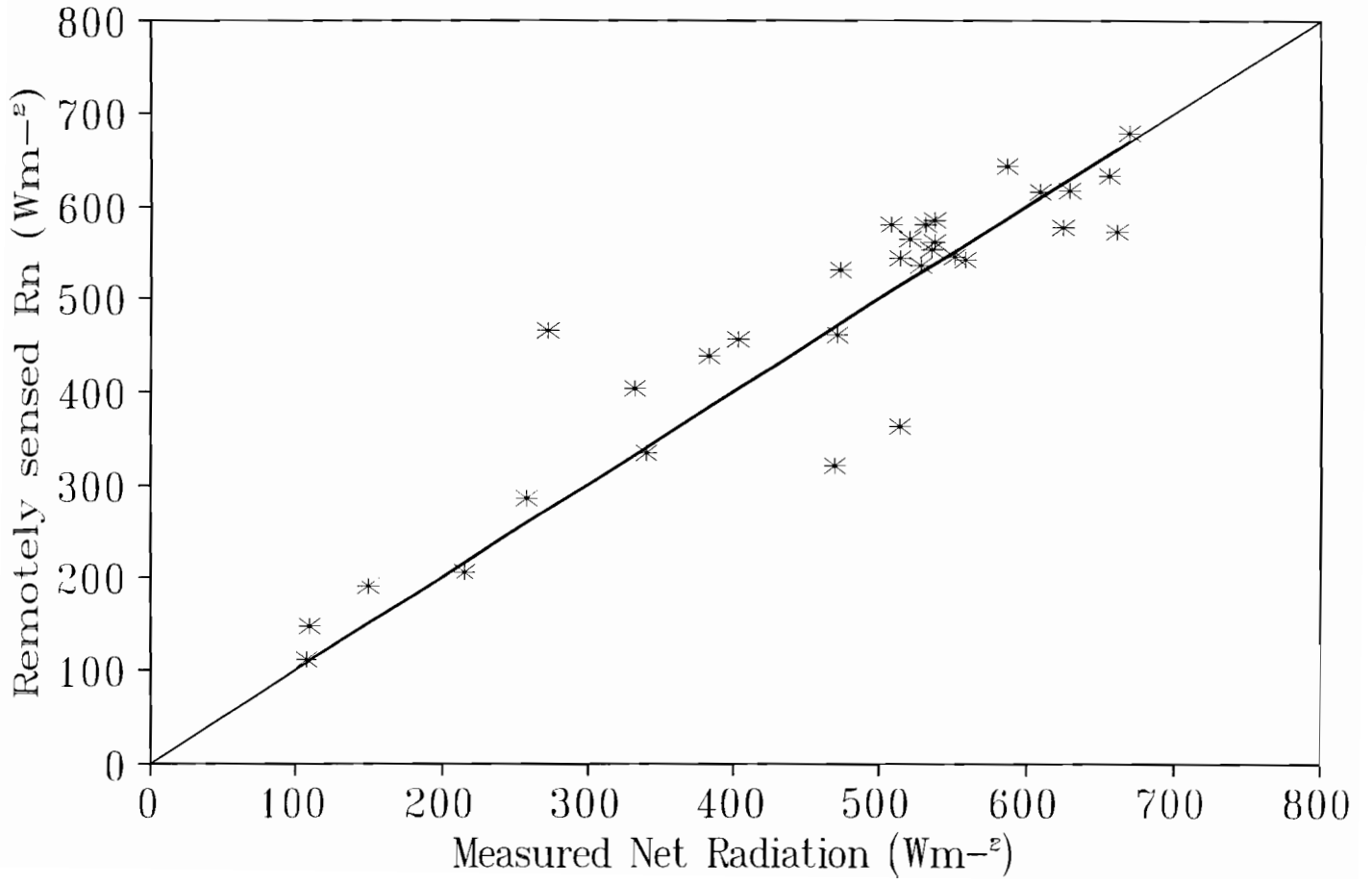
Figure 4 : Comparison between measured and remotely sensed latent heat flux

CITED REFERENCES

- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., and Hatfield, J. L. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agro. J.* 76, 300-306.
- Brutseart, W., On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies, *Water Resour. Res.*, 11, 742-744, 1975.
- Chehbouni, A., Kerr, Y. H., Qi, J., Huete, A. R., and Sorooshian, S., 1994. Toward the Development of a Multidirectional Vegetation Index. *Water Resour. Res.*, 30, 1339-1349.
- Chehbouni A., Lo Seen D. , Njoku E. G. "A Coupled Hydrological and Ecological modeling Approach to examine the Relationship between Radiative and Aerodynamic Surface Temperature over Sparsely Vegetated Surfaces" *Remote Sensing Environment*, 1995a, forthcoming.
- Chehbouni A., Lo Seen, D., Njoku, E.G., Lhomme, J.P., Monteny B., Kerr, Y.H (1995b), Estimation of sensible heat flux over sparsely vegetated, accepted in *J of Hydrology*, Hapex Sahel special issue.
- Chehbouni A., D. Nichols, E.G. Njoku, J. Qi, and Y.H. Kerr "On the use of radiative surface temperature to estimate sensible heat flux in Nevada" 1995c, accepted in *Remote Sensing Review*
- Goutorbe, J. P., Lebel, T, Tinga, A., et al., 1993. HAPEX-Sahel: A large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics, *Ann. Geophysicae* 12, 53-64.
- Kalma, J. D., Jupp, D. L. B. (1990), Estimating evaporation from pasture using infrared thermometry: evaluation of a one-layer resistance model, *Agric. For. Meteorol.* 51:223-246.
- Kustas, W. P., and D. C. Goodrich, Preface, *Water Resour. Res.*, 30, 1211-1226, 1994.
- Kustas, W. P., et al., An interdisciplinary field study of the energy and water fluxes in the atmosphere-biosphere system over semi-arid rangelands: Description and some preliminary results, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 72, 1683-1706, 1991.
- Moran, M. S., T. R. Clarke, W. P. Kustas, M. A. Weltz, and S. A. Amer, Evaluation of hydrologic parameters in semiarid rangeland using remotely sensed spectral data, *Water Resour. Res.*, 30, 1287-1298, 1994a
- Moran, M. S., W. P. Kustas, A. Vidal, D. I. Stannard, J. H. Blanford, and W. d. Nichols, Use of ground-based remotely sensed data for surface energy balance evaluation of a semiarid rangeland, *Water Resour. Res.*, 30, 1339-1350, 1994b.
- Qi, J. A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, and S. Sorooshian, 1994, A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sens. Environ.* 48:119-126.

FIG. 1

Walnut Gulch Basin
Arizona



Walnut Gulch Basin
Arizona

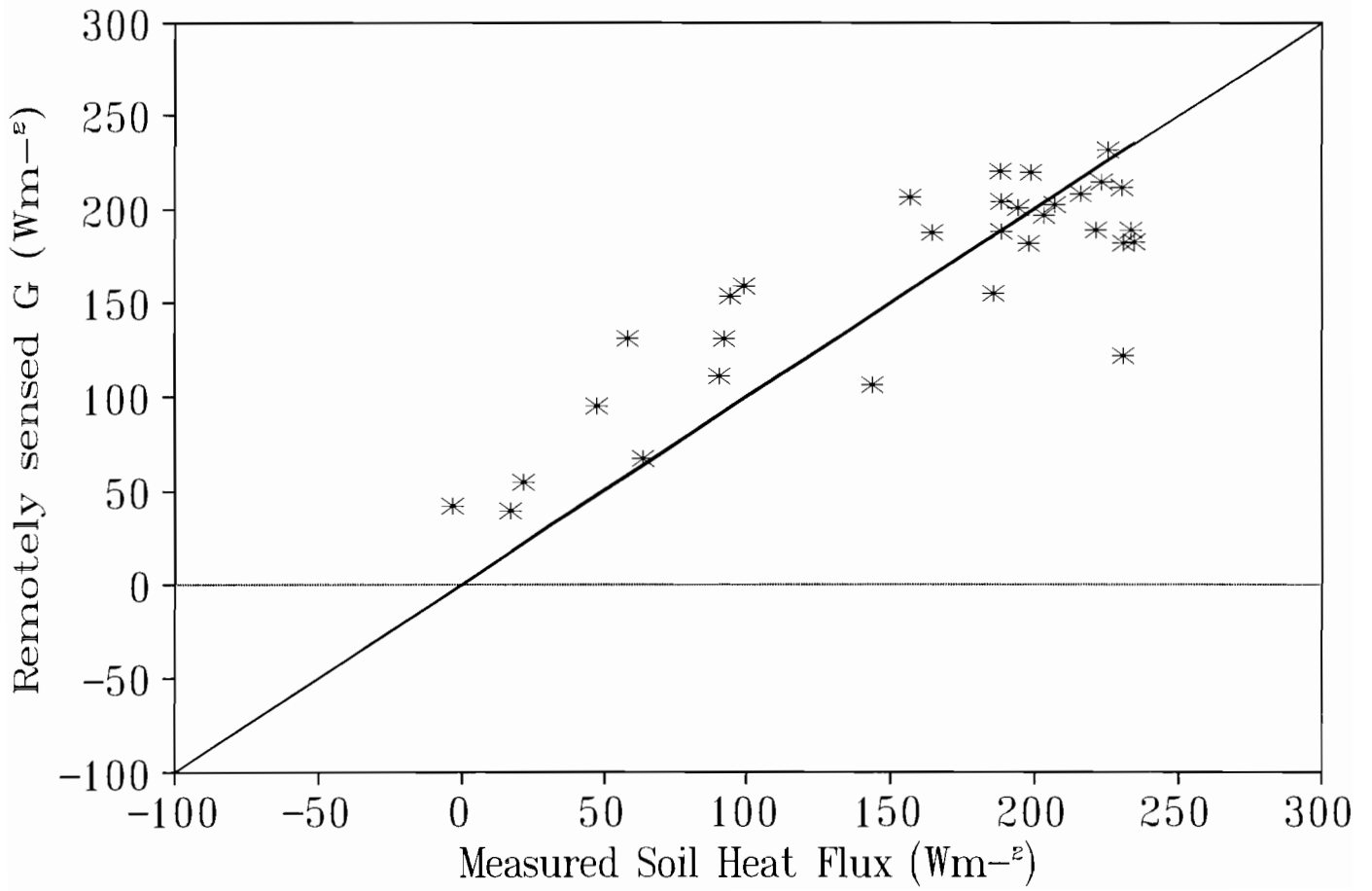


Fig. 3

Walnut Gulch Basin Arizona

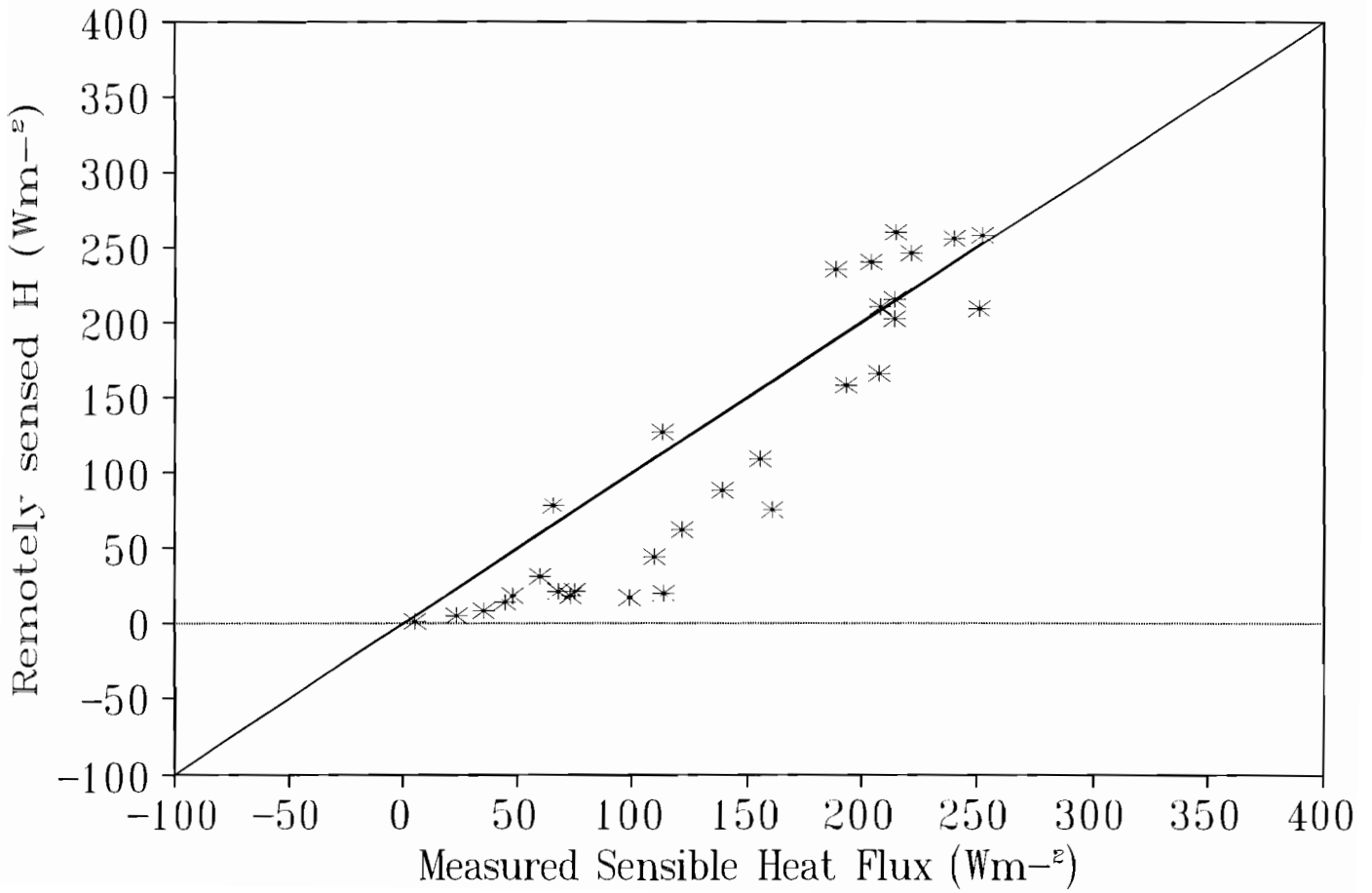
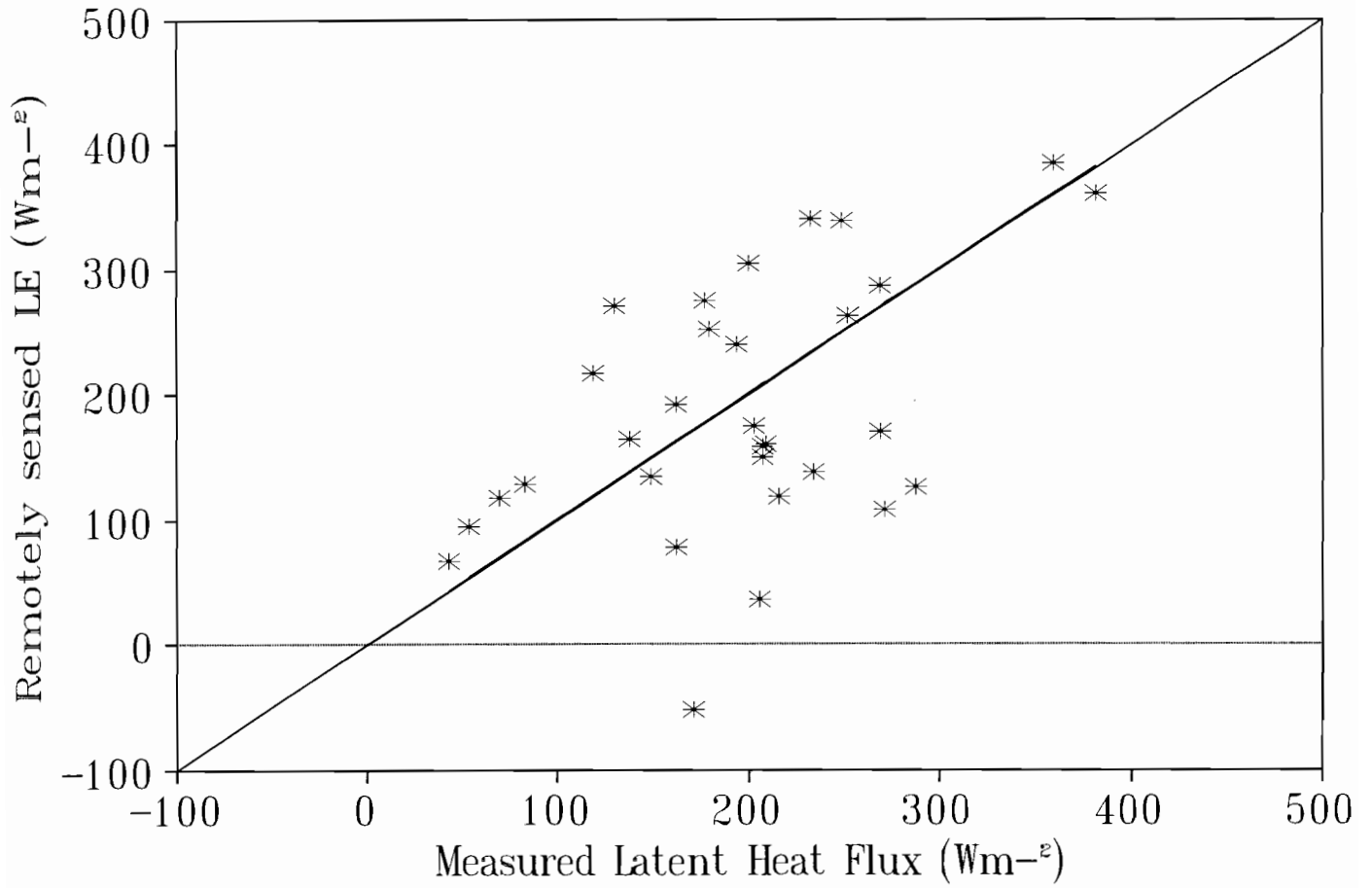


FIG 4

Walnut Gulch Basin
Arizona



I - INTRODUCTION

Depuis bientôt trois décennies, la péjoration climatique associée à la croissance démographique et à la dégradation des terres ont profondément altéré les conditions de vie au Sahel. De nombreuses organisations internationales, nationales ou régionales (CIEH, CILSS, ORSTOM...) ont étudié le problème de la sécheresse au Sahel pour décider d'actions propres à en atténuer les conséquences. Une difficulté rencontrée par tous les organismes est l'insuffisance voire le manque de données sur les ressources naturelles de cette région et plus spécialement sur les ressources en eau.

Les futurs plans impliquant l'utilisation des ressources en eau de surface particulièrement l'irrigation devraient pourtant accorder une place de choix aux nombreuses mares et bas-fonds actuellement peu ou mal exploités.

Axes de convergence préférentiels des eaux de ruissellement et des écoulements hypodermiques, les bas-fonds présentent aux yeux des paysans sahéliens un intérêt économique grandissant. En effet ces populations peuvent y développer une production de sécurité pendant la saison sèche; cependant une gestion optimale des ressources requiert la connaissance des potentialités hydriques des différents sites.

Face aux difficultés actuelles d'investigation pour la collecte des données (crise économique, éloignement des sites) la télédétection, associée à des données exogènes peut constituer une alternative viable.

Dans cette optique, l'objectif de cette étude est d'utiliser les connaissances existantes en matière de gestion de l'environnement sahélien par télédétection, pour construire les courbes de fonctionnement des mares et reconstituer des chroniques de données hydrologiques anciennes, notamment sur des mares du Niger n'appartenant pas au réseau national d'observations hydrologiques.

Nous espérons ainsi contribuer à consolider les acquis de la banque de données hydrologiques en vue d'une meilleure maîtrise des eaux de surface dans ce SAHEL déjà fortement éprouvé des effets de la crise mondiale.

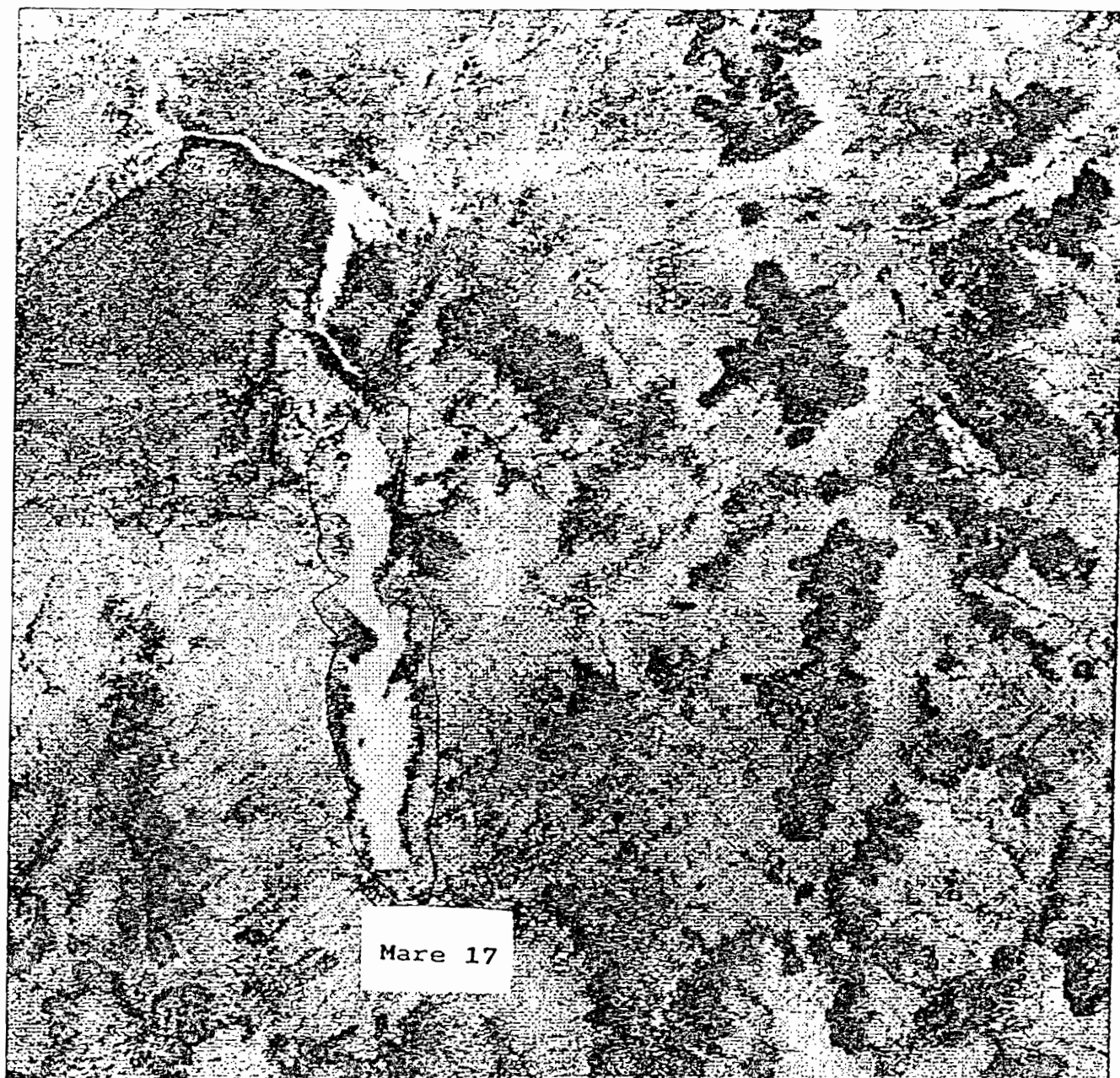
II - CARTOGRAPHIE DES PLANS D'EAU PAR TELEDETECTION

II. 1. Problème d'estimation de surfaces

A l'inverse de la végétation et des sols nus, l'eau a la particularité d'avoir une faible réflectance dans le canal Proche Infrarouge. Dès lors, cette importante propriété permet assez aisément la séparation eau et "non eau" dans ce canal notamment si la taille du plan d'eau est égale ou supérieure à quelques pixels contigus.

En pratique, la détermination de la surface se heurte cependant à deux types d'erreurs plus ou moins minimisées selon la méthode d'estimation :

ESTIMATION DE SURFACE PAR CREATION DE FENETRE POLYGONALE
IMAGE PANCHROMATIQUE 4/01/89
ECHELLE : 1 / 50 000



Mare 17

a) Erreurs liées à l'utilisation de la télédétection elle-même

- L'angle de prise de vue du satellite (en visée oblique) peut introduire un effet de perspective se traduisant par des variations d'échelles importantes suivant l'éloignement du système imageur: dans le cas de la présente étude cette erreur est négligeable puisque les images SPOT ont reçu la correction de niveau 1B.

- La représentation en mode "RASTER" qui impose l'identification d'une surface par des pixels introduit une erreur géométrique d'autant plus appréciable que la taille du pixel est grande par rapport à la taille du plan d'eau. JOANNES et AL, (1986) ont trouvé une erreur de 10% pour un carré d'un hectare délimité sur image SPOT.

b) Erreurs liées au milieu physique

La présence au SAHEL (JOANNES, 1985) l'herbes aquatiques de bord de mare cachant la limite exacte du contour de l'eau et rendant impossible la détermination précise du contour. Toutefois une étude du CEMAGREF (PIATON & PUECH, 1992) a noté le peu de présence de telles herbes dans le site qui nous concerne.

II. 2. Méthodes de calculs de surface

Parmi de nombreuses méthodes existantes, celles dite de la fenêtre polygonale (PIATON & PUECH, 1992) s'est avérée la mieux adaptée à notre étude.

Pour réduire l'incertitude de localisation d'un contour, une des solutions consiste à compenser statistiquement le nombre de pixels mal classés. L'observation, dans le site étudié des courbes de radiométries de l'eau d'une part et des terrains avoisinants d'autre part ayant révélé des allures de type gaussienne et de même dispersion, l'on extrait des fenêtres polygonales autour de chaque mare telle que les populations terre/eau soient sensiblement de même importance. L'activation des pixels à l'écran permet d'éviter les zones de terres perturbatrices. L'histogramme des radiométries sera dès lors bimodale avec deux parties symétriques.

En choisissant la radiométrie minimum comme seuil de séparation terre/eau, il en résulte l'égalité entre le nombre de "pixels-eau" attribués à tort à la terre (surface S1) et le nombre de "pixels-terres" attribués à tort à l'eau (surface S2). La surface optimale de l'eau est alors obtenue après détermination sur l'histogramme bimodale des réflectances minima et maxima pour la limite eau/sol et calcul par la suite des surfaces associées à ces réflectances.

III - EVALUATION DES PLANS D'EAU PAR TELEDETECTION

III. 1. Problématique de la gestion des plans d'eau sahélien

L'équation du bilan hydrique d'une mare s'écrit communément : $DW = EC + P - EV \pm K - C$ (lame d'eau exprimée en mm).

Dans le cas particulier du SAHEL, les termes EC et P deviennent nuls d'Octobre à Mai. En négligeant les termes K et C, l'équation du bilan se simplifie en ces termes :

$DW = E$ (donc vidange de la mare essentiellement due à l'évaporation).

Dans la zone d'étude il a par ailleurs été relevé un parallélisme entre les courbes de tarissement des plans d'eau d'une part et les courbes d'évaporations annuelles d'autre part.

Dès lors, il est possible de bâtir une méthodologie de connaissances et de suivi des mares et d'en déterminer les caractéristiques géométriques grâce à la seule télédétection satellitaire (CEMAGREF, 1992) :

- Pour chaque image i , on calcule la surface de la mare à la date t_i soit : S_1, S_2, S_3 pour T_1, T_2 et T_3 ;
- Entre deux images, aux dates connues on calcule la baisse de niveau $H_1 - H_2$ et $H_2 - H_3$ d'après l'évaporation.

III. 2. Construction des courbes hauteur/surface et hauteurs volume

Pour les plans d'eau sahéliens (grande stabilité de la forme des cuvettes), GRESILLON (1983) et D'AT DE SAINT FOULC (1986) ont établi que la courbe moyenne hauteur/surface peut s'exprimer sous la forme : $S = SOH^\alpha$ (1)

Avec : S = Surface du plan d'eau en hectare ;
 So = Surface du plan d'eau à une profondeur de 1 m ;
 H = Hauteur d'eau dans la mare en m (mare vide si $H = 0$)
 α = Coefficient de tarissement (compris entre 1,1 et 1,30)

La difficulté majeure réside dans la détermination de la profondeur de la mare à la date prise de vue car les hauteurs d'eau entre deux passages du satellite sont des hauteurs relatives (dH). L'obtention de la profondeur réelle s'effectue par recalage des (dH) en émettant une hypothèse de profondeur résiduelle H_3 au dernier passage du satellite.

L'équation de la courbe de variation des volumes en fonction des hauteurs découle de l'intégration de l'équation (1)

$$V = VOH^\beta \text{ en milliers de mètres cubes.}$$

L'incertitude sur les surfaces est $< 5\%$ pour les mares de dimension > 50 ha.

Pour les volumes, cette valeur avoisine les 30% .

III. 3. Calcul d'apports annuels et reconstitution de chroniques de données

La méthode de calcul d'apport annuel à l'aide de la télédétection s'applique à toute mare dont les courbes de fonctionnement S/H et V/H ont été établies :

a) Le calendrier cultural (cultures dites de contre saison) impose de fixer le début et la fin de la saison sèche de l'année i respectivement au 1er Octobre de la même année et au 1er Juin de l'année $i + 1$.

b) Les paramètres intervenant dans le calcul de l'apport annuel VA comprennent :

1) Le volume d'eau VE évaporé durant la saison de pluie de l'année i (du 1er juin au 1er Octobre). C'est le produit de la surface moyenne SM de la mare l'ETP durant la période. SM est obtenue par simple moyenne entre les superficies en début et en fin de saison pluvieuse (soit un pas de temps de 4 mois. Nous notons que l'utilisation d'un pas de temps d'un mois n'a point engendré de gain de précision significatif pour la suite des calculs)

$$SM = S_{\text{juin}} + S_{\text{OCT}}/2$$

Les superficies aux 1er juin et 1er Octobre sont obtenues en entrant la superficie date image dans l'équation des courbes S/H et V/H .

Les données d'évaporation ont été obtenues en divisant le cumul évaporé d'un mois par le nombre de jours du mois. Nous signalons cependant qu'en cas de fort remplissage (mares atteignant des niveaux perméables) il est nécessaire de tenir compte de l'infiltration, en majorant notamment les valeurs de l'évaporation.

2) Le volume VD disponible pour la saison sèche: c'est la différence entre le volume d'eau stocké au 1er Octobre de l'année i et le volume d'eau résiduel au 1er Juin de l'année $i + 1$.

Dans la pratique la détermination de VD s'effectue toujours à partir d'une image satellitaire prise en Octobre, peu après la fin de la saison des pluies, la surface estimée est alors ramenée aux dates de référence ci-dessus citées grâce aux paramètres d'ajustement des courbes de fonctionnement de la mare (paragraphe III - 2) et aux données d'évaporation avant et après la date de l'image.

3) L'apport annuel VA découle de la relation :

$$VA = VD + VE \text{ en milliers de m}^3$$

Ainsi, en présence de n années / images l'on aboutit à une chronique constituée de n données d'apports annuels pour la mare considérée.

Pour la mare N° 17 qui semble présenter un certain intérêt sur le plan d'aménagement , les quatre années/images disponibles ont permis d'obtenir
3,2.10⁶ m³, 2,5.10⁶ m³, 2.10⁶ m³ 2,6.10⁶ m³ respectivement en 1988, 1989, 1990 et 1991.

IV Conclusion

Au terme de cette étude l'on retiendra que la télédétection spatiale offre un intérêt certain dans la surveillance et la gestion des ressources en eau de surface, notamment au SAHEL où le manque de données sur ces ressources constitue une contrainte de taille pour la réussite des programmes d'aménagement.

Nous avons porté une attention particulière à l'étape charnière de la méthodologie ci-avant développée, à savoir l'estimation de surfaces : En effet lors de l'analyse de l'image, la présence de certaines unités géographiques dans les environs immédiats des sites engendre des radiométries perturbatrices. Toutefois la connaissance du terrain et/ou le changement de canal de travail (XS → panchro) contribuent à minimiser sensiblement les erreurs d'attribution de pixels. Les résultats ont été à la hauteur de nos attentes puisque les écarts entre les estimations directes et nos propres estimations restent inférieurs à 4 % pour les mares dont la taille dépasse cent (100) hectares.

La chronique d'apports annuels ainsi générée sans aucune intervention sur le terrain serait plus longue si nous avions disposé d'années/images en nombre suffisant : L'on aurait alors élaboré un véritable outil de planification, adapté aux exigences d'aménagement des sites et de surcroît peu coûteux.

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL, J, et AL, 1993

Mise en valeur des bas-fonds agricoles au Sahel. Typologie de fonctionnement hydrologique Potentialité. CIEH PP 233-265.

CARETTE, J., 1990

Apport de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau d'irrigation en vue de la mise en valeur des plans d'eau au Niger. Photo-interprétation et cartographie. Campagne d'étude 1990. Etat d'avancement des travaux. LCT CEMAGREF/ENGREF.

CHEVALIER, P., et AL., 1985

Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Fasso). ORSTOM. 251 p.

D'AT DE SAINT FOULC, et AL, 1986

Petits barrages en terre au Burkina Fasso. Bilan et analyse critique. CIEH. Série hydraulique agricole. N° janvier. 180 p.

GRESILLON, J., M., 1976

Petits barrages en terre en Afrique Occidentale. EIER-Ouagadoudou (République du Burkina Fasso) 120 p

JOANNES, H., et AL. 1986

Possibilité d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique. CIEH/. Série hydrologique N° Octobre. 141 p.

PIATON, H., et PUECH, C., 1992

Apport de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau d'irrigation pour la mise en valeur des plans d'eau à caractère permanent au Niger.

LCT/CIEH. 80 p.

POUYAUD, G., 1989

Contribution à l'évaluation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. ORSTOM. Col. Etudes et Thèses. 254 p.

PUECH, C., 1994

Plans d'eau sahéliens et imagerie satellitaire SPOT : Inventaire et évaluation des capacités d'exploitation. Communication à la journée Mondiale de l'Eau. IN Colloque International Eau/Environnement et Développement. Nouakchott (République de Mauritanie) 03/1994. 12 p.

RAKOTO-RAVALONTSAMAMA, M., 1987

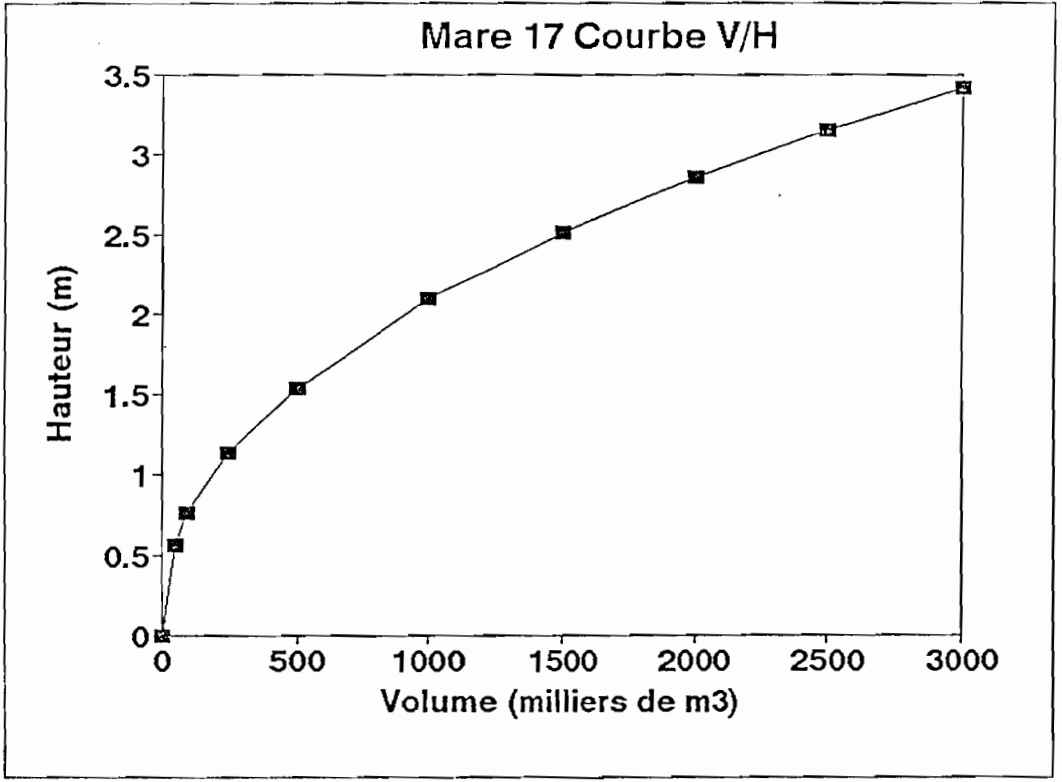
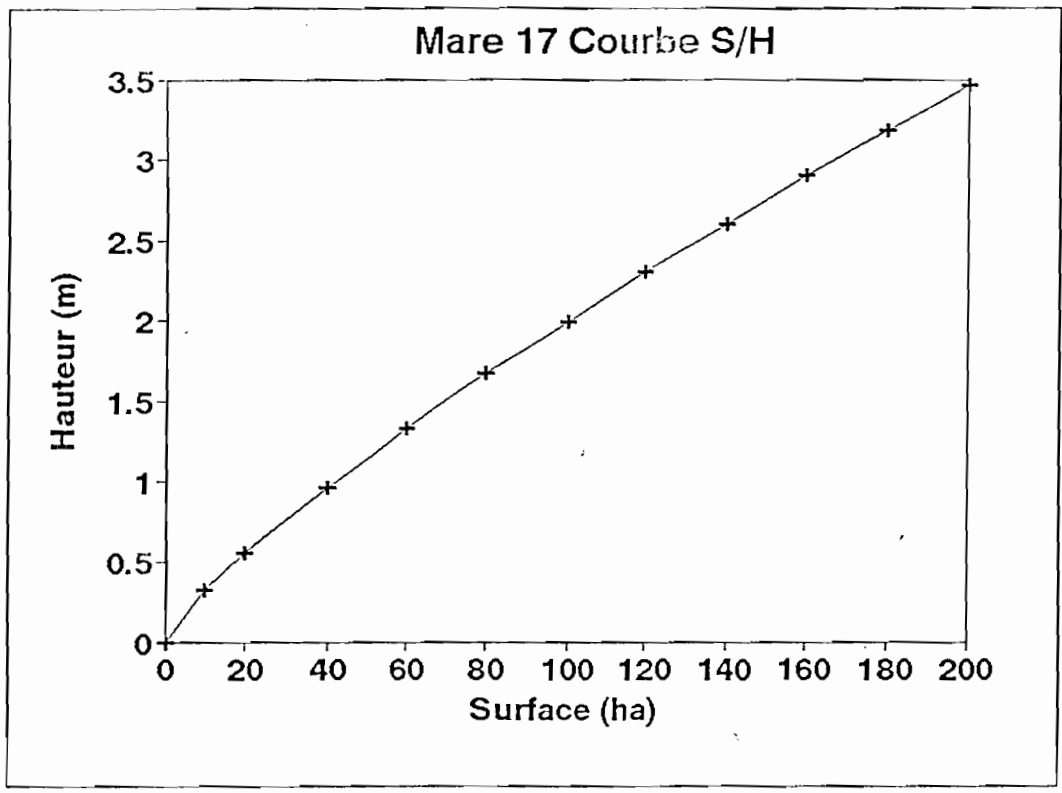
Méthode de segmentation automatique d'image. IN : Images satellitaires et milieux terrestres en régions arides et tropicales. Journées de télédétection. Bondy, 11/1988.

ORSTOM. Pp. 251-260.

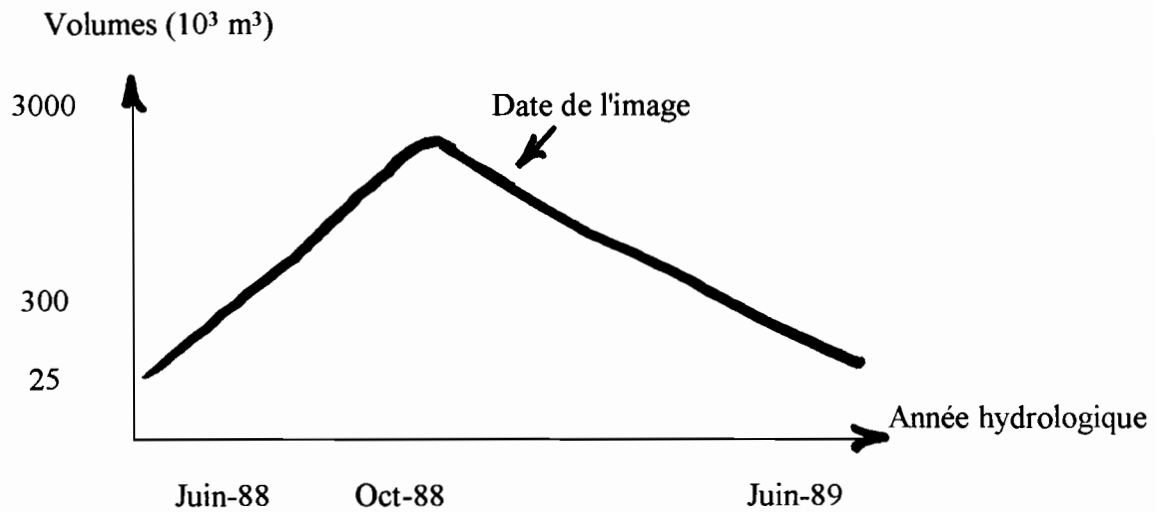
SABOL, D., E., et AL. 1992

Mapping and monitoring changes in vegetation communities of Jasper Ridge, CA, using spectral fractions derived from Aviris images. IN : Summaries of the Fourth Annual JPL Airborne Geoscience workshop. 10/1993. Vol. 1 : Aviris Workshop Green

R.O.Pp. 157-160.

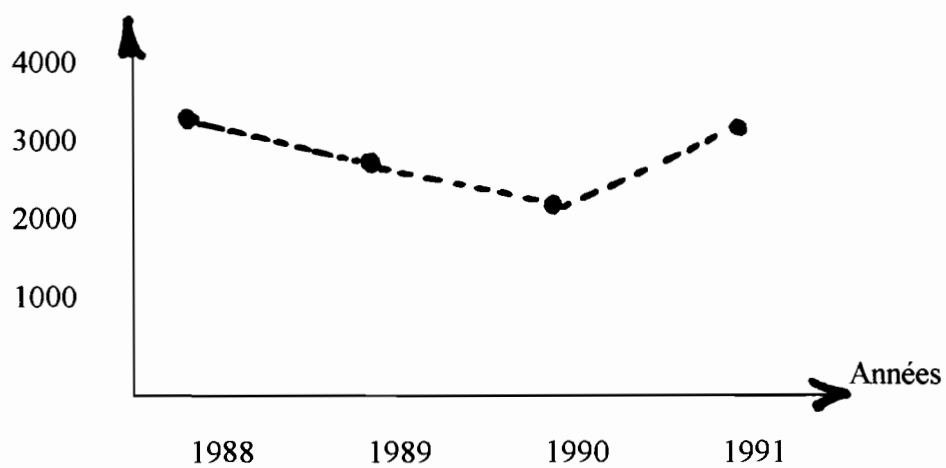


Mare N°17 - Apport (en milliers de m³) de l'année 1988
obtenu à partir de l'image SPOT XS du 24/10/88

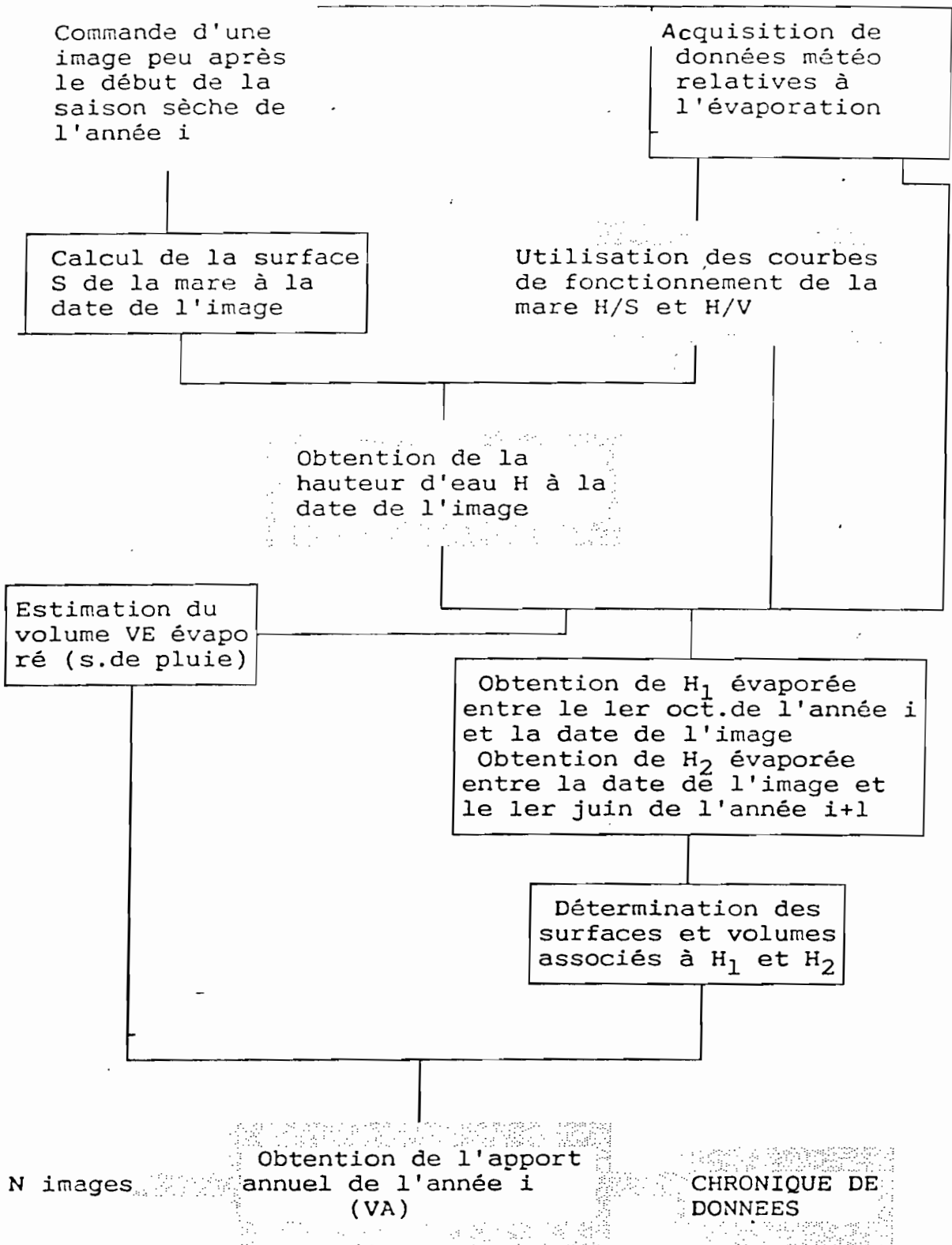


Mare N°17 - Chroniques d'apports annuels obtenues à partir de quatre (4)
images SPOT (une image par saison sèche) de 1988 à 1991.

Apports annuels (milliers de m³)



Organigramme de synthèse pour la reconstitution de chroniques de données hydrologiques



B 3

**MODELISATION HYDROLOGIQUE
ET
DETERMINATION DE PARAMETRES
Modèles hydrologiques**

**HYDROLOGICAL MODELLING
AND
DETERMINATION OF PARAMETERS
Hydrological models**

Proposition de communication à l'atelier sur la télédétection et la gestion des ressources en eau

Titre: Modèle stochastique de prévision des crues sur le fleuve Gambie

Auteurs : **SAMBOU S.** *Université Cheikh Anta Diop. Faculté des Sciences. Département de Physique. Dakar/SENEGAL.*

LAMAGAT J.P. *ORSTOM HYDROCONSULT. Montpellier.*

Résumé. Le réseau hydrométrique du fleuve Gambie en amont de Gouloumbou est très dense, avec de nombreux affluents qui contribuent à l'écoulement. Compte tenu de la difficulté d'intégrer les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau et la topographie du bassin dans le suivi de l'évolution des crues, une approche stochastique basée sur l'hypothèse de l'équation de l'onde cinématique est utilisable et qui s'inspire de la méthode des caractéristiques, a été mise au point. Le cours d'eau en amont de Gouloumbou est divisé en biefs limités chacun par deux stations hydrométriques. Entre deux biefs les équations horaires $T(H_1)$ et les relations de compatibilités $H_2(H_1)$ sont déterminées, en utilisant de longues séquences d'observations. Ces équations permettent de calculer le temps de transfert T_1 correspondant à une hauteur amont H_1 et la hauteur aval H_2 correspondant à une hauteur amont H_1 après un retard égal au temps de transfert. La combinaison de ces deux équations permet de déterminer la cote $H_2(i+T(H_1))$ à la station aval à la date $i+T(H_1)$, à partir de la hauteur observée à la station amont à la date i . Les essais effectués sur les biefs Kédougou-Mako ont été concluants. Les travaux se poursuivent pour les autres biefs, tels que Mako-Simenti, Simenti-Wassadou aval, Wassadou aval-Gouloumbou. information complémentaire sur l'évolution longitudinale des caractéristiques géométriques du cours d'eau provenant de la télédétection peut être utilisé dans la détermination des équations théoriques.

INTRODUCTION

La prévision des crues sur un cours d'eau peut être faite de plusieurs manières:

- soit en résolvant numériquement les équations hydrodynamiques générales à l'aide d'un schéma de résolution numérique approprié (Cunge et Wegner, 1964; Thirriot C., 1960; Abbot J., 1975)
- soit en simplifiant les équations hydrodynamiques générales à la lumière des conditions naturelles de l'écoulement.
- soit en décrivant le processus complet suivi par l'eau de pluie, depuis le sol jusqu'à la l'arrivée au point du bassin choisi comme exutoire (Morin et al 1981).
- soit en utilisant uniquement l'information entre deux biefs amont et aval (Habaieb H., 1987; Sambou S. ,1989)

Les trois premières approches se heurtent au caractère fortement non linéaire des phénomènes qui régissent l'écoulement tel qu'il se produit dans les conditions naturelles, et à la détermination des caractéristiques hydrauliques du lit, qui peuvent varier en cours de crue, et d'une crue à l'autre, et nécessitent un outil informatique de grande puissance.

La dernière approche présente l'inconvénient de ne tenir compte de façon explicite, ni de l'effet du bassin sur l'écoulement, ni de la non linéarité mentionnée ci-dessus et de ce fait ne décrit pas complètement le processus tel qu'il se déroule en réalité. Elle fonctionne en fait comme une boîte noire.

Dans cet article, on part des équations hydrodynamiques de base, et en utilisant des hypothèses simplificatrices justifiées par les conditions naturelles d'écoulement, on fait intervenir la méthode des caractéristiques, pour déterminer les expressions théoriques des équations horaires et des équations de compatibilité, qui permettent de calculer respectivement les temps de transfert correspondant aux hauteurs à l'échelle amont et les hauteurs à l'échelle aval correspondant aux hauteurs à l'échelle amont pour un retard égal au temps de transfert. Les expressions théoriques ainsi obtenues font intervenir les caractéristiques géométriques de la section de l'écoulement et les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau. Ces quantités varient de façon non linéaire d'une crue à une autre, et au cours de la même crue, de sorte que l'intégration des équations obtenues se fait très difficilement. Pour pallier à cet inconvénient, une approche mixte stochastique a été utilisée, qui est basée sur la dépendance existant entre les hauteurs à l'échelle à l'amont et à l'aval. On utilise des échantillons de grande taille pour déterminer les expressions empiriques des lois horaires et des équations de compatibilité. Les relations ainsi obtenues font également intervenir le caractère non linéaire du phénomène étudié. Les essais ont été menés sur les fleuves à plaine d'inondation (Lamagat J.P., 1987; Thirriot C., Sambou S., Lamagat J.P., 1991; Morel-Seytoux, Fahmy et Lamagat J.P., 1993) et sur la partie amont du fleuve Gambie (Lamagat J.P., Albergel J., et al, 1987). Nous allons l'étendre aux autres biefs situés plus en aval, jusqu'à la frontière de la Gambie. Nous présentons ici la méthode sur le bief Kédougou-Mako. Les résultats obtenus sont satisfaisants et peuvent être utilisés dans un système de prévision des crues englobant la télédétection.

CADRE PHYSIQUE

Le bassin du fleuve Gambie s'étend sur une superficie de 77100 km² entre 11.5° et 15° de latitude Nord et 11° et 16.5° de longitude Ouest. Il se répartit entre les états de Guinée, Gambie, Sénégal et dans une certaine mesure la Guinée Bissau. Le bassin comprend 4 zones d'altitudes décroissantes du Sud au Nord (Carte 1).

-le haut-bassin, au Sud de la bordure Nord du Fouta Djallon

-une deuxième zone entre le parallèle 12° N et la frontière du Sénégal, l'altitude moyenne est comprise entre 250 m et 600 m, le relief étant moins marqué.

-une zone comprise entre le confluent du Diahra et la frontière de la Guinée, englobant entre autres les collines Bassari.

-la zone maritime ou bassin inférieur (en aval de Wassadou amont).

Dans le haut-bassin le réseau hydrologique est très dense. Le fleuve est formé par l'association de nombreux petits cours d'eau à pente très forte dont le plus important est la Djimma. Entre Kédougou et Mako il reçoit sur la rive droite le Diaguéry. Après Mako, le Tiokoye, puis le Diahra viennent successivement se joindre à lui rive gauche; sur sa rive droite, peu avant Siminti, il reçoit le Niokolo-Koba. Après le Gué de Wassadou, il reçoit le Niériko sur sa rive droite et le Koulountou son affluent le plus important rive droite. Peu avant Gouloubou vient se jeter Niaoulé. Le Fleuve a une longueur totale de 1180 km, dont 500 km sont influencés par la mer, 200 km constituant le cours supérieur.

Sur le plan climatique le bassin de la Gambie se trouve dans la zone de climat tropical, dans laquelle on distingue deux zones: la zone sahélienne au Nord, avec une saison des pluies plus courte, et la zone guinéo-foutaniennè à hivernage plus pluvieux et plus long.

Cette alternance saison de pluies-saison sèche conditionne le régime hydrologique du fleuve: une période de hautes eaux pendant l'hivernage et une période de basses eaux pendant la saison sèche.

DONNEES DE BASE

Les données utilisées dans cette étude proviennent du Service Hydrologie du Ministère de l'Hydraulique du Sénégal. Il s'agit des hauteurs moyennes journalières, des débits journaliers, des courbes de tarages.

METHODE D'ANALYSE

Les méthodes de prévision des crues sont basées sur le système hyperbolique complet des équations de Saint-Venant:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial S}{\partial T} = 0 \quad (I)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} + V \frac{\partial V}{\partial X} + g \frac{\partial H}{\partial X} = g(I - J)$$

La résolution numérique de ce système peut être faite de plusieurs manières : différence finies implicites (Cunge et Wagner, 1964), méthode des caractéristiques (Thirriot C., 1969a) et nécessite une description topographique détaillée et précise, ainsi que la connaissance des caractéristiques hydrauliques du cours d'eau et celles géométriques du lit.

La résolution analytique peut être menée, à condition de faire des approximations, concernant en particulier l'évaluation des termes de perte de charge qui sont fortement non linéaires, et de linéariser autour du régime porteur, qui peut être soit l'écoulement uniforme, soit une courbe de remous (Thirriot C., 1994; Benyada L., 1995)

Dans le cas de l'écoulement naturel, compte tenu des difficultés d'évaluer les paramètres déjà énumérés, on peut procéder à des simplifications de l'équation dynamique en négligeant les termes d'inertie si la pente est élevée d'une part, et d'autre part, en supposant à chaque instant que l'écoulement est uniforme (Thirriot C. 1969b). Moyennant ces deux importantes approximations le système (I) s'écrit :

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial S}{\partial T} = q \quad (II)$$

$$I = J$$

Le système (II) peut s'écrire en prenant H comme variable fondamentale. En effet, si on exprime la débit sous la forme:

$$Q = \sqrt{I} f(H) \quad (1)$$

où $f(H) = kR_H^m S \approx k \left(\frac{S^{m+1}}{B^m} \right)$ est la débitance au sens de Bakhmeteff avec S section de l'écoulement, B largeur au miroir k coefficient de rugosité du lit et la relation

$$dS = BdH \quad (4)$$

Sachant que :

$$S = S(H, X)$$

$$B = B(H, X)$$

$$I = I(X)$$

$$k = k(X)$$

il vient en dérivant (3) par rapport à X et en remplaçant dans (II), la relation :

$$\frac{\partial H}{\partial X} + \frac{1}{k\sqrt{I}\left(\frac{S}{B}\right)^m \left[(m+1) - m \left(\frac{S}{B^2} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial H} \right)_X \right]} \frac{\partial H}{\partial T} = \frac{q - k\sqrt{I} \frac{S^{m+1}}{B^m} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \ln(I)}{\partial X} + \frac{\partial k}{\partial X} \right) - k\sqrt{I} \left(\frac{S}{B} \right)^m \left[(m+1) \left(\frac{\partial S}{\partial X} \right)_H - m \left(\frac{S}{B} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial X} \right)_H \right]}{k\sqrt{I}\left(\frac{S}{B}\right)^m \left[(m+1) - m \left(\frac{S}{B^2} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial H} \right)_X \right]}$$

En utilisant la méthode des caractéristiques, on a:

$$\frac{\partial H}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial T} \frac{dT}{dX} = \frac{dH}{dX}$$

En identifiant, on obtient après arrangeant

$$\frac{dT}{dX} = \frac{1}{k \sqrt{I} \left(\frac{S}{B} \right)^m \left[(m+1) - m \left(\frac{S}{B^2} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial H} \right)_H \right]} = h(X, T) \quad (6)$$

$$\frac{dH}{dX} = \frac{q - k \sqrt{I} \frac{S^{m+1}}{B^m} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial \ln I}{\partial X} + \frac{\partial \ln k}{\partial X} \right] - (m+1) \left(\frac{\partial \ln S}{\partial X} \right)_H + m \left(\frac{\partial \ln B}{\partial X} \right)_H}{k \sqrt{I} \left[(m+1) - m \left(\frac{S}{B^2} \right) \left(\frac{\partial B}{\partial H} \right)_X \right]} = g(H, X) \quad (7)$$

En intégrant les équations différentielles ci-dessus on obtient:

$$T_1 = T_0 + \int_{X_0}^{X_1} h(X, T) dX \quad \text{équation horaire} \quad (8)$$

$$H(X_1, T_1) = H(X_0, T_0) + \int_{X_0}^{X_1} g(X, T) dX \quad \text{équation de compatibilité} \quad (9)$$

L'intégration est théoriquement possible, si les expressions analytiques des fonctions sont connues, ou alors si on peut les déterminer de façon empirique. Mais ceci va être difficile puisque ces fonctions font intervenir les caractéristiques hydrauliques $k(X)$, $I(X)$, m du cours d'eau et celles géométriques $S(H, X)$, $B(H, X)$, $H(X, T)$ de la section, qui varient d'un bief à un autre, et au cours de la crue. Nous allons contourner cet inconvénient en utilisant une approche stochastique basée sur des échantillons de hauteurs journalières de grandes tailles, comportant de nombreuses années d'observation. Nous allons choisir à la station amont une tranche de hauteurs comprises dans l'intervalle $(H, H + \Delta H)$, observées à des instants i . A ces hauteurs on va faire correspondre des hauteurs à la station aval observées à des instants $i+k$. Pour chaque valeur de k on calcule le coefficient de corrélation $r(k)$ entre les hauteurs amont et aval ainsi définies, et on trace le corrélogramme défini par l'ensemble des points $(k, r(k))$.

La valeur k_0 de k correspondant au maximum du corrélogramme est la valeur la plus probable du temps de propagation correspondant à la moyenne H_0m des hauteurs de l'échantillon amont $(H, H + \Delta H)$. La moyenne des hauteurs aval correspondants aux hauteurs amont décalées d'un délai égal à k_0 est associée à H_0m . Cette opération est menée sur l'ensemble des hauteurs de l'échantillon; les courbes empiriques obtenues représentent respectivement les équations horaires et les équations de compatibilité.

APPLICATION

La méthode ci-dessus a été appliquée au fleuve Gambie, sur le bief Kédougou-Mako. Les données de base sont les hauteurs moyennes journalières observées à l'échelle de ces stations. L'échantillon utilisé dans l'étude comprend 5 années, 1975,76,77,78, 80. Les trois premières années ont servi à déterminer les fonctions empiriques $T(H_1)$ et $H_2(H_1)$ représentant respectivement l'équation horaire et l'équation de compatibilité. Les deux dernières ont servi de test. Les courbes 1 et 2 représentent respectivement, pour le bief Kédougou-Mako les courbes expérimentales représentant les lois équations horaires et de compatibilité. Ces courbes obéissent aux relations empiriques ci-dessous:

$$T(H) = \frac{39439}{H^{1.688}} \quad \text{avec } T \text{ en jours } H \text{ en cm} \quad (10)$$

$$H_2(H) = -0.007H^2 + 1.2281H - 10.185 \quad H_2 \text{ et } H \text{ en cm} \quad (11)$$

La prévision a été faite en utilisant ces deux courbes de la manière suivante:

-pour une hauteur amont $H_m(i)$ observée à la date i , on utilise la relation (10) pour déterminer le temps de propagation jusqu'à l'aval correspondant, soit k_0 .

-à partir de la relation (11) on calcule la hauteur aval correspondant à la hauteur amont, avec un décalage i , soit à la date $i+k_0$.

Les résultats obtenus pour les deux années de test sont représentés sur les courbes 3 et 4.

Bien entendu, les prévisions se font à des délais n'excédant pas le temps de transfert, ce qui exclut la prévision à long terme. Par ailleurs, un examen attentif de ces graphes met en évidence un amortissement du maximum calculé par rapport au maximum observé, ainsi qu'un léger déphasage dans le temps. Ces deux inconvénients peuvent s'expliquer par la taille de l'échantillon utilisé qui est assez faible, de sorte que pour les valeurs extrêmes, on a peu d'observations.

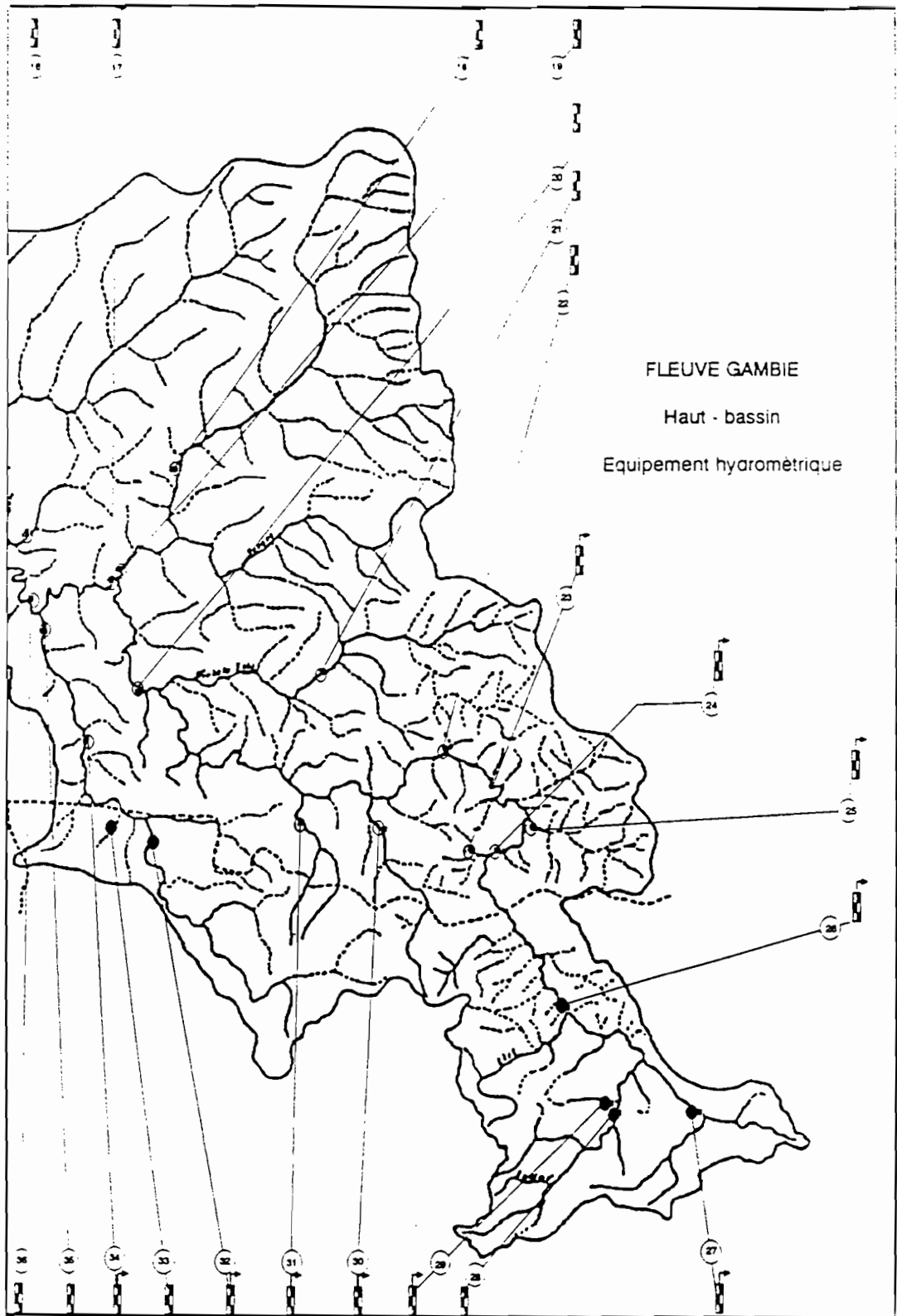
Il serait bien évidemment intéressant de coupler une telle approche à la télédétection. L'apport de celle-ci pourrait consister dans la détermination des lois de variation longitudinale des caractéristiques géométriques des sections du cours d'eau entre deux tronçons. D'autres applications pourraient être trouvées.

BIBLIOGRAPHIE

Abbot M. (1975) *Method of characteristics*. Unsteady Flow in Open Channels pages 63-88.

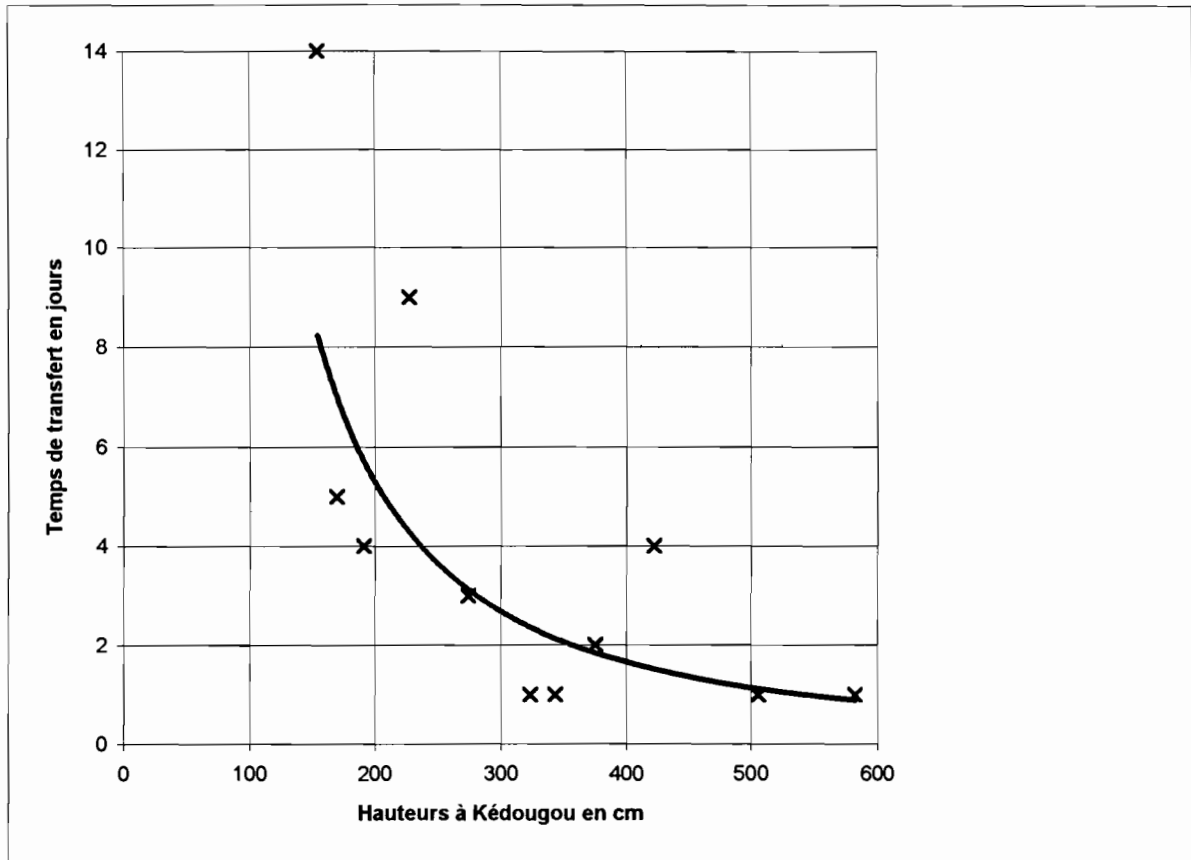
Benyada Lahouari (1994) *Construction d'une solution analytique et critique d'algorithmes numériques afférant aux équations de Saint-Venant en vue d'application aux écoulements transitoires sur fond mobile*. Thèse de Doctorat de l'INPT. Spécialité Mécanique des Fluides. 1994. 164 pages.

- Cunge J. A. et Wegner M. (1964) *Intégration numérique ds équations d'écoulement Barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies*. La Houille Blanche n°1-1964. Pages 33-39
- Habaieb H. (1987) *Contribution à l'étude d'algorithmes de prévision de crues en temps réel. Exemples d e l'Aveyron et de la Médjerdah*. Thèse de Doctorat de l'INPT.
- Lamagat J.P. (1987) *Modèle de propagation des crues du fleuve Niger entre Koulikoro et Ké-Macina*. Ouvrage publié avec le concours de la CEE. ORSTOM.
- Lamagat J.P., Albergel J., Bouchez J.M., Descroix J.M. (1987) *Monographie hydrologique du Fleuve Gambie*. ORSTOM. Ouvrage publié avec le concours du Ministère Français de la Coopération.
- Morel Seytoux, Fahmy, Lamagat J.P. (1993) *A composite Hydraulic and statistical flow routing method*. *Water Resources Research*. Vol 29, pages 413-418. Février 1993.
- Morin G. Fortin J.P. Lardeau J.P. Sochanska W. Paquette S. (1981). *Modèle CEQUEAU manuel d'utilisation*. INRS EAU, rapport scientifique n°93.
- Sambou S. (1989) *Contribution à l'étude des régimes du fleuve Sénégal en vue de la prévision des crues*. Thèse de Doctorat de 3è Cycle présentée à l'Université de Dakar.
- Sambou S. Thirriot C. (1993) *Algorithmes récursifs et non récursifs: application à la prévision des crues du Haut-Bassin du Fleuve Sénégal*. Hydrology of warm humid regions(Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993) IAHS Publications n°221, 1993. pages 139-148.
- Thirriot C. (1993) *De l'intumescence à l'onde de crue: étude de l'influence de la perte de charge par l'examen des modes propres*. CRAS pages 137-143, 1993
- Thirriot C. (1960a) *Quelques méthodes d'étude de la prévision des crues*. Rapport IMFT interne.
- Thirriot C. (1969b) *Écoulement transitoire à surface libre* Rapport interne IMFT CT 172 bis
- Thirriot C. (1960) *Contribution à l'étude des régimes variés et des régimes transitoires dans les canaux d'usine*. Thèse de Doctorat d'Etat. 369 Pages
- Thirriot C., Sambou S. Lamagat J.P. (1991) . *Comparaison d'algorithmes de prévision des crues sur le Fleuve Sénégal*. Utilisation rationnelle de l'eau des petits versants arides. Editions AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. PARIS 1991 Pages 237-253.

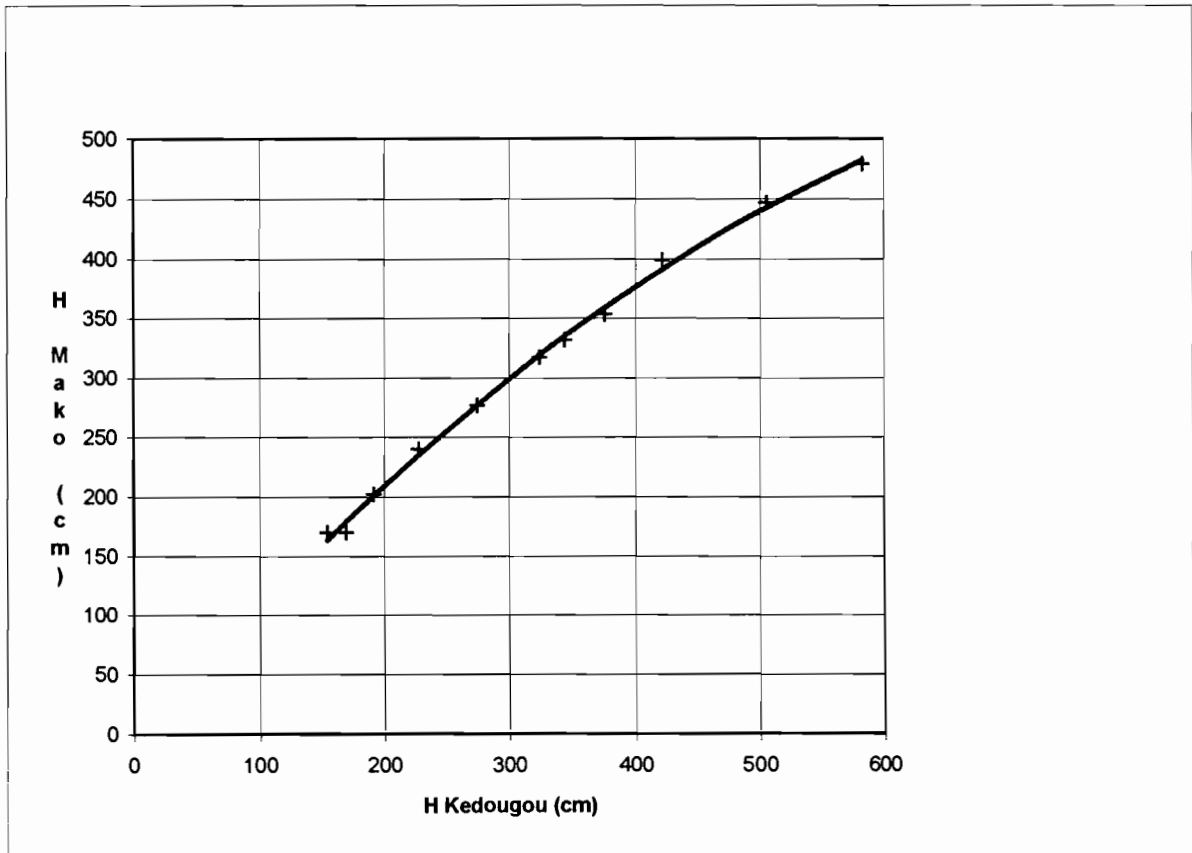


Liste des stations

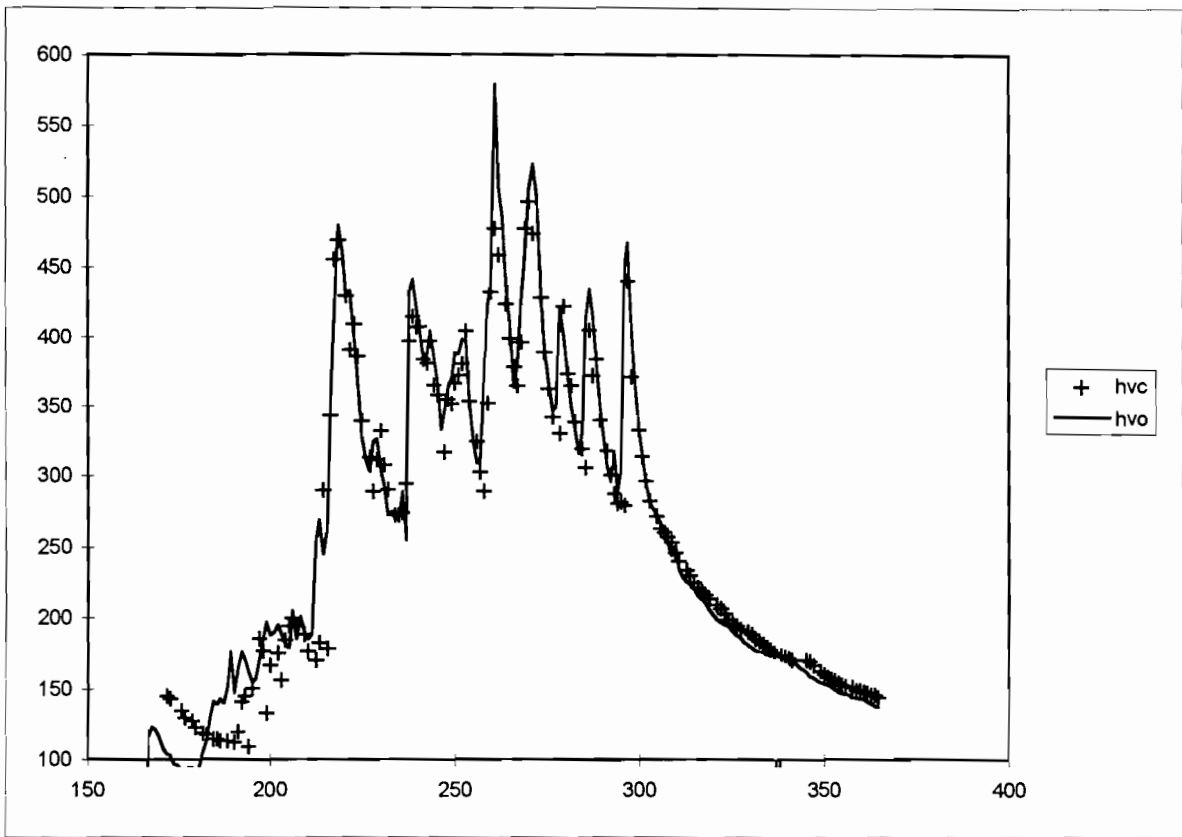
- | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 16 - Niaoulé à Niaoulé Tanou | 17 - Gambie à Wassadou | 18 - Niériko à Gombeyel |
| 19 - Niériko au pont routier | 20 - Gambie à Simenti | 21 - Niokolo au pont routier |
| 22 - Gambie à Mako | 23 - Sili au pont routier | 24 - Gambie à Kédougou |
| 25 - Diaguéry au pont routier | 26 - Gambie à Kouny | 27 - Oundou au bac de Borokomé |
| 28 - Silamé au bac de Matakaou | 29 - Dimma au pont | 30 - Tiokoye au pont routier |
| 31 - Diarha au pont routier | 32 - Koulountou au pont de Youk. | 33 - Ousson à Sambailo |
| 34 - Koulountou au PNKK | 35 - Koulountou à Missira | 36 - Gambie à Fass |



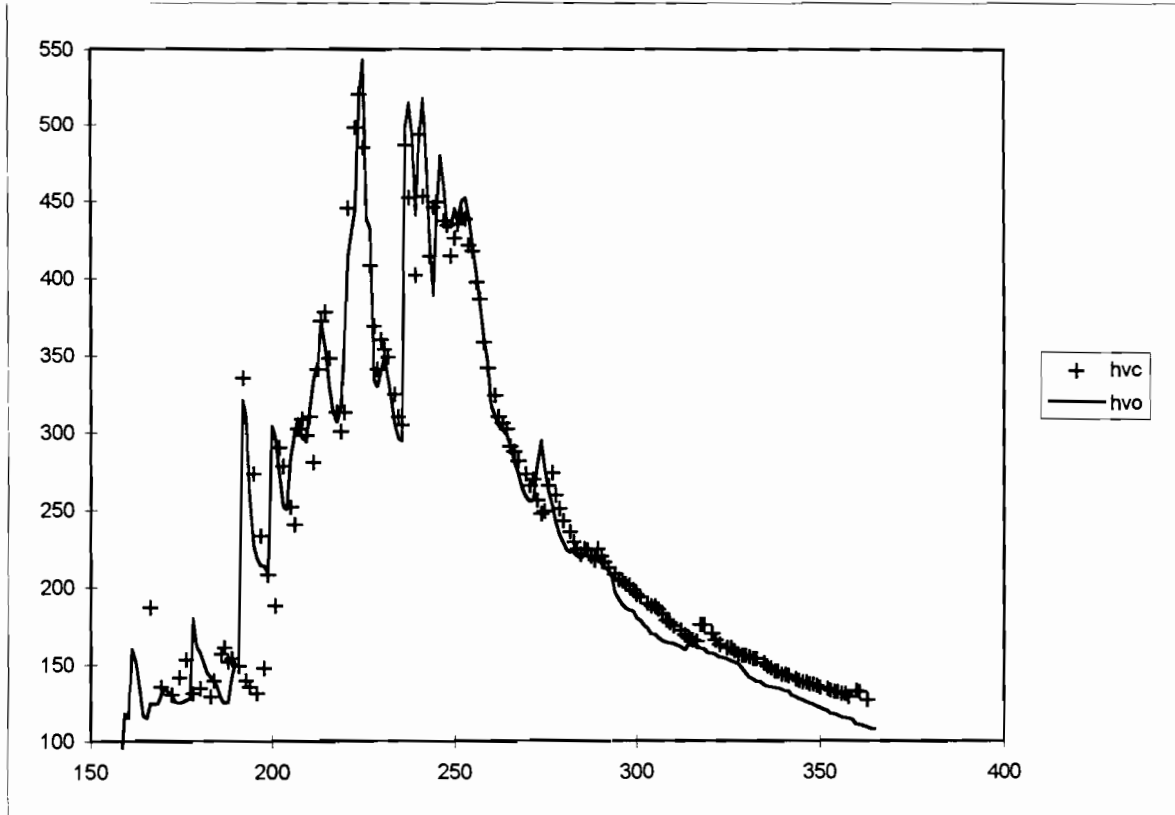
Bief Kedougou-Mako : Courbe horaire



Bief Kedougou-Mako : Courbe de compatibilité - amont aval



Mako 1978 : Simulation du limnigramme à partir des courbes horaires et de compatibilité
 hvc: calculé; hvo: observé



Mako 1980 : Simulation du limnigramme à partir des courbes horaires et de compatibilité
 hvc: calculé; hvo: observé

TELEDETECTION et MODELISATION HYDROLOGIQUE :
QUELLE VISION, QUELLE ECHELLE, QUELS PROCESSUS ?
Remote sensing and hydrological modelisation :
Which sight, which scale, which processes ?

Christian PUECH *

* Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF /ENGREF , 34000 Montpellier

Résumé

La modélisation hydrologique peut se faire selon divers niveaux d'agrégation, depuis une approche globale jusqu'à la modélisation hydrologique très finement distribuée. La liaison avec des données issues de télédétection pose le problème de l'adéquation des deux logiques, hydrologie ou vision, et des échelles correspondantes. Deux échelles sont a priori disponibles, la taille de la cellule de calcul hydrologique et le pixel issu des images de télédétection.

Le choix d'un type de modélisation et de la taille de calcul est un préalable. Il s'en déduit des schémas hydrologiques simples (modèles globaux) ou très compliqués (modèles finement distribués) pour lesquels la connaissance des processus élémentaires devient importante. L'utilisation d'images de télédétection vise parallèlement à fournir certains paramètres hydrologiques à partir d'informations disponibles en surface à l'échelle du pixel. Mais la vision de surface n'est pas toujours compatible avec les besoins hydrologiques.

Parallèlement l'augmentation de complexité des modèles est souvent sans lien avec l'augmentation de la qualité des résultats numériques. En effet la décomposition à des échelles de plus en plus fines conduit à une explosion du nombre de paramètres ainsi que des interrogations sur la validité des équations et concepts à l'échelle de la maille utilisée, étape fondamentale souvent négligée. Ainsi l'apport du couplage entre modèles finement distribués et de la télédétection apparaît plus intéressant pour une meilleure connaissance des processus locaux et pour la gestion en scénario pour tester les modifications de l'état du milieu que pour une amélioration sensible des résultats numériques des simulations.

La cartographie des états de surface du Sahel effectuée dans le cadre du projet FAO sur la connaissance de débits illustre ces propos. Sont décrits le choix des processus et de l'échelle de travail, le type de résultats et leur qualité ainsi que les incertitudes pour passer du pixel au bassin versant. Notre choix s'est porté sur une modélisation de la fonction de production locale pour une zone où les écoulements de surface sont prépondérants. L'échelle pixel est alors acceptable. Le décodage des plans primaires issus de la télédétection en plans utiles quantifiés est effectué sur la base des expérimentations de simulation de pluie.

Abstract

Hydrological modelling can be done under various scale levels, from global to finely distributed models. Calculation size comes from a preliminary choice about modelisation. Uses of RS data is then a problem of linking two logics, hydrology or sight, and their different scales. Two scales are possible : the cell of hydrologic calculation and the pixel given by RS.

Hydrological modelling and size of calculation cell have to be chosen first. The consequences are hydrologic schemes from the simplest (global models) to the more complicated (fine distributed models). For the last one, elementary processes become very important to know. The RS images are used to give some hydrologic parameters from surface information at pixel size. But surface features and hydrologic needs are not ever compatible.

If we want operational products using RS, we have to remember that a more complex simulation model does not warrant better numerical results : in hydrological distributed models, the number of parameters often grows with increasing resolution. Moreover, physical equations are scale dependant. Often, they are often valid at laboratory scale only, and we have to be careful with models using them at pixel size or more. So distributed models and RS images (as source of spatialized data) are more interesting to gain knowledge about local processes or effects of land use modification than to give more precise numerical results.

This is illustrated through the mapping of surface features in Sahelian countries done under FAO project. Are described choices of process (surface runoff as major process in Sahelian countries), hydrologic scale (pixel), primary levels (vegetation, soils and cultivated lands), results (local production function) and quality ; the uncertainty due to scale problem from pixel to the whole catchment is also discussed. The transformation from primary levels to local production function involves rain simulators.

I. INTRODUCTION

La liaison entre modélisation hydrologique et les données issues de télédétection pose le problème de l'adéquation de deux logiques, la conception hydrologique et la description d'une surface. Deux échelles sont a priori disponibles, la taille de la cellule de calcul hydrologique et le pixel issu des images de télédétection.

Cette liaison rapprochant deux techniques impose de trouver des compromis pour une bonne adéquation. Les contraintes hydrologiques sont à associer à ce que l'on peut appeler les processus, tandis que la télédétection a ses contraintes de vision, ne serait ce que sa limitation aux strates supérieures du sol. Le recoupement entre les deux approches se fait sur la base d'une résolution commune dont le choix est fondamental pour les deux problématiques.

De grandes difficultés résident dans ce couplage ; quelques éléments de réflexion générale, fondamentaux pour en comprendre les raisons et pour proposer des méthodologies cohérentes, sont exposés tout d'abord. Un exemple d'application au Sahel permet ensuite d'explicitier ces réflexions dans un cas concret.

II. LIAISON MODELISATION HYDROLOGIQUE - TELEDETECTION

2.1 Schéma général de liaison

Pour l'insertion d'informations issues de télédétection dans la modélisation hydrologique, le souhait maintes fois formulé est que cette nouvelle source de données soit directement compatible avec les modèles. Dans la plupart des cas la télédétection procure des cartographies de plans tels qu'occupation du sol, indice de végétation, température de surface T_s ou un signal radar. Or ces informations ne peuvent être intégrées directement dans les modèles hydrologiques.

Il faut aller au-delà de la simple production de cartographie de ces paramètres (que nous appellerons plans primaires) pour les transformer en paramètres plus pertinents pour la thématique, plans utiles ou "plans secondaires" délivrant des paramètres directement utilisables dans les modèles. Cette transformation, délicate et pas toujours

réalisable, va se faire selon un schéma statistique, empirique ou théorique, bref selon un modèle intermédiaire de transformation (figure 1). On peut citer les transformations de T_s en ETR selon les modèles radiatifs simplifiés (SEGUIN et al, 1994) ou encore l'estimation de coefficient de ruissellement en zone sahélienne (PUECH, 1993) par liaison statistique avec les données de terrain.

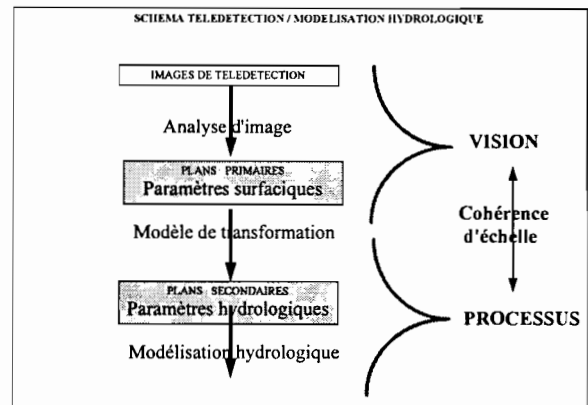


Figure 1 Schéma de liaison télédétection / thématique

Si la difficulté première réside dans cette transformation, des difficultés plus amont et peut-être, plus fondamentales existent, notamment parce que les plans secondaires devront être définis en conformité d'échelle avec les contraintes hydrologiques.

La liaison hydrologie-télédétection est une mise en relation de deux entités avec leurs exigences propres. A priori la modélisation hydrologique distribuée (spatialisée) devrait être directement compatible avec les données télédéteectées, puisque les deux approches sont surfaciques. Toutefois pour une bonne adéquation il faut que les besoins de l'une soit proches des possibilités de l'autre : la réflexion générale peut se décliner sur le mode du **requis** (par l'hydrologie) et du **disponible** (par la télédétection) qui doivent s'associer.

2.2 Variables hydrologiques requises, fonction des différentes modélisations

Le requis par l'hydrologie dépend du type de variable à étudier assorti de ses considérations spatio-temporelles : crue, apport annuel ou étiage, avec une échelle de temps donnée.

L'explication de ces débits fait appel à des caractéristiques du bassin fixes ou lentement variables (occupation du sol, géologie, morphologie) ou rapidement évolutives (pluies, humidité, infiltration ...).

Outre le type de variable à modéliser et la décomposition temporelle, dans l'approche spatiale le choix de l'échelle de travail est la première des priorités. Le couplage impose une échelle unique de travail qui peut aller du pixel, taille minimale, au versant ou au bassin, par regroupement des informations.

Le choix initial devrait être, à notre avis, basé sur des considérations hydrologiques. Il définit le type de modélisation à effectuer et donc la taille de la cellule de calcul. Mais ces choix sous-tendent des réflexions sur les types de modélisations possibles, depuis la boîte noire empirique jusqu'à la modélisation des **processus élémentaires**. Les choix possibles, définis sur la figure 2, sont d'abord présentés du point de vue hydrologique.

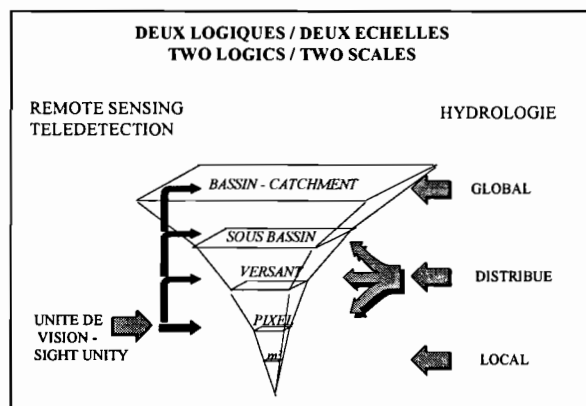


Figure 2 : les deux logiques, les deux échelles possibles

- **Les modèles globaux** sont des modèles empiriques, statistiques ou conceptuels : la détermination des types d'écoulements est souvent obtenue par des schémas loin de la physique, de type boîte noire. La télédétection n'apporte dans ce cas que des paramètres moyennés. Dès cette échelle, on peut décomposer l'approche hydrologique en *fonction de production* et *fonction de transfert*. Remarquons que les notions qui se cachent derrière ces deux termes sont floues dans la mesure où ce qu'elles représentent est extrêmement lié à l'échelle. Au niveau global,

production est associée à "volume écoulé", tandis que *transfert* signifie "délais, temps de parcours".

Les modèles distribués correspondent à plusieurs niveaux de résolution avec nécessité de réflexions de plus en plus détaillées. Pour les plus grossiers (modèles semi-distribués) on reste à un niveau de sous-bassin ou de versant. La fonction de transfert correspond au transport de l'eau jusqu'à l'exutoire et est basée essentiellement sur des considérations de propagation hydraulique (parcours B de la figure 3). Ce sont des outils et une science que l'on maîtrise suffisamment pour arriver à des solutions acceptables.

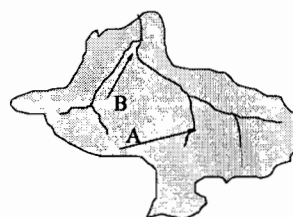


Figure 3 : parcours de versant (A) ou en drain (B)

A l'échelle du versant la fonction de production est plus controversée : elle correspond au volume obtenu à la sortie d'un versant (parcours A de la figure 3). Tant que l'on considère les phénomènes de façon semi-globale, on arrive à bien les décrire et les prédire, mais leur explication est d'autant plus délicate qu'elle est plus fine

- **Quand l'échelle s'affine (modèles distribués)**, on est beaucoup plus démuni car on doit s'interroger sur les différents processus en jeu : les problèmes se complexifient et les schémas deviennent plus incertains et plus critiqués. Ainsi dans la modélisation fine il faudra se préoccuper de la production locale, séparation entre infiltration, évaporation et écoulement de surface ; on fera appel au ruissellement de surface (Hortonien ou sur zones saturées), à l'écoulement de sub-surface, à l'effet piston ... Plus la modélisation s'affine, plus les processus élémentaires deviennent prépondérants, au coeur du problème. Les choix du type de modélisation et des processus

sont donc fortement fonction de l'échelle (figure 4).

La dernière échelle hydrologique est locale ; elle correspond aux mesures élémentaires et aux essais de laboratoire. Cette échelle n'est pas utilisée en modélisation quand on s'intéresse à un bassin versant, mais elle constitue, avec le niveau global, le seul niveau où sont bien connus phénomènes, équations et processus.

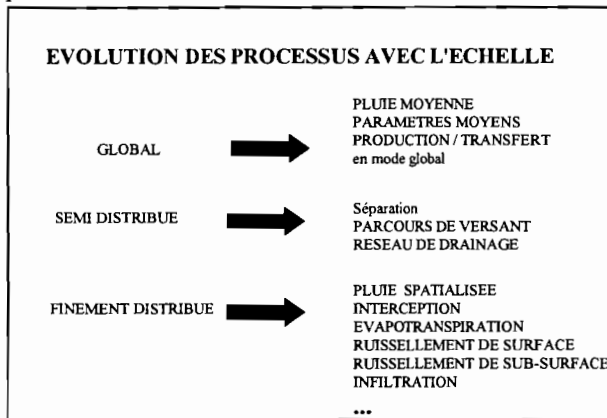


Figure 4 : Choix hydrologique et processus

2.3 Données de télédétection disponibles

Quand, dans ce schéma hydrologique on essaye d'associer les images de télédétection, les choix nouveaux sont restreints par les caractéristiques des capteurs de télédétection. La résolution de vision est imposée, c'est le pixel, mais la résolution requise (hydrologique) est a priori différente : le pixel n'est pas obligatoirement la taille de calcul. Celle-ci sera égale ou supérieure au pixel, avec des regroupements souvent nécessaires.

En pratique trois cas de couplages se rencontrent : pixel, global ou intermédiaire (figure 2).

Deux questions se posent alors : quelle résolution et quel regard pour approcher des paramètres utiles ? Le problème du choix des paramètres et de leur obtention relève de considérations délicates sur la logique de vision des images de télédétection ; seules quelques indications rapides sont données ici, l'article étant plus axé sur la partie échelle.

Seule la couche supérieure de la terre est visible et seules les strates supérieures sont discernables. Les éléments de sol (épaisseur, texture ...) sont donc difficilement obtenus.

Les paramètres à rechercher sont alors des paramètres surfaciques dont quelques exemples sont répertoriés au tableau 1. Les objets élémentaires que l'on va rechercher à la surface du sol dépendent directement des considérations thématiques.

Pour chaque application une liste des paramètres surfaciques recherchés doit être établie et le but du traitement d'image sera de faire apparaître au mieux ces informations dans une résolution proche de la résolution requise.

paramètres	processus
- occupation du sol	- écoulement de surface
- type de sol	- infiltration, ruissellement
- végétation	- interception
- signal radar	- humidité de surface
- température	- ETR
- Chemin de l'eau, talwegs	- drains et modélisation

Tableau 1 : paramètres / processus

Solution pixel .

On considère que le pixel satellite est une bonne base de calcul.

Cette solution est possible dans le cas où les ruissellements de surface sont prépondérants (processus de HORTON). L'état de la surface est alors un élément fondamental du ruissellement à caractériser finement. Ce processus est reconnu prépondérant dans les zones sahéliennes du fait de la présence de croûtes de battance qui imperméabilisent la surface (voir application au paragraphe III).

Le pixel est une bonne base de calcul en zone où les aires contributives sont acceptables. Les écoulements sont alors gérés par la morphologie (ex de TOPMODEL) à travers la connaissance des pentes et des surfaces drainées. Ici c'est la connaissance du MNT (modèle numérique de terrain) qui est la base du calcul.

Zones homogènes

On considère une taille de calcul hydrologique intermédiaire entre le pixel et le bassin versant.

Cette dernière solution fait appel à des considérations de zones homogènes de versants et d'entités hydrologiquement

intéressantes. Dans ce cas les mailles de calcul peuvent être irrégulières, carrés de taille variable (modèle GIRARD) ou de formes quelconques, définies à partir de considérations hydrologiques (lignes topographiques de MOORE et al, 1988 ; toposéquences et parcelles de RISSONS, 1995).

Si l'essentiel du comportement hydrologique est expliqué non par des informations précises de surface mais par des zones plus étendues, celles ci peuvent être choisies comme base de calcul. Il faut alors définir ces zones soit dans les images (recherche de zones homogènes à partir des informations de surface), soit hors image (par exemple des versants à partir de la morphologie). Un écueil possible est la non conformité entre des zones homogènes définies selon leur aspect de surface (aspect visuel) et non selon un critère d'iso-comportement (aspect hydrologique).

Niveau global

Le niveau global correspond à la plus classique et la plus opérationnelle des approches utilisant modèles et télédétection. Le schéma est simple : les paramètres globaux sont obtenus par simple moyenne des informations recueillies en surface. Des essais intéressants ont été effectués sur la température de surface T_s , l'ETR et débutent sur l'humidité moyenne du bassin.

Dans beaucoup de cas cette approche déterminant une valeur moyenne se transforme en une recherche temporelle de coefficient, à travers une série d'images. Par exemple série d'images NOAA, météorologiques, pour définir des chroniques des paramètres rapidement variables.

III ELEMENTS DE CHOIX ET INCERTITUDES

Les choix possibles de couplage entre une modélisation hydrologique et des données de télédétection sont donc multiples mais doivent respecter une cohérence entre échelle et processus décrits.

La télédétection en raison de sa présentation maillée pousse à des couplages avec des modèles a priori distribués. Mais des limitations ou incertitudes dues à chacune des présentations sont certaines et nous allons en

détailler quelques unes tant pour les modèles globaux que distribués.

3.1 Modèle global ou distribué ? Complexité ou qualité ?

L'utilisation et l'apport potentiel de la télédétection sont différents selon le choix global ou distribué.

Dans un cas (global), la recherche s'oriente souvent, à travers des valeurs moyennes, vers une définition de chroniques, tandis qu'une approche maillée, essaye de caractériser et de tenir compte des différences internes au bassin versant.

L'utilisation de modèles globaux est délicate à cause

1) des incertitudes importantes sur la valeur absolue des paramètres recueillis (exemples de T_s ou ETR). Les calibrations et corrections diverses (atmosphère, relief) sont toujours délicates et les utilisations opérationnelles ne peuvent fournir facilement de données absolues. Le recalage se fait parfois avec des observations au sol.

2) du coût élevé des images si elles sont destinées à fournir un seul paramètre sur un bassin versant.

Inversement la difficulté de l'approche maillée vient de l'incapacité des modèles à prendre en compte les différences spatiales des bassins versants telles que définies par les images.

Pour ce qui est de l'approche distribuée, on ressent une grande difficulté de validation par suite d'un manque de données de terrain sur les comportements internes au bassin à l'échelle nouvelle (versant ou pixel).

Ceci est très gênant car il est facile de mettre en oeuvre des modèles cohérents au point de vue des résultats numériques globaux avec des processus en opposition avec ce que l'on connaît de la zone. On peut appliquer à ce propos les réflexions de KLEMES : il rappelle qu'il ne suffit pas qu'un modèle donne de bons résultats pour être bon ; il faut aussi que ce soit pour les bonnes raisons (KLEMES, 1986). Ceci incite alors au développement d'observations hydrologiques de versants.

En second lieu il faut rappeler que complexité ne signifie pas qualité. L'approche finement maillée peut conduire à une explosion de

paramètres qui impliquent que l'on ne maîtrise plus rien

Par exemple BEVEN cite une application du modèle déterministe européen SHE model sur le bassin de la Wye qui utilise 2400 paramètres, sans tenir compte des paramètres topographiques ni des variations temporelles (BEVEN, 1989). Au point de vue des résultats bruts à l'exutoire, les modèles distribués ne donnent pas de résultats significativement meilleurs que ceux des modèles globaux : c'est le cas de la comparaison effectuée entre un modèle simple à 2 paramètres (GR2) et SHE model déjà cité (bassin du Rimbaud, cadre du projet européen DM2E, 1995). En fait l'intérêt de ces modèles maillés n'est pas dans une amélioration de la qualité mais dans une meilleure compréhension des cheminements de l'eau et dans les études en scénarios.

3.2 Dépendance d'échelle : une limitation des approches distribuées

A l'échelle intermédiaire, du pixel au versant, l'un des principaux problèmes tient à la dépendance d'échelle pour les variables, processus ou équations qui les définissent.

Pour ce qui est des variables, on observe une forte dépendance d'échelle touchant la précision et la signification des paramètres. Par exemple une pente sur une portée de 20m (pixel SPOT) n'a pas la même signification qu'une pente sur 1km (pixel NOAA, sous bassin). Ici la dérive est triviale (PUECH, 1993). Or, ces mêmes dérives s'observent pour toutes les variables parfois de façon plus insidieuse : température de surface estimée sur 1 km² par exemple, utilisée ensuite sans précaution dans des modèles établis au niveau d'une parcelle.

On observe le même phénomène de dépendance d'échelle pour les processus et les modélisations potentielles.

Développées au laboratoire elles ne sont souvent plus valables à une échelle plus globale. BEVEN (1989) introduit la notion de **saut conceptuel** : on passe d'une loi étudiée et validée à une échelle stationnelle (laboratoire) à l'échelle d'une maille sans préalable théorique. Les modélisations dites déterministes les utilisent toutefois sans vergogne, sans se poser le délicat problème de

leur validité. Ce qui conduit à des schémas critiquables.

On peut donner des exemples triviaux dans le cas d'une modélisation maillée classique : par exemple l'application brutale, à l'échelle d'une maille de plusieurs mètres, de l'équation de MANNING pour l'écoulement de surface.

L'équation de MANNING STRICKLER exprime les écoulements en rivière à partir de la section mouillée et de la pente de la ligne d'eau. Un coefficient de freinage (de MANNING STRICKLER) exprime la rugosité des parois. Cette équation est souvent utilisée pour caractériser les écoulements de surface supposés en nappe sur une surface d'un pixel ou plus. Cette utilisation nous paraît abusive par suite de nombreuses déviations par rapport aux hypothèses d'application dont les plus importantes sont :

- la non-persistance de tels écoulements sur des distances même moyennes, les nappes se regroupant rapidement en filets préférentiels multiples au bout de quelques mètres (PLANCHON, 1991) ;

- la non-signification d'une section mouillée de quelques millimètres d'épaisseur.

Enfin, le coefficient de rugosité de STRICKLER est même parfois estimé à partir du NDVI, indice de végétation satellitaire (GROS, 1995). Or celui-ci caractérise davantage la strate arborée ou la végétation haute que des paramètres expliquant le freinage à l'écoulement.

Ainsi les équations physiques développées en laboratoire sont **dépendantes d'échelle ("scale dependant")** et leur intégration dans ces modèles est à la limite de l'acceptable. Les équations utilisées deviennent à la rigueur utilisables si elles ont été calées localement, mais l'approche n'a plus rien de physique. Le minimum serait d'utiliser un langage prudent : ne plus parler d'écoulement "selon MANNING", mais parler d'équations équivalentes justes bonnes à représenter numériquement les écoulements, en attendant mieux.

3.3 Résolution minimale.

En télédétection on utilise parfois des notions de résolution optimale (MARCEAU et al., 1991) correspondant à la résolution minimale

à partir de laquelle le pixel est considéré homogène. Ceci est vrai par rapport à un choix d'objet à décoder.

On peut proposer un parallèle avec l'approche hydrologique, à savoir que pour un choix de processus donnés, il existe une **maille optimale** où le comportement est homogène. Décrire l'espace à un pas d'espace plus petit n'apporte aucune information pour la modélisation choisie.

IV EXEMPLE D'APPLICATION AU SAHEL, CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITES DE RUISSELLEMENT

La cartographie des états de surface du Sahel effectuée dans le cadre du projet FAO sur la connaissance de débits de crue illustre ces propos. Le but est d'estimer le débit du bassin versant à partir de cartographies des états de surface.

4.1 Particularités des processus de ruissellement dans les régions sahéniennes : Choix préalables

Dans les régions sahéniennes et soudano sahéniennes, on peut faire l'hypothèse que le ruissellement est globalement déterminé par la présence à la surface du sol d'une fine couche imperméable dite "croûte de battance" qui apparaît au début de la saison des pluies du fait de l'agressivité du climat. La pluie tombant à la surface du sol ne s'infiltré pas en totalité mais ruisselle, car la capacité d'infiltration est rapidement atteinte. C'est le processus de HORTON.

Ainsi la couche de surface explique à elle seule une grande part de la transformation de la pluie en ruissellement : les "états de surface" apparaissent comme l'élément moteur et déterminant des écoulements [1], [2]. Comme par ailleurs le sol est visible pendant la saison sèche, ces deux "qualités" des couches de surface rendent a priori particulièrement intéressantes les images de télédétection pour la définition des écoulements.

De plus, les essais de simulation de pluie ont permis de définir des "états de surface type" à partir d'éléments de 1m² et de leur contexte immédiat et de leur associer une équation

hydrodynamique. La cellule de base pour caractériser les ruissellements est donc a priori correcte à 1 m². La résolution satellitaire haute résolution propose une vision de taille supérieure (20*20 m ou 30*30 m). A cette échelle (pixel), les écoulements de base sont déjà différents de ce qui est observé au m² : il n'y a plus d'écoulement en nappe car, dans la plupart de cas, des rigoles préférentielles se sont formées. Ce rassemblement en rigoles rend très vite indépendantes les zones élémentaires de production ; étant indépendantes les productions peuvent être alors supposées quasi additives. Dès lors, la production totale d'un pixel est pratiquement égale aux productions définies à l'échelle du m², au prorata de sa surface. Ainsi, le pixel apparaît souvent une bonne échelle de caractérisation de ces états de surface.

Notre choix s'est donc porté sur une modélisation de la **fonction de production locale à l'échelle du pixel**. La transformation des plans primaires issus de la télédétection en plans utiles quantifiés est effectuée sur la base des expérimentations de simulation de pluie.

4.2 Méthode

4.2.1. Simulation de pluie et équations hydrodynamiques

Ces présentations ont déjà été faites, notamment dans [1],[2]. Nous n'en donnerons que les éléments principaux. Chaque état de surface élémentaire est susceptible de présenter une lame ruisselée L_r définie par l'équation hydrodynamique suivante :

$$L_r = a.P + b.P.I_k + c.I_k + d \quad (1)$$

où a, b, c, d sont des coefficients dépendant de l'état de surface

P est la pluie

I_k est l'indice d'humidité de KOHLER, calculé à chaque jour de pluie en fonction de l'indice précédent (I_{k-1}), de la dernière pluie observée (P) et du nombre de jours écoulés (dt) depuis cette dernière pluie. I_k est calculé selon :

$$I_k = (I_{k-1} + P).e^{-x.dt} \quad (2)$$

x est un facteur d'atténuation généralement estimé proche de 0.5

4.2.2. Cartographie des états de surface

La première étape concerne la transformation des images de télédétection en différentes couches expliquant le paysage ; les caractères décrits sont un compromis entre ce qui peut être vu dans les images et ce qui est nécessaire pour les explications du ruissellement. Les points particuliers de cette description sont :

- il faut cartographier la totalité bassin (les zones cultivées mais aussi les zones naturelles, telles que forêts dégradées, savanes ...)
- il faut cartographier les caractères liés aux potentialités de ruissellement.

Nous avons déjà indiqué que la surface du sol est prédominante pour l'explication du ruissellement. C'est pourquoi nous avons choisi une image de saison sèche (période avec une végétation pauvre) pour observer la surface du sol et la végétation permanente. Les caractères suivants ont été choisis:

- V pourcentage de végétation
- C pourcentage de terre cultivée
- S type de sol

Ces critères sont quantitatifs (V and C) et qualitatifs (S). Nous cherchons ici à décoder une superposition de plusieurs couches, utiles pour l'explication du ruissellement. Cette approche est spécifique car elle doit définir chaque caractère indépendamment, et ceci est proche d'une technique sub-pixellaire. Nous avons utilisé une classification supervisée basée sur des observations de terrain, relevées selon des transects de 2000 m en utilisant des carrés élémentaires de 100m*100m. Un repérage précis de position a été facilité par l'utilisation de GPS, appareil très utile dans ces zones sans relief et sans repères au sol. Pour un bassin de 30 km², 5 à 10 transects le long de petites pistes ont été décrits.

Une bonne détermination des caractères a été obtenue en utilisant une seule image, ceci grâce aux nombreux canaux (7) de Landsat TM. L'indice de végétation NDVI (pour le plan végétation) et l'indice de brillance IB (pour les plans des sols et des zones cultivées) ont été les canaux les plus utiles.

4.2.3. Obtention des cartes de ruissellement local

La seconde étape concerne la transformation de ces plans élémentaires en classes d'états de surface et donc en classes de comportement hydrologique.

Les informations de ruissellement sont tirées du *catalogue états de surface élémentaires du Sahel* (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Ce catalogue permet de classer chaque état de surface dans un groupe appelé ESE (Etat de Surface Élémentaire) à partir de quelques éléments descriptifs de la surface. A chaque ESE est associée une équation hydrodynamique (spécifique Eq.1).

Certains des éléments caractéristiques des ESE ne sont pas de nature à être observés sur image. Ainsi nous avons utilisé un autre jeu de données de terrain : sur les transects chaque carré de description (100m*100m) a fait l'objet d'un classement en ESE (ou en composition de ESE). Un lien statistique entre d'une part les données primaires de végétation (V), sol (S), pourcentage de cultures (C) d'autre part ces données d'états de surface ESE a été ensuite établi. Cette correspondance permet de transformer les trois plans de base (V,S,C) en un plan unique donnant les numéros de classes ESE pour chaque pixel. Enfin à chaque numéro de ESE correspond une équation hydrodynamique (1) qui associe à toute pluie P, la valeur de la lame ruisselée Lr.

La carte résultante représente le "ruissellement local (ou potentiel)".

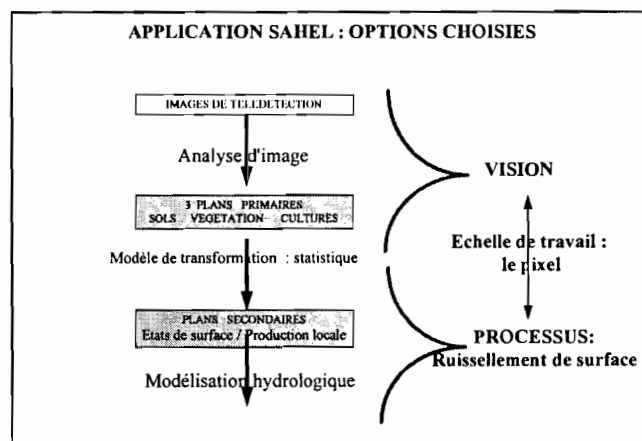


Figure 5 : Options choisies pour l'application Sahel

4.3 Résultats et discussion

Cette méthodologie a été appliquée sur plusieurs bassins versants du Sahel (Sénégal et

Burkina Faso). A partir des productions locales est calculée la production globale sur le bassin, valeur qui peut être comparée aux observations in situ.

4.3.1. Agrégation pour tout le bassin

Le passage du local pour global nous ramène à des problèmes d'échelle. Les clefs de l'interprétation dépendent des processus physiques. Si le ruissellement de surface est généralisé, on a vu que le rassemblement en rigoles impliquait une additivité des productions. La lame ruisselée globale L_r est alors calculée au prorata des surfaces. Ainsi chaque partie du bassin contribue proportionnellement au ruissellement sans tenir compte de sa position dans le bassin. La lame calculée L_r peut être comparée aux observations in situ ($L_{\text{observée}}$) en utilisant le ratio :

$$r = L_{\text{observée}} / L_r \quad (4)$$

r joue comme un facteur d'échelle. Il est proche de 1 si l'additivité est acceptable. En zone sahélienne, r varie en général entre 0.5 and 1, avec une moyenne proche de 0.80.

4.3.2 Résultats comparés

Les résultats obtenus sur le bassin versant de Thyssé Kaymor au Sénégal sont représentatifs d'un premier ensemble de comportements. Dans ce groupe, où la zone cultivée représente près de 75% du bassin, les résultats obtenus sont très cohérents et indiquent une bonne adéquation de la méthode. On donne figure 6 les plans obtenus sur les bassins de Ndiba (16 km²), et de Keur Samba Diama (76 km²). Les images de base sont des LANDSAT TM de 11.1990, les données de terrain ont été relevées à la même saison en 1992. Les rapports observé/calculé sont respectivement de $r=0.47$ and $r=0.90$. Ceci est en accord avec une légère baisse à attendre entre le chiffre de production locale et la valeur globale. Les hypothèses semblent confirmées, tant sur le choix hydrologique que sur la représentativité de la taille de travail, le pixel.

Un deuxième ensemble de bassin est plus problématique. Il s'agit des bassins Soudaniens de NDOROLA au Burkina Faso. Là, certaines des valeurs de r tombent en dessous de 0.05,

ce qui est le signe que l'agrégation n'est plus acceptable [5]. La méthode atteint ses limites. Dans cette zone les cultures n'occupent que 15% à 20% du bassin, sur une zone centrale de type bas-fond. Les zones extérieures sont des plateaux cuirassés et de longs glacis en pente régulière rejoignant les bas-fonds (figure 7). L'analyse que nous avons pu faire de cette zone remet en cause la pertinence de la simulation de pluie pour toute la zone plateau, et en moindre mesure pour les glacis. Pour ces plateaux en particulier, l'eau ruisselée est généralement perdue avant d'arriver à la plaine : le ruissellement global est quasiment nul.

Ainsi, dans cette zone, les hypothèses initiales sont remises en question et toute la chaîne de détermination s'écroule :

1. les processus élémentaires choisis ne sont plus acceptables
2. l'échelle pertinente de détermination hydrologique ne peut plus être ni le m² ni le pixel, mais le plateau tout entier ($Q=0$) : la **maille optimale** a changé de taille.
3. la vision ou détermination à partir d'image de télédétection n'a plus d'intérêt au niveau pixel mais doit définir plateaux, glacis et bas-fond. C'est uniquement dans la zone de bas-fond que l'approche pixel retrouve son intérêt. Les calculs repris en imposant une production nulle sur plateaux et glacis et en ne gardant que la zone bas-fond dans les équations fournissent des résultats globaux cohérents.

En conclusion, dans une même région, dans un même bassin, les processus peuvent être différents selon les zones. L'approche, valable dans un coin, peut être mise en défaut dans l'autre. Ce sont toujours les processus qui dirigeront notre choix final de couplage et hydrologie, et la généralisation est difficile. Pour peu que les processus changent de physionomie, les autres termes du couplage sont mis en défaut.

V CONCLUSION

L'un des écueils de l'utilisation de la télédétection satellitale est de se laisser guider par la résolution de l'image. Il faut en effet opposer taille de la vision (résolution de l'image) et taille du calcul qui doit être guidée

par des considérations physiques sur le phénomène à étudier.

Nous avons développé l'idée que le choix initial de la modélisation doit partir sur des considérations hydrologiques. Une échelle de travail doit être choisie en relation avec des processus cohérents avec cette échelle et avec le contexte. Les données de télédétection doivent s'associer à ce schéma, sur la base d'une vision pixellaire ou agglomérée.

Un exemple d'application au Sahel montre que d'un bassin à l'autre les choix des processus peuvent être remis en question et conduire à une incertitude de la modélisation. Il ressort alors des idées de **résolution optimale de modélisation** en fonction des processus réels et de l'approche modélisatrice, à rapprocher de notions similaires en télédétection. Cette résolution peut être variable d'une zone à l'autre du même bassin versant et conduit, en théorie, à des approches modélisatrices non homogènes.

Bibliographie :

BEVEN K., 1989. Changing ideas in hydrology. The case of physically based models.. Journal of hydrology, 105(1989), p 157-172

CASENAVE ET VALENTIN, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM, collection didactiques . Paris, 226 p

DM2E, 1995; Projet Européen sur érosion et désertification en zone Méditerranéenne. En cours de rédaction. CEMAGREF Aix en Provence.

FAO Calcul des débits de crue en zone sahélienne. (Manuel à paraître).

GROS H., 1995. Test of a distributed hydrological model. Applied on the Cosumes Catchment, California. DEA national hydrologie, USTL Montpellier. 32p

KLEMES K., 1986. Dilettantism in hydrology : transition or destiny ? Water resources research vol 32 No 9 pp 1778 1888

MARCEAU D.J., GRATTON D.J., FOURNIER R.A., FORTIN J.P., 1994. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forest environment : the optimal spatial resolution, RSE, 1994, 49:105-117

MOORE I.D, LOUGHLIN E.M., BURCH G.J., 1988. A contour base topographic model for hydrological and ecological applications. Earth surface processes and landforms, vol 13, 305-320

PLANCHON O., 1991. La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles

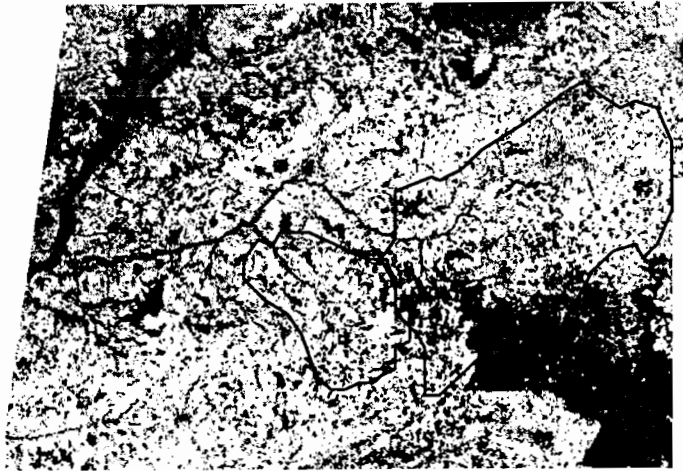
mesures et perspectives de modélisation., in "Utilisation rationnelle de l'eau dans les petits bassins versants en zone aride". AUPELF UREF ED J Libbey Paris pp 59-75

PUECH C., 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble, 215p.

RISONS M, 1995. Modèle de représentation et de dynamique. Application au bassin de la Peyne. Thèse USTL, Montpellier, 200p

SEGUIN B. , D. COURAULT, M. GUERIF, 1994. Surface temperature and evapotranspiration : application of local scales using satellite data. Remote Sensing Environ 49, p 287- 295,

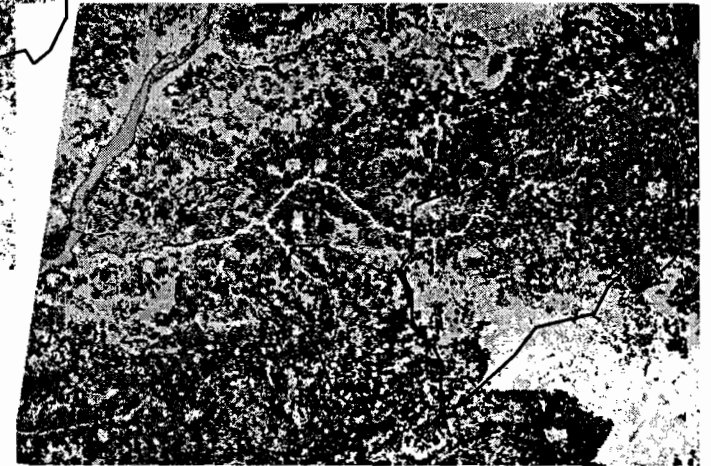
BASSINS DE THYSSE KAYMOR (SENEGAL)



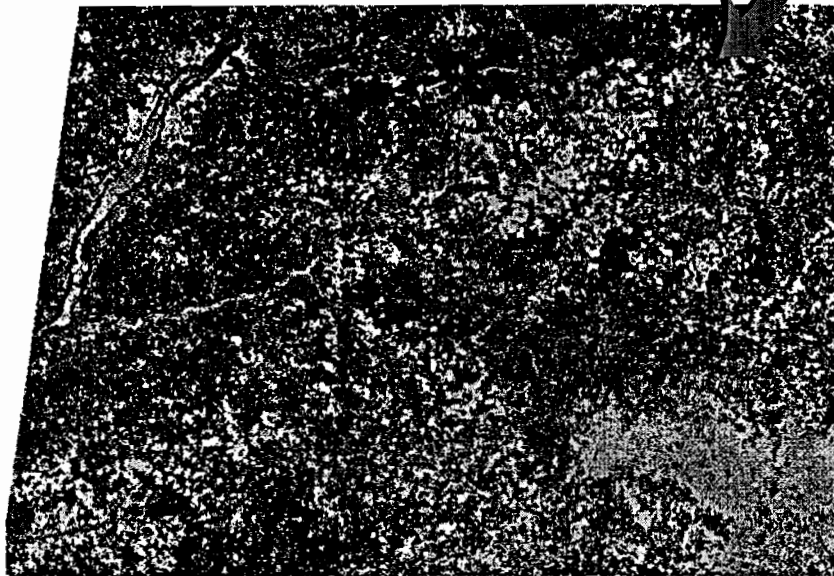
CULTURE / NATURE



SOL



VEGETATION



PLAN ETATS DE SURFACE

5 km

image LANDSAT TM 28.11.1990

- Figure 6 -

AIRES CONTRIBUTIVES :
EXTRACTION DES BAS-FONDS SUR LE BASSIN DE KUO
(BURKINA FASO)
Composition colorée image SPOT XS 47-567, du 09.06.1991



0 1 km

— Limite du bassin versant (59 km²)
— Limite du Bas-fond (25 km²)

- Figure 7 -

Téledétection radar : Perspectives pour la modélisation hydrologique

Radar remote sensing : Prospects for hydrological modeling

Philippe GINESTE

Laboratoire Commun Téledétection CEMAGREF-ENGREF, Montpellier.

Résumé

Face au problème des pollutions d'origine agricole sous nos latitudes tempérées et à la pression démographique des pays moins développés, il devient urgent de proposer des outils d'aide à la décision fiables permettant une gestion rationnelle des eaux et des sols. Deux objectifs concrets bien distincts sont identifiés : prédire le débit à l'exutoire d'un bassin versant et gérer la circulation de l'eau au sein du bassin.

L'analyse proposée suggère qu'en dépit d'une bien meilleure compréhension des processus du ruissellement, les modèles actuels même les plus sophistiqués répondent mal à l'un et l'autre de ces objectifs. Aussi s'attache-t-on à en faire ressortir les causes afin d'esquisser les contributions potentielles de la téledétection, notamment radar, à ces problématiques.

Il apparaît que la téledétection radar présente un intérêt fondamental pour la compréhension de la spatialisation des processus du ruissellement qui doit permettre in fine de proposer une modélisation adaptée aux bassins étudiés. Dans les zones plutôt arides pour lesquelles le mécanisme Hortonien est largement accepté et essentiellement contrôlé par la surface des sols, les perspectives d'utilisation des données satellitales sont naturellement plus prometteuses...

Abstract

The spreading of agricultural pollutions and the demographic pressure upon less developed countries stress the need for reliable soil and water management tools. Two main objectives are : to predict the flow at the outlet of a watershed and to represent the water paths within the watershed.

However, despite great progresses in the understanding of runoff processes, the analysis suggests that even the most sophisticated models badly address the previous objectives. This paper therefore aims to identify the major causes of this discrepancy especially to point out possible contribution of active microwave remote sensing.

Radar eventually appears as a fundamental tool to study the spatialization of hydrological processes. This may finally lead to a modeling approach that is suited to the watershed under investigation. In rather arid areas, where the Hortonian process is generally accepted and is essentially controlled by the soil surface, remote sensing is felt even more promising as the Rainfall - Runoff transformation may be easier to deduce from the watershed topographic and spectral characteristics.

1. Introduction

La télédétection joue indiscutablement un rôle de plus en plus important dans la gestion des ressources naturelles. De plus, le lancement récent et prochain de plates-formes équipées de capteurs travaillant dans le domaine des hyperfréquences (ERS-1, JERS-1, ERS-2, Radarsat, SIR-C...), outre la synergie avec les données optique et infrarouge, va encore renforcer l'opérationnalité des techniques satellitaires car la vision radar traverse les couverts nuageux sans perturbation.

Face au problème particulier des pollutions d'origine agricole sous nos latitudes tempérées et à la pression démographique des pays moins développés, il devient urgent de proposer des outils d'aide à la décision fiables permettant une gestion rationnelle des eaux et des sols. Aussi, de nombreux efforts se concentrent pour tenter d'intégrer les données spatiales de façon pertinente dans une approche de modélisation hydrologique. Or ce domaine, bien qu'il se soit considérablement développé ces deux dernières décennies grâce à une compréhension plus large des processus du ruissellement, soulève « paradoxalement » d'autant plus d'interrogations. Les modèles sont certes capables de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin si l'on dispose au préalable de chroniques hydrologiques suffisantes, mais qu'en est-il des écoulements au sein même du bassin versant ?

C'est pourquoi l'on essaie ici, sur la base d'une analyse des causes des faiblesses des modèles hydrologiques, de dégager les perspectives d'utilisation des données satellitaires les plus prometteuses.

2. Problématique de la modélisation hydrologique

Les modèles hydrologiques sont trop nombreux... Simple boutade certes, mais aussi conclusion première de tout utilisateur potentiel chargé de choisir le modèle le plus adéquat pour sa problématique... En fait, les modèles diffèrent surtout par leur degré de complexité très variable qui s'accompagne en général d'une gourmandise en données souvent alors déterminante dans son choix. Quant aux sorties qu'ils proposent (ou que l'on souhaiterait qu'ils proposent !), l'on peut en toute généralité distinguer deux objectifs concrets bien hiérarchisés : **Prédire le débit** à l'exutoire d'un bassin versant et gérer la **circulation de l'eau au sein d'un bassin** ce qui typiquement relève d'une approche spatialisée.

2.1. Modélisation Pluie-Débit

Jusqu'à ces trente dernières années, on a surtout demandé aux hydrologues de prédire le débit à l'exutoire d'un bassin versant, donc de comprendre la transformation de la pluie en débit. Or, comme on ne sait toujours pas déduire cette relation des caractéristiques géomorphologiques et physiques du bassin (Gresillon, 1994), les approches **globales** se sont d'abord imposées.

L'analyse **statistique** des chroniques hydrologiques est par conséquent encore la technique d'ingénierie de référence pour le dimensionnement d'ouvrage en particulier, bien qu'elle comporte de sévères limitations : chroniques souvent insuffisantes, extrapolation aux épisodes extrêmes par conséquent dangereuse, hypothèse de stationnarité en dépit des influences climatiques et humaines... Il est par exemple bien connu que la réponse d'un bassin dépend de son statut hydrique initial, que la présence de végétation favorise l'infiltration ou qu'au contraire un sol nu limoneux favorise la formation de croûtes de battance ; aussi une même pluie se traduira-t-elle différemment en débit selon qu'elle intervient en pleine saison humide ou à la fin de la saison sèche (Sahel).

Un autre type d'approche considère le bassin versant de façon conceptuelle comme un réservoir d'humidité (ou plusieurs réservoirs virtuellement superposés voire en cascade) avec des lois de vidanges dont certains paramètres doivent être calibrés par rapport au débit observé à l'exutoire du bassin. Malheureusement, les tentatives pour relier ensuite ces paramètres aux caractéristiques spatiales du bassin n'ont semble-t-il

jamais abouti. L'approche permet en revanche d'introduire de façon **empirique** l'influence de l'état hydrique des sols sur la réponse du bassin.

Le développement des autres approches **conceptuelles** semble étroitement lié à la compréhension des mécanismes de formation des débits. Ainsi, la célèbre méthode de l'Hydrogramme Unitaire (Sherman, 1932)* ou encore la plus ancienne « méthode rationnelle » (Kluichling, 1889) s'inscrivent dans un schéma de « **ruissellement de surface généralisé** » (Gresillon, 1994) d'ailleurs hérité de l'hydrologie urbaine où chaque parcelle contribue au débit de la rivière avec un délai de transfert essentiellement fonction de sa distance à l'exutoire. Horton (1933) a donné force à ce concept en proposant une conceptualisation empirique efficace du ruissellement local : excès d'intensité de la pluie par rapport à la capacité d'infiltration des sols** qui elle-même décroît au cours d'une pluie pour atteindre la valeur de la conductivité hydraulique à saturation. Ainsi les diverses « **productions** » locales sont ensuite nécessairement agrégées pour traduire leur **transfert** jusqu'à l'exutoire. Cette conceptualisation se retrouve également lorsque des modèles de production à la parcelle (le plus souvent SCS Curve Number et USLE pour l'érosion) sont introduits dans un Système d'Information Géographique. Elle nécessite théoriquement que les différentes parcelles soient hydrauliquement indépendantes ou au moins que leur contribution relative reste stable quelque soit l'épisode. Or c'est cette même hypothèse qui permettrait de justifier les hypothèses d'invariance et de linéarité de la réponse d'un bassin, fragiles piliers de la technique de l'Hydrogramme Unitaire notamment pour les petits bassins.

Par ailleurs, les hydrologues et forestiers des régions plus humides s'interrogeaient sur la réalité du **mécanisme Hortonien** à cause de l'existence de crues rapides sur des bassins très perméables et de l'observation plutôt rare d'un réel écoulement de surface si ce n'est aux abords des ruisseaux sur des terrains déjà saturés (Fernow, 1902). La technique de séparation isotopique des hydrogrammes (Crouzet et al., 1970) a confirmé ce doute puisqu'un hydrogramme de crue se révèle très souvent composé d'eaux "anciennes", i.e. antérieures à l'événement pluvieux. Divers mécanismes ont été proposés pour tenter d'expliquer ce **ruissellement souterrain rapide** : écoulement de « subsurface » ou hypodermique (Hursh, 1936), écoulement par macropores (Hursh, 1944 ; Beven et Germann, 1982) ou encore écoulement par surélévation de nappe ou écoulement "piston" (Vaidhianathan et Singh, 1942 ; Sklash et Farvolden, 1979). Le concept de « **surfaces saturées contributives d'aire variable** » (Hewlett, 1961 ; Hewlett et Hibbert, 1967) présente l'avantage de concilier des apports souterrains par effet piston et des apports de surface par refus d'infiltration à cause d'un affleurement de la nappe. Extension des « zones contributives » proposé par Cappus (1960), il s'oppose en revanche radicalement à la vision d'un ruissellement généralisé à l'ensemble du bassin. Il connaît toujours un vif succès comme en témoigne l'attrait pour **TOPMODEL** (Beven et Kirby, 1979) et son application fréquente y compris dans les zones tempérées voire méditerranéennes pour lesquelles les conditions d'une réelle surélévation de la nappe phréatique ne sont en général pas satisfaites... En fait, l'extension des zones saturées n'est pas limitée au strict voisinage des ruisseaux. La saturation survient à la surface d'un sol quand sa transmissivité n'est plus suffisante au regard des flux amonts (O'Loughlin, 1981) comme à la faveur d'une épaisseur de sol localement réduite, de convergences topographiques ou encore de nappes temporaires perchées sur un horizon moins perméable. Elle s'accompagne ici et là d'une exfiltration d'eaux plus ou moins souterraines.

La panoplie des concepts du ruissellement s'est donc considérablement accrue ces dernières années ainsi que le **risque** de proposer une modélisation basée sur des processus qui ne sont pas représentatifs du bassin étudié. Typiquement, TOPMODEL simule bien le fonctionnement des petits bassins plutôt humides mais qui n'ont pas une composante souterraine profonde importante car l'hypothèse d'une décroissance rapide (exponentielle) de la conductivité hydraulique des sols avec la profondeur favorise la représentation d'écoulements hypodermiques.

Fort heureusement pour l'hydrologie des régions arides ou semi-arides, le mécanisme Hortonien est largement reconnu comme dominant. Cependant, le concept d'un ruissellement de surface généralisé ou encore les concepts de « production » et de « transfert » s'inscrivent dans un schéma agrégatif discutable. Quand bien même un excès d'infiltration serait produit en tout point, l'eau à la surface des zones les plus

* Sont fournies uniquement les références « historiques »...

** L'infiltration est modélisée par une approche physique depuis Green et Ampt (1911).

éloignées du réseau hydrographique risque fort de se réinfiltrer en chemin peu après la fin de la pluie... d'où l'intérêt a priori d'une approche effectivement spatialisée, c'est-à-dire distribuée.

2.2. Modèles « physiques » distribués

Historiquement, les approches spatialement distribuées ont été développées à des fins de recherche parallèlement aux progrès de l'informatique. Elles utilisent autant que faire se peut les équations de la physique des écoulements et ont surtout été appliquées pour explorer les conséquences de certaines hypothèses dans tel ou tel cadre **théorique** particulier, comme par exemple l'influence de la topographie sur la prédominance d'un certain type d'écoulement (Freeze, 1972).

Cependant plus récemment, ces modèles physiques ont cherché à représenter finement le comportement d'un bassin réel, à supposer que tous les paramètres intervenant puissent être mesurés ce qui ne peut concerner que quelques rares versants expérimentaux. Beaucoup d'espoirs se sont alors portés sur la **capacité prévisionnelle** des modèles distribués, notamment en termes de conséquences de changement d'occupation du sol (Système Hydrologique Européen, Abott et al., 1986). Cet objectif semble depuis peu remis en question pour les raisons suivantes.

Dans la pratique, la discrétisation de l'espace est à la fois limitée par les temps de calcul du modèle et notre capacité à le renseigner. Or, force est de constater la complexité et l'**hétérogénéité du milieu réel**... Comment paramétrer un bassin versant à l'échelle si petite soit-elle des mailles des modèles distribués (de l'ordre de quelques centaines de m²) alors que les techniques de mesures au sol sont essentiellement ponctuelles ? Par ailleurs, les modèles les plus physiques s'appuient sur des équations hydrodynamiques hautement non linéaires (e.g. Richards, 1931) établies de plus à très petite échelle et en milieu homogène. Aussi, rien ne justifie théoriquement que l'on puisse appliquer ces mêmes équations à l'échelle d'une maille élémentaire fortement hétérogène... Ce faisant néanmoins, les paramètres intervenant dans ces équations deviennent effectifs car ils sont alors censés intégrer le changement d'échelle qui s'opère, et ne sont alors plus mesurables comme tout paramètre d'un modèle typiquement conceptuel !

D'autre part, une approche distribuée conduit alors nécessairement à une **inflation de paramètres à calibrer** même si la plupart se révèlent ensuite peu sensibles (40 paramètres retenus sur 2400 pour l'application du SHE au bassin de Wye, Beven, 1989). Pourtant, dès lors que l'on dépasse une poignée de paramètres, l'optimisation a toutes les chances de déboucher sur plusieurs jeux de paramètres qui donneront des résultats identiques du point de vue des performances de la simulation des débits, mais bien des **différences quant aux écoulements internes** (Grayson et al., 1992) ! Il semble donc illusoire d'espérer calibrer une approche finement distribuée sur la seule base de l'évolution temporelle du débit à l'exutoire d'un bassin versant.

Aussi, certains chercheurs, notamment parmi ceux qui ont contribué au développement des modèles distribués, s'inquiètent-ils de l'utilisation qui pourrait en être faite. Leur complexité relative n'est pas un gage de confiance suffisant, ces modèles ne sont dans l'absolu que d'extrêmes simplifications de la réalité... Une construction théorique très fine - impliquant la résolution des équations tridimensionnelles de Richards (Paniconi et Wood, 1993) alors que le SHE lui-même suppose une infiltration verticale - aura par exemple d'autant plus de mal à prendre en compte les circulations préférentielles de l'eau qu'elles ne relèvent pas de l'échelle considérée où elles apparaissent au contraire comme de singulières discontinuités.

Si l'on prend l'exemple a priori plus simple d'un bassin versant contrôlé par le seul processus Hortonien, ce n'est qu'au prix de certaines hypothèses que l'on parvient à décrire les écoulements à partir de l'hydraulique de Barré de St Venant. La géométrie des versants est en effet approchée par une cascade de plans contigus sur lesquels coule suivant la pente une lame d'eau latéralement uniforme, d'où le terme d'écoulement en nappe. Un coefficient empirique, le facteur de friction, relie les variables de vitesse, d'épaisseur de nappe et de débit afin de traduire la résistance du sol à l'écoulement. Ce coefficient variable avec la texture superficielle des sols, la strate herbacée ou encore avec l'intensité de la pluie, dépend

également du nombre de Reynolds et peut par conséquent balayer plus de deux ordres de grandeur le long d'un versant (Dunne, 1979). Le paramètre de friction doit donc théoriquement être calibré localement tout en tenant compte du freinage de la nappe par la pluie elle-même... On imagine déjà sans peine le degré de complexité. Pourtant les hypothèses de départ sont en général fausses : De véritables écoulements en nappes n'ont-ils été observés que sur des versants à la fois lisses et courts. D'une part, l'eau aime par nature converger. A l'instar d'une goutte d'eau bombée sur un plan horizontal, les écoulements se concentrent pour minimiser leur surface de contact avec le sol. D'autre part, la microtopographie et la végétation de certains versants forcent les écoulements à prendre des chemins plus ou moins tortueux. Ainsi, certains chemins privilégiés se forment au fil des crues si bien qu'une épaisseur moyenne de « nappe » de l'ordre de quelques millimètres n'est souvent plus alors qu'une abstraction utile pour estimer le flux agrégé d'un ensemble de petites rigoles se concentrant elles-mêmes jusqu'au ruisseau. L'approche est en revanche assez impuissante en matière d'érosion. En toute rigueur, il faudrait apprécier l'hydraulique des écoulements dans leur dynamique érosive, c'est-à-dire considérer, sinon la « bidimensionalité » du phénomène, le degré de convergence local des écoulements.

2.3. Conclusion sur les modèles

Prédire le débit à l'exutoire d'un bassin n'est guère possible qu'à la condition de disposer de **longues chroniques hydrologiques** (Gresillon, 1994), car toute approche de modélisation nécessite encore la calibration de certains paramètres. De ce point de vue, les approches distribuées ne se différencient pas fondamentalement des approches statistiques, empiriques ou conceptuelles. La **prudence** invite donc à douter de la capacité prévisionnelle des modèles distribués - en termes de conséquences de changement d'occupation des sols notamment - qui souvent pourtant a justifié leur développement.

Quant à l'objectif plus ambitieux d'une représentation interne au bassin des chemins de l'eau, les modèles distribués sont naturellement pressentis. Cependant, cette approche échoue pour l'instant dans la mesure où elle ne parvient pas à s'affranchir du problème de calibration. Au contraire, le nombre de paramètres tend naturellement à s'accroître avec la finesse de résolution du modèle soulignant alors **l'incohérence à vouloir calibrer une approche effectivement distribuée sur l'observation d'une variable globale**. On renonce ce faisant implicitement à l'objectif d'une représentation interne des écoulements pour l'approche de modélisation classique Pluie-Débit.

Posons alors le problème ainsi : Les modèles conceptuels ou distribués présentent-ils une quelconque supériorité sur les approches purement globales ? En d'autres termes, **quel est l'apport de l'information spatialisée qui s'ajoute aux chroniques hydrologiques ?** Cette question est loin d'être innocente dans la mesure où la comparaison des performances des diverses approches de modélisation est rarissime dans la littérature hydrologique (Loague and Freeze, 1985). Quelques intuitions néanmoins...

La plupart des **modèles conceptuels** découlent d'une compréhension particulière des mécanismes du ruissellement donc d'hypothèses qui portent déjà sur la spatialisation des écoulements. Dans la mesure où ces concepts s'appliquent bien au bassin étudié, les modèles conceptuels présentent l'avantage sur les méthodes statistiques d'offrir une base théorique qui puisse guider **l'extrapolation du modèle aux événements extrêmes**. Encore faut-il que les processus dominants soient correctement représentés par le modèle, alors qu'un modèle qui « marche » bien n'apporte aucune garantie à ce sujet.

Dans les régions plutôt arides, le mécanisme Hortonien est largement accepté. En revanche, les modélisations conceptuelles associées s'appuient sur un schéma de ruissellement de surface généralisé à l'ensemble du bassin versant qui ne prend pas en compte les possibilités de réinfiltration.

Dans les régions plus humides, sans renier un possible ruissellement Hortonien sur certains sols dégradés, un consensus s'est établi pour reconnaître la validité du concept de surfaces saturées contributives d'aire variable qui englobe dans une vision dynamique la plupart des autres mécanismes proposés. TOPMODEL, basé sur ce concept, parvient au moyen d'hypothèses supplémentaires à extraire de la topographie d'un

bassin une distribution d'indices traduisant l'aptitude relative du sol à se saturer à cet endroit et sa production relative (approche semi-distribuée). Calé sur le débit à l'exutoire du bassin, le modèle prédit alors l'extension des zones saturées qui lui correspond selon la topographie du bassin, c'est-à-dire selon la seule information fixe fiable dont on puisse disposer couramment. Parce que le modèle n'implique qu'un minimum de paramètres de calibration, l'optimisation n'est pas ambiguë et le modèle propose en sortie une information spatialisée qui nous **renseigne approximativement sur les chemins de l'eau, i.e. sur les lieux où la pluie s'infiltré ou ruisselle** directement sur des surfaces saturées par l'exfiltration d'eaux plus ou moins souterraines. A condition une fois encore que la nature des écoulements pour le bassin étudié soit suffisamment connue au préalable pour préjuger de l'application du modèle...

Quant aux **approches distribuées**, elles n'ont sans doute pas atteint un stade de maturité suffisant pour se démarquer franchement des approches conceptuelles. Y parviendront-elles ? L'essentiel de l'**information supplémentaire** qu'acquière les modèles distribués, l'occupation du sol notamment, ne peut guère s'exprimer en termes de pouvoir prédictif car cette information se **dilue dans la prolifération des paramètres de calibration**, d'ailleurs surtout à cause de la démarche « aveugle » adoptée pour l'optimisation de ces paramètres. Peut-on alors s'affranchir de toute calibration, est-ce un objectif réaliste ? Probablement pas à cause de la complexité du milieu réel. En fait, l'espoir majeur des approches distribuées qui ressort de cette analyse consisterait à calibrer ces modèles sur la base d'une variable spatialisée, comme l'humidité superficielle des sols. Cette calibration spatiale, parce qu'elle s'attacherait à représenter les écoulements internes au bassin, permettrait de réconcilier les approches spatialisées avec leur objectif initial...

3. Contribution potentielle de la télédétection à la modélisation hydrologique

La télédétection permet d'accéder couramment à certaines caractéristiques d'un bassin versant qui participent plus ou moins de sa réponse hydrologique : plans d'eau, indices de couverture végétale, brillance et types de sols, ou encore topographie d'un bassin issue d'images stéréoscopiques. En revanche, des paramètres hydrologiques essentiels comme l'**humidité des sols** ou l'évapotranspiration ne pouvaient être déduits qu'assez indirectement des variations de la « température de surface » télédéteectée dans l'infrarouge thermique avant le développement plus récent des hyperfréquences. La technologie radar en particulier, qui consiste à mesurer le signal réfléchi par la surface terrestre en réponse à une impulsion micro-onde, présente une résolution spatiale voisine des caractéristiques SPOT ou Landsat. Aussi, cette technique permet d'obtenir par tout temps et à une échelle voisine des mailles des modèles distribués une mesure directe « moyenne » des propriétés diélectriques du milieu, elles-mêmes fortement liées à la présence d'eau de par sa constante diélectrique particulièrement élevée.

Après un bref état de l'art en matière d'estimation de l'humidité des sols, on sera mieux à même de raisonner les objectifs majeurs de la télédétection radar en hydrologie. On propose ensuite d'approfondir la réflexion en examinant successivement son application à la modélisation hydrologique des zones humides et « Hortoniennes ».

3.1. Télédétection radar et humidité des sols

Un satellite radar est essentiellement sensible à l'humidité volumique d'un couvert végétal, à l'humidité dans les premiers centimètres du sol et à leur rugosité, c'est-à-dire le micro-relief (Ulaby et al., 1986). Il dépend également des caractéristiques du capteur (fréquence, polarisation) et de l'angle de visée par rapport à la cible, donc également de la topographie du bassin. Aussi, selon les paramètres recherchés comme par exemple l'estimation de la biomasse, telle ou telle configuration est mieux adaptée.

Concernant l'humidité des sols, un couvert végétal suffisamment épars est un préalable. Il apparaît ensuite qu'aucune **cartographie** valable de l'humidité n'a pu être obtenue à partir d'un capteur radar simplement

configuré (Gineste et al., 1995). En effet, on a d'abord cherché à relier de façon empirique le signal radar aux humidités mesurées au sol. Cependant, cette approche de calibration est très limitée dans l'espace de par l'ampleur des données terrain à collecter lors des passages du satellite notamment à cause du caractère ponctuel des mesures d'humidité dans un contexte de forte hétérogénéité spatiale. Aussi les résultats sont-ils peu nombreux par rapport à l'ampleur des informations télédéteectées, de plus pour le moins mitigés. Alternativement, le développement récent des modèles électromagnétiques (Fung et al., 1992) semble prometteur bien qu'il soit logiquement très difficile de séparer la composante rugosité du sol de celle de l'humidité dans le cas d'une source d'information unique. Des mesures de rugosité au sol sont nécessaires mais ne peuvent être conduites à l'échelle d'un bassin versant. De plus, on peut se demander si une mesure locale est bien représentative de la rugosité effective perçue par le satellite. Enfin, le signal rétrodiffusé devient très sensible aux faibles valeurs de rugosité si bien qu'une légère erreur induirait de fortes variations sur l'estimation de l'humidité.

Dans ce contexte, la recherche s'oriente vers les **sources radar multiples** (plusieurs polarisations, fréquences variables, angle d'incidence variable...) afin d'estimer conjointement **l'humidité superficielle des sols et leur rugosité effective**. Cependant, les résultats de validation sont encore peu nombreux pour apprécier l'opérationalité des techniques d'inversion (Dubois et Van Zyl, 1995). Les modèles utilisés bien qu'ils ne s'appliquent théoriquement qu'à des sols nus sont déjà trop complexes pour permettre une résolution explicite, mais permettent en revanche l'apprentissage d'un réseau de neurones artificiel chargé ensuite de l'inversion (Dawson et al., 1993). Notre expérience suggère néanmoins qu'une approche multi-temporelle peut compenser dans une certaine mesure la pauvreté d'une seule source d'information si l'on introduit l'hypothèse d'une rugosité constante sur une période donnée. Il semble en outre possible de détecter des changements de rugosité survenant à l'occasion d'un travail du sol. Aussi, pourrait-on s'inspirer de la méthodologie d'inversion proposée pour les multi-capteurs et l'adapter au cas d'un suivi multi-temporel mono-source en introduisant là où c'est probable l'hypothèse d'une rugosité constante.

Enfin, un cas d'humidité particulier concerne les zones saturées. Une des applications opérationnelle de la technologie radar concerne le suivi des inondations grâce à une décroissance marquée du signal que l'on explique par la réflexion spéculaire de l'onde à la surface de l'eau. Aussi un critère de seuillage aux faibles intensités radar a été proposé pour suivre l'extension des zones saturées (Brun et al., 1990). Ce schéma de détection ne semble pourtant **pas opérationnel à l'échelle des petits bassins** où la saturation n'implique pas nécessairement une forte présence d'eau libre à la surface des sols. Subsiste aussi une certaine ambiguïté au niveau de l'interprétation d'un signal faible : saturation ou très sec au contraire ? De plus, le seuillage proposé ne prend pas en compte l'influence de l'occupation des sols sur le signal, qu'elle soit directe (couvert végétal) ou indirecte (rugosités particulières à certaines cultures). Ce point souligne en tout cas que la forme de la dépendance du signal à l'humidité est encore mal connue.

3.2. Objectifs de l'utilisation de la télédétection radar en hydrologie

Cartographier l'humidité superficielle des sols sous couvert suffisamment épars est l'objectif majeur du radar qui semble d'ailleurs pouvoir aboutir à l'horizon 2000 grâce au développement des capteurs multi-configurés et des modèles électromagnétiques. Cette information intéresse bon nombre d'applications agro-climatologiques de par le rôle privilégié de l'humidité superficielle des sols à l'interface du complexe Sol-Végétation-Atmosphère. En hydrologie s'ouvre la voie d'une **mesure spatiale** d'une variable d'état du système à une échelle compatible avec celle des modèles distribués. De plus, cette mesure d'humidité risque de s'accompagner d'une estimation de la rugosité des sols.

Après avoir vérifié comment ces « humidités radar » se comportent vis-à-vis des mesures ponctuelles et des moyennes spatiales de ces mesures, l'on serait certes tenté d'essayer d'intégrer ces nouvelles données dans une approche de modélisation. Une étape préliminaire importante consiste pourtant à reconnaître la complexité de la genèse des crues en général : diversité des processus, sources variables dans le temps et l'espace, mélange d'eaux plus ou moins souterraines et écoulements de surface... Aussi, un premier objectif est de comprendre à présent la **spatialisation des processus du ruissellement**.

Cette compréhension passe par l'observation dans l'espace et dans le temps de l'humidité superficielle des sols. Le bassin se prête-t-il bien à un zonage en unités relativement homogènes du point de vue de l'humidité ou de leur dynamique ? Peut-on relier l'observation de différentes dynamiques de drainage superficiel des sols aux caractéristiques morpho-pédologiques du bassin, ou encore à la présence de chemins préférentiels naturels (fissures, macropores...) ou artificiels (drains, fossés...) ? L'approche consiste donc essentiellement à caractériser **l'échelle et le fonctionnement d'unités hydrologiques homogènes**, comme le sont les **zones saturées**. Siège de processus géochimiques particuliers comme la dénitrification, ces zones saturées sont également les limites naturelles de divers processus hydrologiques : infiltration, rétention de surface, exfiltration, ruissellement de surface...

Remarquons à présent que si le concept de zones contributives s'applique également aux bassins contrôlés par un ruissellement Hortonien, et que l'on peut formuler l'**hypothèse d'une plus grande persistance de l'humidité superficielle pour les zones d'écoulement privilégiées**, la spatialisation de l'humidité concerne néanmoins au premier chef les régions humides pour lesquelles la spatialisation des processus dépend fortement de la distribution de l'humidité des sols.

En revanche, l'estimation de la rugosité des sols intéresse davantage les zones plus arides (ruissellement Hortonien) pour lesquelles les conditions du **transfert des écoulements de surface** sont primordiales. De plus, d'autres informations sur la végétation et les sols qui la supporte sont contenues dans le signal radar. La **texture** des sols influence en principe la réponse du signal à l'humidité car la présence d'éléments fins argileux par le lien exercé sur les molécules d'eau gêne leur alignement en réponse à un champ électromagnétique (Schmugge, 1983). C'est pourquoi le plan primaire du coefficient de rétrodiffusion radar peut être conservé tel quel par ailleurs, tout comme certains produits interférométriques comme la **cohérence de phase**, très sensible aux modifications du micro-relief survenant entre l'acquisition d'un couple d'images (Wegmüller et Werner, 1995).

Aussi, la différence de comportement des bassins selon leur zone climatique se retrouve au niveau des objectifs d'application de la télédétection à ces zones et des paramètres recherchés. Dans les deux cas néanmoins, qu'il s'agisse de zones saturées ou de zones d'érosion, la nature spatialisée des mesures télédéteectées est une clé pour l'étude de la spatialisation des processus du ruissellement.

3.3. Application des « humidités radar » à la modélisation (zones humides)

Les humidités radar pourront en principe servir à la **confrontation** avec les prévisions de modèles (distribués) qui incluent cette variable en sortie, à l'**initialisation** de modèles événementiels qui simule le fonctionnement d'un bassin à l'échelle de l'orage ou encore pour **ajuster** ceux qui en revanche modélisent l'évapotranspiration lors des phases de ressuyages, voire enfin à la **calibration spatiale** de modèles spatiaux (distribué et conceptuel non global)... Cependant, une réelle assimilation des humidités radar par les modèles se décline selon le type de modélisation envisagée.

Les **approches empiriques globales** apparaissent comme une solution pragmatique pour prendre en compte l'effet de l'humidité du bassin sur sa réponse hydrologique (Loumagne et al., 1991). Ce travail engagé dans le cadre de plusieurs thèses doit contribuer à l'amélioration de la prévision des débits d'une famille de modèles développés au CEMAGREF qu'il s'agit alors d'adapter pour permettre l'intégration des données télédéteectées. Seule une indication sur l'humidité moyenne du bassin est nécessaire; aussi un simple suivi temporel du signal radar moyenné sur l'ensemble du bassin versant semble suffisant. Une amélioration sensible est probable alors que la conceptualisation est très peu physique.

Les modèles **conceptuels** les plus souvent pertinents en région humide s'inspirent de la structure de TOPMODEL. En général, ils ne proposent pas une cartographie de l'humidité superficielle des sols mais celle des zones saturées. Si l'on peut en suivre l'extension par télédétection, on peut alors envisager de modifier le modèle pour une meilleure adéquation avec l'observation. TOPMODEL propose une information spatialisée sur un schéma conceptuel très simple qui ne dépend que d'un indice de saturation

local (approche semi-distribuée). Dédit de simples considérations de drainage, il dépend à son tour de la topographie (pente et surface contributive amont) et de la transmissivité du sol. Cette transmissivité est souvent omise, c'est-à-dire qu'on la considère uniforme par nécessité. Aussi serait-il intéressant d'essayer de la calibrer en la confrontant à une couche d'indices empiriques qui satisfasse les observations, à supposer que cette dernière veuille relativement bien se stabiliser.

Les modèles **distribués** enfin, sont semble-t-il dans une impasse. A moins qu'une calibration spatiale soit possible. Néanmoins si l'on s'interroge a priori sur la faisabilité de la calibration concernant la simple approche précédente, le problème est ici beaucoup plus complexe... Oevelen et al. (1995) proposent une solution **stochastique** pour une intégration des mesures spatiales d'humidité qui tienne compte de la variabilité spatiale. Mais, ce n'est peut-être qu'à partir de l'observation du fonctionnement d'unités hydrologiques homogènes que pourra se dessiner une nouvelle approche de modélisation plus empirique mais néanmoins spatialisée puisqu'elle tendrait à discrétiser l'espace selon l'organisation spatiale des processus du ruissellement...

3.4. Application de la télédétection à la modélisation des zones « Hortoniennes »

La réponse d'un bassin versant Sahélien par exemple (ruissellement Hortonien) n'est pas très sensible à l'humidité initiale car les sols n'en ont pas une réserve importante, et non pas parce que cette variable n'apparaît pas dans le modèle Hortonien de l'infiltration. Smith et Parlange (1978), partant des équations de Richards, obtiennent une formulation analytique de la capacité d'infiltration qui n'implique que deux paramètres que l'on peut soit calculer à partir des propriétés du sol, soit calibrer par des mesures d'infiltration. Cette formulation permet ainsi d'introduire simplement l'effet de l'humidité des sols dans une approche distribuée. Aussi, si l'on ajoute le facteur de friction, **trois paramètres spatialisés** semblent suffire pour décrire le ruissellement « Hortonien » auquel s'ajoute bien entendu la topographie. Certes un peu simpliste (degré de convergence des écoulements ?), cette présentation souligne cependant le moindre degré de complexité lorsque les processus sont essentiellement contrôlés par la surface des sols. Peut-on alors télédétecter ces paramètres ?

Les travaux de Puech (1993) sur la **cartographie des « états de surface »** à partir de la télédétection illustrent bien le passage des informations de télédétection aux informations utiles à la modélisation. Un simulateur de pluie permet de caler les paramètres d'un modèle empirique de production de ruissellement mis au point vers 1970 par l'ORSTOM. Les paramètres de ce modèle sont donc a priori connus pour chaque type d'états de surface présenté dans le catalogue de Casenave et Valentin (1989). La télédétection sert alors à identifier les différents types d'états de surface présents sur le bassin, en extrapolant spatialement les états de surface reconnus au sol sur une zone d'apprentissage. Les productions correspondantes sont ensuite agrégées sur l'ensemble du bassin versant. Les résultats obtenus pour deux des trois bassins étudiés marquent un premier pas notable vers **la prédétermination des débits de crue des bassins non jaugés**. Ils sont d'autant plus encourageants que l'apport potentiel des produits de la télédétection radar (rugosité, cohérence de phase...) susceptible d'améliorer la caractérisation des états de surface n'était pas considéré.

Aussi, ce type d'approche qui en définitive utilise la **possibilité en télédétection d'extrapoler une mesure locale** est tout à fait applicable à la recherche des paramètres précédents. Deux variantes sont néanmoins possibles : l'**approche « pixel »** (illustrée précédemment) et l'**approche par zones homogènes**. Cette dernière consiste en revanche à découper l'espace en fonction de critères d'homogénéité portant sur les réponses des divers canaux du spectre électromagnétique. C'est en fait un moyen de tenter d'esquisser une nouvelle typologie des états de surface pour le bassin considéré. Reste cependant à vérifier comment les mesures locales portant sur une zone identifiée comme homogène du point de vue de la vision satellitale conservent ou non une certaine homogénéité du point de vue des paramètres hydrologiques recherchés.

Cependant, il convient d'adopter une certaine réserve vis-à-vis des **difficultés de mise en application** de telles méthodologies. Le traitement de la production locale de ruissellement est trop sophistiqué par rapport

au traitement du transfert. Aussi est-on naturellement conduit à complexifier encore ce dernier en envisageant la modélisation « physique » des écoulements de surface... Sans doute est-ce alors un peu tôt dans la mesure où la télédétection radar, en nous renseignant sur la localisation des zones érosives, peut d'abord contribuer à préciser la part des écoulements en nappe ou en rigoles et le lieu des transitions pour le bassin étudié. On imagine en effet aisément qu'une transition rapide en rigole diminue les chances de réinfiltration en chemin, donc favorise l'hypothèse d'agrégativité des productions.

Enfin, selon Puech (1993), on peut mettre en relation la présence de sols cultivés sur le bassin avec la qualité des résultats car le bassin essentiellement non cultivé ruisselle beaucoup moins que prévu. Aussi, une dernière approche, mais également la première à envisager, consisterait à relancer **des études statistiques régionales incluant les données de la télédétection**.

4. Conclusion générale

En dépit d'une bien meilleure connaissance des processus du ruissellement, la spatialisation des écoulements internes à un bassin reste très mal connue et par conséquent très mal modélisée. Parallèlement la télédétection radar progresse vers la cartographie de l'humidité superficielle des sols et de leur rugosité. Elle présente en outre un fort potentiel de détection des zones saturées et des zones d'érosion. Un suivi spatio-temporel de ces zones particulières apparaît alors comme fondamental pour caractériser les processus dominants d'un bassin versant.

Or, le risque majeur en modélisation spatialisée provient de l'utilisation de modèles qui ne sont pas représentatifs des processus dominants du bassin versant étudié. Aussi, la télédétection radar peut d'abord servir à caractériser un bassin afin de choisir la modélisation la plus adaptée. Une réelle assimilation des données télédéteectées par les modèles est beaucoup plus complexe et nécessite en principe d'adapter la structure des modèles existants. Une approche pragmatique consiste à l'envisager dans un premier temps à un niveau global. Les modèles empiriques permettent en effet de traduire simplement l'influence d'un facteur dominant sur la réponse du bassin : humidité initiale des bassins plutôt humides, ou encore rôle de la croissance végétale sur la diminution des écoulements de crue au Sahel en particulier. Au niveau d'une approche spatialisée, les « humidités radar » offrent des perspectives intéressantes de calibration spatiale et la télédétection permet en général d'extrapoler une paramétrisation locale des « états de surface » obtenue par des mesures au sol. Cependant, la complexité des approches spatialisées ne semble pas forcément rentable dans l'immédiat. La nature est de toute façon bien plus complexe encore. Aussi, de nouvelles approches de modélisation émergeront peut-être des observations satellitales.

Face à cette complexité, mieux vaut garder les idées simples et ne pas perdre de vue les objectifs des modèles. Quelle utilisation va en être faite ? Dans la mesure où les modèles sont calibrés, l'utilisation relève en principe de l'extrapolation temporelle. Or dans le contexte général - et plus particulièrement africain - d'un manque de chroniques hydrologiques, c'est plutôt une extrapolation spatiale à des bassins non jaugés qui paraît la plus intéressante.

Le Sahel est une région qui se prête très bien à ce type d'étude. Les ruissellements de surface y sont d'une part prépondérants ; aussi on ne risque pas d'extrapoler les connaissances acquises sur certains bassins à ceux qui ne seraient pas régis par les mêmes processus. D'autre part, ce ruissellement est essentiellement contrôlé par la surface des sols ; aussi les « états de surface » sont-ils très caractéristiques de la réponse du bassin. En outre, la surface des sols est particulièrement visible en fin de saison sèche. A contrario, les bassins des régions humides, parce qu'ils sont le siège d'écoulements essentiellement souterrains, n'offrent guère de paramètres de surface télédéteectables susceptibles de bien caractériser leur fonctionnement. En conséquence, le Sahel apparaît comme un **laboratoire naturel privilégié pour l'étude du couplage Hydrologie-Télédétection** susceptible de décoincer la pratique hydrologique d'ajustement de données maintes fois critiquée par ailleurs (Klemes, 1986).

Remerciements : à J.M. Grésillon pour son éclairante synthèse sur la modélisation Pluie-Débit.

Références bibliographiques

Abott ,M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connel, and J. Rasmussen, An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, « SHE », 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system, *J. Hydrol.*, 87, 45-59, 1986.

Beven, K., Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models, *J. Hydrol.*, 105, 157-172, 1989.

Beven, K., and P. Germann, Macropores and water flow in soils, *Water Resources Research* 18 (5), 1311-1325, 1982.

Beven, K., and M.J. Kirkby, A physically-based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrology Science Bull* (24), 27-53, 1979.

Brun, C., R. Bernard, D. Vidal-Madjar, C. Gascuel-Oudou, P. Mérot, J. Duchesne, and H. Nicolas, Mapping saturated areas with a helicopter-borne C band scatterometer, *Water Resour. Res.*, 26(5), 945-955, 1990.

Cappus, P., Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits, *La Houille Blanche* 493-518, 1960.

Cazenave, A. et C. Valentin, Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM, collection didactiques, Paris, 226 p., 1989.

Crouzet, E., P. Hubert, P. Olive, E. Siwertz, et A. Marcé, Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement, *Journal of Hydrology* (104), 301-310, 1970.

Dawson, M. S. , A. K. Fung, and M. T. Manry, Surface parameter retrieval using fast learning neural network, *Remote Sensing Reviews*, vol.7, pp. 1-18, 1993.

Dubois, P.C. and J. Van Zyl, Measuring soil moisture with active microwave : validation of two algorithms, Symposium International « Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres », Toulouse, France, 10-13 octobre 1995.

Dunne, T., Field studies of hillslope flow processes, *Hillslope Hydrology*, Kirkby M. J. (ed.), Wiley, Chichester, U.K., 1979.

Fernow, B.E., Forest influences, U.S. Dep. Agric., Washington, D.C., U.S. For. Serv., Bull. No 7, 1902.

Freeze, R.A., Role of subsurface flow in generating surface runoff. 2.Upstream source areas, *Water Resour. Res.* 8(5), 929-941, 1972.

Fung, A.K., Z. Li, and K.S. Chen, Backscattering from a randomly rough dielectric surface, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 356-369, 1992.

Gineste, P., P. Merot, and C. Puech, A spatio-temporal analysis of ERS-1 SAR data over a small agricultural watershed, to be submitted to *Int.J. Remote Sens.*, 1995.

Grayson, R.B., I.D. Moore, and T.A. McMahon, Physically Based Hydrologic Modeling, 1. A terrain-based model for investigative purposes, *Water Resour. Res.*, 28(10), 2639-2658, 1992.

Green, W.H., and G. A. Ampt, Studies on soil physics, 1, The flow of air and water through soils, *J. Agr. Sci.*, 4, 1-24, 1911.

- Gresillon, J.M., Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales à différentes échelles, Document présenté pour obtenir le Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Janvier 1994.
- Hewlett, J. D., Watershed management. In: Report for 1961 Southeastern Forest Experiment Station, U.S. For. Serv., Asheville, N.C., 1961.
- Horton R. E., The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Trans. Am. Geophys. Union* 14, 446-460, 1933.
- Hursh C. R., Storm water and adsorption, Report of the Committee on Absorption and Transpiration, *Trans. Am. Geophys. Union* 17, 301-302, 1936.
- Hursh C. R., Report of the sub committee on subsurface flow, *Trans. Am. Geophys. Union*, 25, 743-746, 1944.
- Klemes, V., Dilettantism in hydrology : Transition or Destiny ?, *Water Resour. Res.*, 22(9), 177s-188s, 1986.
- Kuichling, E., The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts, *Trans. of the American Society of Civil Engineers* 20, 37-40, 1889.
- Loague, K.M., and R.A. Freeze, A comparison of Rainfall-Runoff Modeling techniques on small upland catchments, *Water Resour. Res.*, 21(2), 229-248, 1985.
- Loumagne C., C. Michel, et M. Normand, Etat hydrique du sol et prévision des débits, *J. Hydrol.*, 123, 1-17, 1991.
- O'Loughlin, E. M., Saturated regions in catchments and their relation to soil and topographic properties, *J. Hydrol.*, 53, 229-246, 1981.
- Paniconi, C., and E.F. Wood, A detailed model for simulation of catchment scale subsurface hydrologic processes, *Water Resour. Res.*, 29(6), 1601-1620, 1993.
- Puech, C., Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble, 215 p., 1993.
- Richards, L. A., Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1, 318-333, 1931.
- Schmugge, T. J., Remote sensing of soil moisture : Recent advances, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* GE-21 (3), 336-344, 1983.
- Sherman, L.K., Streamflow from rainfall by unit-graph method, *Engineering News Record* 108, 501-505, 1932.
- Smith, R. E., and J.-Y. Parlange, A parameter-efficient hydrologic infiltration model, *Water Resour. Res.*, 14 (3), 533-538, 1978.
- Sklash, M. G., and R. N. Farvolden, the role of groundwater in storm runoff, *J. Hydrol.*, 43, 45-65, 1979.
- Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing : Active and Passive*, Artec House, Dedham, MA, 1986.
- Vaidhianathan, V.I., and C. Singh, A new phenomenon in the movement of the free water-level in a soil and its bearing on the measurement of the water table, *Proc. Ind. Acad. sci.*, 15, 264-280, 1942.
- Van Oevelen, P. J., D.H. Hoekman, M.L. Kavvas, E.T. Engman, and A. Hsu, Evaluation of soil Moisture Estimates by means of microwave remote sensing using deterministic and stochastic hydrological models, Symposium International « Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres », Toulouse, France, 10-13 octobre 1995.
- Wegmüller, U., and C. L. Werner, Farmland monitoring with SAR interferometry, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 544-546, Firenze, Italy, 10-14 July 1995.

Modélisation hydrologique de petits bassins ruraux sahéliens : Apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la détermination des paramètres.

A. NONGUIERMA⁽¹⁾ et S. DAUTREBANDE⁽²⁾

Résumé

Dans la région sahélienne, en Afrique subsaharienne, le ruissellement de surface est pratiquement la seule forme d'écoulement observée sur les bassins. Son importance dépend en partie de l'aptitude au ruissellement du bassin.

Dans cette étude, le paramètre numérique de ruissellement (CN, de la méthode SCS) est associé à un modèle paramétrique pluie - débit (modèle SWRRB), conduisant à l'estimation de volumes de crue journaliers au niveau de quelques bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi au Burkina Faso). L'utilisation conjointe de la télédétection et des systèmes d'information géographique élargit l'horizon de la recherche en permettant la détermination synthétique du potentiel de ruissellement. La démarche est significative et conduit à une modélisation satisfaisante des écoulements.

Mots-clés :

Sahel

Oursi

Bassins versants

Ruissellement

Modélisation hydrologique

Télédétection

Système d'information géographique

(1) Centre Régional AGRHYMET
BP 11011 Niamey (Niger)
Tél. : (227) - 73.31.16
Fax. : (227) - 73.24.35
Internet : agrhymet@his.com

(2) Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux
Passage des Déportés, 2
B-5030 Gembloux (Belgique)
Tél. : (32) - 81 - 62.21.87
Fax. : (32) - 81 - 62.21.81
Internet : dautrebande@fsagx.ac.be

INTRODUCTION

Dans la région sahéenne, le ruissellement de surface est pratiquement la seule forme d'écoulement observée sur les bassins. Son importance dépend en partie de l'aptitude au ruissellement du bassin.

L'objectif de cette étude est d'appréhender les principaux paramètres hydrodynamiques agissant sur le processus pluie-écoulement de surface dans le contexte de petits bassins ruraux sahéens.

Nous avons orienté l'étude vers un modèle paramétrique pluie-débit, qui demande la détermination d'un potentiel de ruissellement, conduisant à un premier niveau, à l'estimation des valeurs de volumes d'écoulement de crue au niveau des bassins versants étudiés. Le modèle est d'abord ajusté et validé sur six bassins versants au Nord du Burkina Faso et ensuite utilisé pour simuler des situations particulières (prédiction de la crue de récurrence décennale).

L'utilisation de la télédétection élargit l'intérêt de l'étude en permettant, d'une part, d'obtenir les informations sur le potentiel de ruissellement, paramètre hydrologique de base pour la simulation de l'écoulement superficiel, d'autre part, de tester la sensibilité du modèle à toute modification spatiale ou temporelle des différentes caractéristiques du bassin versant concerné.

CADRE DE L'ETUDE

Les six bassins étudiés font partie du grand bassin dit de la Mare d'Oursi. Celui-ci est situé au nord du Burkina Faso, en zone climatique sahéenne. Il s'étend entre 14°33' et 14°41' Nord et entre 0°26' et 0°40' Ouest (fig.1). Le paysage du bassin de la Mare d'Oursi est très complexe malgré une relative homogénéité d'ensemble. Sous l'angle des caractéristiques hydrodynamiques, on y distingue (Chevallier et al., 1985) quatre grandes familles de paysages :

- (i) Le système dunaire, correspondant à un erg ancien fixé, plus ou moins pédogénéisé avec des sols bruns-rouges subarides sur sables éoliens, ou des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés.
- (ii) Les talwegs et les dépressions, constitués par les marigots et la mare elle-même.
- (iii) Les buttes et les reliefs provenant de sources variées : roches basiques, roches granitiques, paléosurfaces cuirassées puis disséquées.
- (iv) Les grandes zones de glacis qui sont des paysages à surface relativement plane et de faible pente, liées soit à des cuirasses ferrugineuses, soit à des affleurements rocheux.

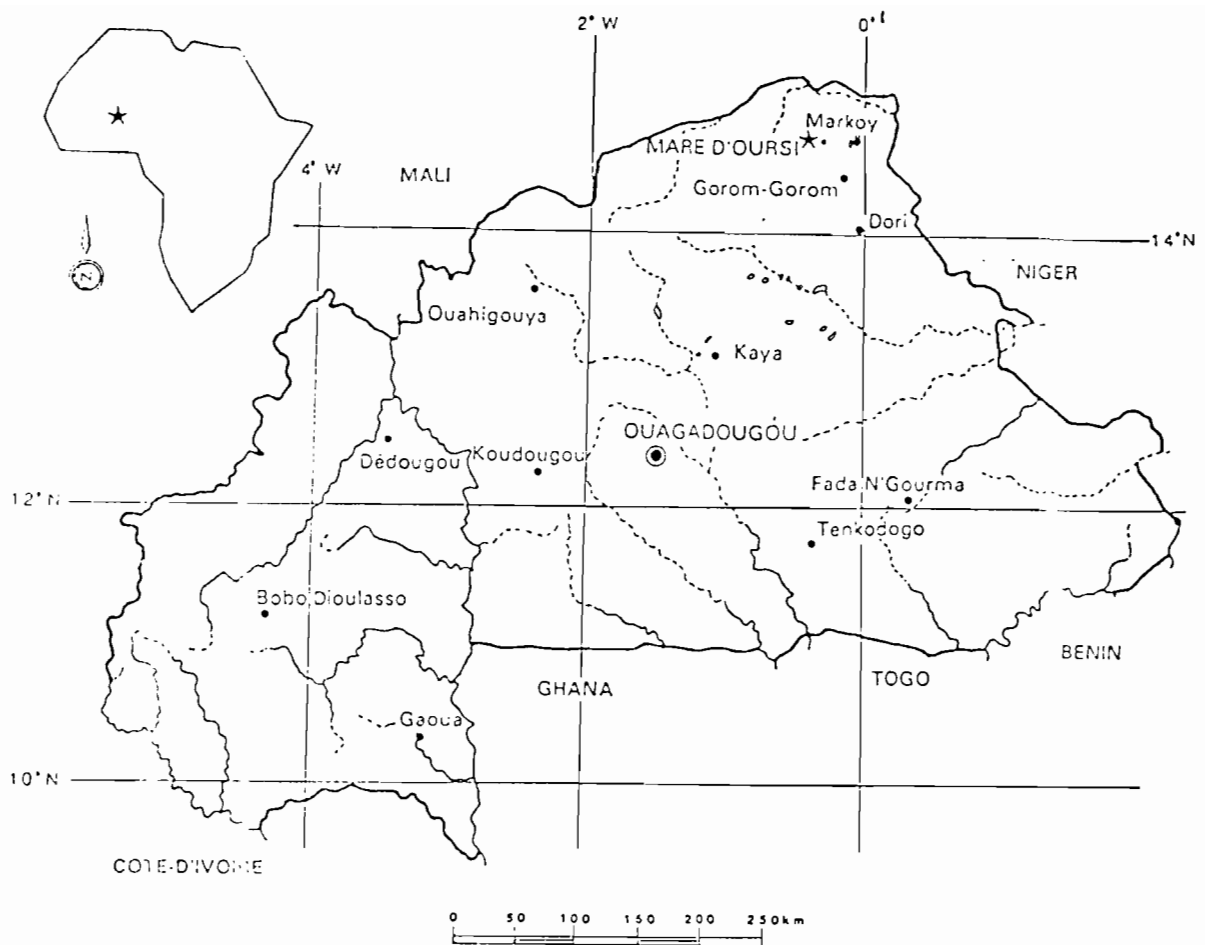


Fig. 1 : Carte de situation de la zone d'étude

Le climat de la région est de type sahélien sec, caractérisée par des températures moyennes élevées avec de fortes amplitudes, des valeurs moyennes mensuelles très fortes de l'évapotranspiration potentielle (plus de 2500 mm par an, méthode Penman), un régime de précipitation caractérisé par une saison de pluie unique de moins de quatre mois, des averses de courtes durées (les corps d'averses durent rarement plus de 30 minutes) et généralement de forte intensité et une pluviosité faible (465 mm par an en moyenne).

Au niveau de l'écoulement de surface, les observations montrent qu'il se produit entre quinze à vingt crues par année. L'essentiel de l'écoulement provient du ruissellement consécutif à une ou plusieurs averses. Sur l'ensemble des bassins de la mare, il n'y a ni écoulement de base, ni même écoulement hypodermique (Ribstein, 1990). Les coefficients d'écoulement sont très variables d'un bassin à l'autre, mais restent en moyenne très faibles. Sur la figure 2, nous avons reporté un exemple de valeurs des couples [pluies journalières , lames ruisselées] observées sur les bassins.

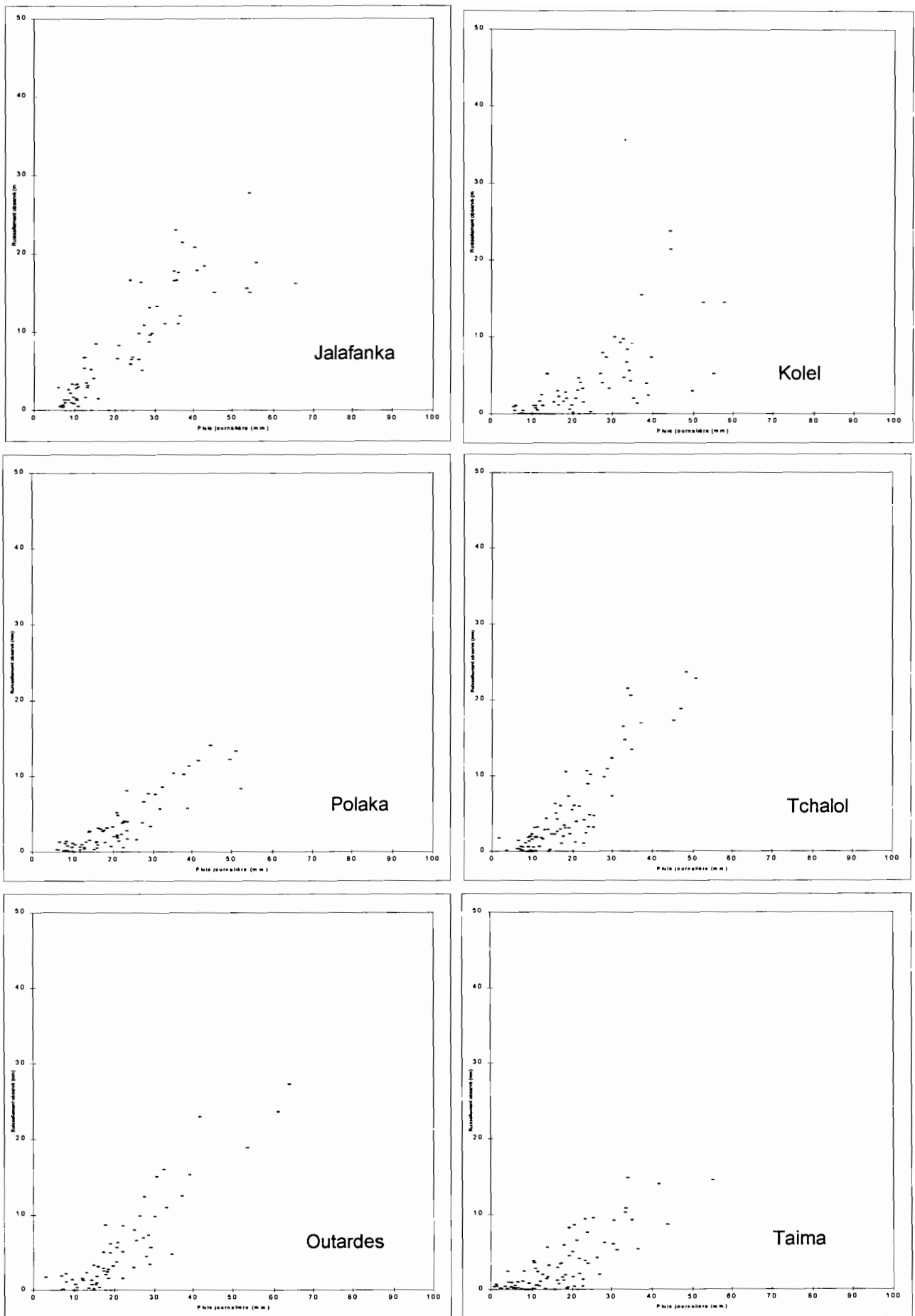


Fig.2 : Relation pluie - ruissellement observé

LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Le développement des modèles conceptuels pour l'étude hydrologique a permis de mettre en évidence certaines spécificités de la zone sahélienne lors de la transformation de la lame précipitée en lame ruisselée : difficulté d'estimation de la fonction de production et dépendance quasi-exclusive de l'aptitude au ruissellement sur les états de surface.

Le modèle SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), qui est utilisé dans cette étude, est un modèle déterministe de simulation des processus hydrologiques, dans lequel la variabilité spatiale des phénomènes est prise en compte à travers des caractéristiques moyennes ou représentatives du bassin. Il a été développé d'abord aux Etats-Unis pour prédire en continu, au pas de temps journalier, le rendement en eau et en sédiments de bassins versants ruraux, assez grands et complexes, en fonction de modifications ou manipulations du système (Arnold et Williams, 1989).

Le modèle est composé de trois sous-modèles : le sous-modèle climatique, le sous-modèle hydrologique et le sous-modèle érosion; un sous-modèle de croissance de culture est associé. Les composantes du sous-modèle hydrologique sont le ruissellement direct (volumes de ruissellement et débits de pointe), la percolation, l'écoulement hypodermique ou retardé et l'évapotranspiration.

Le ruissellement de surface est estimé par les équations empiriques de l'approche proposée par le US Soil Conservation Service, (Chow, 1964) en considérant que l'écoulement direct de crue de cours d'eau peut être déterminé à partir d'une relation simple entre les hauteurs d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées, exprimée de la manière suivante :

$$R = \frac{(P - 0.2S)}{(P + 0.8S)^2}$$

R : ruissellement (mm)

P : hauteur totale de la pluie considérée (mm)

S : paramètre de rétention (mm), estimée en fonction du complexe hydrologique sol - couverture végétale humidité du sol du bassin versant considéré.

LES DONNEES DE BASE

La mise en oeuvre du modèle SWRRB nécessite l'acquisition d'informations sur le système hydrologique lui-même, ainsi que sur les phénomènes hydrologiques. On distingue deux catégories de données : les données d'ordre climatique et les données liées à la physiographie du bassin.

Les variables climatiques nécessaires pour exécuter le modèle SWRRB sont : les précipitations, la température et la radiation solaire. Ces données peuvent être simulées par le modèle lui-même lorsque l'on ne dispose pas d'observations.

Les facteurs physiographiques comprennent toutes les caractéristiques dépendantes de l'état du bassin versant : les types de sol, la végétation, l'occupation du sol, la topographie des terres, les techniques d'aménagement. Tous ces éléments qui sont des composants usuels des modèles hydrologiques conceptuels sont définis dans le modèle SWRRB à travers un paramètre global : le potentiel de ruissellement (ou " Curve Number "). Celui-ci est déterminé pratiquement à partir de la connaissance de trois catégories d'information : les groupes hydrologiques de sol (infiltrabilité du sol), l'occupation moyenne du sol à l'intérieur d'une rotation culturale et les pentes, intégrées et analysées contextuellement dans un système d'information géographique, sur base des correspondances établies pour la région de la Mare d'Oursi dans le tableau suivant :

Tableau I : Descriptif des catégories d'utilisation du sol et valeurs de CN correspondants (approche SCS).

CATEGORIES D'OCCUPATION DU SOL	ETATS DE SURFACE	DESCRIPTION	CONDITION HYDROLOGIQUE	GROUPE HYDROLOGIQUE DE SOLS			
				A	B	C	D
1. JACHERES (13.28%)	Cuirasses (Buttes, altération, blocaille)	Plages cuirassés, buttes cuirassées et massifs rocheux. Sols lithiques. Couverture végétale très faible à nulle.	Défavorable	76	85	90	93
	Sables vifs	Végétation herbeuse à recouvrement discontinu. Strate ligneeuse lâche					
2.CULTURES (5.26%)	Sables fixés	Sols brun-rouge subarides sur sables éoliens et sols ferrugineux tropicaux peu lessivés. Couvert végétal nul.	Défavorable	65	76	84	88
3. PATURES Défavo. (69.28%) Moy. favo (12.18%)	Zones de glacis (gravillons, arènes, pellicule indurée).	Sols ferrugineux tropicaux et bruns subarides vertiques. Brousse tachetée, mosaïque végétation-plages de sols nus.	Défavorable (R% < 50)	68	79	86	89
	Végétation	Sols vertiques et hydromorphes. Formation ripicole avec strate herbacée importante.	Moyenne (R% > 50)	49	69	79	84

Il faut signaler que réciproquement à cette approche synthétique, le potentiel de ruissellement peut aussi être déterminé de manière analytique ou semi-empirique à partir de la connaissance des débits et des pluies qui en sont la cause. En effet, si l'on dispose de données d'observations de pluies et d'écoulement suffisantes, on peut calculer la valeur du CN_2 à partir de la relation entre les hauteurs d'eau ruisselées et la pluie (voir équation [1]). La moyenne des valeurs obtenues pour chaque couple [pluie, ruissellement] représente le CN moyen du bassin versant et peut alors être reliée aux caractéristiques du bassin versant selon le tableau I.

Il est aussi possible de déduire graphiquement cette valeur moyenne en reportant les valeurs des couples [pluie, ruissellement] sur un diagramme SCS. Dans l'exemple ci-dessous (fig.3), la valeur du CN est approximativement de 90 pour le bassin de Jalafanka.

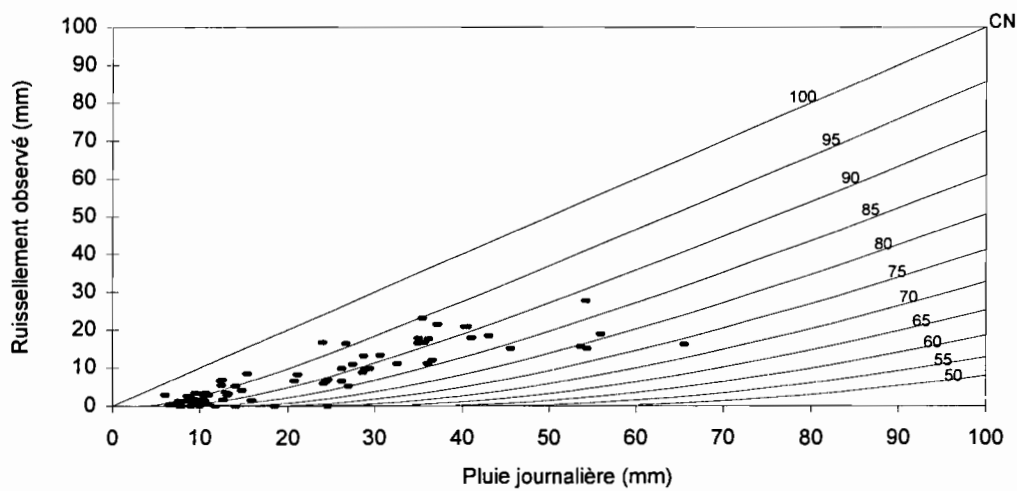


Fig.3 : Couples [Pluie - Ruissellement] dans un diagramme SCS (Bassin de Jalafanka).

Dans le tableau II, sont reprises les valeurs du CN moyen obtenues empiriquement et cartographiquement pour chaque bassin versant étudié.

Tableau II : Valeurs du CN moyen synthétique et analytique pour les bassins versants de la mare d'Oursi

Bassin	Mare d'Oursi	Outardes	Polaka	Tchalol	Taima	Jalafanka	Kolef
Superficie (km ²)	263	16.5	9.14	9.28	105	0.809	1.05
Pente (m/km)	1.50	6.00	8.10	7.60	3.80	7.00	55.0
CN ₂ analytique	88	88	86	90	89	90	83
CN ₂ synthétique (pente moyenne de 5%)	88	86	86	89	86	87	94

On remarque que les écarts entre CN moyens sont souvent relativement faibles dans l'ensemble, mais peuvent être importants au niveau de certains bassins.

Le modèle SWRRB nécessite d'introduire en entrée la valeur moyenne du potentiel de ruissellement (déterminé soit analytiquement, soit synthétiquement). Ensuite, compte tenu de la variabilité permanente de l'humidité du sol dans le temps, le modèle recalcule à partir de cette valeur moyenne une valeur de CN au début de chaque averse.

APPLICATIONS

L'application d'un modèle déterministe à un bassin versant nécessite l'ajustement des paramètres et des constantes afin que le modèle reproduise le mieux possible les observations. Cette opération est appelée calage du modèle et vise en définitive à minimiser la somme des carrés des écarts entre valeurs observées (Q_{obs}) et les valeurs simulées (Q_{sim}).

L'ajustement des paramètres se fait normalement par *essai et erreur*, c'est-à-dire, analyse des résultats précédents et modification des paramètres (en cherchant par ailleurs à en réduire le nombre autant que possible) pour améliorer les résultats. On procède ainsi de façon itérative jusqu'à l'obtention de résultats de simulation comparable aux données observées.

Le ruissellement de surface étant une fonction directe de la teneur en eau du sol (équation [1]), tous les paramètres et constantes affectant donc l'eau du sol ont des effets directs ou indirects sur les valeurs d'écoulement de surface. Toutefois, comme le ruissellement est évalué à partir de l'approche SCS des " CN ", l'ajustement se fait essentiellement sur les variations des valeurs du potentiel de ruissellement. Plusieurs essais nous ont permis de constater qu'une différence de deux ou trois unités autour de la valeur moyenne du CN dans chaque bassin versant n'entraîne pas de différence significative sur les résultats de la simulation. Dès lors, nous considérons que les valeurs moyennes du CN synthétique sont directement utilisables pour les simulations sur chaque bassin considéré.

A chaque scénario, la qualité des résultats de simulation est appréciée en vérifiant que chacune des caractéristiques des écoulements observés est bien reproduite. Le modèle a été adapté pour fournir en résultats une série de tableaux présentant les débits journaliers observés et les débits journaliers simulés, à partir desquels s'effectue l'analyse comparant les différents essais.

L'application du modèle fournit en règle générale des résultats d'écoulement proches des valeurs observées sur la plupart des bassins. A titre d'exemple, nous présentons (fig.4) les résultats de trois années de simulation sur le bassin versant de Jalafanka.

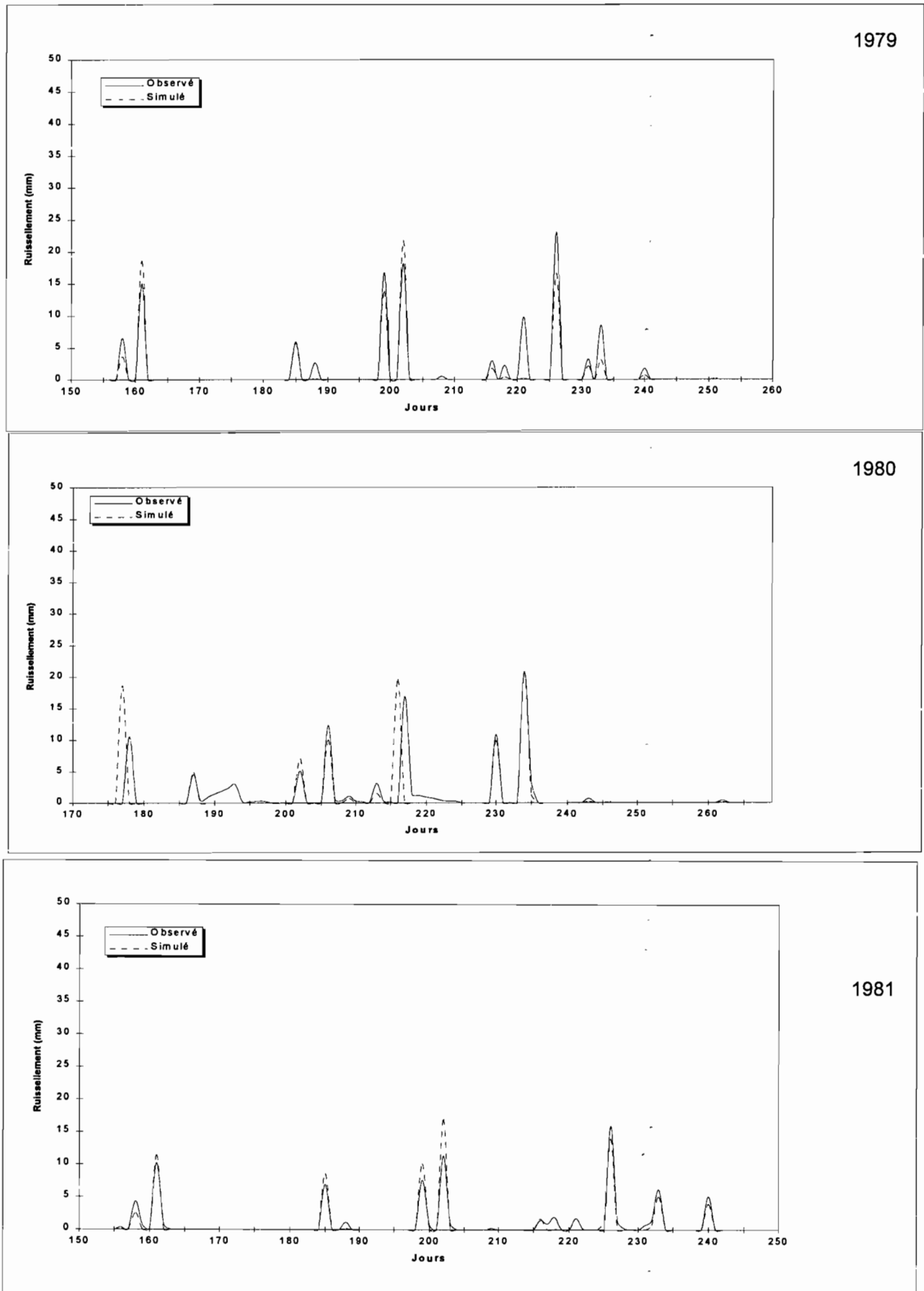


Fig.4. : Comparaison entre ruissellement simulé et ruissellement observé

On constate que d'une manière générale, l'adéquation entre les débits observés et simulés est en moyenne acceptable, la forme de la courbe est dans la plupart des cas à peu près bien respectée. On remarque aussi une bonne qualité prédictive du modèle pour les volumes d'écoulement, puisque 70 à 80 % de la variation est expliquée par le modèle. Les différences proviennent, soit d'une sous-estimation de l'évapotranspiration réelle (la demande évaporative est particulièrement considérable dans cet environnement aride), soit de la non prise en compte de la vitesse d'infiltration de l'eau dans les sols. Il ne considère que simplement le potentiel de rétention. Or, dans la zone sahélienne, les corps d'averse, quelque soit leur durée, sont caractérisés par une forte intensité au début de l'épisode pluvieux. Dès lors, l'intensité de la pluie dépasse très rapidement la vitesse d'infiltration et entraîne le ruissellement même si la pluie est de courte durée..

En dépit du nombre relativement faible d'événements pluviométriques conduisant à du ruissellement ($n_{\max} = 56$) dans certains cas, une analyse statistique par régression au sens des moindres carrés montre que la relation entre les ruissellements observés et les ruissellements simulés peut être de type linéaire (fig.5). Le coefficient de détermination associé est tout à fait acceptable. Le test de signification des différents paramètres confirme qu'au seuil de 5%, la pente de la droite, la plupart du temps, n'est pas significativement différente de l'unité, compte tenu de la dispersion des points (l'ensemble des points se retrouve statistiquement dans les limites de confiance à 95%).

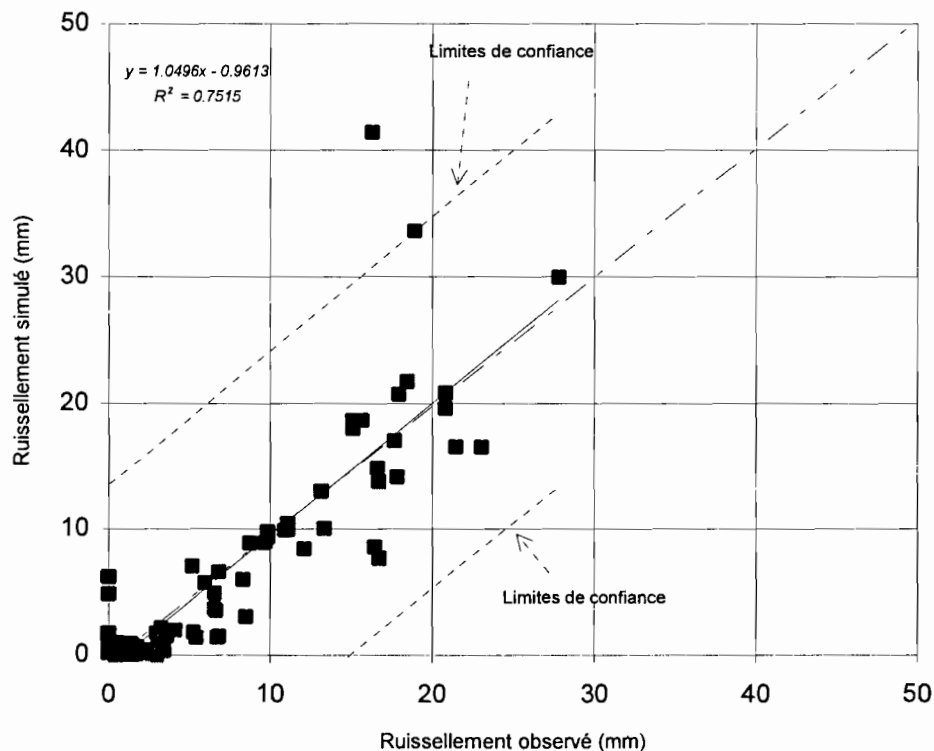


Fig.5. : Relation entre ruissellement simulé et ruissellement observé

CONCLUSION

Nous avons utilisé dans cette étude, un modèle déterministe et global, basé sur un paramètre de rétention dépendant des caractéristiques physiographiques du bassin. L'importance du potentiel de ruissellement (donc les états de surface) dans cette région aride est confirmée. La détermination synthétique du paramètre numérique de ruissellement CN à partir de télédétection et de systèmes d'information géographique est significative et conduit à une modélisation satisfaisante des écoulements.

L'étude a également permis l'élaboration de programmes informatiques permettant de transformer certaines étapes de la méthodologie en une base dynamique de connaissances pouvant être orientée vers la construction de systèmes de type expert qui fournirait le lien entre les techniques de spatialisation de l'information (télédétection et SIG) et la formulation mathématique des processus (modélisation).

Au niveau des perspectives d'utilisation pratique des résultats, le modèle permet en principe :

- (i) l'évaluation de la ressource en eau,
- (ii) la prédiction des effets des décisions d'aménagement sur les écoulements,
- (iii) la simulation de situations particulières (par exemple, simulation du comportement d'une averse de récurrence décennale).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOLD J.G., WILLIAMS J.R., NICKS A.D., SAMMONS N.B., (1989). *SWRRBW, a Basin scale simulation model for soil and Water Resources Management*. Texas A&M University Press; 142 p.

CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A., (1985). *Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso) (1976-1981)*. Ed. de l'ORSTOM, Paris 1985; 251 p.

8. CHOW V.T., (1964). *Handbook of applied hydrology*. New-York : MC. Graw - Hill Book Co., 1964, pp. 21.1 - 21.97.

CLAUDE J., GROUZIS M., MILLEVILLE P., (1991). *Un espace sahélien : la mare d'Oursi (Burkina)*. Ed. ORSTOM, Bondy (France). 241 p.

DAUTREBANDE S. (1991). *Hydrologie des zones humides intérieures : Etudes, méthodes et modèles. Application à l'Afrique Intertropicale*. Faculté des Sc. Agro. de Gembloux / Division Régionale de la FAO (Accra, Ghana). 304 p.

NONGUIERMA A., DAUTREBANDE S., (1995). *Télédétection et systèmes d'information géographique appliqués à l'étude hydrologique au Sahel : modélisation et automatisation des procédures*. Rapport de recherche. Unité d'Hydraulique Agricole (FSAGx), 102p.

RIBSTEIN P., (1990) *Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel*. Thèse de doctorat. Ed. ORSTOM, Paris (France). 317 p.

Application du modèle GRASS / ANSWERS à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant d'Afrique de l'ouest

P. PEREZ*, D. URVOIX, M. ARNAUD*****

* CIRAD-CA, URGE, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1

** USTL, Fac Sciences, 34095 Montpellier Cedex 5

*** CIRAD-CA, URFCM, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1

L'étude des problèmes environnementaux entraîne une globalisation croissante des techniques d'observation et des méthodes d'analyse. Cette tendance s'accompagne d'une interdisciplinarité de plus en plus marquée de l'approche scientifique. Afin d'établir un diagnostic pertinent et de concevoir des stratégies adaptatives opérantes, agronomes, écologistes, hydrologues et économistes doivent disposer d'outils d'analyse communs, en particulier en terme de modélisation (Ambroise, 1994).

Au sein des processus environnementaux majeurs, le cycle de l'eau tient une place prépondérante, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. C'est le cas en Afrique de l'Ouest dont l'agriculture pluviale doit faire face à des aléas climatiques importants. L'élaboration de scénarii alternatifs aptes à renseigner le niveau de durabilité de tel ou tel système de production nécessite de pouvoir intégrer la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes d'érosion, de ruissellement ou de lixiviation.

Dans cette optique, certains modèles biophysiques font figure de standards de par leur aptitude à gérer les informations d'entrée et leur capacité à fournir des données utilisables par d'autres types de modèles, à l'aval (Srinivasan et Arnold, 1993).

Cependant, la plupart de ces modèles ont été conçus et validés dans des conditions fort éloignées de celles qui prévalent en Afrique de l'Ouest. Le caractère tendanciel de la plupart des études environnementales en cours ne peut justifier une absence de vision critique sur les outils et méthodes utilisés pour leur réalisation. Pour cette raison, nous avons entrepris de tester le modèle GRASS/ANSWERS sur un petit bassin versant situé dans la région agricole du Sine Saloum au Sénégal. Fortement cultivé, le bassin versant a été étudié de 1983 à 1990 d'un point de vue hydrologique et agronomique (Albergel et al, 1992).

I - MATERIEL ET METHODES

Le modèle GRASS/ANSWERS

Le système d'information géographique GRASS (Geographical Resources Analysis Support System) est né au début des années 80 au sein de l'office de l'environnement de l'armée américaine à Fort Hood (Texas). Développé par les ingénieurs du CERL (Construction Engineering Research Laboratory), son but initial était d'assister les responsables de l'aménagement des installations militaires. De fait, il fut très vite adopté par l'administration américaine (Soil Conservation Service, National Park Service...). SIG orienté raster, GRASS s'est enrichi de fonctionnalités vecteur afin de pouvoir importer des cartes digitalisées et réaliser certaines classifications. C'est un système ouvert qui s'appuie sur les fonctionnalités d'autres logiciels du domaine public (RIM, MAPGEN, XGEN...)

Le modèle hydrologique ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) a été développé par D.B. Beasley, L.F. Huggins et E.J. Monke (1980). C'est un modèle distribué et événementiel conçu pour simuler les processus d'écoulement, d'érosion et de transport des sédiments dans un bassin versant agricole. Le modèle définit successivement l'interception de la pluie par la végétation, l'infiltration et la détention superficielle, le ruissellement en nappe et, enfin, l'écoulement concentré dans le réseau hydrographique. En parallèle, le détachement des sédiments par la pluie puis leur transport, leur dépôt ou leur reprise sont simulés. Le fonctionnement hydrogéologique est caractérisé par une loi de récession uniforme pour l'ensemble du bassin versant. La présence de retenues d'eau ou d'aménagements hydro-agricoles peut être prise en compte.

Les informations d'entrée concernent les caractéristiques pluviographiques, les différents types de sols et d'occupations du sol, le descriptif du réseau hydrographique et le comportement hydrogéologique. Certains modules de calcul n'ayant pas été utilisés lors de nos tests, compte-tenu des caractéristiques du bassin versant, les descriptions des paramètres d'entrée et des principales équations de résolution seront limitées à notre cas d'étude.

Le couplage avec le logiciel GRASS (Rewerts et Engel, 1991) a permis d'améliorer l'ergonomie de l'environnement de travail. Le mode raster permet de transformer les données cartographiques de base en un jeu de paramètres distribués nécessaires au modèle hydrologique, puisque celui-ci fonctionne sur une grille de maille carrée. Des tables attributaires simples permettent à l'utilisateur de fournir les valeurs des paramètres d'entrée.

Les données disponibles

Le bassin versant de Ndiba (16.5 km²) est situé dans la région agricole du Siné Saloum au Sénégal. Le modèle général de la région est un ensemble de vastes plateaux tabulaires de 30 à 60 mètres d'altitude, entaillé par un réseau de larges vallées de faibles pentes. Au quaternaire, les pédogenèses successives se sont imprimées sur les facettes de ce modèle (Bertrand, 1972). Fortement cultivé, le bassin versant a été étudié de 1983 à 1990 d'un point de vue hydrologique et agronomique.

Le SIG GRASS a été renseigné à partir d'une image classée LANDSAT-TM du 28/11/90 et d'une carte topographique issue d'orthophotoplan au 1/25000 (OTNG, Déc. 1983). La classification d'image a été réalisée sur un mode dirigé en utilisant des transects d'entraînement et la méthode du maximum de vraisemblance sous hypothèse gaussienne. Les résultats ont permis de déterminer trois classes de sol (sables, limons, sablo-limoneux) et cinq classes d'occupation du sol, en fonction de la densité de végétation (Castanier, 1993 ; Puech, 1993). La carte d'occupation des sols a été ramenée à trois classes correspondant aux zones de culture, brousse et forêt claire. Les matrices de confusion associées fournissent une précision globale de 59 % et 74 % pour les plans sol et occupation du sol, respectivement. L'homogénéité apparente de la couverture pédologique explique, en partie, la faible précision enregistrée. Cependant, de faibles différences texturales entraînent des comportements très contrastés en terme d'encroûtement de surface et de régime d'infiltration (Casenave et Valentin, 1989). La carte topographique a été fournie sur support papier et digitalisée. Les courbes isohypses sont distantes de cinq mètres d'altitude. Cette précision est, à priori, trop faible compte tenu du pas de discrétisation choisi (30 x 30 mètres) et du dénivelé moyen du terrain, compris entre les côtes + 5 et + 45 mètres. De ce fait, un certain nombre de points supplémentaires ont été ajoutés afin de faciliter les interpolations du modèle numérique de terrain (Figure 1).

Les données hydrologiques, issus des enregistrements effectués entre 1983 et 1988, sont composés de 24 couples pluie/écoulement correspondant à des événements pluvieux supérieurs à 35 mm (Dacosta, 1992). La pluie est considérée comme uniforme sur l'ensemble du bassin versant, le pluviographe utilisé est situé au centre de la zone d'étude.

Les pas de temps de dépouillement sont de cinq minutes pour les pluies et les écoulements, les échelles de temps ont été synchronisées. Les hiétoigrammes et hydrogrammes sont tous monomodaux, les crues sont caractérisées par des temps de montée brefs et une traîne réduite (Tableau 1). Cela correspond à un fonctionnement hydrologique relativement simple, sans intervention de la nappe phréatique et en l'absence d'inféroflux. L'ensemble de l'écoulement correspond au ruissellement de surface, selon un schéma hortonien classique.

En l'absence d'écoulement de base, le module hydrogéologique de ANSWERS n'a pas été renseigné. De même, l'absence de données expérimentales fiables nous a contraint à négliger les informations relatives à l'érosion.

Parmi les paramètres nécessaires, concernant les sols, les modes d'occupation du sol et les réseaux hydrographiques, dix peuvent être fixés de manière déterministe à partir de données expérimentales disponibles ou de sous-routines de simulation déjà validées dans la zone d'étude. En revanche, quatre paramètres se révèlent difficiles à déterminer et nécessitent un calage préalable.

. Les paramètres liés au sol

La capacité de stockage est caractérisée par la porosité totale (TP) et la capacité au champ, exprimée en pourcentage de la capacité à saturation (FP). L'infiltration (F) en fonction de la teneur en eau (V) est régie par l'équation de Holtan (1961) :

$$F = FC + (FMAX - FC) \times \left(\frac{V}{TP}\right)^P \quad (1)$$

avec :

FC vitesse d'infiltration en régime permanent (mm/h)

FMAX vitesse d'infiltration maximale (mm/h)

P coefficient de forme

Le régime d'infiltration est gouverné par une zone de contrôle de profondeur donnée (DF). Cette couche représente une barrière hydraulique d'autant plus sévère que son épaisseur est faible. Cette formulation de l'infiltration est intéressante dans le cas des sols du bassin versant de Ndiba, plus ou moins sensibles au phénomène d'encroûtement de surface. L'état d'humectation du sol avant une pluie est également pris en compte (ASM).

Les valeurs des paramètres FC, FMAX, TP et FP ont été déterminées à partir des nombreuses expérimentations sous pluies simulées qui ont été réalisées dans la région d'étude (Perez, 1994). Le paramètre ASM, dont la valeur dépend des conditions pluviométriques antérieures, a été assimilé à l'indice des pluies antérieures (IK) largement utilisé en zone sahélienne (Chevalier, 1983) :

$$Ikn = (Ik_{n-1} + Lp_{n-1}) \times e^{-0.5 \Delta t}$$

$$ASM = \frac{I_n}{60} \times MO \quad (2)$$

avec

Lp_{n-1} : hauteur de pluie de rang (n-1) (mm)

Δt : durée entre les pluie de rang (n-1) et (n) (jours)

Cet indice permet, pour chacun de nos couples pluie/écoulement, de calculer la valeur du paramètre ASM. Les paramètres DF et P ne peuvent être estimés à priori, compte-tenu du caractère empirique de l'équation de Holtan. Nous avons choisi de tester la sensibilité du modèle hydrologique vis à vis de ces deux paramètres puis de caler leurs valeurs par rapport aux données expérimentales.

Les paramètres liés à l'occupation du sol

L'interception de la pluie (INT) par la végétation dépend du potentiel d'interception (PIT) et du taux de couverture au début de l'événement pluvieux (PER) :

$$INT = PIT \times PER \quad (3)$$

La pluie qui arrive au sol peut être stockée en surface en fonction du niveau de rugosité rencontré. Ce volume de détention (DEP) est calculé selon l'équation de Huggins et Monke (1966) :

$$DEP = HU \times ROUGH \times \left(\frac{H}{HU}\right)^{ROUGH} \quad (4)$$

avec :

H : hauteur d'eau (mm)

HU : hauteur maximale du micro relief (mm)

ROUGH : paramètre de forme

Enfin, le temps de concentration du ruissellement en nappe est calculé à partir de l'équation de Manning. Elle nécessite la connaissance de la valeur du paramètre de retard (N) pour chaque type d'occupation du sol.

Les valeurs de PIT et HU ont été déterminées à partir de données expérimentales (Perez, 1994) et bibliographiques (Rawitz et al., 1981 ; Lamachère, 1991). La valeur de PER évolue rapidement durant la saison des pluies, en particulier dans le cas des cultures. Nous avons simulé la croissance annuelle des couverts cultivés (mil), de brousse et de forêt claire à partir de l'équation de Baret (1987) :

$$PER = 100 \times (1 / (1 \times \exp(a \times (jas - INF)))) - \exp(b \times (jas - FIN))$$

avec :

jas : jour après semis

INF : jour correspondant au premier point d'inflexion

FIN : jour correspondant au second point d'inflexion
a et b : paramètres de courbure

L'équation a été calée chaque année, de 1983 à 1988, pour une culture de mil (var. Souna III). Par analogie, la même relation a été utilisée pour les couverts plus ou moins pérennes rencontrés dans la brousse et la forêt claire. Seuls les points d'inflexion ont été modifiés afin d'obtenir une évolution plus rapide du taux de couverture dans ces deux derniers cas. Cette modélisation très approximative ne tient pas compte d'un éventuel effet de stress hydrique sur la croissance végétative.

Les paramètres ROUGH et N ne peuvent être estimés à priori, compte tenu de leur caractère empirique. Comme précédemment, nous avons choisi de tester la sensibilité du modèle hydrologique puis de caler leurs valeurs par rapport aux données expérimentales.

. Les paramètres liés au réseau hydrographique

Chaque élément du réseau est défini par sa largeur moyenne (WIDTH) et son coefficient de Manning (N). Les valeurs des paramètres ont été estimées à partir des relevés de terrain et des valeurs fournies par la littérature.

Le tableau 2 présente l'ensemble des valeurs des paramètres utilisés pour le bassin versant de Ndiba.

II - RESULTATS

. Le modèle numérique de terrain

Malgré l'ajout de points cotés sur la carte topographique originale, l'interpolation pour une fonction n'est pas entièrement satisfaisante. Les très faibles dénivelés et le pas de discrétisation entraînent la création de replats séparés par des zones plus pentues. Cette absence d'uniformité est très nette lorsqu'on observe les courbes isohypses numérisées (Figure 2).

Les limites du bassin versant, calculées à partir de la carte des accumulations respectent la forme générale du bassin observé. La bordure sud, malgré un relief quasi-nul est restituée de manière satisfaisante. La seule erreur importante concerne la bordure nord, près de l'exutoire, vraisemblablement due au nombre limité d'orientations des pentes (huit directions possibles).

La superficie du bassin versant numérisé est de 18,5 km² contre 16,5 km² pour le bon versant observé, soit une surestimation de 14%. Le réseau hydrographique numérisé respecte le talweg principal mais l'orientation des segments d'ordre inférieur et leur développement correspondent assez peu à ceux du réseau observé (Figure 3). On retrouve ici l'effet conjugué de la faible uniformité des pentes calculées et du nombre limité d'orientation possibles.

Les cartes de pentes et d'orientation sont utilisées directement pour ANSWERS. Le modèle hydrologique doit gérer, dans le cas du bassin versant de Ndiba, 21051 mailles de 30 x 30 mètres.

. La sensibilité du modèle hydrologique aux paramètres de calage :

Nous avons effectué une analyse de sensibilité du modèle hydrologique aux quatre paramètres dont les valeurs n'ont pu être déterminées (DF, P, ROUGH, N). Cette analyse a été réalisée en faisant varier indépendamment chacun des paramètres entre ses valeurs extrêmes, pour chaque catégorie de sol (sable, limon, sablo-limoneux) et d'occupation du sol (culture, brousse, forêt).

La même pluie a été utilisée dans tous les cas, d'une hauteur de 50 mm et d'intensité maximale en 10 minutes de 109 mm/h. La sensibilité est caractérisée par l'écart maximal entre lames écoulées simulées rapportée à la valeur moyenne. Au delà de l'influence des superficies occupées par les différentes classes du sol ou d'occupation du sol, les variations de valeurs des paramètres DF et N entraînent une sensibilité allant jusqu'à 39 % et 67 % sur les lames écoulées. Les paramètres P et ROUGH ont une influence moindre (Tableau 3). Ces résultats rendent nécessaires un calage de ces quatre paramètres par rapport aux données expérimentales.

. Le calage des paramètres par rapport à la crue décennale :

Afin d'éviter de caler les paramètres DF, N, P et ROUGH par rapport à un cas particulier, nous avons préféré utiliser les hiéogrammes et hydrogrammes d'occurrences décennales calculés par la méthode de l'hydrogramme unitaire (Dacosta, 1992). Les autres paramètres ont conservé leurs valeurs initiales, hormis PER et ASM dont les valeurs sont simulées de manière indépendante. Nous avons choisi arbitrairement d'affecter les valeurs PER = 50 % et ASM = 50 % comme conditions moyennes pour la crue décennale.

Le calage manuel a consisté en un nombre important d'itérations afin d'obtenir des valeurs de la lame écoulee (Le) et débit de pointe (Qm) aussi fidèles que possible. Dans un second temps, nous avons cherché à améliorer les temps de montée (Tm) et de base (Tb). Le résultat final est satisfaisant du point de vue des lames écoulées, mais le débit de pointe est nettement sous-estimé. En corollaire, le temps de montée est nettement surestimé, de même pour le temps de base (Tableau 5).

Cet écrasement de la crue décennale (Figure 4) est compréhensible si on se réfère aux erreurs engendrées par le modèle numérique de terrain. Les valeurs de calage retenues des paramètres sont données dans le Tableau 2.

. La validation du modèle hydrologique :

Nous avons utilisé les 24 couples pluie/écoulement disponibles pour valider le modèle ANSWERS. Pour chaque événement pluvieux, seuls les paramètres PER et ASM sont modifiés. Rappelons que les hauteurs de pluie sont comprises entre 35 et 105 mm et les lames écoulées observées entre 0 et 13 mm.

Quatorze simulations ont été arrêtées en cours de calcul car le modèle ne parvenait plus à maintenir la continuité des écoulements. Dans ce cas, nous avons conservé la valeur de lame ruissellée à l'instant de l'arrêt mais nous n'avons pas tenu compte des cinétiques d'écoulement. Les variables analysées sont la lame écoulee (Le), le débit de pointe (Qm), le temps de base (Tb), le temps de montée (Tm), le temps de réponse (Tr). Nous avons calculé les moyennes et écart-types des valeurs observées, simulées et des différences appariées (observé - simulé). Cette analyse porte sur 24 couples pour la variable (Le) et 10 couples pour les autres variables (Tableau 4).

On note que les temps de montée et de base sont systématiquement surestimés de 60 et 100 minutes environ. Les débits de pointe sont sous-estimés mais l'écart demeure acceptable. Cependant, cette présentation globale masque des compensations très fortes au sein de l'échantillon. Les lames écoulées sont apparemment surestimées d'une valeur proche de leur valeurs moyennes. En fait, la mise en relation des écoulements observés et simulés montre que les faibles valeurs sont restituées de manière satisfaisante alors que dans les forts écoulements sont nettement surestimés (Figure 5).

III - DISCUSSION

Il apparaît que l'utilisation du modèle GRASS/ANSWERS dans les conditions testées soit d'un intérêt limité. La précision sur les lames écoulées est suffisante pour évaluer les composantes du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant de Ndiba, mais la distorsion des hydrogrammes est trop forte pour permettre une prévision des risques de crue.

Compte-tenu de la nécessité de caler les paramètres DF, P, ROUGH et N, le modèle hydrologique ne peut être appliqué sur des bassins versants non jaugés sans prendre un risque important ; le coefficient de Manning (N) possédant la plus forte indépendance sur les calculs. A ce titre, il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec ceux issus de méthodes empiriques de détermination des crues en Afrique de l'Ouest (Rodier et Auvray, 1965 ; Puech et Chabi Gonni, 1983). On observe que l'estimation de la crue d'occurrence décennale souffre des mêmes insuffisances dans les deux cas (Tableau 5). Certes la méthode empirique n'est applicable qu'aux crues exceptionnelles mais l'investissement nécessaire pour alimenter le modèle GRASS/ANSWERS est disproportionné vis à vis des résultats, dans ce cas précis.

La prise en compte de l'influence du mode d'occupation du sol sur les écoulements paraît également limitée : le couvert végétal intervient uniquement dans l'interception aérienne de la pluie ; la représentation de la rugosité du sol dans le modèle est trop lourde pour pouvoir être évolutive et rendre compte des pratiques culturales ou des phénomènes de tassement (Hoogmoed et Stroosnijder, 1984 ; Guillobez et Zougmore, 1991). La stratégie alternative qui consiste à étudier globalement les états de surface s'est révélée pertinente en zone sahélienne (Albergel, 1987 ; Casenave et Valentin, 1989).

Enfin, le fonctionnement du modèle GRASS/ANSWERS nécessite, dans les conditions topographiques qui prévalent en Afrique de l'Ouest, un modèle numérique de terrain d'une très grande précision. Cela implique des relevés de terrain longs et coûteux dont la mise en oeuvre est loin d'être facile pour un programme de recherche ou de développement.

CONCLUSION

L'ergonomie satisfaisante de l'outil informatique ne peut masquer un certain nombre de contraintes à l'utilisation du modèle GRASS/ANSWERS en Afrique de l'Ouest. Les caractéristiques pédologiques et topographiques présentent des obstacles à l'utilisation de la télédétection et d'un modèle numérique de terrain pour caractériser un bassin versant. On ne peut pas envisager l'utilisation du modèle hydrologique sur des bassins versants non jaugés compte tenu du nombre et de l'importance des paramètres de calage.

Enfin, la précision des résultats obtenus dans le cadre de notre étude est loin d'être satisfaisante. Si l'objectif est la fourniture de valeurs de lames écoulées acceptables, d'autres types de modèle travaillant sur les volumes écoulés semblent plus prometteurs.

Date	Lp (mm)	Tm (mn)	Tb (mn)	Qm (m3/s)	Le (mm)
13/7/83	81.5	75	375	35.4	8.3
14/7/84	32.5	80	285	2.1	1.4
01/9/85	63.8	130	420	11	4.5
07/10/86	47.2	135	305	0.6	0.41
08/8/87	55.2	155	355	2.3	1.1
13/7/88	76.8	70	340	57.2	13

Tableau 1 Exemples de Exemples de crues enregistrées sur le bassin versant de Ndiba (16.5 km²), entre 1983 et 1988.

Type	Sol			Occupation du sol		
	sables	sables/limon	limons	culture	brousse	forêt
Surface (%)	57.2	37.8	5	66.8	30.8	2.4
TP (%)	40	43	47			
FP (%)	48	49	55			
FC (mm/h)	31	11	5			
P	0.4	0.5	0.6			
DF (mm)	150	150	150			
ASM (%)	simulé	simulé	simulé			
PIT (mm)				1	2	3
PER (%)				simulé	simulé	simulé
ROUGH				0.8	0.8	0.8
HU (mm)				30	20	30
N				0.05	0.05	0.05

Tableau 2 Valeurs des différents paramètres utilisés dans ANSWERS pour simuler les écoulements sur le bassin versant de Ndiba.

Type	Sol			Occupation du sol		
	sables	sables/limons	limons	culture	brousse	forêt
Surface (%)	57.2	37.8	5	66.8	30.8	2.4
DF	38.95	35.12	6.46			
P	27.15	7.16	2.22			
RC				22.95	6.92	1.27
N						

Tableau 3 Analyse de la sensibilité du modèle aux paramètres (DF) : prof. zone de contrôle ; (P) : coefficient d'infiltration ; (RC) : coefficient de rugosité ; (N) : coefficient de Manning. Exprimée en % de variation de la lame ruisselée.

	Tm (mn)		Tb (mn)		Tr (mn)		Qm (m3/s)		Le (mm)	
	moy	e.t	moy	e.t	moy	e.t	moy	e.t	moy	e.t
observé	107	39	385	89	143	34	20.1	18.8	2.3	3.5
simulé	169	51	480	58	198	48	17.9	13.3	4.2	6.5
(obs-sim)	-62	40	-95	88	-54	31	2.1	9.7	-1.6	3.7

Tableau 4, valeurs moyennes et écart-types des temps de montée (Tm), temps de base (Tb), temps de réponse (Tr), débits de pointe (Qm) et lames écoulées (Le). Valeurs observées, simulées et écarts appariés.

	Hyd. unitaire	Empirique	ANSWERS
Lp (mm)	97	97	97
Tm (mn)	70	150	170
Tb (mn)	380	660	480
Qm (m3/s)	60	27.5 */ 41.9 **	42
Le (mm)	21.3	25.2	22.9
Kr (%)	22	26	24

* : Rodier et Auvray (1965)

** : Puech et chabi Gonni (1983)

Tableau 5 Comparaison de trois méthodes de calcul de la crue décennale sur le bassin versant de Ndiba (16.5 km²).

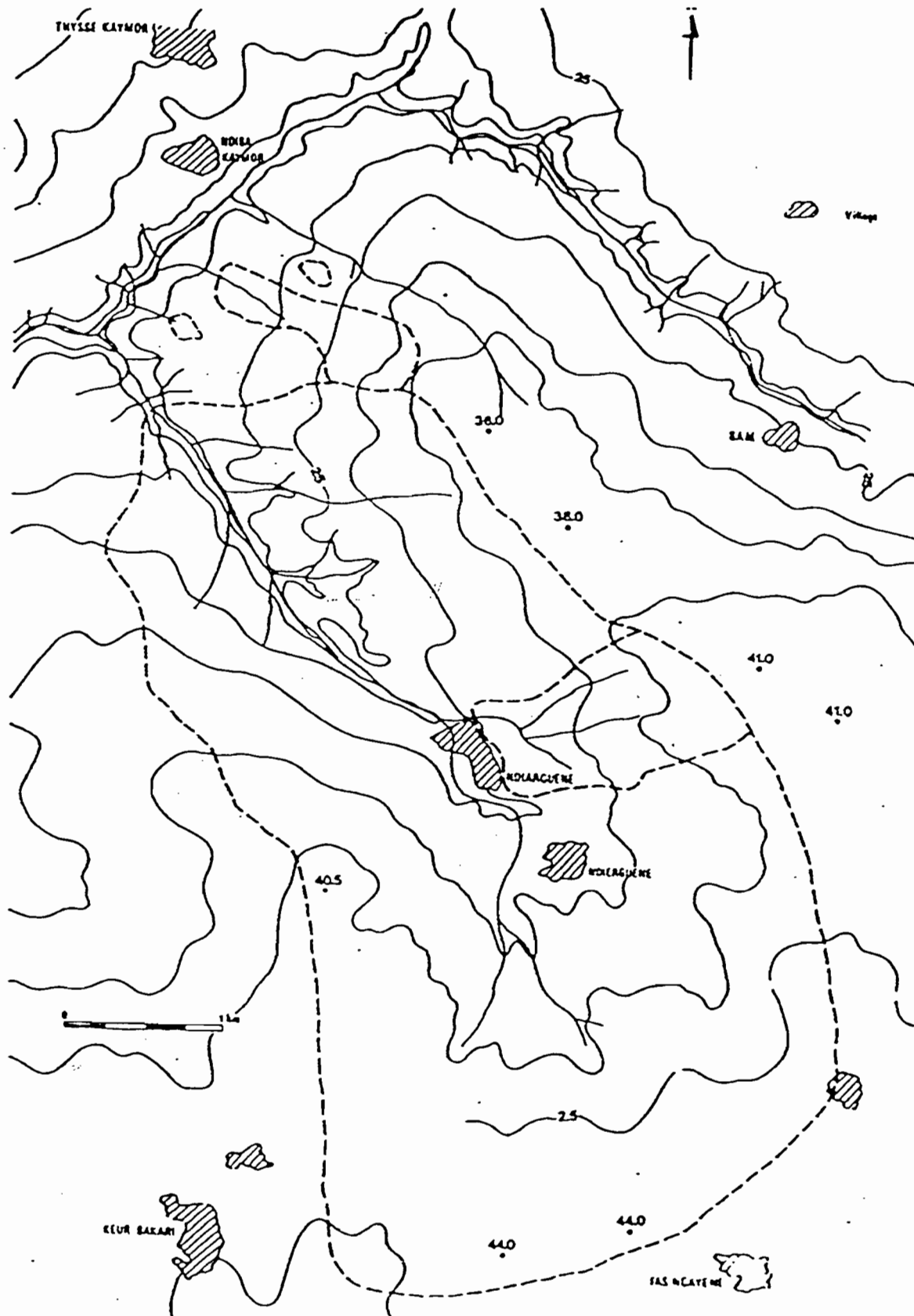
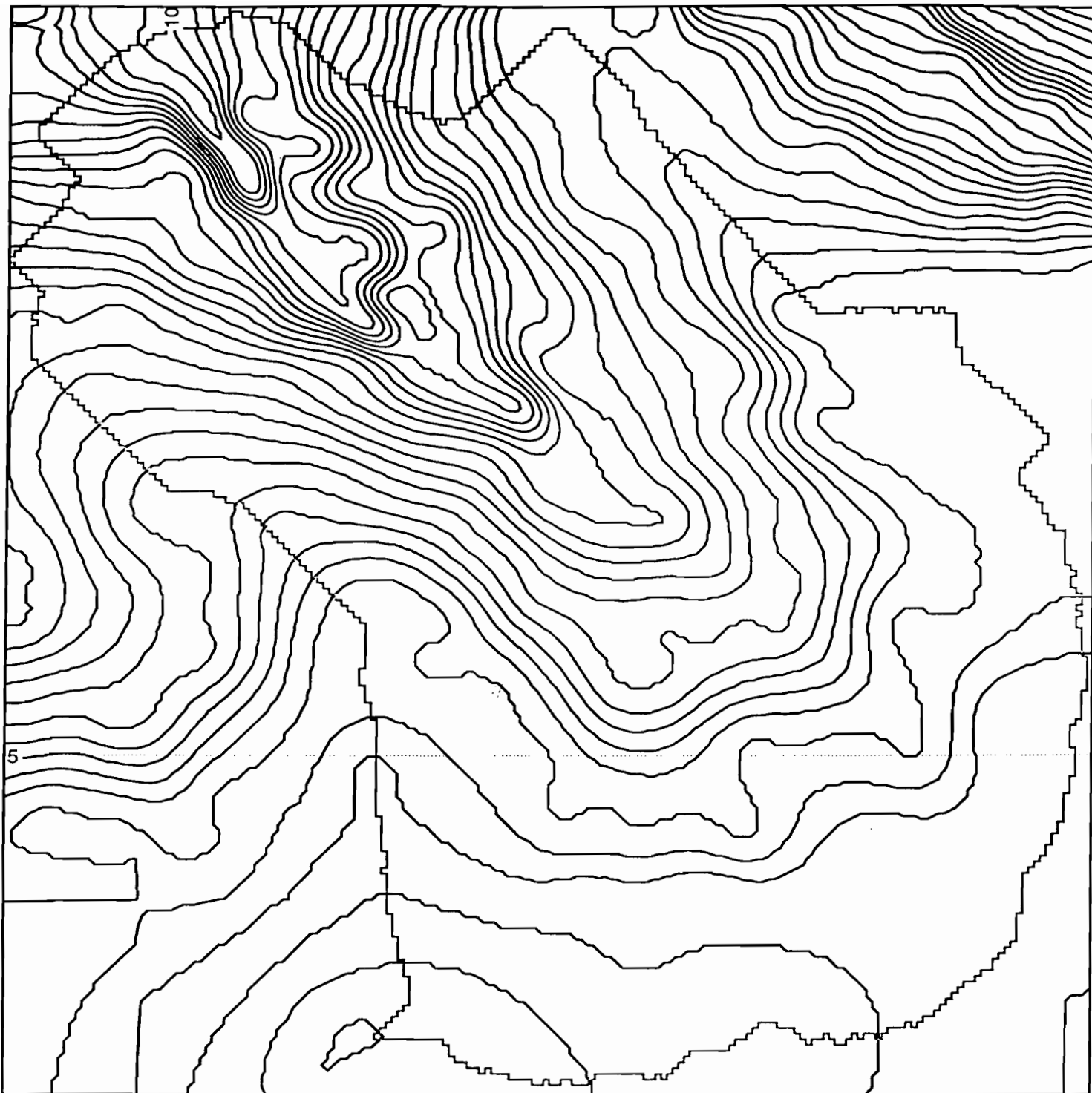


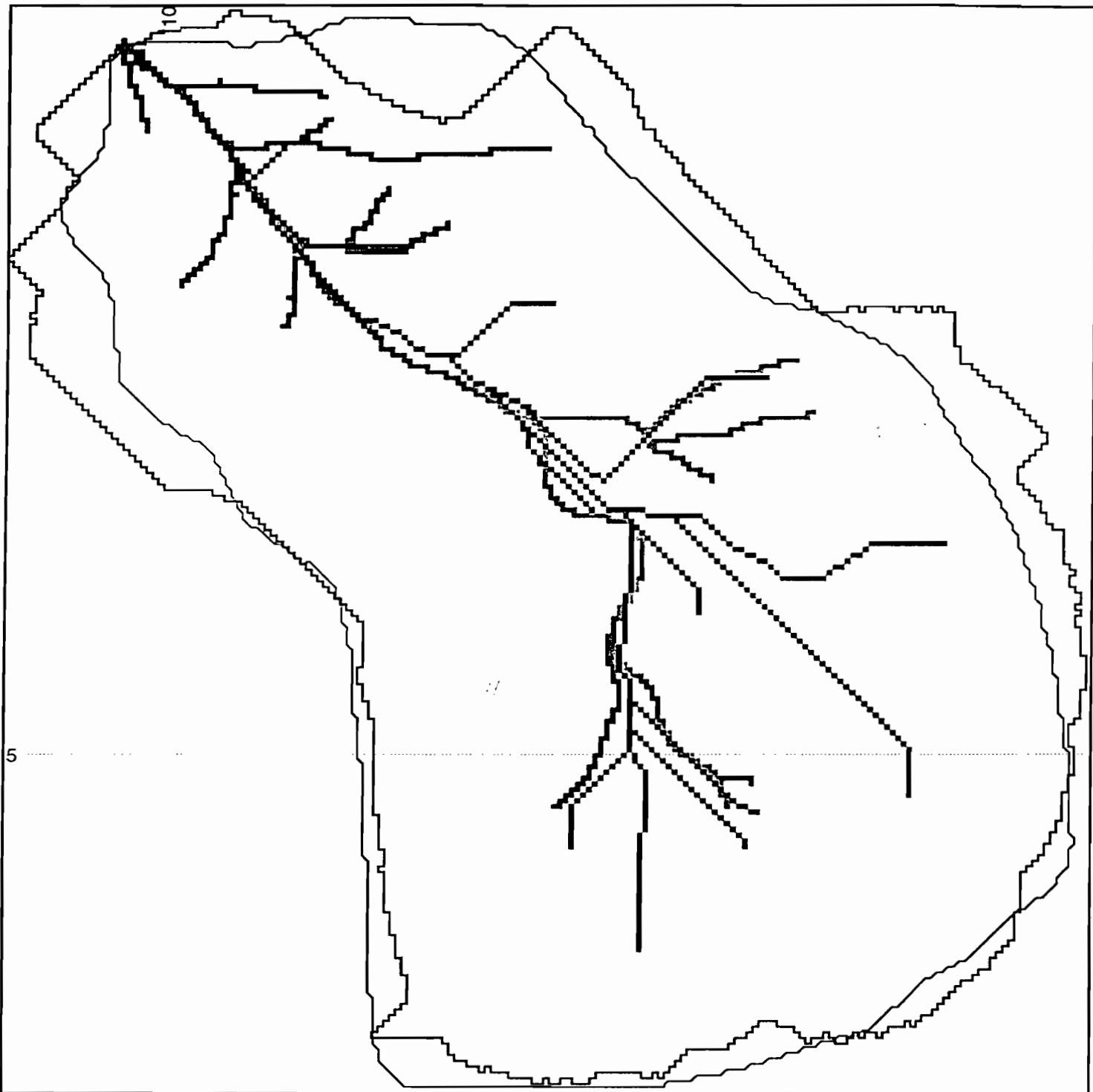
Figure 1: Carte topographique issue d'orthophotoplans (1/25000).



SCALE: 1 : 29291
GRID: 5000 units
8940
REGION: 9186 14766
3210

—— limites_calculees (pascal)
—— courbes_de_niveau (pascal)

Figure 2: Courbes de niveau et limites du bassin versant calculées à partir du MNT.



SCALE: 1 : 29291
 GRID: 5000 units
 REGION: 9186 14766
 8940
 3210

— limites_calculees (pascal)
 - - - limites_observees (pascal)

□ no data
 ■ reseau hydrographique calcule
 ▒ reseau hydrographique observe

Figure 3: Comparaisons entre les limites du bassinversant et les réseaux hydrographiques observés et simulés.

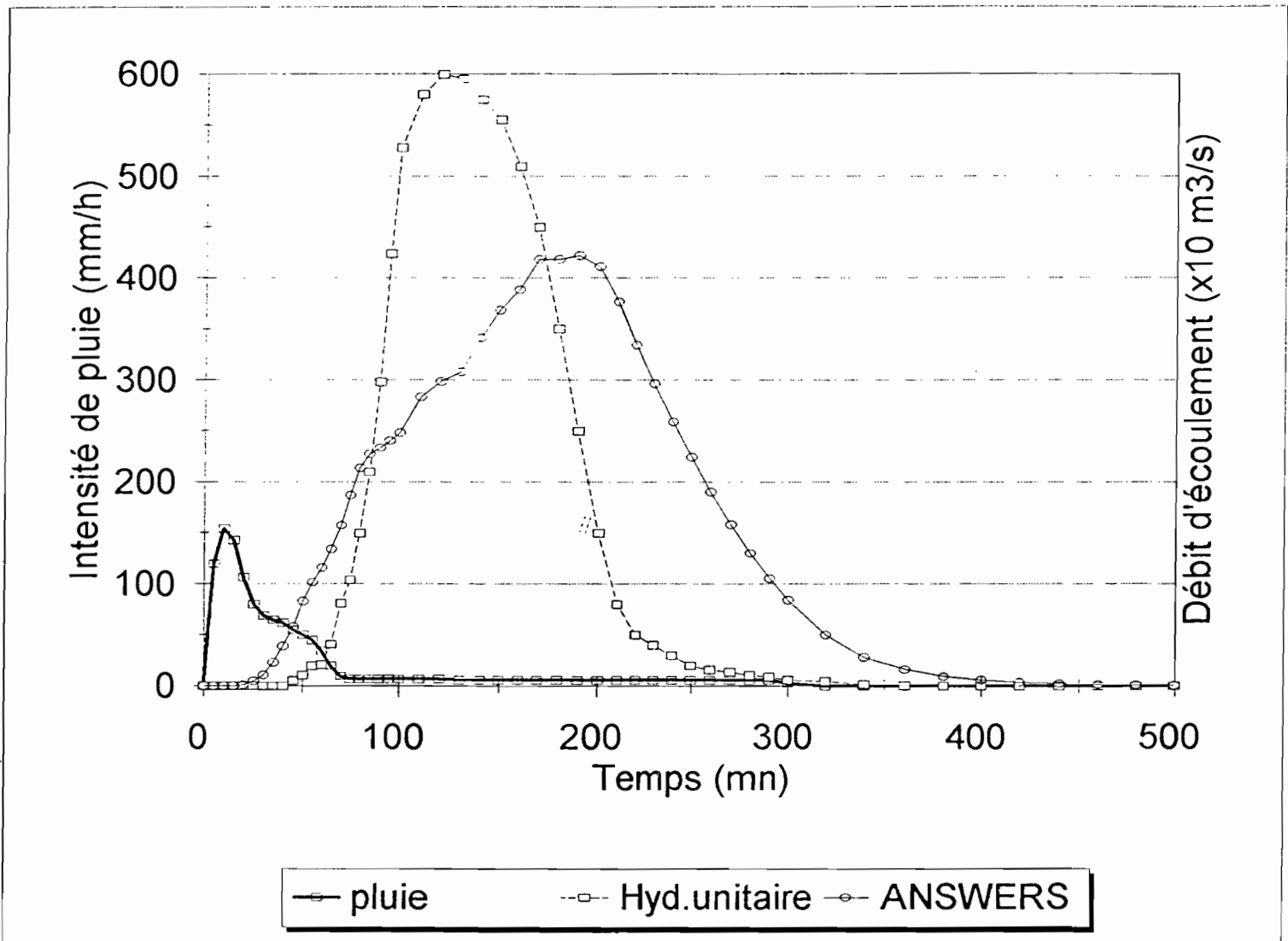


Figure 4: Comparaison des hydrogrammes de cue décaennale obtenus par la méthode de l'hydrogramme Unitaire ou le modèle ANSWERS

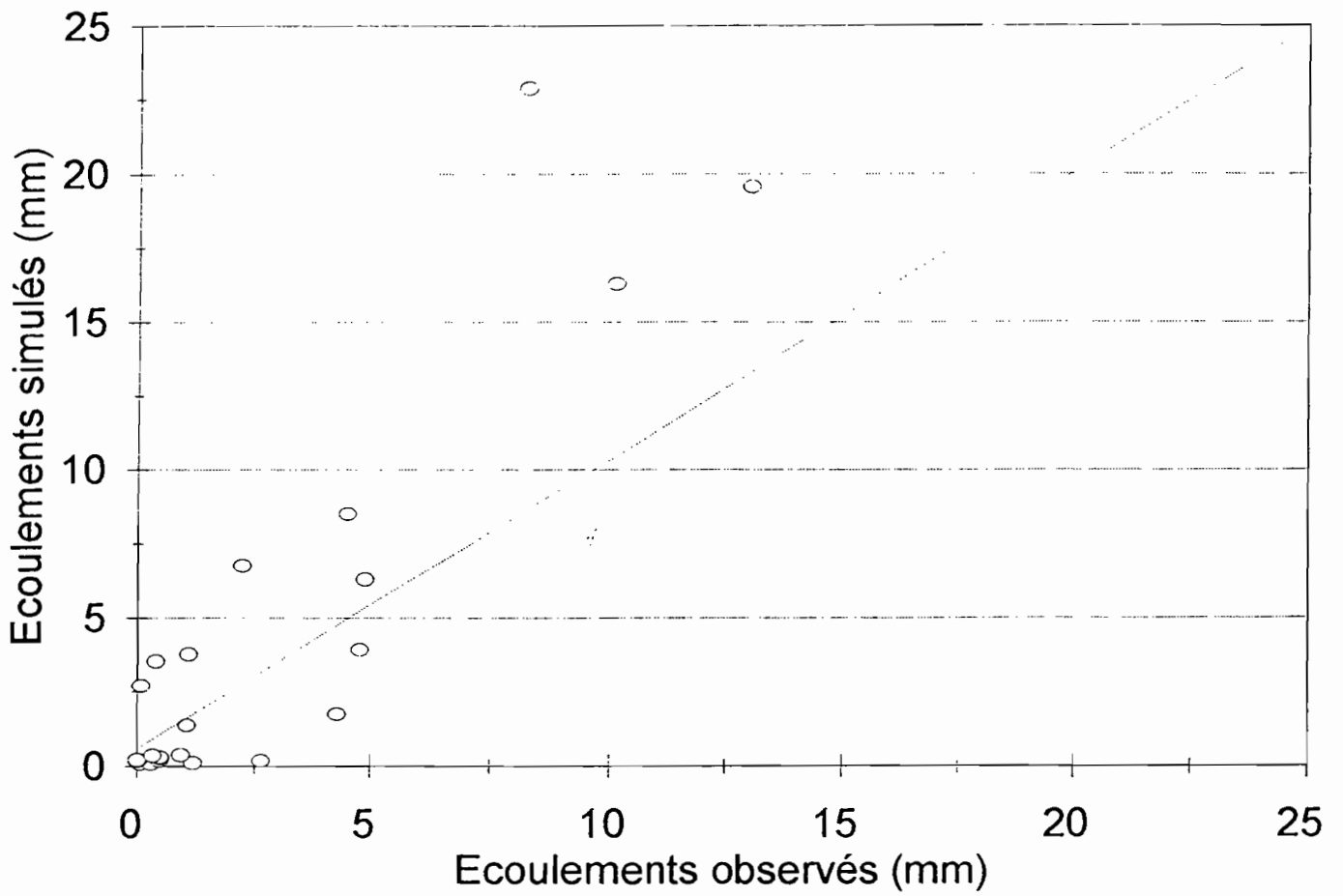


Figure 5: Relation entre les écoulements observés et simulés - 24 couples pluie/écoulement.

M.H.M.: Le Modèle Hydrologique Maillé

EL IDRISSE A* et PERSOONS E.**

*Doctorand et ** Professeur à l'Unité de Génie Rural
Université Catholique de Louvain
Faculté des Sciences Agronomique

INTRODUCTION

Le MHM a été conçu et élaboré au départ par Batardy J. au début des années 80 à l'Unité de Génie Rural de l'Université Catholique de Louvain en Belgique (Batardy, 1984), puis développé par Randriamaherisoa A.J. (Randriamaherisoa, 1993) pour aboutir à un logiciel commercialisé par la firme Da Vinci Consulting.

Le MHM se base sur la discrétisation du bassin versant en mailles régulières carrées. Il fait partie des modèles déterministes qui tentent de définir les phénomènes hydrologiques par des formulations mathématiques.

Le MHM est le résultat de l'utilisation combinée de deux technologies: la modélisation déterministe distribuée et la cartographie numérique (cartes numérisées ou télédéteectées), il est fondé sur l'identification de la réponse hydrologique unitaire spécifique à un bassin

I. LES HYPOTHESES:

I.1. Continuité spatiale

Le modèle maillé considère la maille comme unité d'analyse des phénomènes hydrologiques dans le bassin. Il suppose donc l'applicabilité des fonctions hydrologiques à l'échelle d'une maille.

L'uniformité des propriétés physiques des mailles associées aux phénomènes hydrologiques est la première hypothèse, il s'agit donc de l'hypothèse de continuité spatiale adoptée pour tout système discret.

L'irréalisme de cette hypothèse peut être pallié par le choix de la taille des mailles: "Au plus la maille est petite, au plus elle est uniforme".

I.2. Hypothèse conceptuelle

De part son caractère conceptuel, le modèle se base sur une série d'hypothèses simplificatrices liées à la formulation symbolique schématisant le système réel.

D'une manière générale, les hypothèses de base sont la linéarité et la permanence de la fonction de production et des fonctions de transfert. Le régime permanent suppose que les paramètres de ces fonctions sont constants durant une averse.

I.2.1. Système linéaire et permanent de la fonction de production

Comme la fonction de production est appréhendée par la notion de coefficient de ruissellement, la condition de régime permanent n'est réaliste qu'à la saturation des différents types de réservoirs.

I.2.2. Système linéaire et permanent de la fonction de transfert

Quant aux paramètres de transfert, la simple translation à l'exutoire par le principe de l'isochronisme des volumes ruisselés est effectivement une fonction linéaire et permanente. Les vitesses de transfert sont constantes pendant l'averse et le volume à transférer ne subit pas de déformation (laminage). Or, physiquement, les vitesses sont fonction de la hauteur d'eau et des caractéristiques hydrauliques du lieu.

II. FONDEMENTS DU MHM

La recherche de la réponse unitaire d'un système hydrologique linéaire peut être appréhendée par la théorie de la réponse impulsionnelle.

Un système est, par définition, un ensemble de règles transformant un signal d'entrée en un signal de sortie. Un système linéaire est caractérisé par les principes de proportionnalité et d'additivité.

En considérant le bassin versant comme un système hydrologique, l'équation de continuité relie le stockage dans le bassin (S), le signal entrant qui est la pluie (I) et le signal sortant qui est le débit:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (1)$$

II.1. Fonction de réponse impulsionnelle

La réponse d'un système linéaire est nécessairement caractérisée par sa fonction de réponse impulsionnelle. Si à l'instant τ , le système reçoit instantanément une unité de signal entrant de durée infiniment courte (impulsion unitaire), sa réponse à l'instant τ est décrite par fonction de réponse à une impulsion unitaire $u(t - \tau)$ (figure 1). Conformément aux principes de proportionnalité et d'additivité, pour un système d'entrée quelconque $I(t)$, la réponse du système est donnée par l'intégrale de convolution

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau)u(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

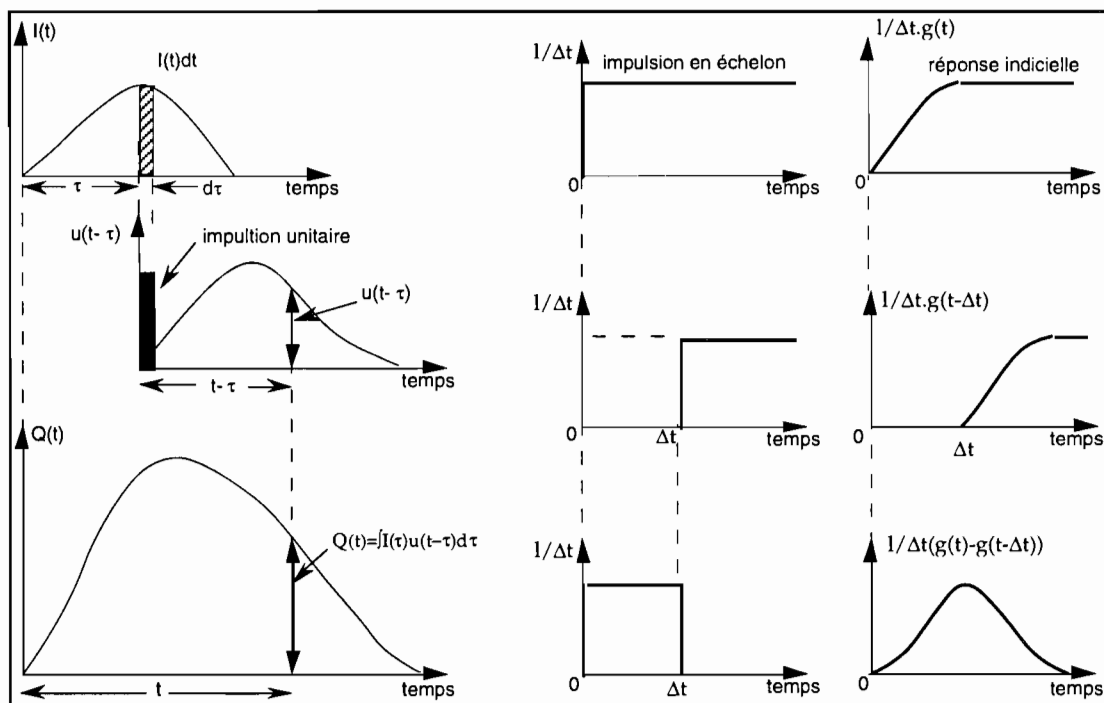


Figure1: Fonction de réponse d'un système hydrologique linéaire (Chow et al., 1988)

Pour l'application en hydrologie, les solutions sont attendues à des intervalles discrets car le signal d'entrée lui-même est une fonction discrétisée dans le temps comme c'est le cas de la pluie ou de la pluie ruisselée. La manipulation d'un tel signal d'entrée nécessite deux autres fonctions.

II.1.1. Fonction de réponse à un échelon unitaire ou de réponse indicielle

Un signal d'entrée en échelon unitaire passe de 0 à 1 à partir du temps 0 et continue indéfiniment à ce niveau. La sortie du système, c'est-à-dire sa fonction de réponse à un échelon unitaire $g(t)$, est obtenue à partir de l'équation (2) en considérant $I(\tau) = 1$ pour $\tau \geq 0$:

$$Q(t) = g(t) = \int_0^t u(t - \tau) d\tau = \int_0^t u(l) dl \quad \text{en prenant } l = t - \tau \text{ et } dl = -d\tau \quad (3)$$

II.1.2. Fonction de réponse à un signal discrétisé

Un signal d'entrée discret unitaire est l'entrée de valeur unitaire en Δt de niveau:

$$I(\tau) = \frac{1}{\Delta t} \quad \text{pour } 0 \leq \tau \leq \Delta t \quad (4)$$

Ainsi la fonction réponse à un signal discret unitaire est:

$$h(t) = \frac{1}{\Delta t} [g(t) - g(t - \Delta t)] = \frac{1}{\Delta t} \left[\int_0^t u(l) dl - \int_0^{t-\Delta t} u(l) dl \right] = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t u(l) dl \quad (5)$$

Cette équation constitue la base de l'utilisation en hydrologie d'un système linéaire en temps discret.

II.2. Application en hydrologie

Le signal d'entrée qui est la pluie, au pas de temps $m\Delta t$, est déterminé en représentation discrète par:

$$P_m = P(m\Delta t) = \int_{(m-1)\Delta t}^{m\Delta t} I(t) dt \quad \text{pour } m=1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Par contre le signal de sortie, qui est le débit est déterminé par échantillonnage en pas de temps discret pour le même pas de temps,

$$Q_n = Q(n\Delta t) \quad \text{pour } n=1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

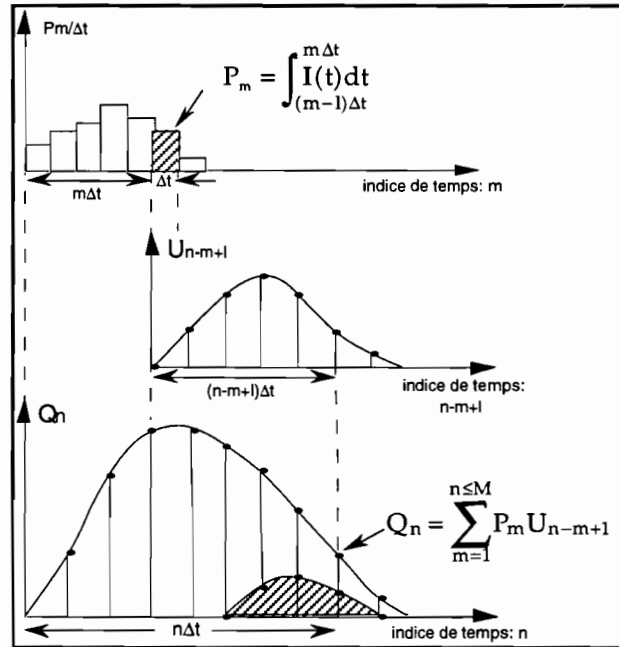


Figure 2: réponse unitaire d'un système hydrologique linéaire avec des variables discrètes

Si M est une série de signaux discrets de niveau constant, en procédant par un changement de variable et en remplaçant la fonction $h[(n - m + 1)\Delta t]$ par une fonction d'échantillonnage discret U_{n-m+1} , l'équation finale est:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (8)$$

La reconstitution de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin se fait par la somme des produits des ordonnées de la réponse unitaire avec la hauteur de la pluie le décalage temporel adéquat

III. STRUCTURE DU MHM

III.1. Fonction de production:

La fonction de production régit la transformation de la pluie brute en pluie nette destinée au ruissellement, elle constitue donc l'élément moteur des modèles hydrologiques car elle est responsable du volume de ruissellement. Il existe différentes formulations plus au moins élaborées de la fonction de production. La plus connue et la plus simple est celle avec le coefficient de ruissellement défini comme le rapport de la pluie ruisselée à la pluie brute:

$$P_E(t, i) = C_R(i) * P_B(t) \quad (9)$$

où $P_E(t, i)$ est la pluie ruisselée au moment t d'une maille de classe hydrologique i ,
 $C_R(i)$ est le coefficient de ruissellement de la classe hydrologique i ,
 $P_B(t)$ est la pluie brute tombée dans la même maille au moment t .

III.2. Fonction de transfert

La fonction de transfert régit le transport à l'exutoire du volume d'eau ruisselée déterminé par la fonction de production. Le modèle MHM utilise une fonction de transfert résultante de la combinaison de la méthode des lignes isochrones qui détermine le délai de transfert du volume ruisselé à partir de n'importe quelle partie du bassin jusqu'à l'exutoire et de la méthode de transfert d'ondes de crue qui régit le laminage du volume ruisselé au fur et à mesure que l'on recule en amont du bassin.

III.2.1. Principe de l'isochronisme:

La méthode des zones isochrones consiste à découper la surface du bassin en une série de n_{iso} zones $A_1, A_2, \dots, A_K, \dots, A_{n_{iso}}$ limitées par des lignes d'égal temps de ruissellement jusqu'à l'exutoire. Les pluies ruisselées issues des zones isochrones respectives arrivent donc à l'exutoire successivement après $\Delta t, 2\Delta t, \dots, K\Delta t, \dots, A_{n_{iso}} \Delta t$, Δt étant l'intervalle de temps entre deux lignes isochrones.

Pour une pluie ruisselée de durée Δt et d'intensité I_E , le ruissellement $Q_E(K, t)$ correspondant à chaque zone isochrone k au moment t est:

$$Q_E(K, t) = A_j I_E(t) \quad (10)$$

Pour une pluie ruisselée de durée quelconque $m\Delta t$, le débit de ruissellement à l'exutoire à l'instant t est constitué de la somme des ruissellements:

- de la 1^{ère} zone isochrone A_1 à l'instant t , c'est-à-dire $A_1 I_E(t)$
- de la 2^{ème} zone isochrone A_2 à l'instant précédent $t - \Delta t$, c'est-à-dire $A_2 I_E(t)$
- de la k ^{ème} zone isochrone A_k à l'instant $t - (k - 1)\Delta t$, c'est-à-dire $A_k I_E(t - k + 1)$
- et ainsi de suite jusqu'à la n_{iso} ^{ème} zone isochrone n_{iso} tant que chaque temps récursif $t - (k - 1)\Delta t$ soit supérieur à 0, pour k variant de 1 à n_{iso} .

$$Q_E(t) = \sum_{k=1}^{n_{iso}} A_k I_E(t - k + 1) \quad \text{pour} \quad (t - k + 1) > 0 \quad (11)$$

Le principe de l'isochronisme ne concerne que la fonction de transfert.

III.2.2. Transfert d'ondes de crue amont

La relation Débits amont-Débit à l'exutoire est traitée par transfert d'ondes de crue. Il s'agit de la résolution de l'équation de continuité du système hydrologique dont l'entrée, $Q_{in}(t)$ et la sortie, $Q_{out}(t)$, sont de même nature, c'est-à-dire un débit. L'évolution du stock d'eau dans le système est exprimé par:

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (12)$$

Bien que l'hydrogramme d'entrée soit connu, l'équation ne peut pas être résolue directement car l'évolution du stock et l'hydrogramme de sortie sont tous les deux inconnus. Une autre équation appelée fonction de stockage est donc nécessaire. D'une manière générale elle est fonction de l'entrée et de la sortie:

$$S = \left[Q_{in}, \frac{dQ_{in}}{dt}, \frac{d^2Q_{in}}{dt^2}, \dots, Q_{out}, \frac{dQ_{out}}{dt}, \frac{d^2Q_{out}}{dt^2}, \dots \right] \quad (13)$$

III.2.2.1. Laminage des crues par un réservoir

En système discret, les données sont représentées par des mesures échantillonnées à des pas de temps discrets. Le débit d'entrée au début et à la fin du $j^{\text{ème}}$ intervalle de temps de durée Δt sont respectivement $Q_{in}(j\Delta t)$ et $Q_{in}((j+1)\Delta t)$. Les valeurs correspondantes pour l'hydrogramme de sortie sont $Q_{out}(j\Delta t)$ et $Q_{out}((j+1)\Delta t)$.

Si la variation de l'hydrogramme d'entrée et de sortie durant l'intervalle de temps Δt est approximativement linéaire, la variation de stock est exprimée par:

$$S_{j+1} - S_j = \frac{Q_{in}(j\Delta t) + Q_{in}((j+1)\Delta t)}{2} \Delta t - \frac{Q_{out}(j\Delta t) + Q_{out}((j+1)\Delta t)}{2} \Delta t \quad (14)$$

Dans cette équation, sont connus $Q_{in}(j\Delta t)$, $Q_{in}((j+1)\Delta t)$, S_j et $Q_{out}(j\Delta t)$ et sont inconnus S_{j+1} et $Q_{out}((j+1)\Delta t)$ que l'on isole par:

$$\left(\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{out}((j+1)\Delta t) \right) = \left(\frac{2S_j}{\Delta t} - Q_{out}(j\Delta t) \right) + (Q_{in}(j\Delta t) + Q_{in}((j+1)\Delta t)) \quad (15)$$

Dans le cas d'un réservoir, en combinant l'équation précédente avec la fonction niveau de stockage-débit sortant, le calcul des deux inconnues est fait de la manière suivante:

- la relation topographique hauteur-surface-volume donne la valeur du stock à partir de l'élévation du niveau d'eau suite au débit d'entrée;
- la relation hydraulique débit de sortie-hauteur d'eau donne le débit sortant suite à l'élévation du niveau d'eau. Cette relation est établie soit par une opération de tarage soit en utilisant des profils types de régime hydraulique connu.

III.2.2.2. Méthode de Muskingum

Le transfert des débits amont mesurés et/ou simulés à l'exutoire des sous-bassins ou à la sortie des différentes formes de réservoir est traité par la méthode de Muskingum de transfert de débit dans une rivière. Entre les deux sections de contrôle amont et aval, en supposant que l'aire des sections en travers est directement proportionnel au débit transitant, le stockage dans la rivière est divisé en deux parties χQ_{out} où $\kappa\chi(Q_{in} - Q_{out})$ où κ est un coefficient de proportionnalité et χ est un facteur de pondération compris entre 0 et 0.5 (Chow et al., 1988).

La fonction de stockage de la méthode de Muskingum, qui représente un système linéaire de transfert d'écoulement en rivière, est donnée par l'équation de continuité suivante:

$$S = \chi Q_{out} + \kappa\chi(Q_{in} - Q_{out}) = \kappa[\chi Q_{in} + (1-\chi)Q_{out}] \quad (16)$$

Dans le cas d'une rivière naturelle, $0 > \chi > 0.3$, il est en moyenne égale à 0.2. Par contre, le paramètre κ est déterminé par le temps de transfert de l'onde à travers la rivière (Linsley et al., 1992).

Indicée par j au début et par $j+1$ à la fin de l'intervalle de temps, la variation de stock peut également être écrite de la façon suivante:

$$S_{j+1} - S_j = \kappa \left([\chi Q_{in}((j+1)\Delta t) + (1-\chi)Q_{out}((j+1)\Delta t)] - [\chi Q_{in}(j\Delta t) + (1-\chi)Q_{out}(j\Delta t)] \right) \quad (17)$$

La résolution simplifiée de la combinaison des équations (14) et (17) détermine l'équation de transfert de la méthode de Muskingum écrite de la façon suivante (Cunge, 1969):

$$Q_{out}((j+1)\Delta t) = C_1 Q_{in}((j+1)\Delta t) + C_2 Q_{in}(j\Delta t) + C_3 Q_{out}(j\Delta t) \quad (18)$$

C_1 , C_2 et C_3 sont fonction de κ , χ et Δt tel que: $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Les valeurs de κ et de χ peuvent être déterminées à partir des hydrogrammes d'entrée et de sortie mesurés. En effet, à partir des équations de variation de stock, on peut établir la relation suivante:

$$\kappa = \frac{0.5\Delta t [Q_{in}((j+1)\Delta t) + Q_{in}(j\Delta t)] - [Q_{out}((j+1)\Delta t) + Q_{out}(j\Delta t)]}{[Q_{in}((j+1)\Delta t) - Q_{in}(j\Delta t)] + (1-\chi)[Q_{out}((j+1)\Delta t) - Q_{out}(j\Delta t)]} \quad (19)$$

En prenant différentes valeurs de χ , le dessin du numérateur en ordonnée et du dénominateur en abscisse donne en principe des courbes en boucles. La valeur de χ correspondant à la boucle la plus fermée est retenue. La valeur de κ est la pente de la droite estimée à partir des points de la boucle (Gill, 1978).

III.3. Séparation des écoulements:

Le débit de la rivière est composé principalement de trois types d'écoulement:

L'écoulement direct de surface représente *le ruissellement*. Il est rapide.

A l'opposé, l'écoulement retardé souterrain, appelé *débit de base*, alimenté par les nappes aquifères, est un écoulement lent à cause de du transit dans le sol et le sous sol.

Entre ces deux écoulements, on conceptualise un *écoulement* dit *hypodermique* qui sous-entend un écoulement au niveau de la couche superficielle du sol.

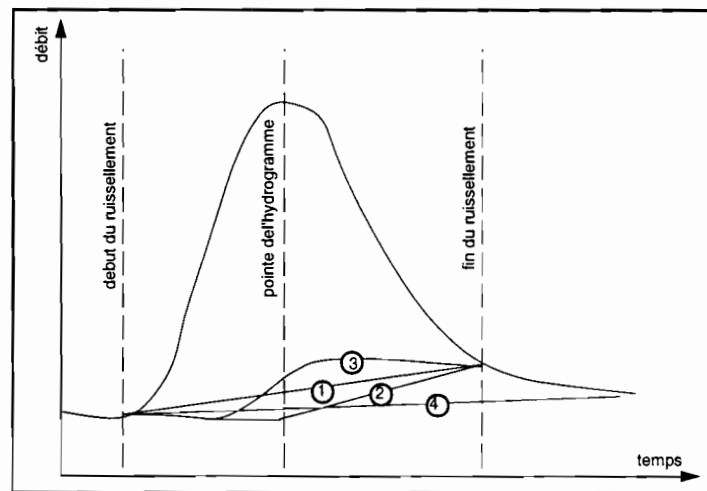


Figure 3: les différentes méthodes de séparation des écoulements

La quantification respective de ces écoulements, connue sous le nom de *séparation des écoulements*, est une opération délicate. Théoriquement, le début et la fin du ruissellement seraient marqués par deux points d'inflexion. La localisation de ces points permettrait la séparation des écoulements selon l'une ou l'autre des diverses hypothèses et différentes méthodes. La plupart de ces méthodes sont plutôt subjectives.

Au lieu de retrancher systématiquement le débit de base au débit mesuré suivant l'une ou l'autre des méthodes de la figure 2, il est laissé aux utilisateurs le soin de calculer le débit de base selon la spécificité hydrogéologique du bassin versant étudié.

IV. LE MHM ET LA CARTOGRAPHIE NUMERIQUE

Les différentes fonctions géomatiques sont regroupées dans la figure 4.

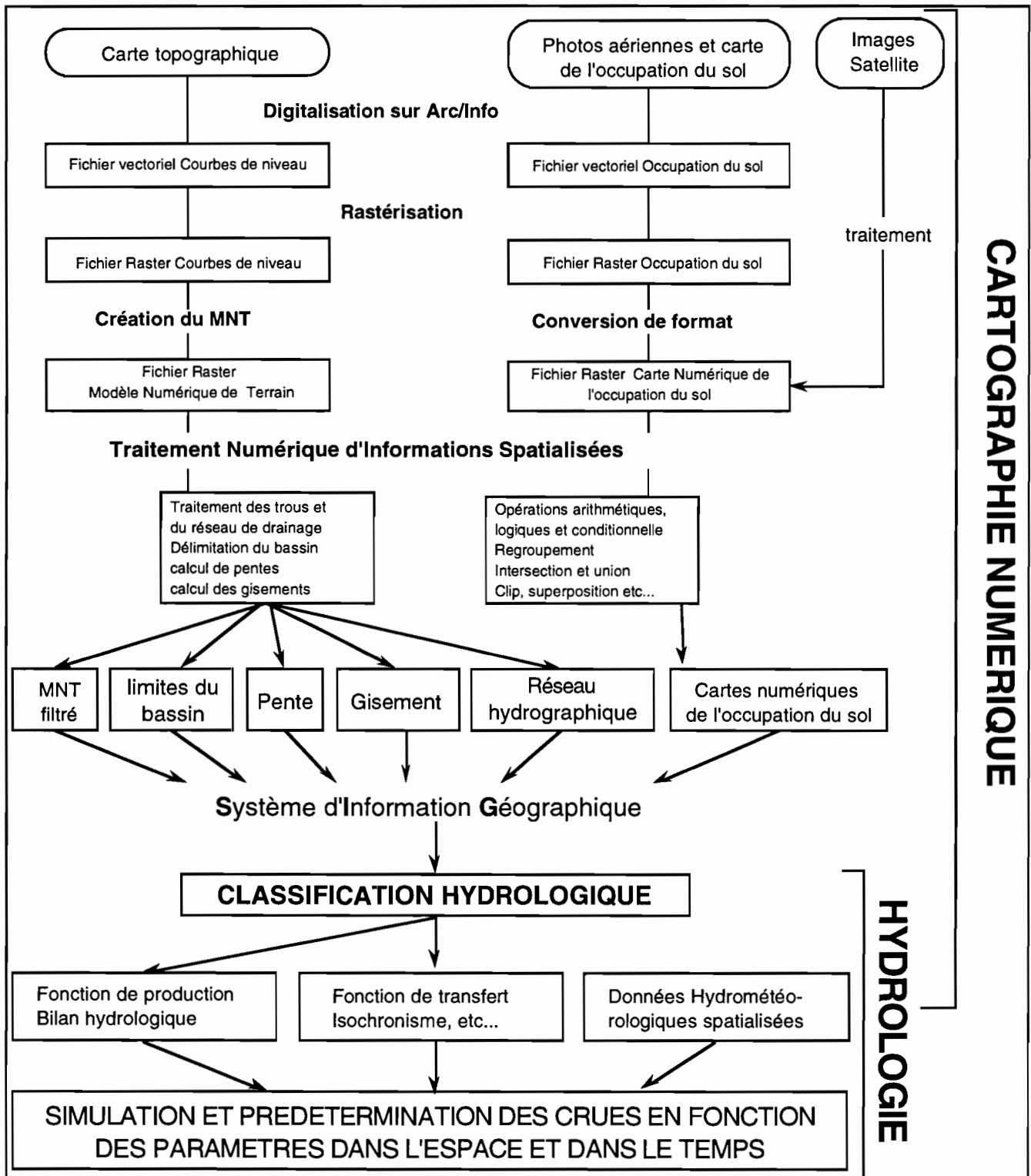


Figure 4: organigramme des opérations de géomatiques du modèle MHM (Randriamaherisoa A.J., 1990)

V. PROCEDURES DE SIMULATION

Comme l'objectif du MHM est de déterminer les réponses unitaires à partir du traitement par SIG des caractéristiques physiques du bassin et de la carte numérique des isochrones, la procédure de simulation de l'hydrogramme de crue développée est généralisée de la façon suivante:

- La fonction de production détermine, à partir des pluies brutes $P_E(t)$ à l'instant t , les pluies ruisselées $P_E(t,i)$ de toutes les mailles au même instant selon le coefficient de ruissellement propre à leur classe hydrologique représentée par l'indice i .

- Après classification des mailles discrétisant le bassin versant en fonction de leurs caractéristiques physiques, on rassemble les mailles similaires hydrologiquement à l'intérieur de chacune des zones isochrones. Ces mailles sont comptabilisées par le nombre de chaque *classe hydrologique* i dans chaque isochrone k que l'on note $n_{CH/Iso}(k,i)$. Comme ces mailles ont les mêmes paramètres de production, le débit de ruissellement de l'isochrone k au moment t , $Q_E(k,t)$ est donné par l'équation:

$$Q_E(k,t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{n_{CH}} P_B(t) * C_R(i) * n_{CH/Iso}(k,i) \quad (20)$$

n_{CH} : est le nombre de classes hydrologiques et Su est la surface d'une maille.

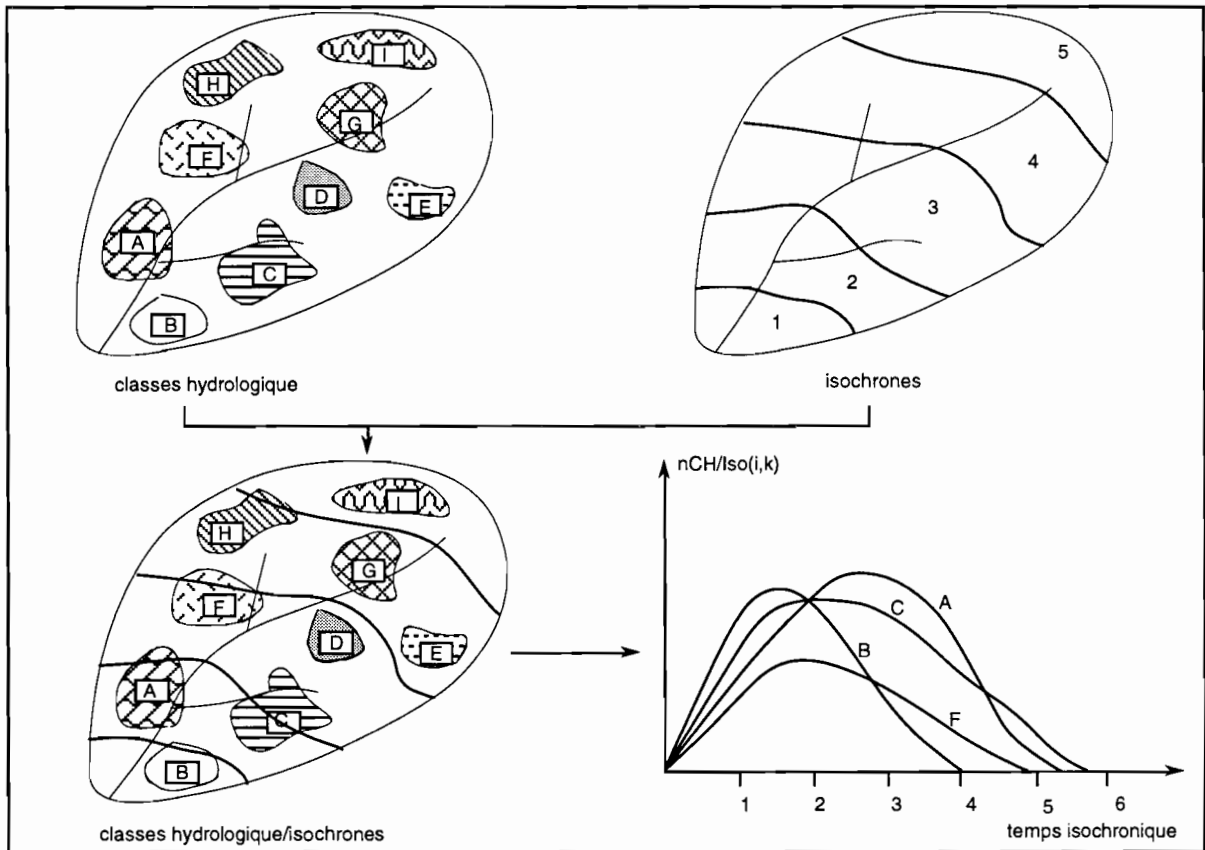


Figure 5: synthèse des caractéristiques spatiales d'un bassin versant

- Le ruissellement en fonction du temps, $Q_R(t)$, est déterminé à partir du déchargement à l'exutoire du contenu en pluie ruisselée de chaque isochrone avec le décalage temporel adéquat:

$$Q_E(t) = \sum_{k=1}^{n_{Iso}} Q_E(k, t-k+1) \quad \text{pour } (t-k+1) > 0 \quad (21)$$

$$Q_R(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^{n_{Iso}} \sum_{i=1}^{n_{CH}} P_B(t-k+1) * C_R(i) * Su * n_{CH/Iso}(k,i) \quad (22)$$

La commutativité et l'associativité des additions permet la permutation de l'ordre des sommations

$$Q_R(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{n_{CH}} \left[\sum_{k=1}^{n_{Iso}} P_B(t-k+1) * C_R(i) * Su * n_{CH/Iso}(k,i) \right] \quad (23)$$

- Le débit calculé en fonction du temps est la somme du ruissellement et du débit de base

- Dans le contexte du MHM qui nécessite une méthode rationnelle pour minimiser le temps de calcul, on introduit la notion des surfaces réduites. Par définition, il s'agit des surfaces équivalentes à celles des zones isochrones, mais en surfaces parfaitement imperméables. La surface réduite d'une maille de classe hydrologique est égale à

$$sr = (i) = C_R * Su \quad (24)$$

La surface réduite de toutes les mailles de classe hydrologique i à l'intérieur de l'isochrone k est

$$Sr(k, i) = C_R(i) * Su * n_{CH/Iso}(k, i) \quad (25)$$

La surface réduite de l'isochrone k est égale à

$$SR(k) = \sum_{i=1}^{n_{CH}} SR(k, i) \quad (26)$$

L'hydrogramme du ruissellement déterminé par l'équation 45 est calculée de la façon suivante

$$Q_R(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^{n_{ISO}} P_B(t - k + 1) SR(k) \quad \text{pour } (t - k + 1) > 0 \quad (27)$$

L'histogramme des surfaces réduites en fonction du temps représente réellement la réponse unitaire du bassin. Si l'intensité de la pluie est égale à l'unité, l'hydrogramme de ruissellement est représenté par l'histogramme des surfaces réduites à la conversion d'unité près. C'est pourquoi la considération des surfaces réduites en fonction du temps de transfert isochronique comme étant la signature hydrologique du bassin n'est pas un abus de langage car elle définit réellement l'identité hydrologique du bassin.

Si l'on dispose d'épisode de crue unimodale bien isolée, on peut reconstituer la réponse unitaire par déconvolution et l'utiliser directement et indépendamment de la cartographie numérique.

VI. APPLICATIONS:

- La reconstitution des hydrogrammes de crues: dite aussi *simulation*, cette opération consiste à établir une série chronologique du débit de la rivière à l'exutoire d'un bassin à partir de la relation Pluie-Débit sur base de pluie mesurée.

- La prédétermination des crues de projet: consiste à simuler une crue particulière correspondant à une fréquence d'occurrence caractéristique donnée, connue sous la dénomination de *périodes de retour*.

- La prévision des crues: consiste à déterminer le débit de la rivière à un moment futur à partir de différentes mesures antérieures et au moment de la prévision.

- Ajustement des paramètres: consiste à la recherche des valeurs des paramètres de la relation Pluie-Débit en faisant correspondre au mieux les débits simulés et les débits mesurés

Références bibliographiques

Batardy J., 1984; L'élaboration d'un modèle Hydrologique conceptuel maillé pour la prévision des débits en temps réel. Application au bassin versant de la Lesse à Daverdisse; Rapport final, s.a. L.G.R. n.v.; Athus, 245 pp.

Chow V.T., Maidment D., 1988; Applied Hydrology; Mc Graw-Hill, 251 pp.

- Cunge J.A.**, 1969; On the subject of flood propagation method (Muskingum method); J. Hydraulic research; 7, n:2.
- Gill M.A.**, 1978; Flood routing by Muskingum method; Journal of Hydrology; 36, 353-363.
- Linsley R.K., Franzini J.B., Freyberg D.L. & Tchobanoglous G.**, 1992; Water resources Engineering, 4th edition; McGraw-Hill, 841 pp.
- Randriamaherisoa A.J.**, 1990; Le relief et le modèle maillé. Proc. Symp. Inter. "Utilités et limites des modèles en Hydrologie"; ORSTOM; Montpellier; France.
- Randriamaherisoa A.J.**, 1993; MHM-Modèle Hydrologique Maillé et Système d'Information Géographique; Thèse de Doctorat; Unité de Génie Rural, Université Catholique de Louvain; 178 pp.
- Randriamaherisoa A.J. et Persoons E.**, 1992; Application de la cartographie à l'analyse des conséquences du déboisement des bassins versant pour l'hydrologie; Journée d'études: Cartographie numérique et analyses environnementales; Société de Génie Rural; Belgique
- Randriamaherisoa A.J. et Persoons E.**, 1994; Notions théoriques liées au logiciel MHM; Notes de cours; Unité de Génie Rural; Université Catholique de Louvain, 24 pp.