

PARTIE II

Cartographie des ressources en eau

7

Cartographie des fractures d'un réservoir hydrogéologique en milieu volcanique à partir de données HRV de SPOT contrôlées sur le terrain (basaltes miocènes de Djibouti)

FRANÇOIS ARTHAUD* et MOHAMED JALLUDIN**

**Laboratoire de géologie structurale appliquée, case 058, Université des sciences et techniques du Languedoc (USTL), 34095 Montpellier cedex 05, France; téléphone : (33) 67-14-32-45; télécopie : (33) 67-54-30-79*

***Laboratoire d'hydrogéologie, Institut supérieur d'études et de recherches scientifiques et techniques (ISERST), B.P. 486, République de Djibouti; téléphone (253) 35-27-95; télécopie : (253) 35-48-12*

Résumé

Le site expérimental des basaltes du Dalha a été choisi pour effectuer essentiellement l'analyse géométrique du réseau de fissures de surface, étudié sur une couverture stéréoscopique SPOT à l'échelle du 1:200 000 où les discontinuités tectoniques sont marquées par des reliefs de failles plus ou moins régularisés, par les perturbations du réseau hydrographique et par des linéaments indéterminés. Le traitement statistique de la carte de fractures permet de reconnaître quatre familles principales de fractures : N020, EO, N120 et courbes pour les longueurs comprises entre 200 m et à plus de 10 km. Ce travail a été complété sur photos aériennes et sur le terrain par une étude surtout morphotectonique. Le contrôle sur le terrain montre que dans chaque famille il faut tenir compte des données suivantes : âge relatif des failles, valeur du rejet, rejeu récent, phénomènes hydrothermaux syntectoniques, reprise d'érosion, conditionnant fortement le comportement hydraulique des fractures.

1. Introduction

La République de Djibouti (fig. 1) se situe en zone tropicale aride à moins de 200 mm de précipitation par an. L'alimentation en eau potable de ses populations dépend à plus de 90% des eaux souterraines. En domaine rural l'eau est généralement exploitée par des puits peu profonds captant dans les nappes alluviales d'inféoflux, alors que des forages profonds sont nécessaires pour les grandes villes afin d'assurer les besoins en eau élevés.

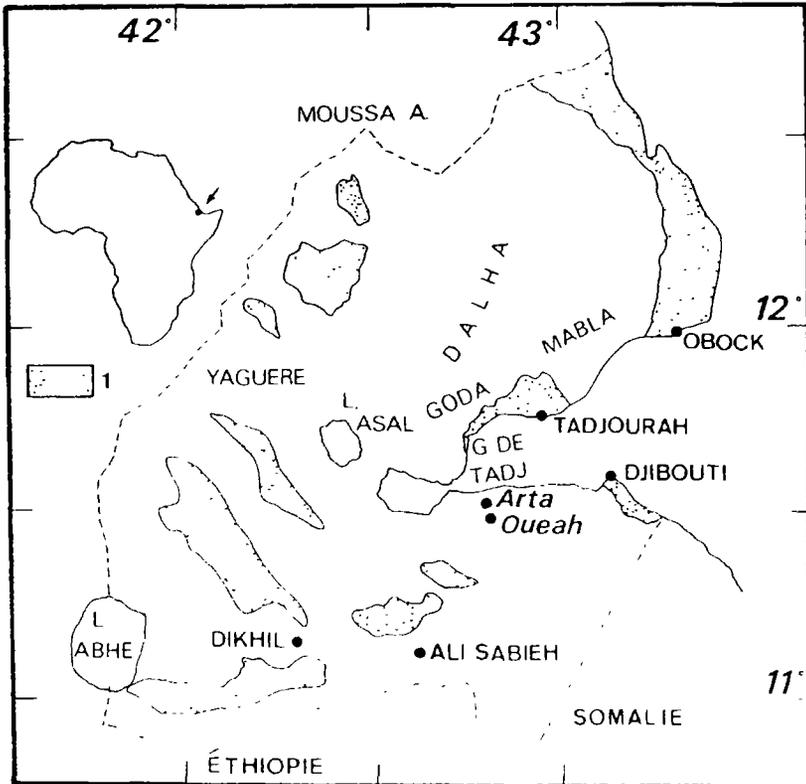


Figure 1. Carte de localisation; 1) principales plaines

La majeure partie du sol djiboutien est constituée de roches volcaniques et les recherches en eaux souterraines ont de plus en plus accès sur ces formations géologiques dont la structure est très hétérogène. La localisation des forages et l'évaluation des potentialités de ces formations sont intimement liées à leur fracturation.

En ce sens, le site expérimental des basaltes du Dalha a été sélectionné en raison des besoins en eau immédiats, des problèmes dus à son exploitation intensif au niveau de certains captages et de la disponibilité des données géologiques et hydrogéologiques. L'étude porte sur la reconnaissance de la fracturation à partir des tirages photographiques au 1:200 000 d'images satellitaires HRV de SPOT stéréoscopiques. Sur la base d'une analyse statistique du champ de fractures, on effectue une étude de terrain associée aux observations des photos aériennes au 1:30 000 afin d'établir une caractérisation qualitative des fractures et leur participation dans la perméabilité du réservoir en tenant compte de l'histoire tectonique, de l'altération et de l'hydrothermalisme.

2. Géométrie d'ensemble du réservoir

Les basaltes du Dalha au sud du golfe de Tadjourah ont une extension de 120 km et décrivent une forme allongée depuis le SO jusqu'au NE couvrant près de 1800 km² (fig. 2). Ils sont recouverts à l'ouest par les basaltes stratoïdes (3,4 - 1 Ma) et les bassins sédimentaires continentaux. À l'est le Dalha repose sur les rhyolites Mabla (15 Ma). Dans la partie nord viennent se juxtaposer contre le Dalha les basaltes somali (9 - 3,4 Ma) et plus au nord les basaltes du golfe (3,4 - 1 Ma) en bordure du golfe de Tadjourah (BARBERI *et al.*, 1974; BLACK *et al.*, 1974; CHESSEX *et al.*, 1974).

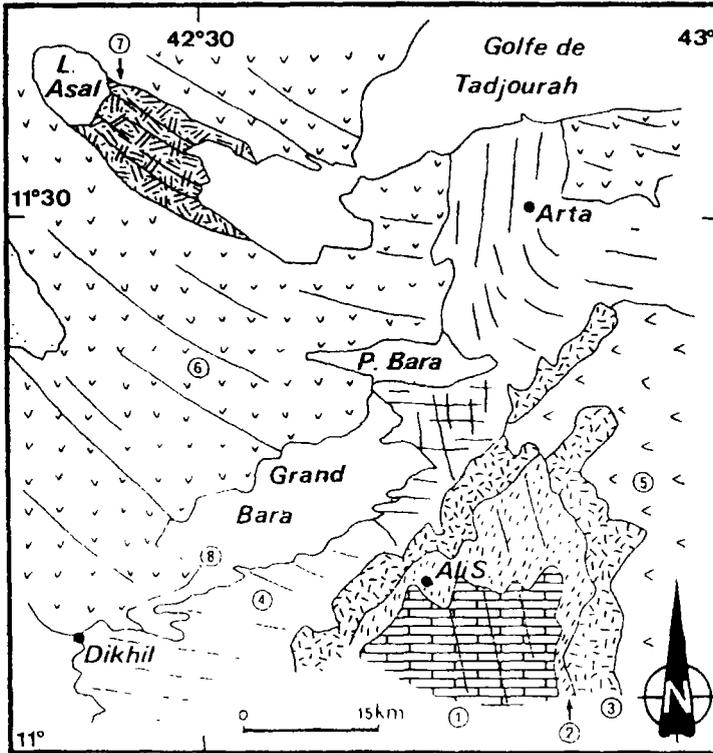


Figure 2. Carte géologique simplifiée; 1) socle sédimentaire jurassique crétacé; 2) basalte ancien; 3) rhyolite Mabla; 4) basalte du Dalha; 5) basalte somali; 6) basalte stratoïde; 7) basalte récent du rift d'Asal; 8) bassin sédimentaire

Cette formation volcanique qui dépasse plusieurs centaines de mètres d'épaisseur dans la zone d'étude (ISERST, 1986) a fait l'objet d'une cartographie de la fracturation sur la base des tirages photographiques à l'échelle du 1:200 000 d'images satellitaires HRV stéréoscopiques. L'intérêt d'une telle opération consiste en l'acquisition d'une carte de fracturation à moindre coût, rapidement et de plus sur un support ayant un format pratique d'utilisation. Cette cartographie vise à mettre en évidence le comportement de la fracturation sur une surface donnée. Le relevé de la fracturation a été effectué à l'aide d'un stéréoscope qui a permis de procéder à deux types d'observations directes et indirectes. La première se caractérise par l'observation de falaises, d'alignements morphologiques ou d'escarpements rectilignes tandis

que les observations indirectes s'identifient par les perturbations du réseau hydrographique, les alignements de cônes ou de coulées volcaniques ainsi que les informations lithologiques.

Des travaux sur images satellitaires ont permis essentiellement d'analyser les structures d'ensemble à l'échelle de la tectonique des plaques (BANNERT, 1972; KRONBERG *et al.*, 1974). Récemment les images HRV ont été utilisées dans la dépression Afar pour reconnaître des accidents tectoniques (TAPPONIER *et al.*, 1990).

La carte de fracturation des basaltes du Dalha ainsi obtenue nous permet de distinguer 5 ensembles à extension variable (fig. 3) où la fracturation semble se comporter différemment en orientation et en dimension.

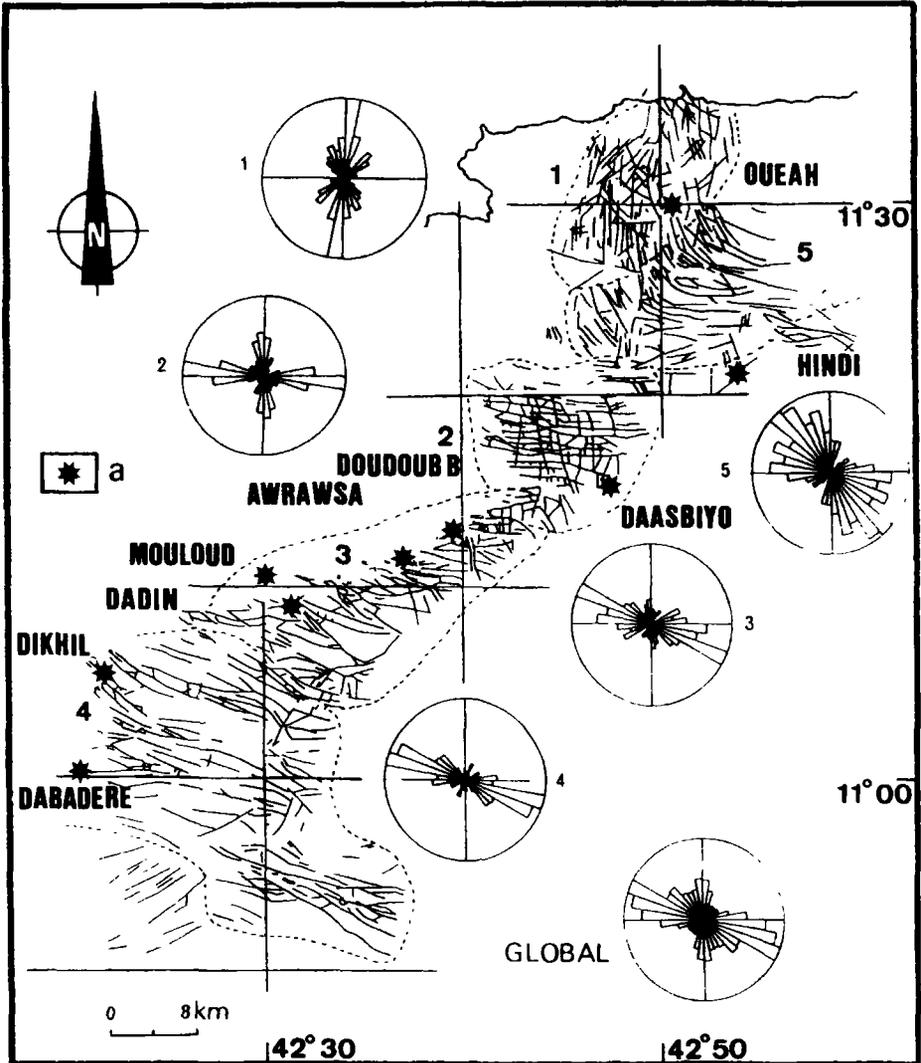


Figure 3. Carte de fracturation des basaltes du Dalha, d'après les images SPOT au 1:200 000; a) champs de captage

Afin de détecter d'éventuelles différences significatives entre les familles de fractures au sein des différentes zones et de les comparer, la fracturation a été numérisée à l'aide du programme RAFNUM et traitée ensuite par le programme RAFORT (RAZACK, 1984). On obtient de cette manière les rosaces, soit les histogrammes directionnels relatifs à chaque zone et pour la fracturation globale.

Les directions principales de fracturation dans la zone 1 sont NS, N050 et N150. Les fractures semblent relativement petites et serrées. Celles EO sont longues mais apparaissent discrètement sur l'ensemble de la zone. Le relief est marqué par des oueds encaissés NS et une érosion active importante.

Dans la zone 2 la fracturation forme un réseau plus ou moins régulier de fractures principalement N160-180 moins fréquentes, recoupées par des directions EO. Le basalte se présente sous forme de blocs d'altitude assez uniforme délimités par les oueds.

Dans la zone 3 les axes principaux de fracturation sont EO et N110-130. Cette zone forme une bande allongée qui s'élargit du NE vers le SO. Parallèlement, des blocs à relief émoussé deviennent de plus en plus allongés. L'ensemble est recoupé par des fractures NS, N060-070 de petites dimensions.

La zone 4 ressemble à la précédente à ceci près que la direction principale de fracturation est N100-120. Certaines fractures dépassent 10 km en longueur.

La fracturation de la cinquième zone se caractérise particulièrement par des arcs elliptiques ayant un foyer vers le golfe de Tadjourah. Elle affecte des reliefs élevés et très escarpés.

L'histogramme directionnel de la fracturation globale indique un axe principal de fracturation dans la fourchette N090-120, mais comme mentionné ci-dessus, chaque zone, en fait, se caractérise par son champ de fractures spécifique.

3. Fracturation dans le réservoir et son rôle hydrogéologique

Le Dalha se compose d'empilements de coulées de basalte de quelques mètres d'épaisseur, séparées par les bases de coulées, qui peuvent se présenter sous forme de brèches et des paléosols. L'ensemble est interstratifié avec des niveaux de scories et parfois des niveaux sédimentaires. Les coulées ont généralement subi une fissuration due au refroidissement lors de la mise en place. Cette stratification dans la formation des basaltes du Dalha introduit une perméabilité dans le plan horizontal.

La fracturation qui affecte cette séquence joue donc un rôle capital dans la perméabilité globale du réservoir. Cependant, il est possible de répertorier un certain nombre de facteurs qui interviennent en faveur ou en défaveur de la perméabilité de ce réservoir volcanique.

La tectonique cassante récente et actuelle, avec la contrainte principale σ_1 dans la direction verticale, permettent l'ouverture de nouvelles fractures et le rejeu des failles préexistantes. Elle permet aussi la juxtaposition de strates de perméabilités identiques ou différentes. Les mouvements verticaux entraînent le plus souvent une réouverture des fractures anciennes colmatées.

Par ailleurs, il est fréquent d'observer les effets de l'hydrothermalisme qui est d'autant plus important que la fracture est ancienne et inactivée. Il colmate les fractures partiellement ou complètement par la cristallisation des minéraux secondaires (calcite, zéolite, etc.). Les événements tectoniques qui s'accompagnent de volcanisme provoquent l'injection de produits volcaniques dans les fractures ouvertes (dykes). La perméabilité de la fracture dépendra alors du taux de fissuration par refroidissement de la lave. De même la stabilité de la formation géologique par rapport au niveau de base conduit à une altération importante de la roche.

4. Principaux résultats de terrain

Les basaltes du Dalha affleurent dans la dépression Afar qui est le résultat de la jonction triple (MC KENZIE *et al.*, 1970) constituée par les rifts de la mer Rouge, du golfe d'Aden et de l'Est Africain, fonctionnant depuis 25-30 Ma.

L'histoire tectonique complexe au cours de laquelle se sont succédées plusieurs phases de contraintes tectoniques (ARTHAUD et CHOUKROUNE, 1976; ARTHAUD *et al.*, 1980a,b; GAULIER, 1990) locales et régionales, est à l'origine du système de fissures observé. Il n'est pas toujours aisé d'affecter à une ou plusieurs familles de fractures un champ de contraintes tectoniques, donc une chronologie, étant donné qu'il faille tenir compte des rejeux de fractures préexistantes. De plus en raison du degré d'altération et d'érosion des basaltes du Dalha les observations microtectoniques, pour déterminer les contraintes tectoniques, sont rendues difficiles, excepté dans la zone 1 (ARTHAUD *et al.*, 1980b).

Pour identifier dans le champ de fractures global celles ayant un rôle dans la perméabilité du réservoir il s'avère nécessaire de rechercher les critères de failles actives ou réactivées à l'aide des photos aériennes au 1:30 000 et sur le terrain. Cette démarche est indispensable dans le cadre d'un programme concernant par exemple la localisation des forages ou intéressant l'évaluation du bilan hydrogéologique.

Les observations de terrain sur la fracturation des basaltes du Dalha sont multiples et pourront être décrites au travers de schémas explicatifs au cours de notre exposé.

Au NE de Dikhil (fig. 4) la morphologie d'un relief de faille complètement régularisé (a) montre une importante altération en boule des basaltes et le dépôt des éboulis provenant de l'érosion du relief. La réactivation de la faille (b) modifie la géomorphologie du site et à la place du relief émoussé apparaît un escarpement de basalte recouvert d'éboulis vifs.

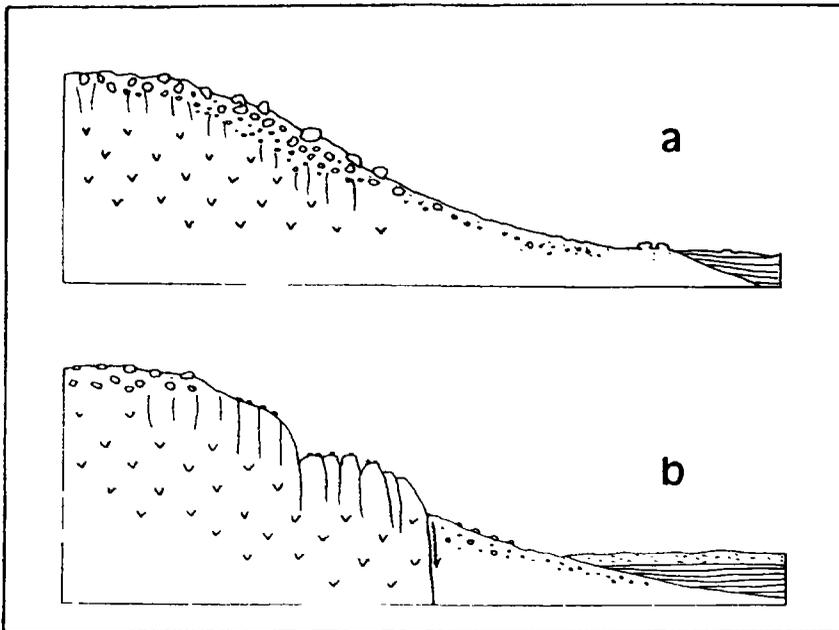


Figure 4. Réactivation de faille au NE de Dikhil; a) relief de faille totalement régularisé; b) réactivation de la faille et apparition d'un escarpement

La reprise d'une fracture antérieure peut être marquée à la base d'un relief par une série de facettes où affleure le basalte comme le long de l'oued Awrawsa (fig. 5). Le basalte se trouve recouvert en certains endroits par des éboulis récents qui se sont mis en place après le rejeu de la faille.

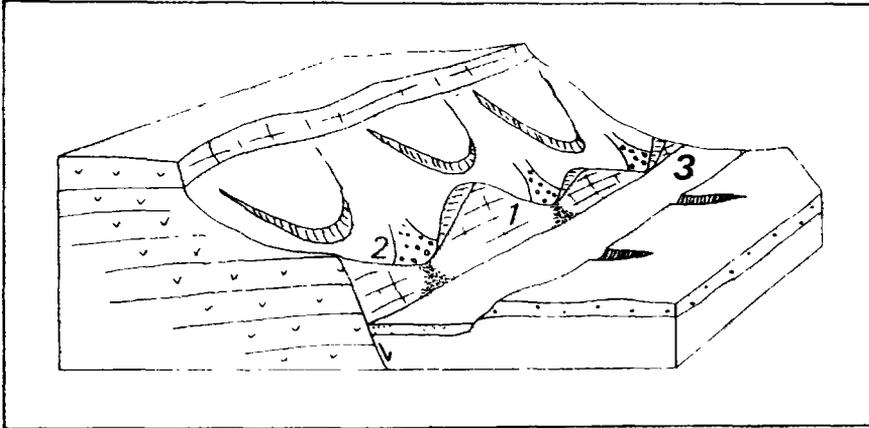


Figure 5. Réactivation de faille : oued Awrawsa; 1) facettes marquant l'escarpement de faille après sa réactivation; 2) reprise d'érosion récente postérieure à l'escarpement; 3) lit d'oued

Dans le secteur NE de la zone d'étude (fig. 6) on peut se rendre compte sur carte et en bloc diagramme que l'escarpement majeur (7) ne constitue que l'effet actif de l'érosion d'où les éboulis en volume conséquent à la base. L'escarpement de faille apparaît (6) au pied de la grande falaise sous forme de lambeaux, marqués par de petits reliefs à la base desquels se déposent les matériels fins (3) amenés par les petits cours d'eau créés récemment.

Les observations de terrain et sur images HRV des failles affectant le sédimentaire récent confirment la création et/ou la réactivation de certaines familles de fractures (cônes de déjection à l'ouest de Tadjourah, Daasbyo, région NE de la zone d'étude).

Le cas de perturbation du réseau hydrographique s'observe dans la région de Dadin où le jeu de la faille normale provoque un détournement du cours de l'oued (fig. 7). Celui-ci, qui s'écoulait en (2) est venu se rabattre contre la faille (3). La faille normale a par ailleurs été mise en évidence (fig. 8) dans le cadre d'un projet hydrogéologique (JALLUDIN *et al.*, 1990).

L'analyse de l'interférence de plusieurs familles de fractures peut aboutir à la chronologie relative de leur mise en place, lorsque le stade de fracturation est récent (fig. 9). Toutefois, dans un stade avancé d'érosion et d'altération cette analyse ne permet pas nécessairement de démontrer cette chronologie des différentes familles de fractures (fig. 10).

Dans le secteur de Oueah, sur le bord méridional de la dorsale du golfe de Tadjourah, des mouvements verticaux de grande ampleur sont mis en évidence par les alluvions perchées dans les vallées encaissées et les glissements de terrain indiquant une érosion rapide. Ces mouvements permettent la réactivation de fractures préexistantes repérées dans le paysage par le décalage des terrasses anciennes et les éboulis vifs par-dessus ceux de la phase antérieure (fig. 11).

Enfin, la reprise ou la nouvelle mise en place d'une famille de fractures peut s'accompagner d'une injection de matériel volcanique. Ainsi à Dabadère il est possible de noter en surface des alignements de cônes volcaniques de différentes dimensions le long et sur le croisement des

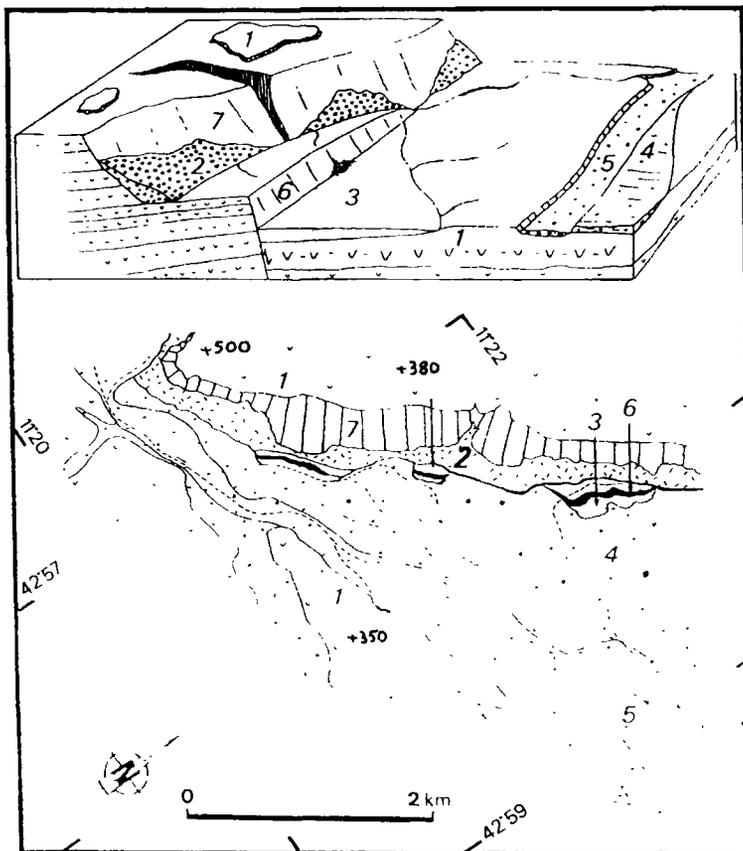


Figure 6. Réactivation de faille : Hindi; 1) basalte stratoïde; 2) éboulis dus à l'érosion active de la falaise; 3) dépôts fins au pied de l'escarpement de faille et amenés par les cours d'oueds récents; 4) terrasse alluviale ancienne; 5) oued principal; 6) escarpement de faille récent; 7) falaise constituée de basalte du Dalha

fractures. Localement ces fractures jouent plutôt le rôle de voiles étanches, à moins qu'une fissuration significative n'existe dans ces dykes, d'où l'intérêt de procéder aux travaux détaillés de terrain.

5. Conclusion

L'information fournie par les images HRV au 1:200 000 sur la fracturation des basaltes du Dalha est essentielle pour connaître le comportement et l'agencement de fractures en surface. Le document cartographique obtenu à partir de ces données de fracturation permet ainsi d'orienter la prospection hydrogéologique à plus grande échelle (ex. 1:30 000 et le terrain), et par conséquent, de vérifier la contribution de chaque famille de fractures dans l'hydrodynamique souterraine. Effectivement le rôle hydraulique des fractures est déterminé

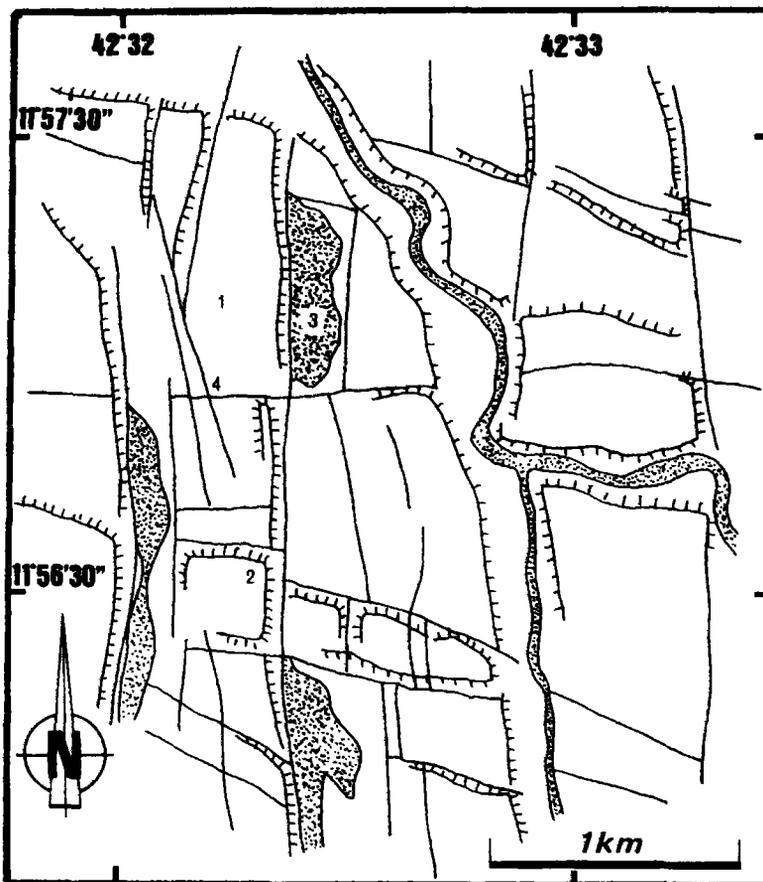


Figure 9. Makarassou; 1) basalte stratoïde; 2) falaise; 3) dépôt de sédiments fins récents; 4) fractures

par la tectonique, les mouvements verticaux, l'altération et l'hydrothermalisme, autant de facteurs qui ne peuvent être identifiés que par l'étude de terrain.

À ce stade de l'étude et dans une optique de modélisation de l'aquifère volcanique fissuré des basaltes du Dalha, il paraît utile de rechercher une éventuelle structure de la fracturation. Cette démarche sera rendue possible à l'aide des méthodes géostatistiques qui sont appliquées de plus en plus en sciences de la terre.

6. Remerciements

Les différentes missions en République de Djibouti et en France, ainsi que le programme de recherche sont financés par le Ministère de la coopération. Nous remercions tout particulièrement la Mission de coopération française à Djibouti pour la gestion du programme, et la Direction de l'ISERST pour tous les appuis logistiques mis à notre disposition.

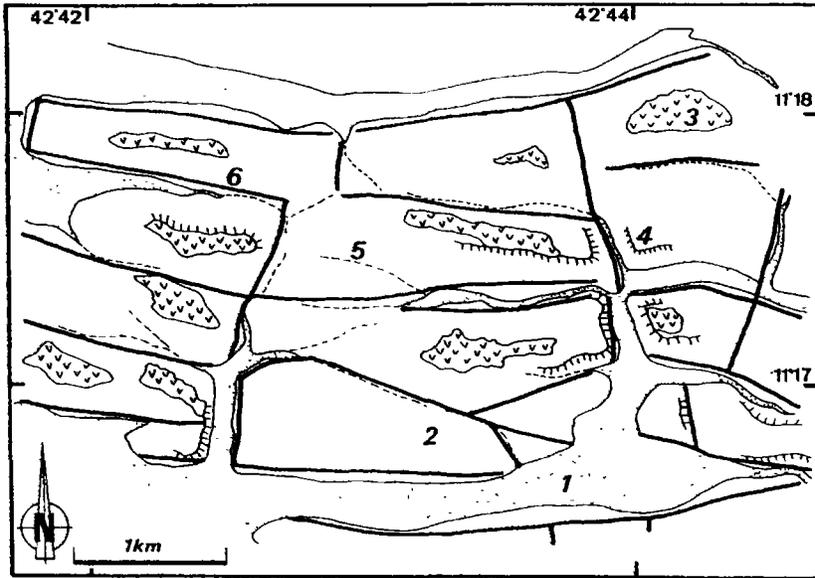


Figure 10. Sud du Petit Bara; 1) roches sédimentaires; 2) basalte du Dalha; 3) basalte stratoïde; 4) falaise; 5) cours d'eau; 6) fractures

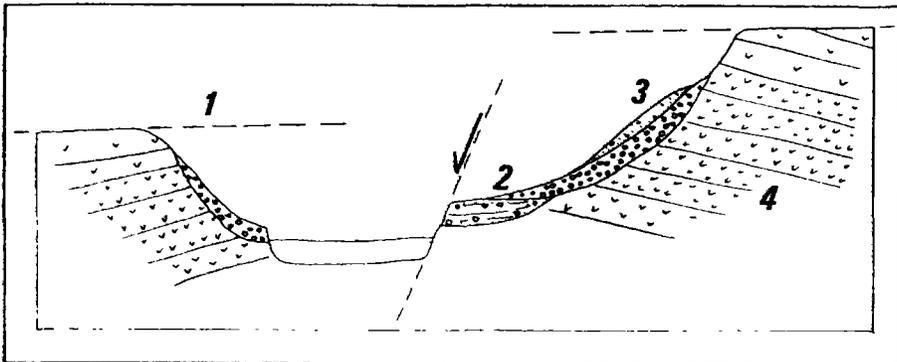


Figure 11. Mouvements verticaux : région de Oueah; 1) niveau de la surface d'érosion décalé; 2) éboulis anciens; 3) éboulis récents; 4) basalte du Dalha

7. Références

- ARTHAUD, F. et CHOUKROUNE, P. 1976. Mise en évidence d'une phase de compression à 3,5 Ma. séparant deux épisodes d'ouvertures du rift océanique de Tadjourah (TFAI). Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, t. 283, p.13-16.
- ARTHAUD, F., CHOUKROUNE, P. et ROBINEAU, B. 1980a. Tectonique, microtectonique et évolution structurale du golfe de Tadjourah et du sud de la dépression Afar (République de Djibouti). Bulletin de la Société géologique de France, t. XXII, n° 6, p. 901-908.

- ARTHAUD, F., CHOUKROUNE, P. et ROBINEAU, B. 1980b. Évolution structurale de la zone transformante d'Arta (République de Djibouti). Bulletin de la Société géologique de France, t. XXII, n° 6, p. 909-915.
- BANNERT, D. 1972. Plate drift in the Red Sea region analysed from space photograph. Proceedings of the seventh international symposium on remote sensing of environment, Michigan, 17-21 May 1971, p. 1261-1271.
- BARBERI, F., FERRARA, G., SANTACROCE, R. and VARET, J. 1974. Structural evolution of the Afar triple junction. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, April 1-6 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 38-54.
- BLACK, R., MORTON, W. H. and REX, D. C. 1974. Block tilting and volcanism within the Afar in the light of recent K/Ar age data. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, April 1-6 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 296-299.
- CHESSEX, R., DELALOYE, M., MULLER, M. and WEIDMANN, M. 1974. Evolution of the volcanic region of Ali-Sabieh (TFAI), in light of K/Ar age determination. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, April 1-6 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 228-231.
- GAULIER, J.-M. 1990. De l'extension intracontinentale à l'accrétion océanique : géodynamique de la mer Rouge. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 363 p.
- ISERT (Institut supérieur d'études et de recherches scientifiques et techniques) 1986. Carte géologique d'Ali-Sabieh, Notice géologique.
- JALLUDIN, M., ANIS, A., IDRIS, G., MOHAMED, I., SANJUAN, B., GAULIER, J.-M., ZOTSKINA, E., GAFFANEH, A. et HAGA, A. 1990. Alimentation en eau potable de la ville d'Ali-Sabieh. Sciences et techniques, n° 5, p. 13-21.
- KRONBERG, P., SCHONFELD, M., GUNTHER, R. and TSOMBOS, P. 1974. ERTS-1 data on the geology and tectonics of the Afar/Ethiopia and adjacent regions. Afar Depression of Ethiopia, Bad Bergzabern, Federal Republic of Germany, 1-6 April 1974, Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1, p. 19-27.
- MCKENZIE, D. P., DAVIES, D. and MOLNAR, P. 1970. Plate tectonics of the Red Sea and East Africa. Nature, vol. 226, p. 243-248.
- RAZACK, M. 1984. Applications de méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse de doctorat d'État, Université des sciences et techniques du Languedoc, 384 p.
- TAPPONIER, P., ARMIJO, R., MANIGHETTI, I. and COURTILOT, V. 1990. Bookshelf faulting and horizontal block rotations between overlapping rifts in southern Afar. Geophysical Research Letters, vol. 17, n° 1, p. 1-4.

8

Les facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso : l'exemple de Pobé-Mengao

SAMUEL NAKOLENDOUSSE*, ALAIN NINDAOUA SAVADOGO*
et A. ROULEAU**

**Laboratoire d'hydrogéologie, Faculté des sciences et techniques, B.P. 7021, Université de Ouagadougou, Burkina Faso; téléphone : (226) 307159; télécopie : (226) 307242*

***Centre d'études sur les substances minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada, G7H 2B1; téléphone : (418) 545 5348; télécopie : (418) 545 5012*

Résumé

La sécheresse qui sévit depuis vingt ans au Sahel, la non-disponibilité permanente des eaux de surface, la nécessité de se référer aux eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable des villes ont rendu impérative la recherche sur les facteurs climatiques et hydrogéologiques conduisant à l'obtention de débits élevés (plus de 5 m³/heure) dans les formations cristallines du Burkina Faso. Grâce au soutien du Centre de recherches pour le développement international (C.R.D.I.), le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou et l'Université du Québec à Chicoutimi ont étudié une vingtaine de sites sur lesquels existent déjà forage à gros débit et forage à faible débit afin d'identifier *post mortem* les conditions de succès ou d'échec de l'implantation de ces forages. Les méthodes suivantes ont été mises en oeuvre : 1) la téledétection, pour la cartographie des linéaments assimilables aux failles affectant le substratum; 2) la géologie, la géophysique et la chimie des eaux (analyses isotopiques), qui ont porté respectivement sur la pétrographie et la tectonique, la localisation précise des failles et la quantité et le renouvellement des eaux souterraines. L'étude du site de Pobé-Mengao que nous prenons comme exemple ici ainsi que les résultats acquis sur les autres sites ont permis de retenir comme facteurs de productivité les éléments suivants : l'hétérogénéité du faciès

granitique, la longueur plurikilométrique de la faille exploitée, son injection par des filons de quartz ou de pegmatites, l'existence de nombreux filons relais sub-horizontaux, l'importante épaisseur de la frange fissurée du substratum et la réalimentation artificielle de la nappe par les eaux des mares aux caïmans.

1. Introduction

La sécheresse qui sévit au Sahel depuis les années 1970 et les conditions géomorphologiques et hydrogéologiques défavorables y ont rendu complexes les problèmes d'alimentation en eau potable des villages et des villes situés dans les régions cristallines du Burkina Faso. Pour les villes en particulier, les forages sollicités pour les adductions d'eau doivent avoir des débits supérieurs à 5 m³/heure. Le mode de gisement des eaux souterraines dans les formations de socle de l'Afrique de l'Ouest est maintenant bien connu (MATHIEZ et HUOT, 1968; ENGALENC, 1978-1979; SAVADOGO, 1984). Il s'agit souvent de poches discontinues d'extension variable liées aux fractures et à l'altération affectant le substratum cristallin. Les débits moyens obtenus dans ces formations se situent entre 1 et 2,5 m³/heure. Dans ces conditions, quels sont les facteurs climatiques, géomorphologiques et hydrogéologiques qui président à l'obtention de débits unitaires élevés dans les formations cristallines du socle qui occupent les quatre cinquième du territoire burkinabè? Telle est la question à laquelle nous tenterons de répondre ici à travers l'étude du site de Pobé-Mengao et en nous appuyant aussi sur les résultats acquis sur vingt autres sites étudiés dans le cadre du projet de recherche intitulé «Étude des facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso». Ce projet de recherche a été financé par le C.R.D.I. et exécuté par le Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou et l'Université du Québec à Chicoutimi.

2. Méthodologie et résultats

Nous avons choisi d'appréhender le problème en étudiant *a posteriori* sur le même site deux forages en production dont l'un à haut rendement et l'autre à faible débit ou négatif c'est-à-dire sec. Les méthodes mises en oeuvre étaient : la télédétection, la géologie, la géophysique et enfin la chimie des eaux.

2.1. La télédétection

Tous les sites étudiés sont situés sur le môle granitigmatique de Ouagadougou, partie nord de la dorsale de Man. Quand au site de Pobé-Mengao choisi comme exemple, il est situé au nord du Burkina Faso sur l'axe Ouahigouya-Djibo et à 25 km au sud de cette dernière localité. Il est donc en pleine zone sahélienne et ne reçoit que 500 mm de pluie par an. Le site est couvert par l'image satellitaire TM de Landsat 195-51 du 21 janvier 1987 (fig. 1). Cette dernière figure montre également l'ensemble des images et sous-images utilisées dans le cadre du projet.

L'analyse en télédétection a essentiellement consisté à tracer d'abord les linéaments d'importance régionale sur l'image satellitaire sur support papier photographique (canaux 7, 4 et 2).

Les images numériques des mêmes scènes, comportant l'ensemble des canaux TM (1 à 7), ont ensuite été utilisées pour réaliser des compositions multibandes (tab. I).

En sus de l'analyse par compositions multibandes standard et adaptées, plusieurs traitements ont été testés afin de cerner celui qui procurerait la meilleure accentuation des linéaments

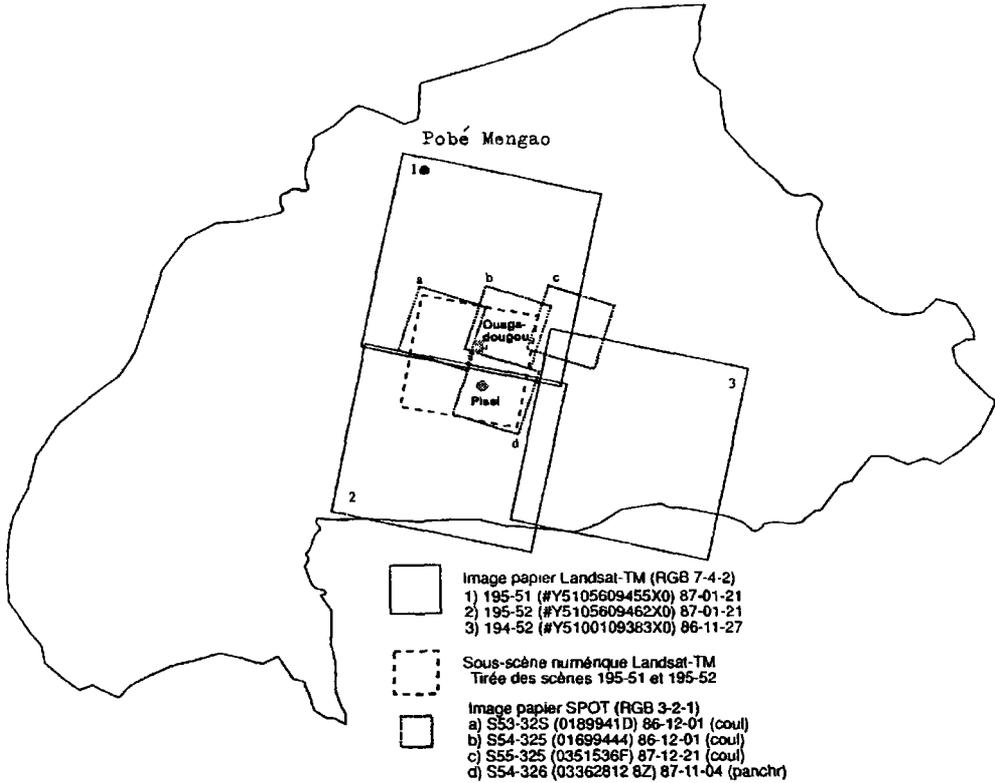


Figure 1. Localisation des images satellitaires acquises pour le projet «Productivité des aquifères du socle au Burkina Faso»

Tableau I. Les produits numériques interprétés

Les compositions multibandes (bandes TM en rouge, vert et bleu)
Composition couleurs conventionnelles 3-2-1
Composition fausses couleurs 4-3-2
Composition conventionnelle de végétation 5-4-3
Composition conventionnelle de végétation 5-3-4
Les algorithmes mathématiques en monochrome
Indice géologique Seuthé <i>et al.</i> (1985) 7/5
Analyse en composantes principales CP2
Les images filtrées en monochrome (filtres appliqués sur la composante principale # 2 (CP2))
CP2 + filtre passe-bas de moyenne (PBM)
CP2 + PBM + filtre directionnel EO
CP2 + PBM + filtre directionnel NS
CP2 + PBM + filtre directionnel NO-SE
CP2 + PBM + filtre directionnel NE-SO

(tab. I). À l'instar de MOORE et WALTZ (1983), nous avons privilégié dans cette étude la technique de rehaussement qui fait appel à une série d'opérations successives à partir d'un néo-canal généré par analyse en composantes principales. Cette analyse en composantes principales utilisant l'ensemble des bandes donne des résultats intéressants sur la deuxième composante (CP2) qui représente à peine 5% de l'information fournie par le capteur TM. La première composante principale a été éliminée en raison de l'information redondante avec celle procurée par les bandes brutes sur lesquelles l'effet des feux de brousse est important. La composante principale numéro 2 (CP2) a donc été retenue comme donnée de base à laquelle nous avons appliqué un filtre passe-bas de moyenne servant de bande d'entrée dans la composition de filtres directionnels de type Sobel (tab. II).

Tableau II. Les filtres directionnels de type Sobel et leurs poids respectifs

Filtre directionnel E-O	1	2	1
	0	0	0
	-1	-2	-1
Filtre directionnel N-S	1	0	-1
	2	0	-2
	1	0	-1
Filtre directionnel NO-SE	0	1	2
	-1	0	1
	-2	-1	0
Filtre directionnel NE-SO	2	1	0
	0	-1	1
	-1	-2	0

Chacune des quatre images filtrées (tirées des 4 directions azimutales) a ensuite été additionnée à la composante principale numéro 2 moyennée pour être interprétée manuellement. Les poids retenus dans la composition du filtre directionnel de type Sobel sont ceux suggérés par Showengerdt, et cotés comme étant les plus performants par YÉSOU *et al.* (1990), auxquels nous avons attribué des orientations adaptées des filtres directionnels de MOORE et WALTZ (1983).

Du point de vue résultats, les compositions multibandes les plus pertinentes demeurent la composition conventionnelle TM5, TM4 et TM3 et la composition infrarouge fausses couleurs TM4, TM3 et TM2 tandis que les traitements qui procurent les meilleurs résultats se révèlent être la deuxième composante principale sur laquelle un filtre passe-bas de moyenne est appliqué.

Le seul rapport de bandes utilisé pour rehausser les contrastes fut celui TM7/TM5. Il a apporté une information intéressante proche de celle fournie par la deuxième composante principale.

L'information résultante de la CP2 tire sa composition surtout des bandes TM7, TM4 et TM6 et permet de voir de nombreux éléments linéaires. Dans l'ensemble, la CP2 avec filtre passe-bas fournit les meilleurs résultats visuels bien que plusieurs linéaments lui échappent et puissent être repérés à l'aide des diverses compositions multibandes. C'est pourquoi nous avons envisagé l'interprétation des linéaments sous l'angle de la complémentarité des résultats des différents produits. En effet, un linéament peut être non apparent sur une image et être complètement révélé sur une autre qui s'avère très pauvre en quantité d'informations.

À des fins de comparaison, les résultats de l'interprétation numérique ont été confrontés à ceux de l'interprétation analogique des photographies panchromatiques afin d'évaluer les avantages mais aussi les limites.

Les linéaments sur les photographies aériennes sont nettement plus denses que ceux tracés sur l'image satellitaire qui eux sont beaucoup plus importants en longueur; mais on note une bonne superposition entre certains linéaments des images satellitaires et ceux des photographies aériennes (fig. 2). Ces linéaments apparaissent selon deux directions principales : N70-N80° et N120-N130° (fig. 3). Sur les photographies aériennes s'observent également des structures annulaires centrées pratiquement sur le village de Pobé-Mengao et dont la signification géologique reste à préciser. La télédétection a donc permis la mise en évidence et la cartographie des mégafractures d'importance régionale ou sectorielle.

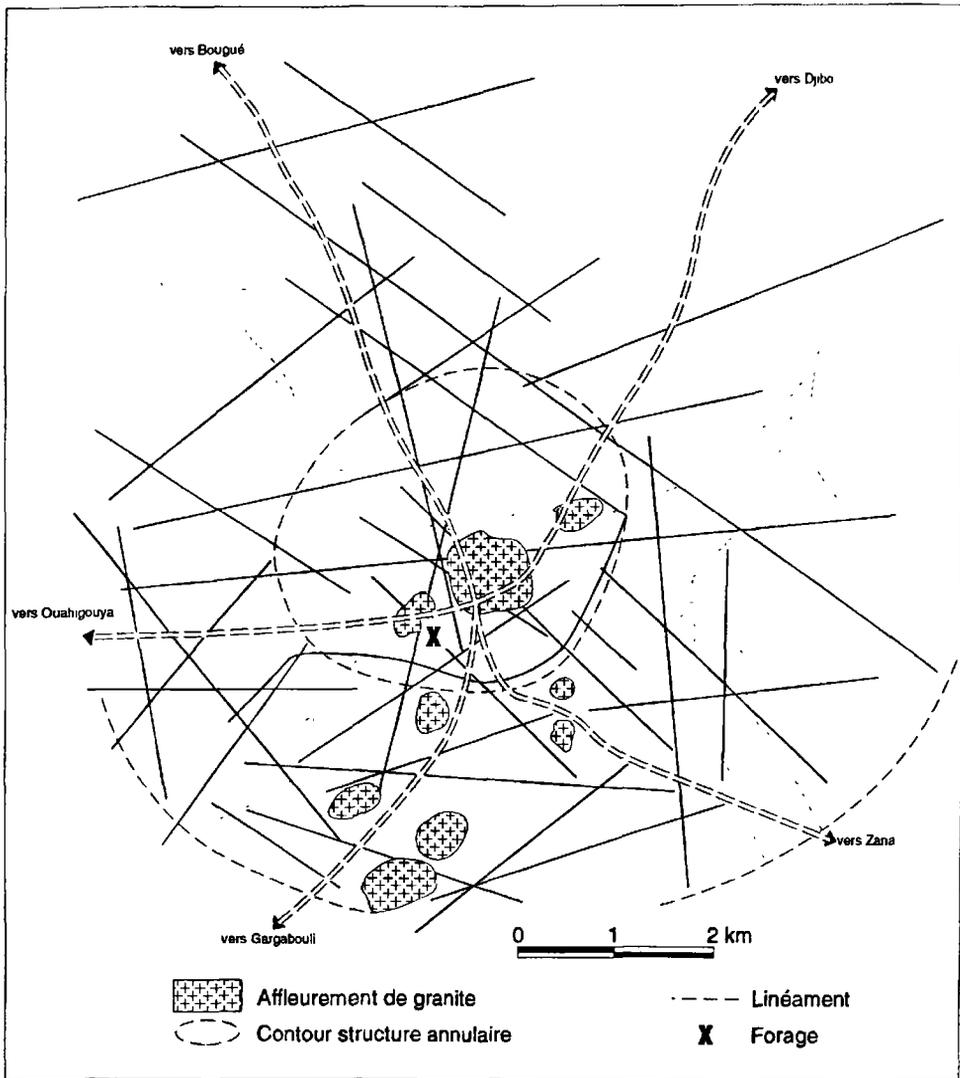


Figure 2. Carte hydrogéologique et tectonique du site de Pobé Mengao

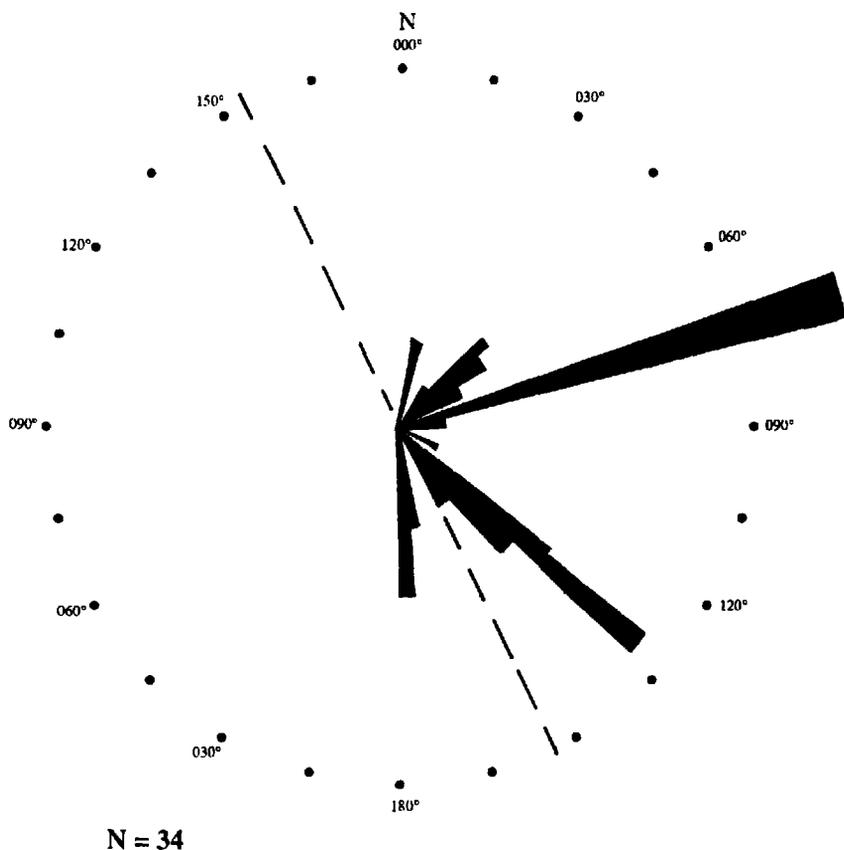


Figure 3. Diagramme de distribution des linéaments

2.2. La géologie et l'hydrogéologie

Le site de Pobé-Mengao appartient au domaine des granites et migmatites libériens décrits par DUCCELLIER et DEFOSSEZ (1949-1950; 1953-1954) comme étant des granites syntectoniques à biotite. Les affleurements sont particulièrement abondants à Pobé-Mengao et permettent de distinguer au nord du village des granites migmatitiques passant vers le sud à des granites plus homogènes à l'intérieur desquels on note, à l'affleurement est du forage très productif que nous avons étudié, des panneaux de migmatite non digérés.

L'étude microtectonique réalisée sur les affleurements indique une prédominance des fractures N60-N70° (fig. 4). Quant aux filons, ils s'injectent souvent selon la direction des failles N140-N160° et plus rarement selon la direction N50-N60° (fig. 5).

Une comparaison des données des images satellitaires et des photographies aériennes avec celles des affleurements laisse apparaître que les fractures les plus fréquentes sur les premières ne le sont pas sur les secondes. De plus, les filons de quartz et de pegmatites n'injectent ni l'une ni l'autre des directions prédominantes sus-mentionnées. On connaît l'importance de l'injection des failles par les filons pour la productivité hydraulique des ouvrages de captage dans les formations de socle cristallin du Burkina Faso (SAVADOGO, 1984).

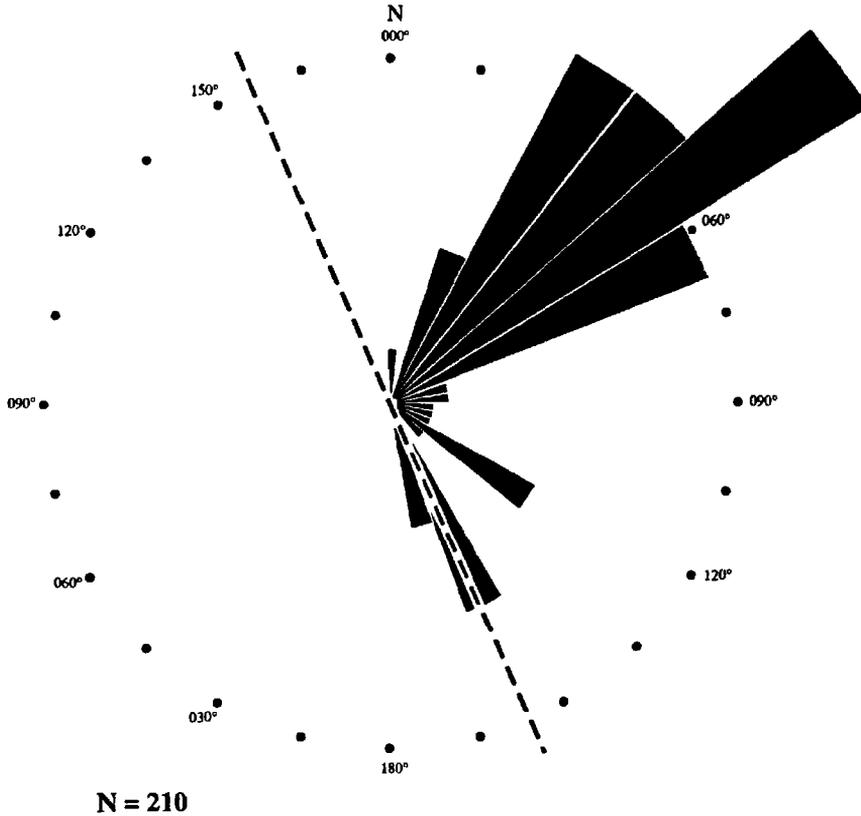


Figure 4. Diagramme de distribution des fractures relevées sur affleurements

Un autre élément hydrogéologique remarquable sur le site de Pobé-Mengao est la présence de filons de quartz sub-horizontaux dans tous les affleurements ainsi que dans tous trous de carrière devenus des mares peuplées de caïmans.

Le site de Pobé-Mengao correspond à une zone de sub-affleurement généralisé comme en attestent l'abondance des affleurements et la présence des sols très sableux. Mais l'exemple de Pobé-Mengao comme celui des nombreux autres sites (Zorgho, Dakaye, Koupéla, Tenkodogo, etc.) montre que si, la grande épaisseur des altérites noyées contribue à accroître les réserves exploitables à long terme voire les débits unitaires (le débit ne dépend-il pas de la transmissivité donc de l'épaisseur de l'aquifère? : $Q = KSi = KLHi = TLi$ avec $Q =$ débit en m^3/s ; $K =$ perméabilité en m/s ; $S =$ section en m^2 ; $L =$ longueur de la section; $H =$ hauteur de la section; $i =$ gradient et $T =$ transmissivité), des débits élevés peuvent très bien se rencontrer dans des zones où le substratum est peu profond. Tout dépend de la présence de drain important lié à l'épaisseur de la frange fissurée du socle induite par les failles.

2.3. La géophysique

Nous avons réalisé en matière de prospection géophysique, des profils de traînée et des sondages électriques et électromagnétiques. Les deux méthodes avaient pour objet de

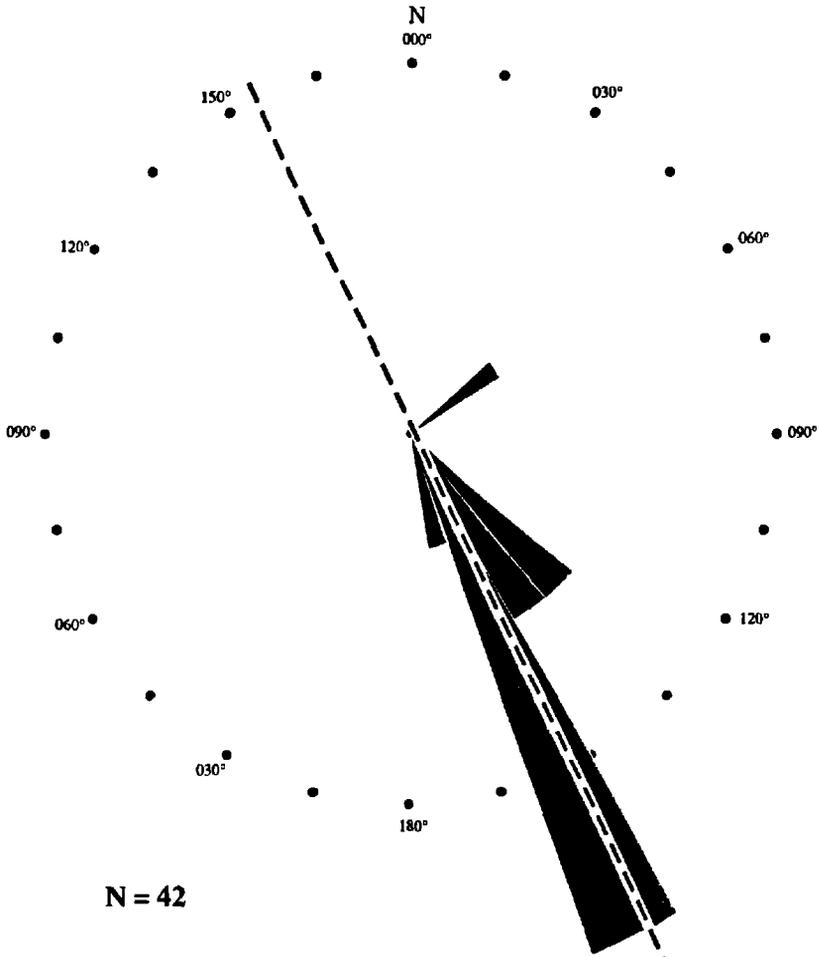


Figure 5. Diagramme de distribution des filons

localiser avec précision les mégafractures vues en télédétection et de permettre l'évaluation de leur extension longitudinale et latérale ainsi que l'épaisseur de la frange fissurée induite. La carte de résistivités apparentes (fig. 6), obtenue avec des longueurs de ligne $AB = 200$ m, $MN = 20$ m, et la carte des pourcentages de champ (fig. 7), réalisée avec une séparation de bobines émetteur-récepteur de 50 m et un pas de 10 m, mettent en évidence deux directions d'anomalie conductrices correspondant aux failles. La première est d'orientation $N50^\circ$ et la seconde $N150^\circ$. La première anomalie conductrice qui n'apparaît pas sur la carte électromagnétique peut être considérée comme secondaire alors que la seconde repérée par les deux méthodes correspond à la direction d'allongement des filons de quartz et de pegmatites. Les mesures rotatoires du champ électromagnétique confirment et précisent cette direction de la faille principale (fig. 8). Cette faille principale a été recoupée par des profils électriques et électromagnétiques sur 3 km et elle présente une extension latérale souvent supérieure à 50 m.

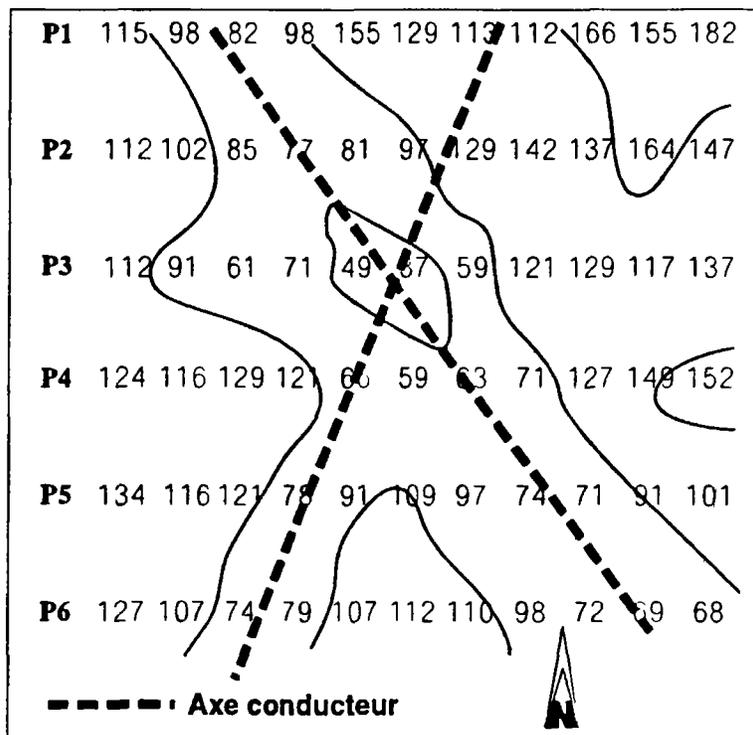


Figure 6. Carte de résistivités apparentes du site de Pobé-Mengao

Les sondages électriques qui donnent des courbes pseudo-trois terrains (fig. 9) (les courbes types rencontrées dans les régions de socle cristallin de l'Afrique de l'Ouest sont des courbes trois terrains en fond de bateau; ici le premier terrain résistant est à peine marqué sur la courbe) indiquent l'existence d'une épaisse frange de roche fissurée, premier facteur de haute productivité hydraulique se traduisant par une remontée finale traînante (SAVADOGO, 1978).

2.4. La chimie des eaux

Les analyses chimiques des eaux indiquent pour Pobé-Mengao une teneur en arsenic de 39,4 ppb (tab. III) et la présence de nitrates qui montre que la nappe qu'exploite le forage est polluée par les eaux des mares aux caïmans qui participent à sa réalimentation. Les teneurs en arsenic ne sont pas négligeables même si elles sont inférieures à celles rencontrées dans quatre des onze eaux de forage analysées. Il y a donc lieu, dans les analyses usuelles des eaux de forage, de doser systématiquement l'arsenic, eu égard à la toxicité de cette substance.

Les teneurs en tritium (tab. IV) montrent que les eaux du forage de Pobé-Mengao malgré la situation géographique du site sont les plus tritiées. Ce qui indique que les eaux souterraines qu'exploite le forage productif de Pobé-Mengao connaissent un bon renouvellement à partir des eaux de pluie.

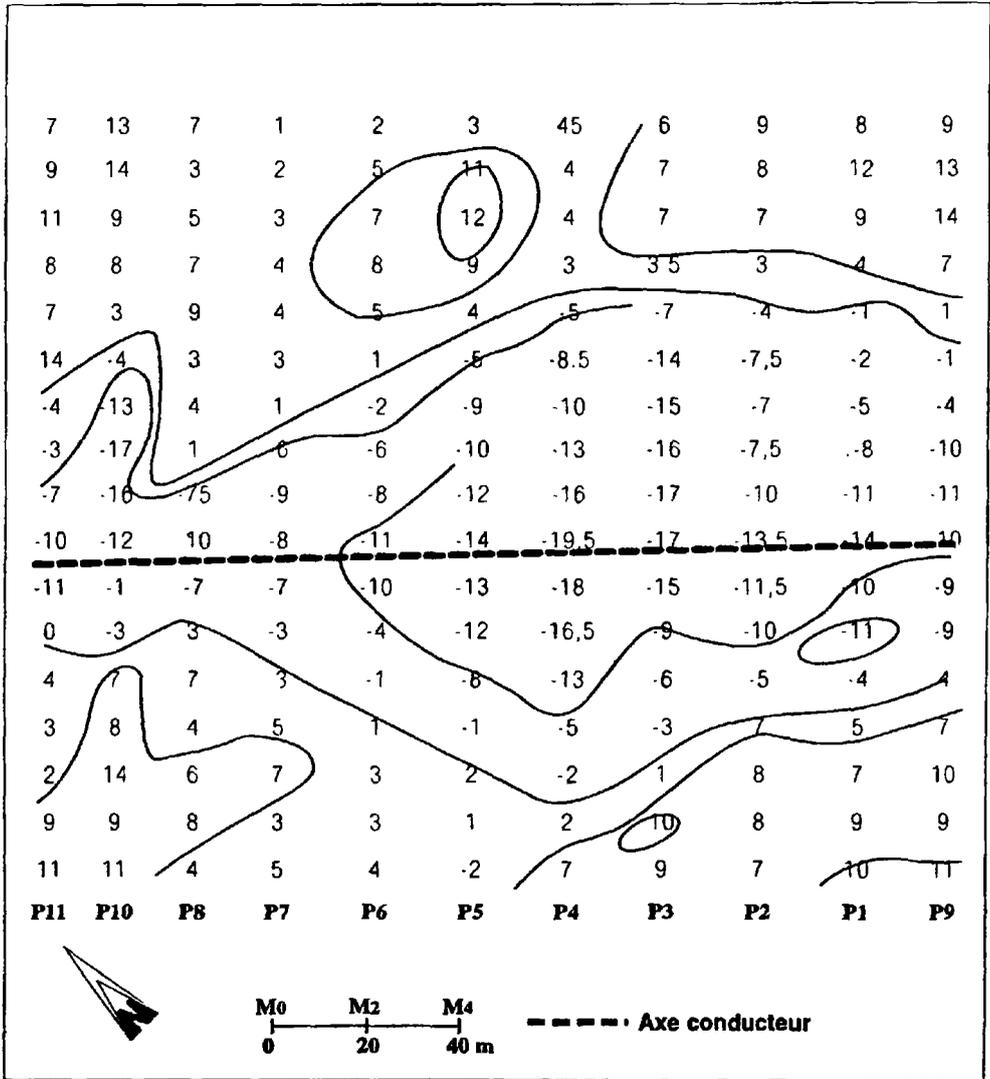


Figure 7. Carte de pourcentage de champ électromagnétique du site de Pobé-Mengao

3. Conclusion

L'étude du site de Pobé-Mengao, comme celles réalisées dans d'autres sites de plusieurs régions du socle cristallin du Burkina Faso, nous permet de dégager, après la mise en oeuvre de la télédétection, de la géologie, de la géophysique et de la chimie des eaux, les facteurs de productivité hydraulique suivants :

- la longueur plurikilométrique (3 km au moins dans le cas de Pobé-Mengao) de la faille sur laquelle est implanté le forage, le recoupement de cette mégafracture par une autre faille au point d'implantation (il s'agit donc d'une intersection de fractures dont une au moins est majeure);

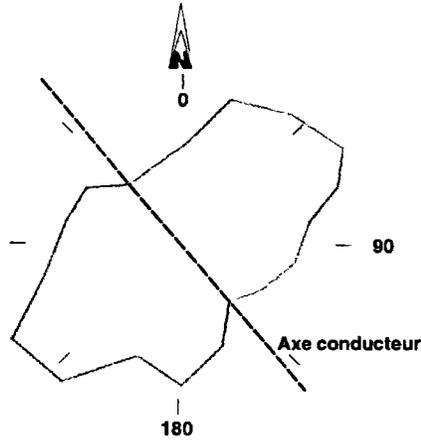


Figure 8. Diagramme de mesures rotatoire du champ avec bobines horizontales

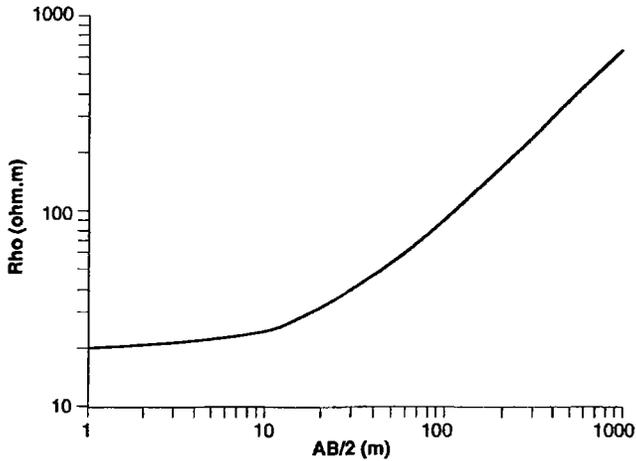


Figure 9. Courbe de sondage électrique

- l'injection de la mégafracture par des filons de quartz ou de pegmatite;
- l'existence de filons de quartz relais sub-horizontaux assurant l'interconnexion entre les failles verticales ou obliques;
- la présence d'une épaisse couche de roche fissurée, premier facteur de productivité hydraulique donnant à la remontée finale de la courbe de sondage électrique une allure traînante;
- latéralement, cette zone broyée s'étend sur 50 m au moins à Pobé-Mengao;
- la réalimentation exceptionnelle de la nappe à travers les sols sableux et les mares entourant le forage. Ailleurs, cette condition est remplie pour des forages situés aux abords des marigots ou plus généralement dans les zones de bas-fonds.

Il importe de souligner que dans notre contexte d'étude, le substratum rocheux est généralement enfoui sous des altérites épaisses de 10 à 50 m. Cependant, les seules réserves d'eau souterraine qu'on y rencontre sont constituées par des poches d'extension variable liées aux fractures affectant le socle. Or la cartographie de ces fractures est impossible à réaliser

Tableau III. Quelques résultats d'analyse de l'arsenic (mesures effectuées par spectrométrie de masse, source au plasma)

Échantillon	Concentration (mesurée en ppb)
Rectorat	19,3
ISP	18,0
Lay1	21,6
Lay2	33,6
Pobé-Mengao	39,4
Guilungou	4,1
Ziniaré	50,2
Rakaye	48,0
Pissi	49,5
Doulougou	43,3
Sambin	36,9

Tableau IV. Quelques résultats d'analyse du tritium

Échantillon	Unités de ^3H	Écart type
Rectorat	9,8	2,8
ISP	11,2	2,8
Lay1	<6	
Lay2	12,9	2,8
Pobé-Mengao	16,9	2,8
Guilongou	<6	
Rakaye	<6	
Pissi	7,6	2,7
Sambin	<6	
Bangrin	<6	
EIER	8,6	2,6

à partir d'observations directes de terrain. En autorisant une vision synoptique des régions étudiées, la télédétection nous a permis de cartographier les linéaments que nous assimilons aux failles. Le seul problème est que si la plupart des failles se traduisent par des linéaments, tous les linéaments ne sont pas des failles. C'est pourquoi nous avons fait intervenir la géophysique pour préciser la nature et la localisation des linéaments.

Il apparaît donc que la télédétection qui permet de s'affranchir de la couche épaisse des altérites est un outil incontournable lorsqu'on veut cartographier les mégafractures sur lesquelles on doit implanter les forages à débit unitaire élevé. Mais des études sont à mener afin de différencier ceux des linéaments qui ont une signification hydrogéologique.

4. Références

- DUCELLIER, J. et DEFOSSEZ, M. 1949-1950, 1953-1954. Notice de la carte géologique de reconnaissance de la Haute-Volta. Feuilles ND-30 SE et ND-30 NE (partie Haute-Volta) dressées et publiées par le Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.), 1961
- ENGALENC, M. 1978-1979. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Mémoire du CIEH, volume 1 et 2.
- MATHIEZ et HUOT 1968. Prospection géophysique et recherche d'eau souterraine, Exemples d'application en Afrique de l'Ouest. Mémoire du CIEH.
- MOORE, G. and WALTZ, F. 1983. Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, n° 5, p. 641-647.
- SAVADOGO, N. A. 1978. La géophysique appliquée à la recherche d'eau dans les formations cristallines de Haute-Volta. Bulletin de liaison du CIEH, n° 35.
- SAVADOGO, N. A. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta, Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat d'État, Université Grenoble I, 350 p.
- SEUTHÉ, C. *et al.* 1985. Études géologiques par interprétation d'images Landsat accentuées. *in* Bernier, M., Lessard, G. et Gagnon, P. (éd.). Télédétection et gestion des ressources : l'aspect opérationnel, L'Association québécoise de télédétection, p. 295-308.
- YÉSOU, H., SAINT-JEAN, R., PION, J.-C. et BESNUS, Y. 1990. Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical : exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo, Afrique Occidentale). *in* Dubois, J.-M. M. et Blasco, F. (éd.) Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Les Presses de l'Université du Québec, p. 253-269

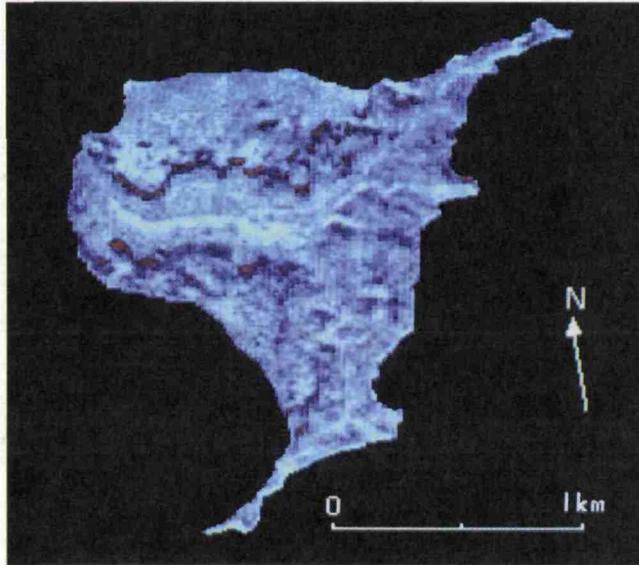


Figure 1-3. Composition colorée de XS1, XS2 et XS3; image enregistrée par SPOT 1 le 14 mai 1989 à 10 h 19 min 47 s heure locale; azimut solaire : 34,5°; hauteur solaire : 41°; les plantations de cocotiers et d'arbres fruitiers sur les terrains plats sont représentées en rouge; les graminées sur les versants apparaissent en vert (© CNES-SPT)

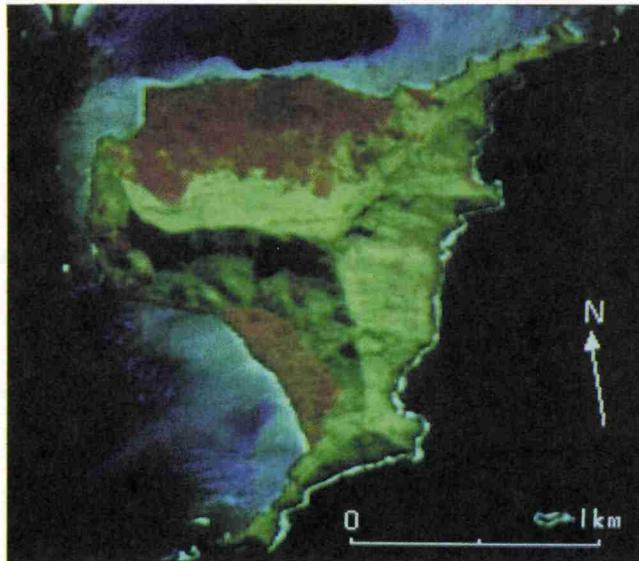


Figure 1-12. Image obtenue à l'issue du traitement; les zones de végétation humide ressortent en rouge sur un dégradé de bleus correspondant aux zones non classées

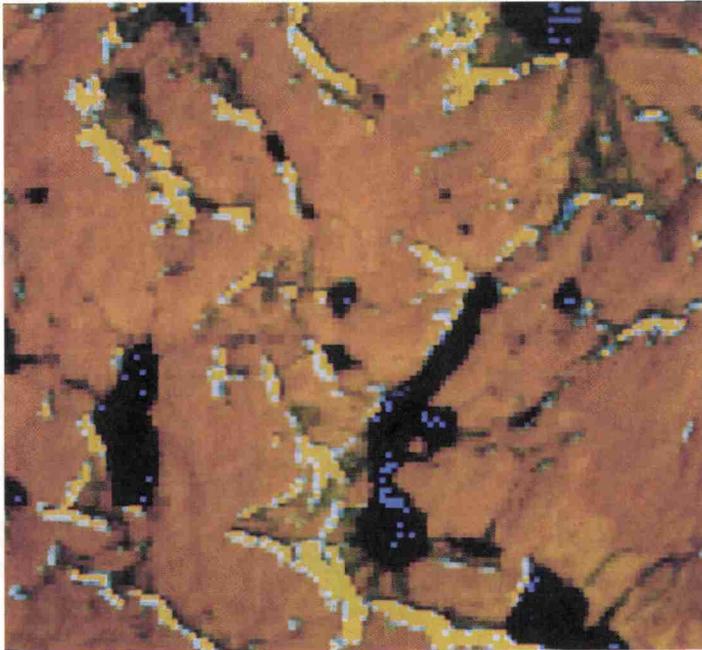
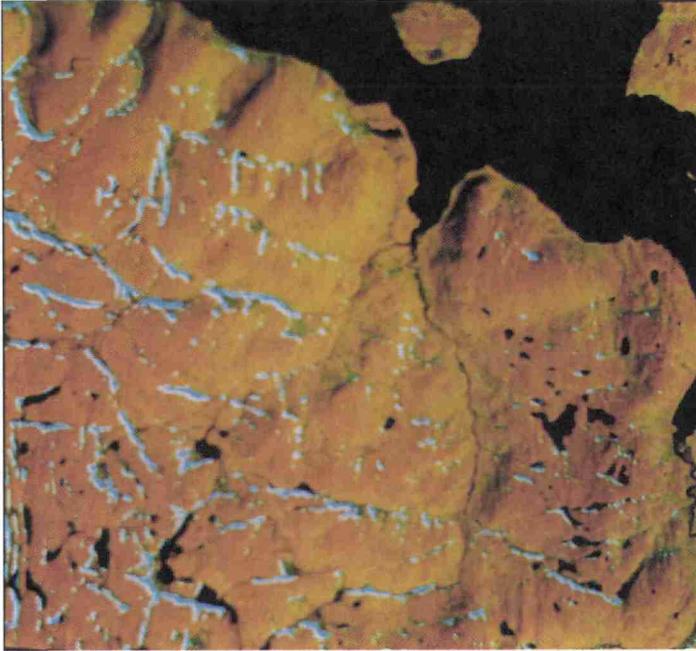


Figure 3-5. Sous-scènes de l'image TM d'Ungava : a) bandes TM2, 4 et 5 rehaussées en bleu, vert et rouge; b) seuillage en jaune de la neige

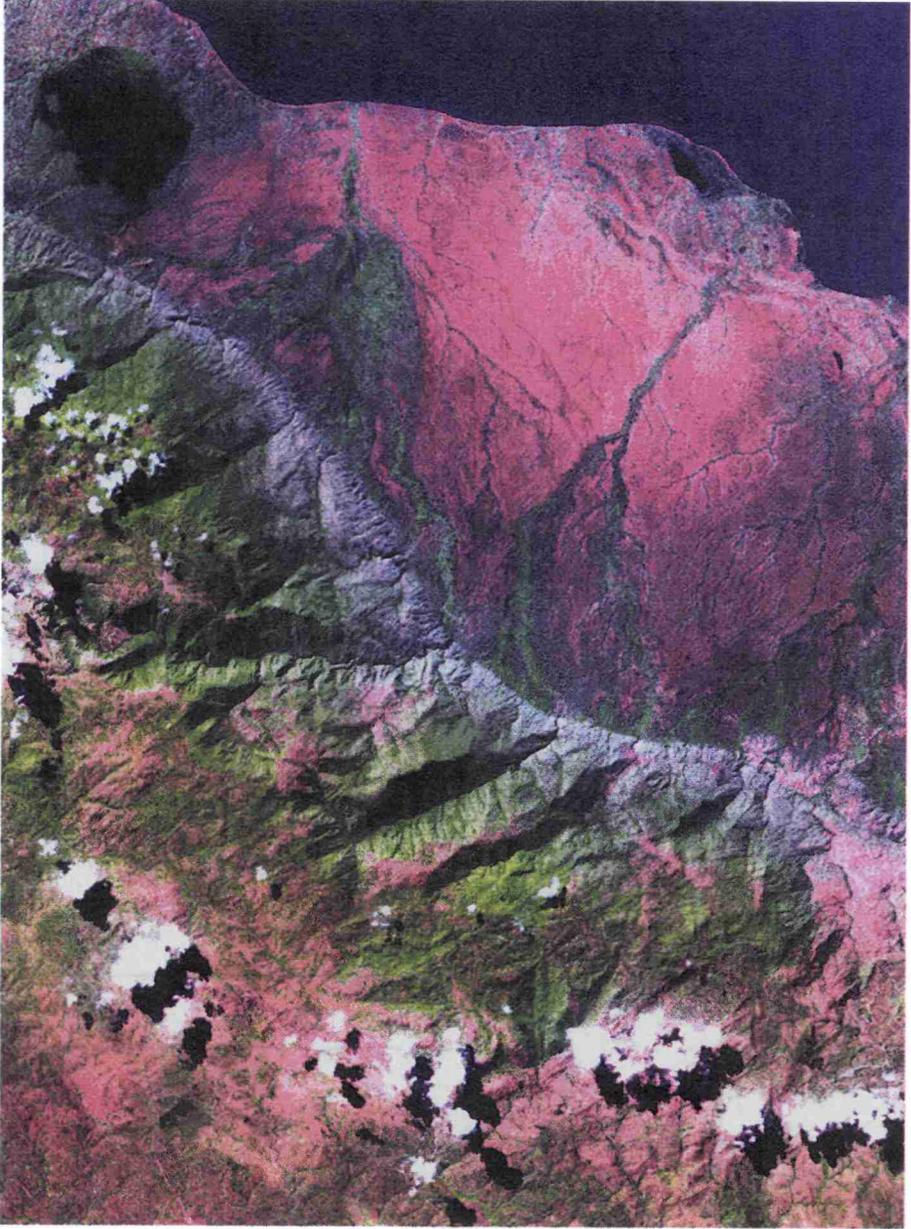


Figure 4-2. Composition colorée TM5-TM4-TM1 en rouge, vert et bleu de la zone de l'escarpement et de la plaine Kasenyi

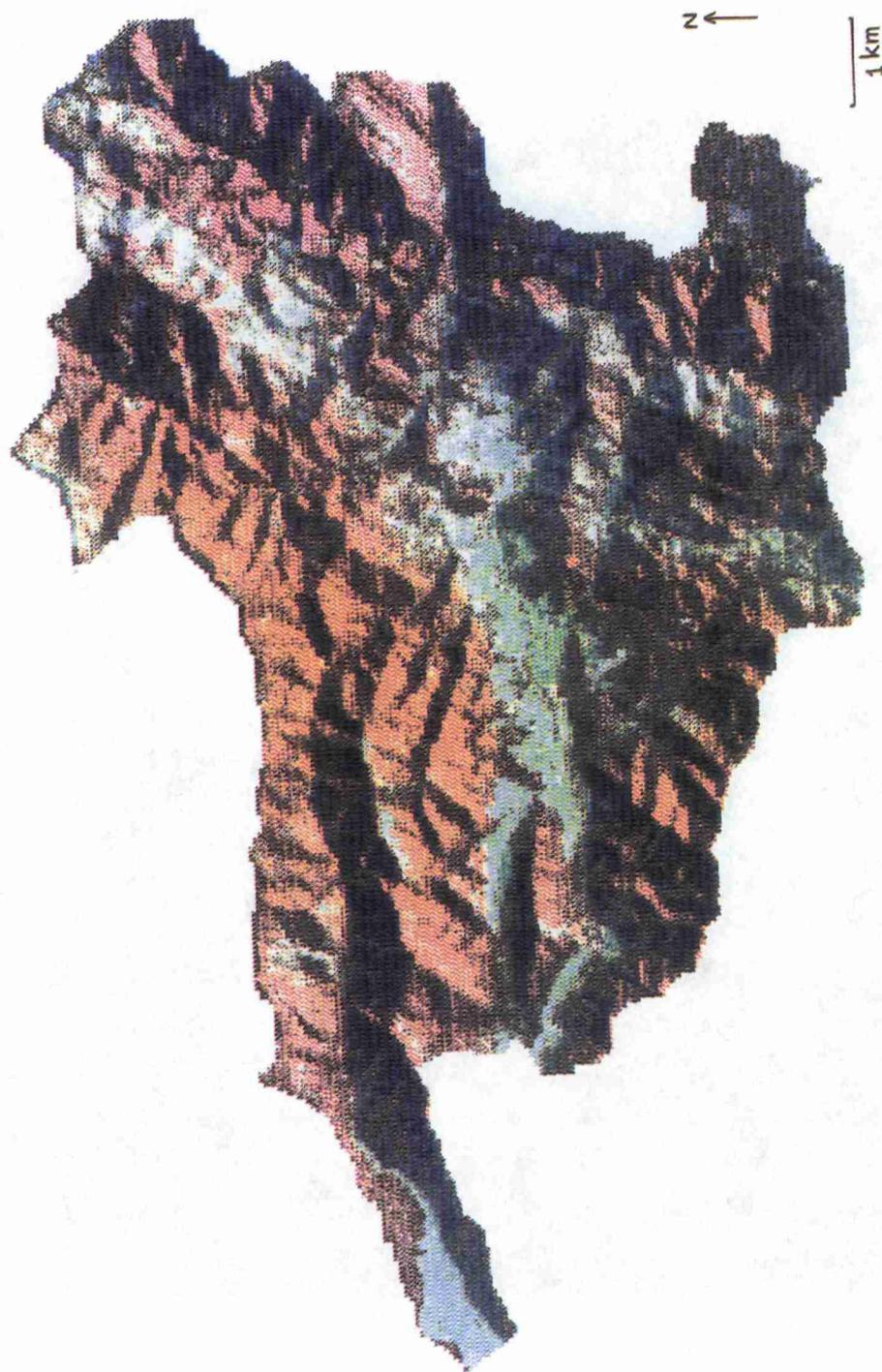


Figure 6-3. Image brute HRV de SPOT-1 du 24 janvier 1989 du bassin versant du Réal Collobrier avec une perception sensible du relief



Figure 6-4. Image corrigée HRV de SPOT-1 du 24 janvier 1989 du bassin versant du Réal Collobrier avec une atténuation de la perception du relief

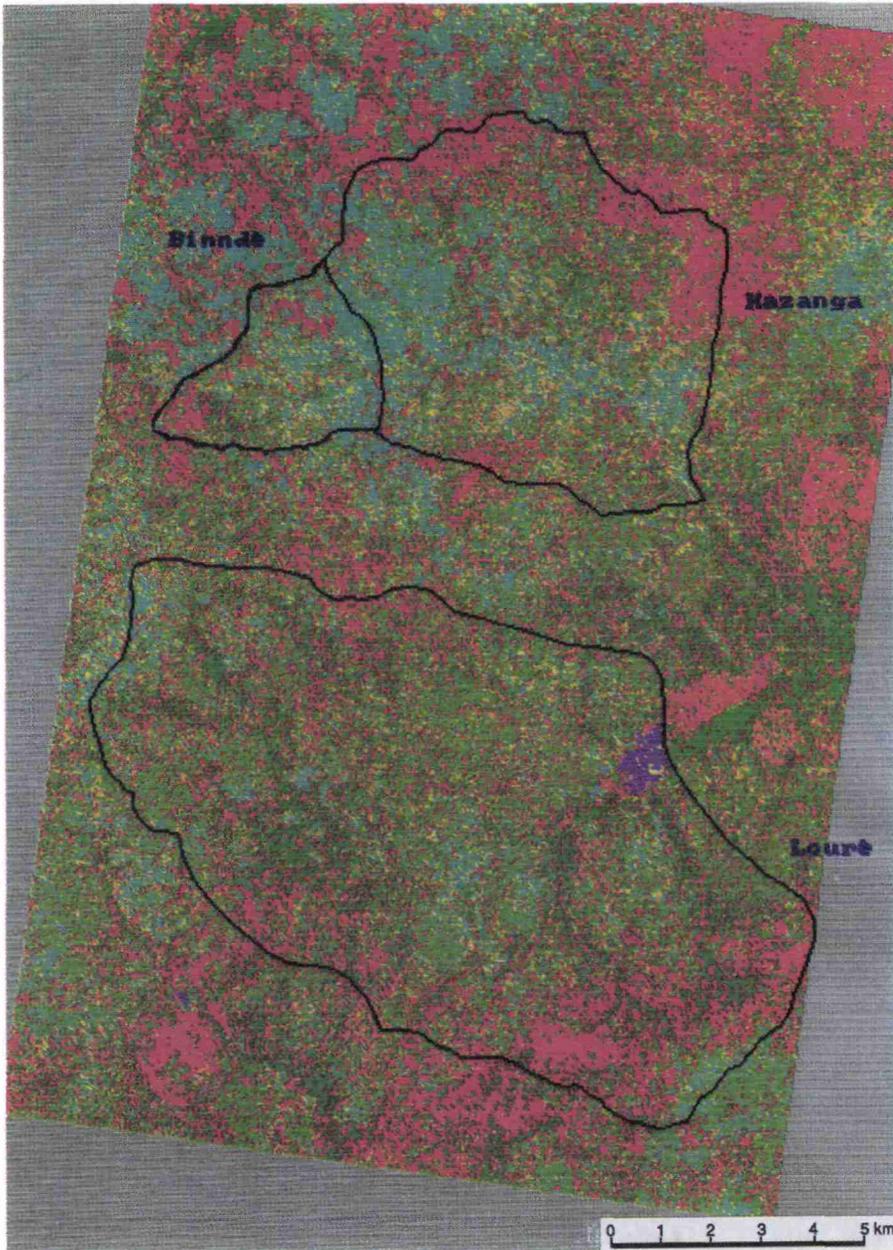


Figure 9-5. Image des classes d'états de surface

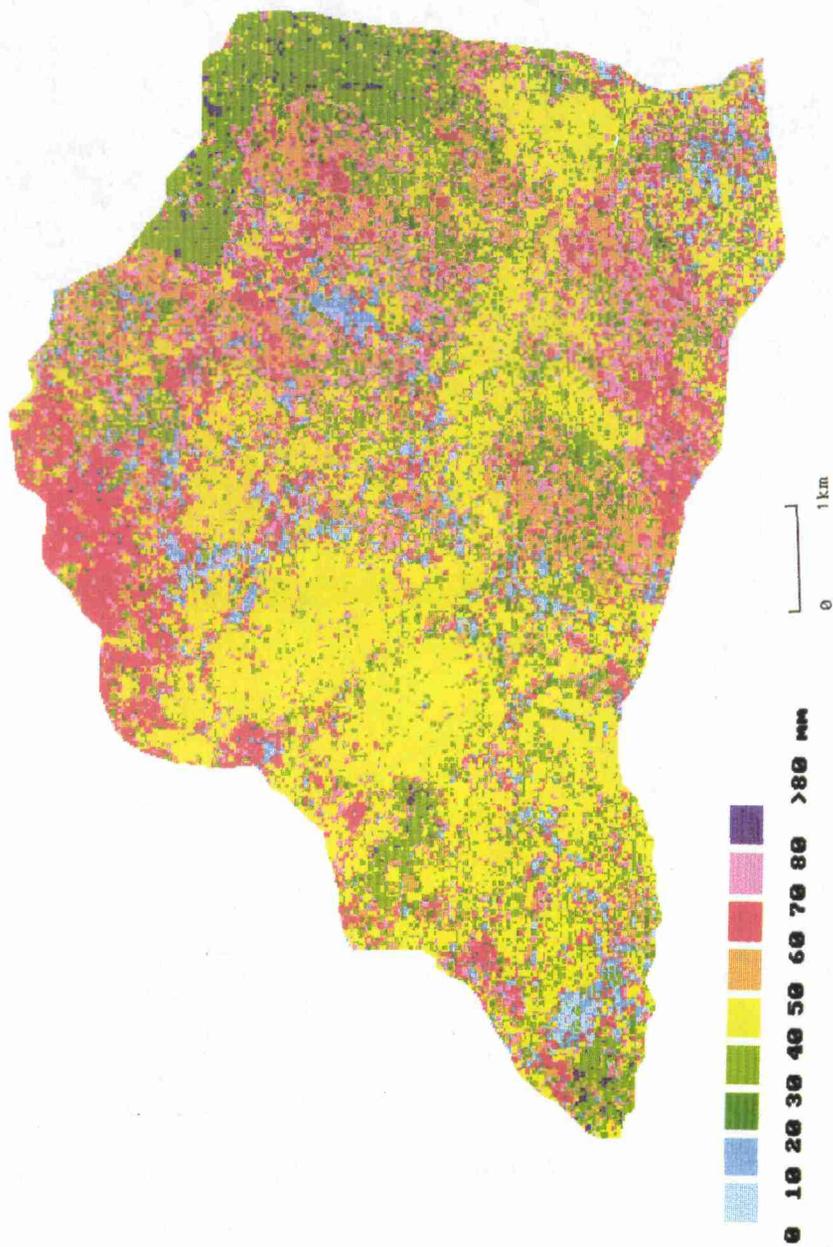


Figure 9-6. Image des lames ruisselées

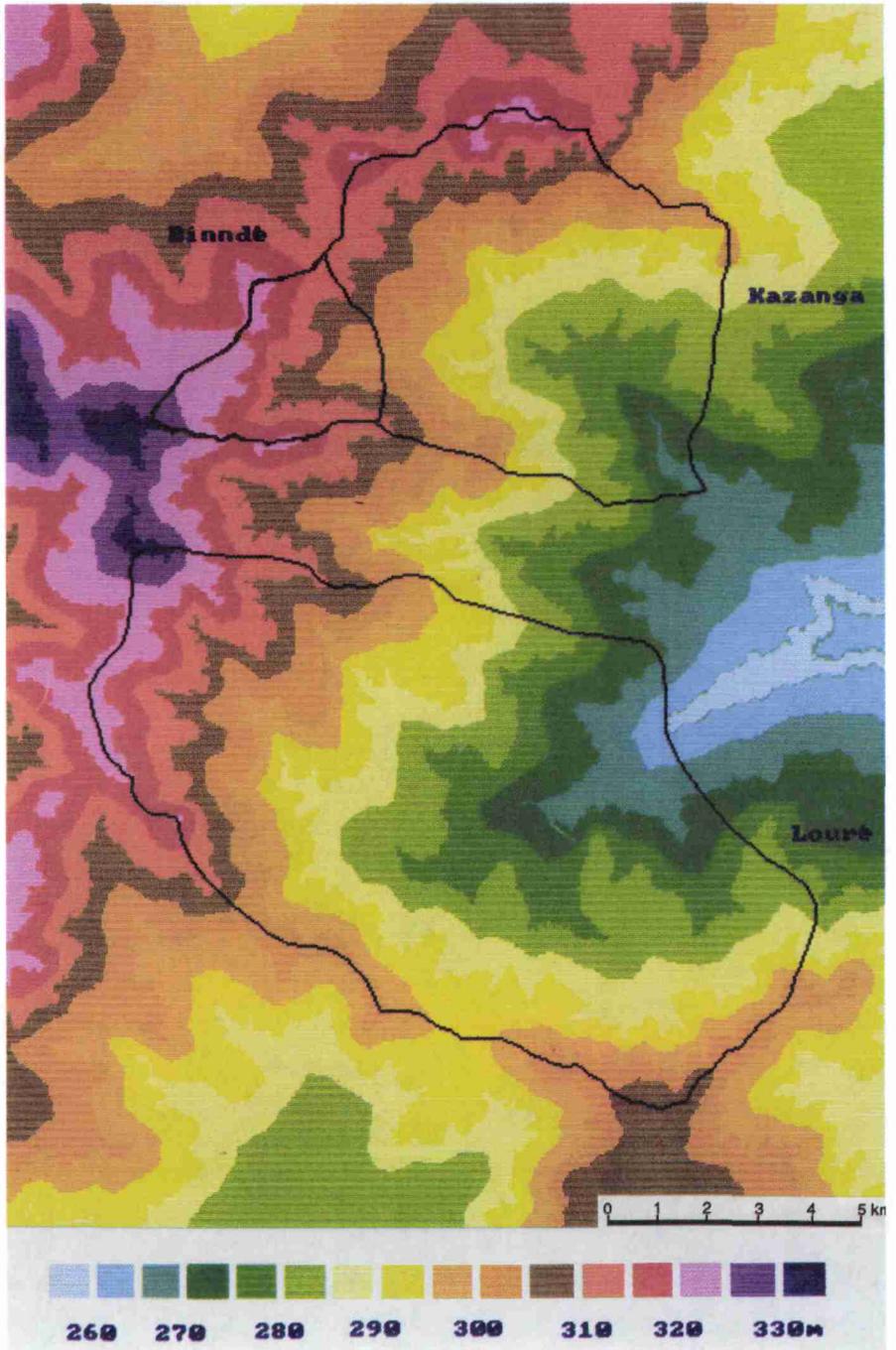


Figure 9-9. Modèle numérique de terrain

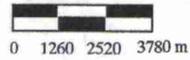
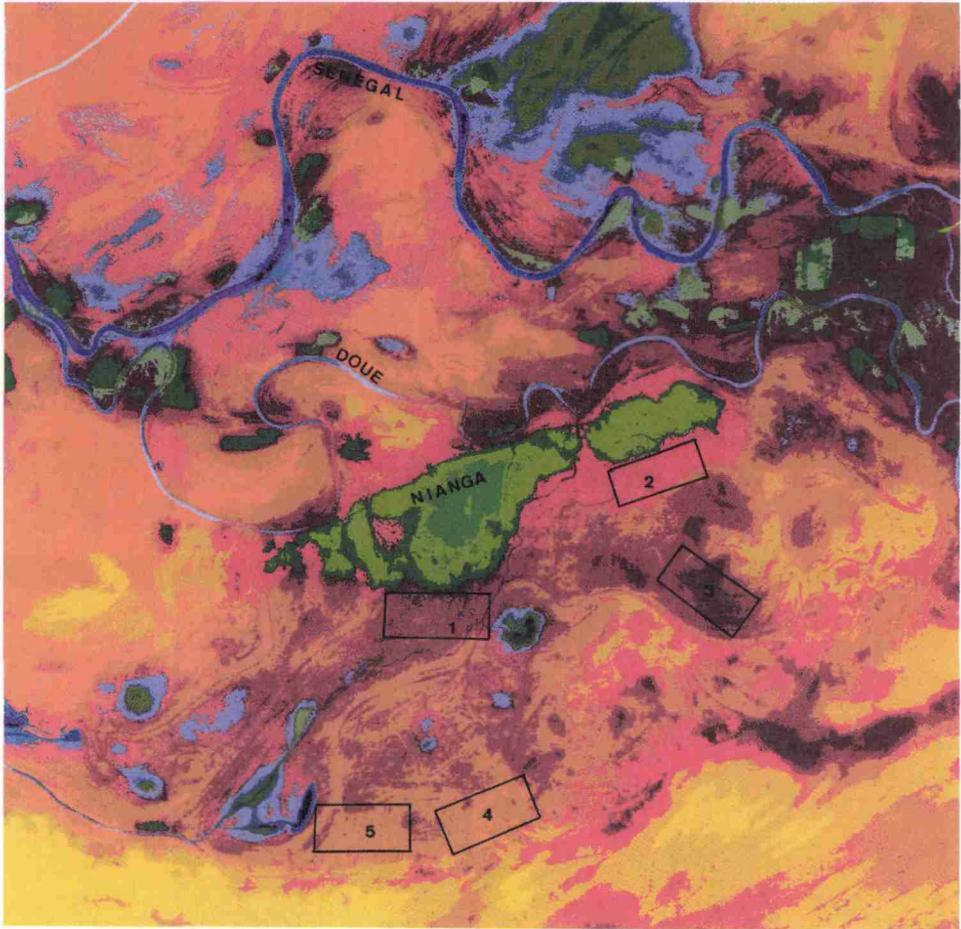
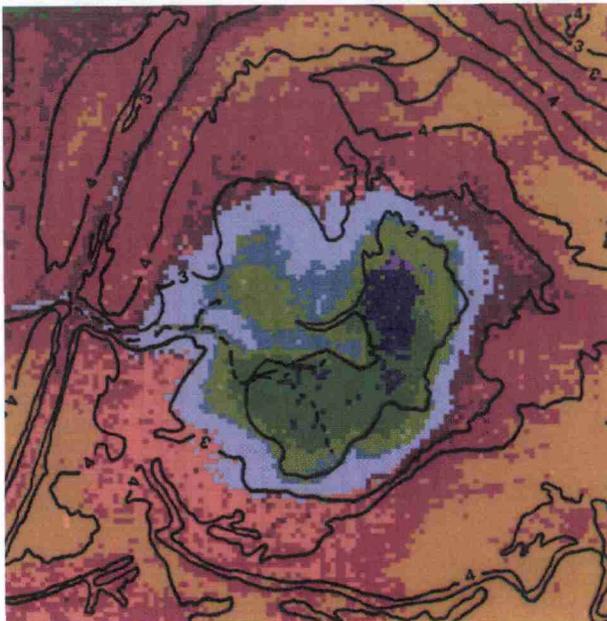
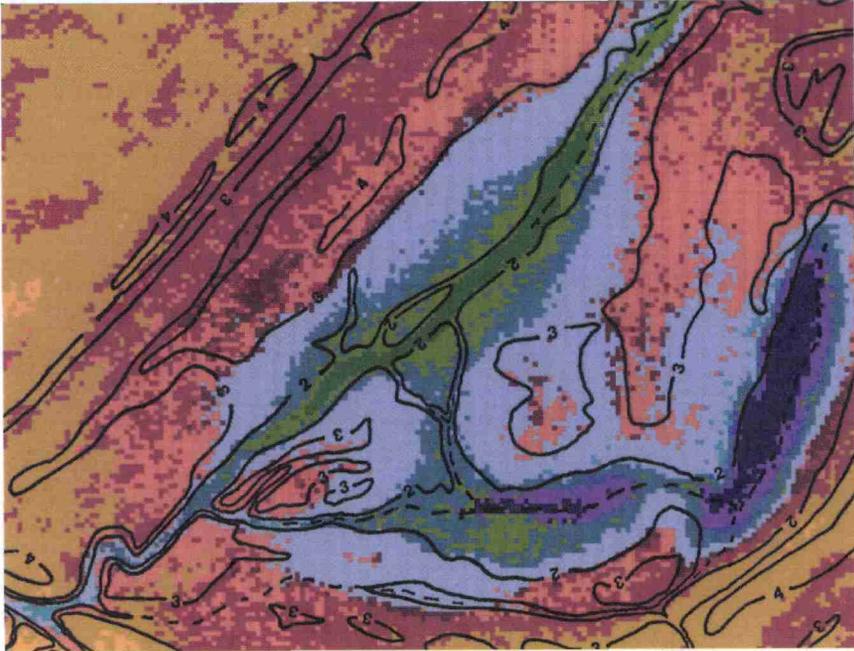


Figure 10-3. Image classifiée



0 310 620 930 m

Figure 10-5. Détails de l'image classifiée sur les zones inondées (altimétrie en m surimposée)

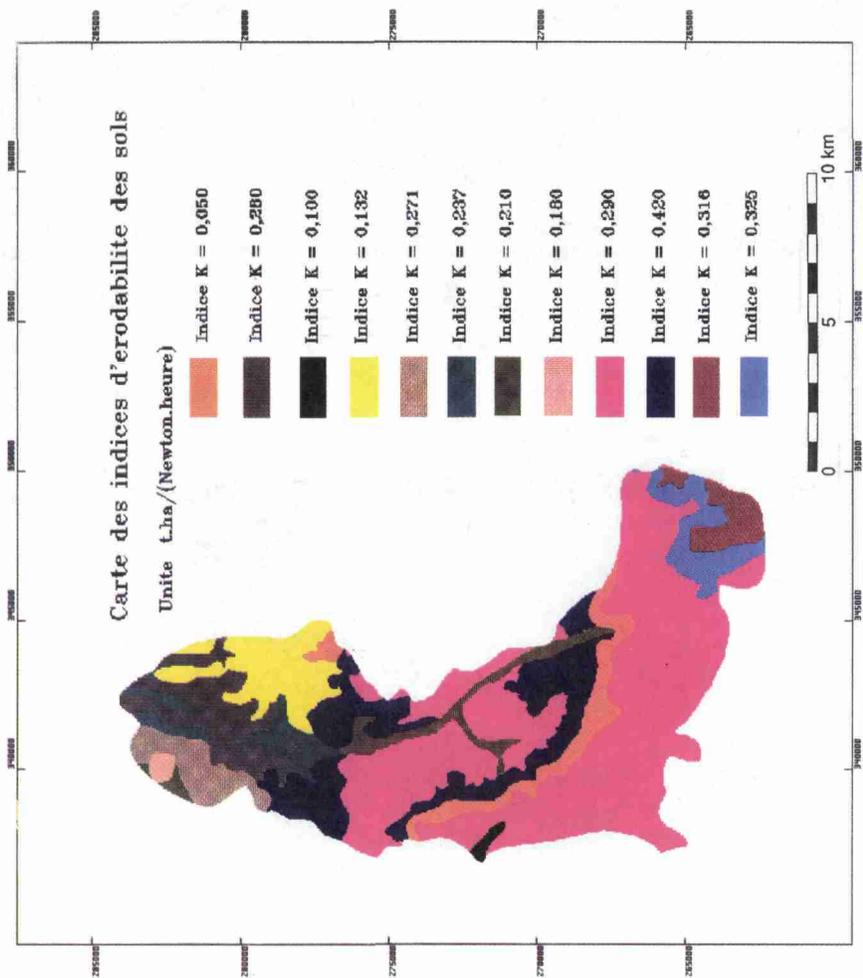


Figure 11-1. Carte des indices d'érodabilité des sols

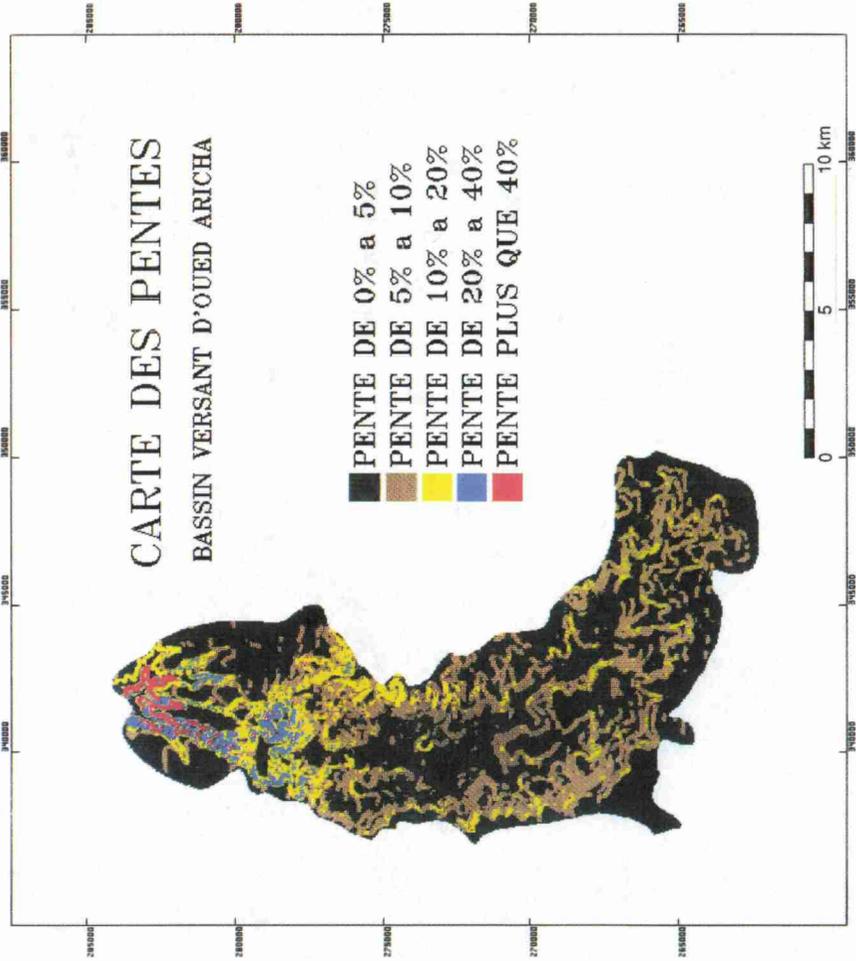


Figure 11-2. Carte des pentes

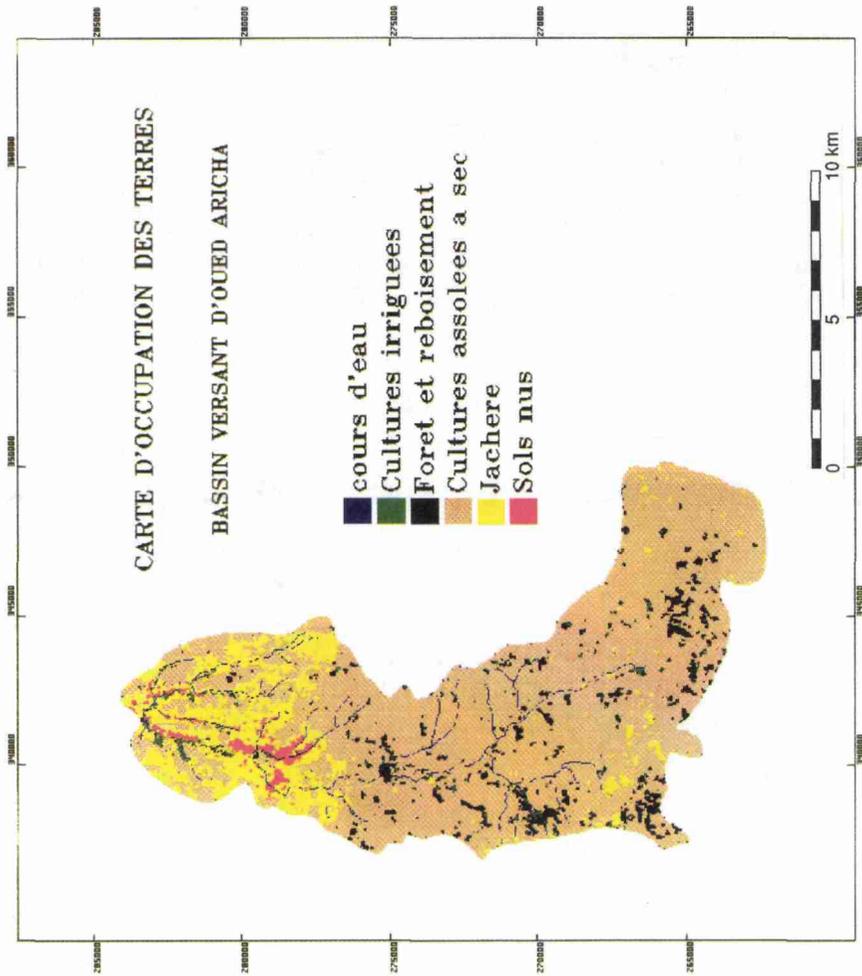


Figure 11-4. Carte d'occupation des terres

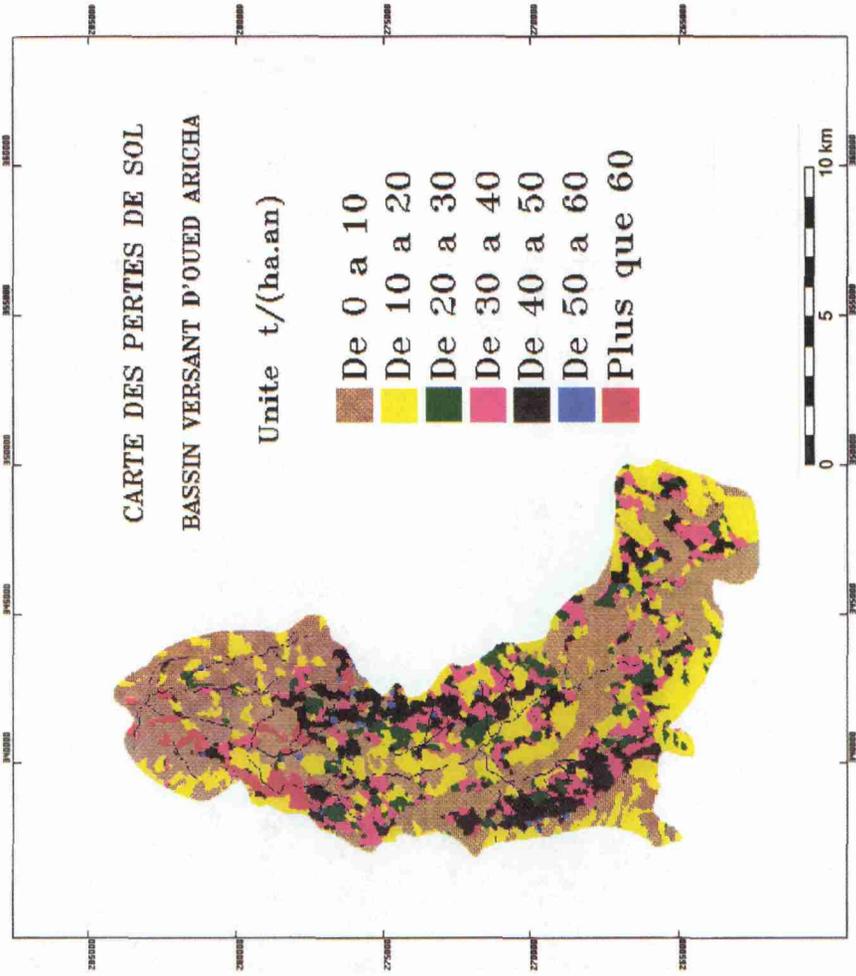


Figure 11-5. Carte des pertes de sols

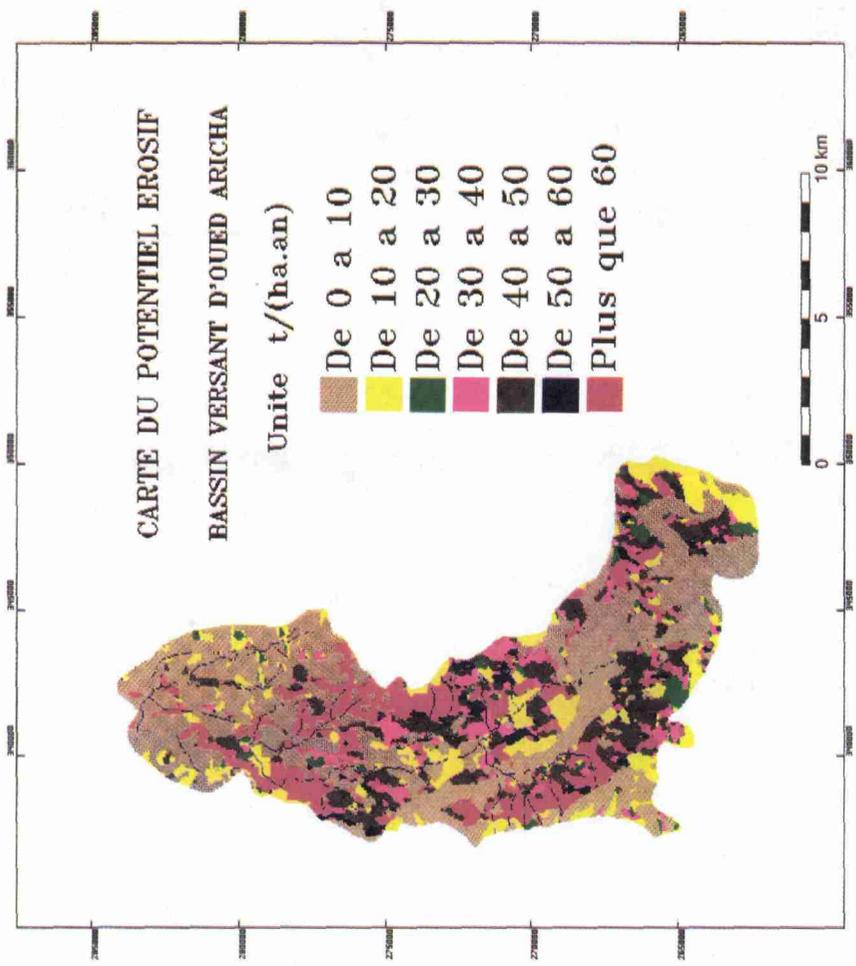


Figure 11-6. Carte du potentiel érosif

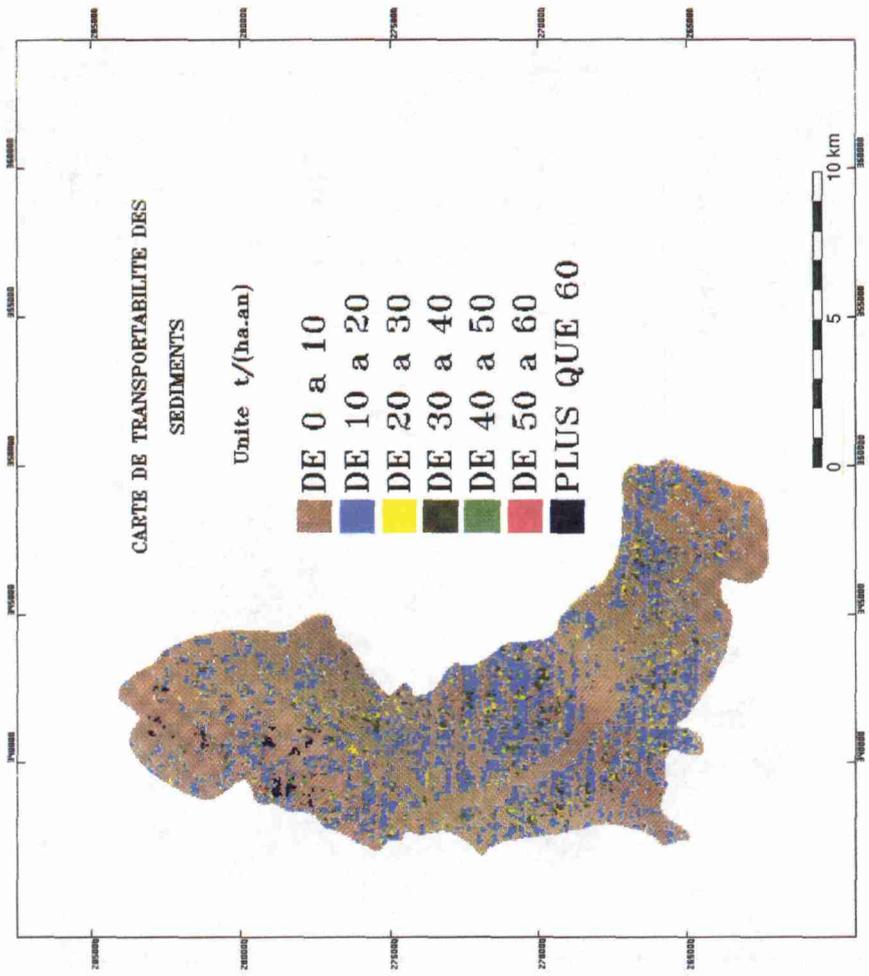


Figure 11-7. Carte de transportabilité des sédiments

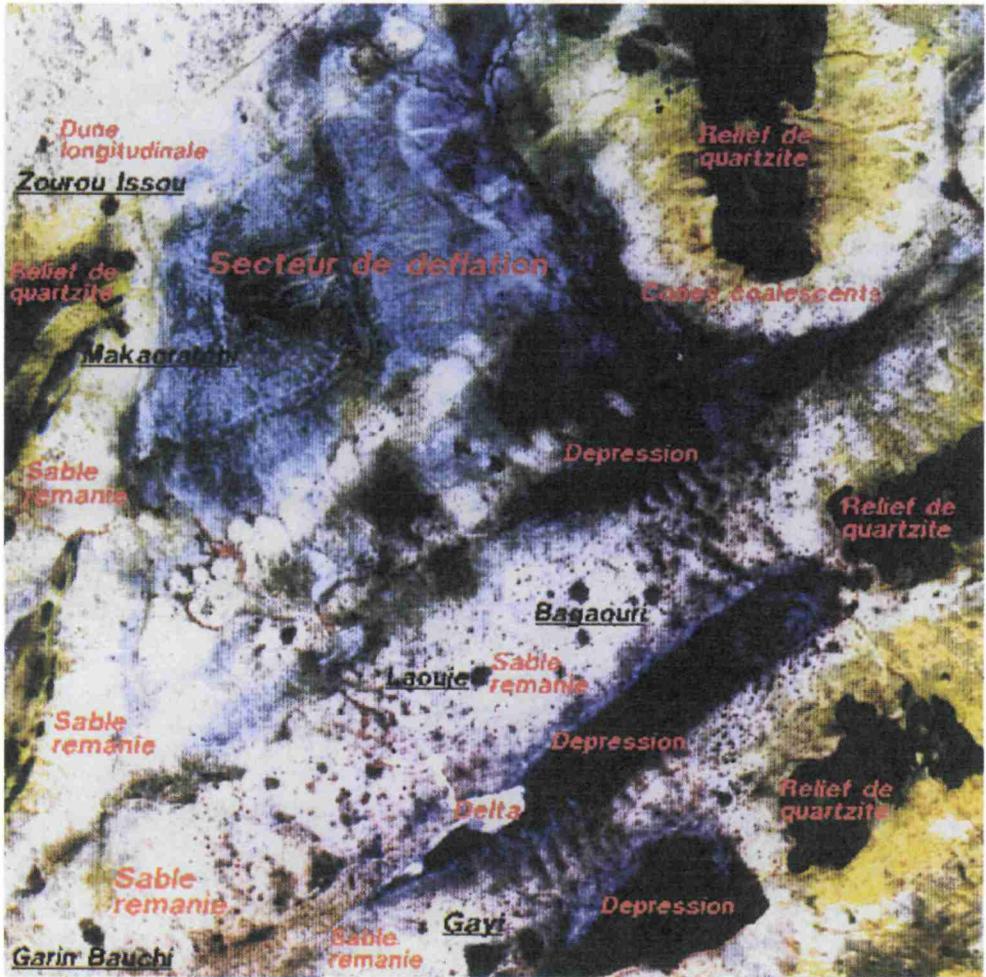


Figure 12-4. Composition colorée de la zone d'intérêt (image HRV de SPOT du 22 novembre 1987)

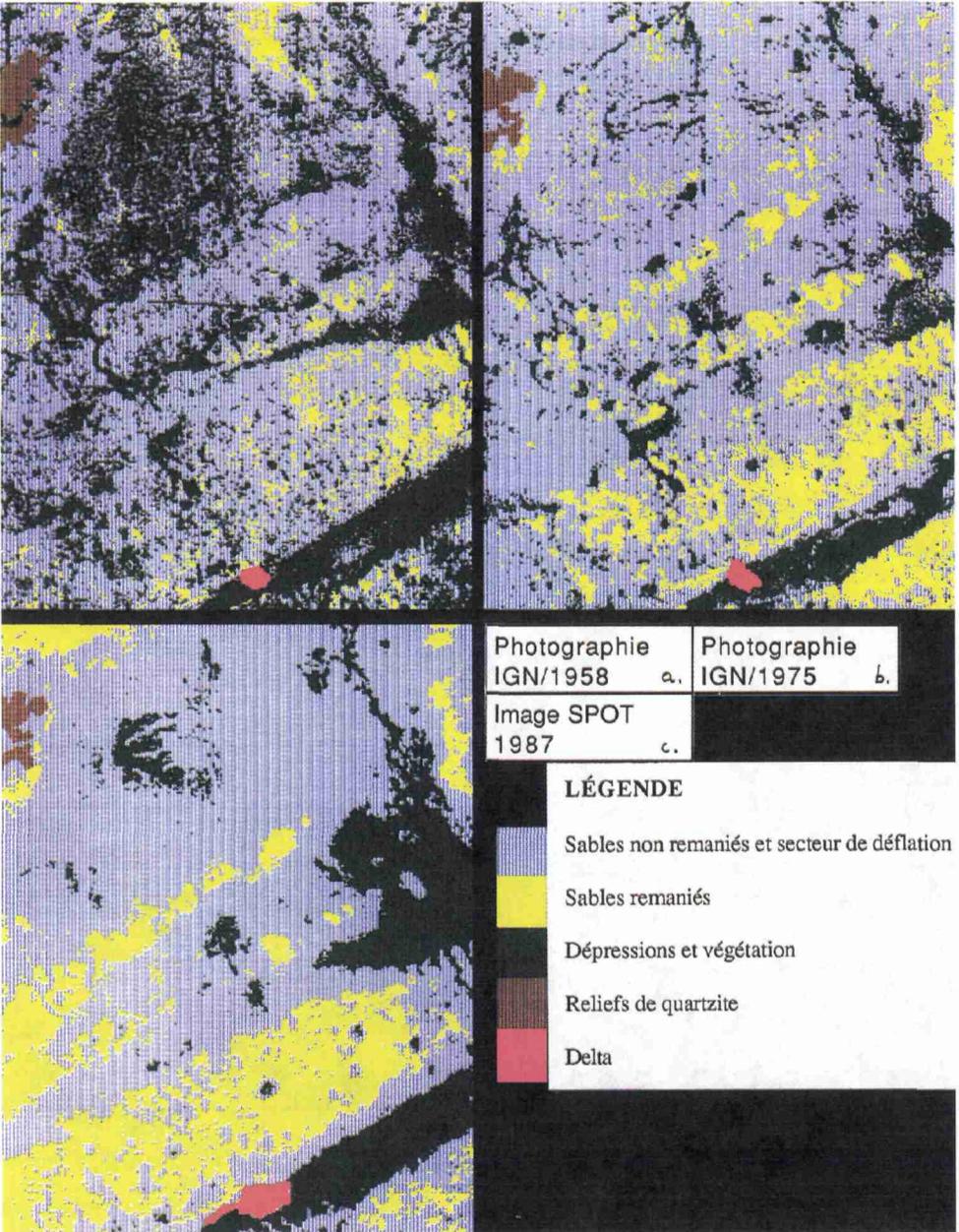


Figure 12-5. Évolution du secteur de Makaoratchi entre 1958 et 1987

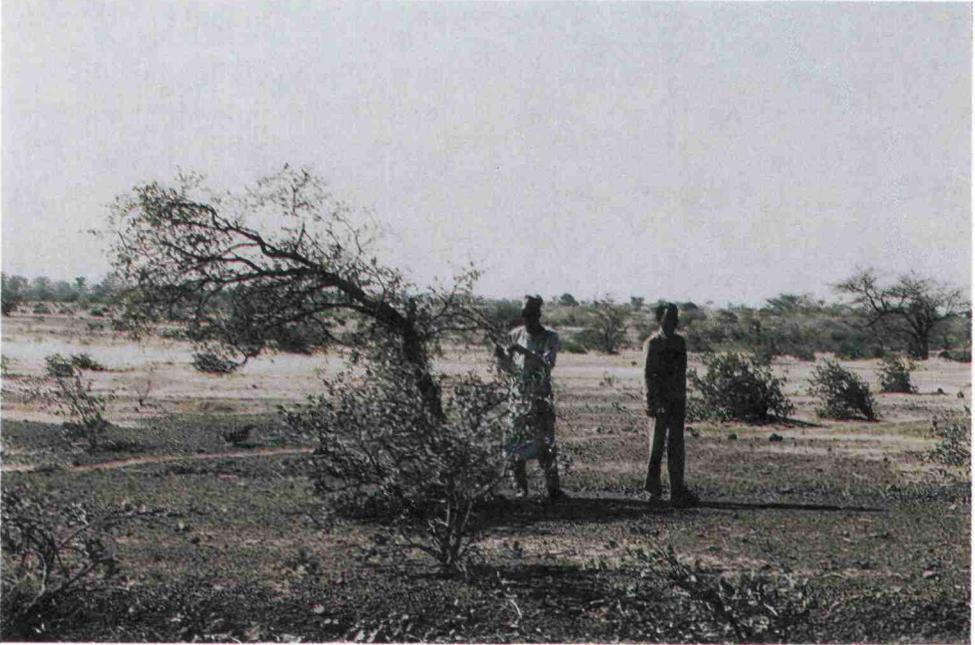


Figure 12-6. Anémomorphisme des arbustes dans les zones situées sous le vent des reliefs résiduels (sud de Makaoratchi)



Figure 12-7. Épandage dénudé de grenailles latéritiques (sud de Makaoratchi)

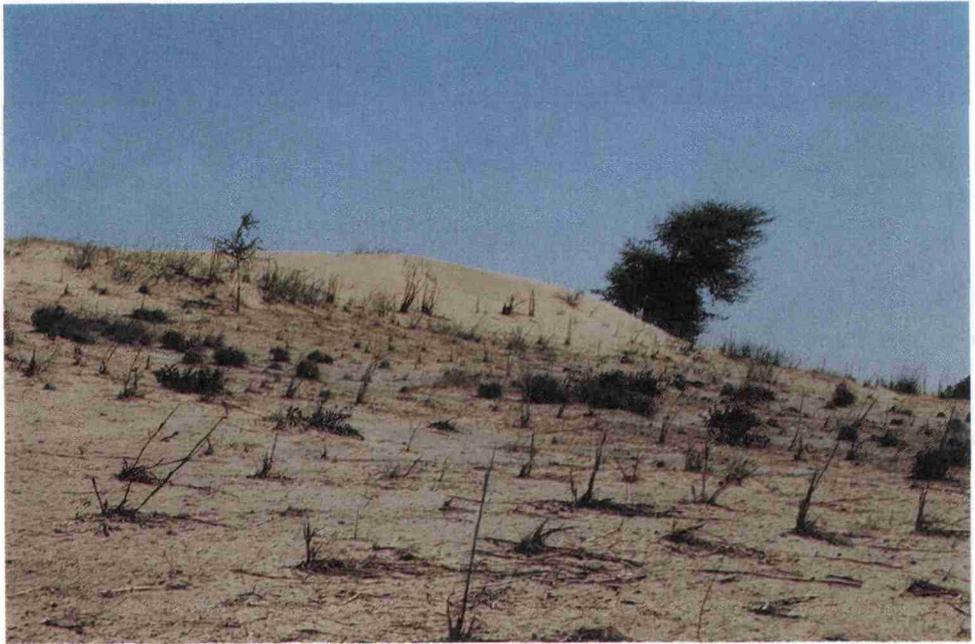


Figure 12-8. Remise en mouvement des sables sur le sommet d'une dune ancienne (ouest de Zinder)



Figure 12-9. Caoudeyre creusé par le vent près d'une haie plantée pour fixer les sables (sud de Wacha)



Figure 13-2. Morphologie du cirque de Diosso; aspect de la paroi bordière et des arêtes centrales

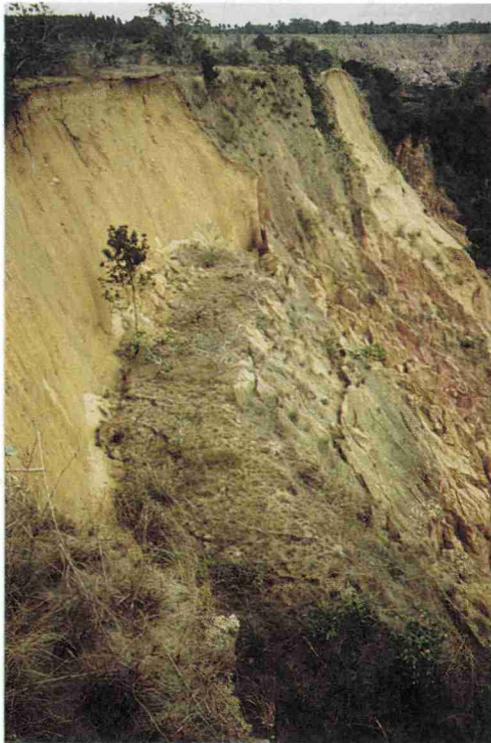


Figure 13-5. La dynamique du cirque de Diosso; les affaissements brusques et massifs sont les processus les plus répandus des mécanismes érosifs sur la paroi bordière



Figure 13-6. Le glissement de terrain sur le flan d'une arête centrale à la faveur d'une action combinée d'un sapement à la base par le ruisseau et de la destruction de la forêt par l'homme

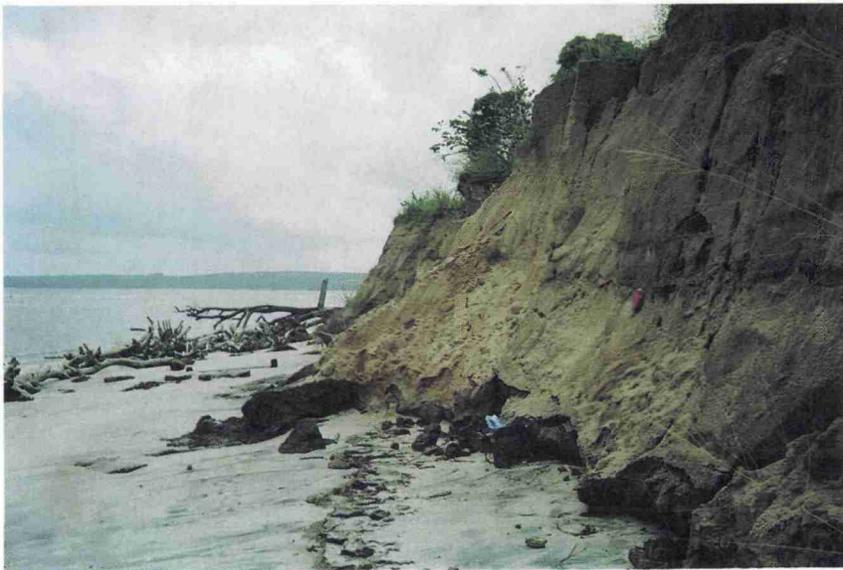


Figure 13-11. Une forte érosion du trait de côte à l'exutoire du cirque de Diosso (baie de Loango)

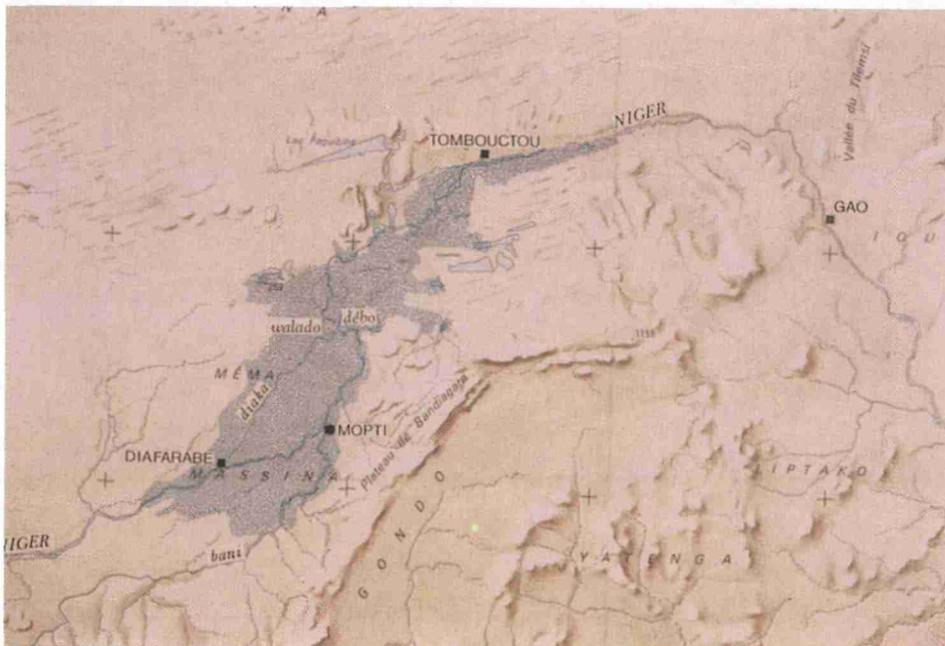


Figure 16-1. Carte de situation du Delta Central du Niger au Mali



Figure 16-2. Les formations végétales aquatiques du delta Central



Figure 16-3. Cartographie de l'indice de Verdeur (NDGI); image du 3 janvier 1989



Figure 16-4. Cartographie de l'indice de Verdeur (NDGI); image du 7 janvier 1990

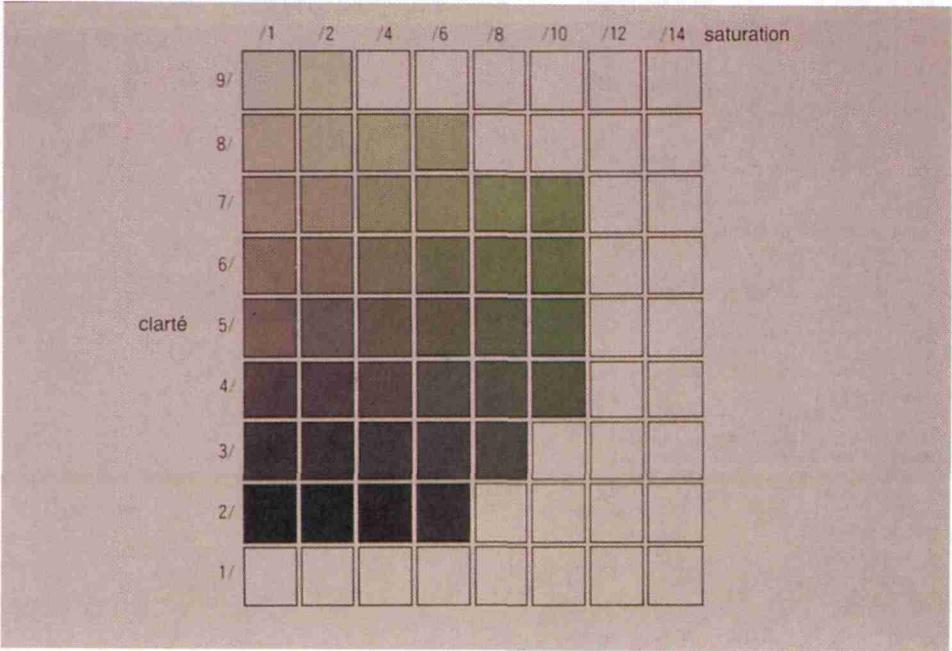


Figure 16-5. Grille de clarté et saturation du vert dans la charte des couleurs Munsell

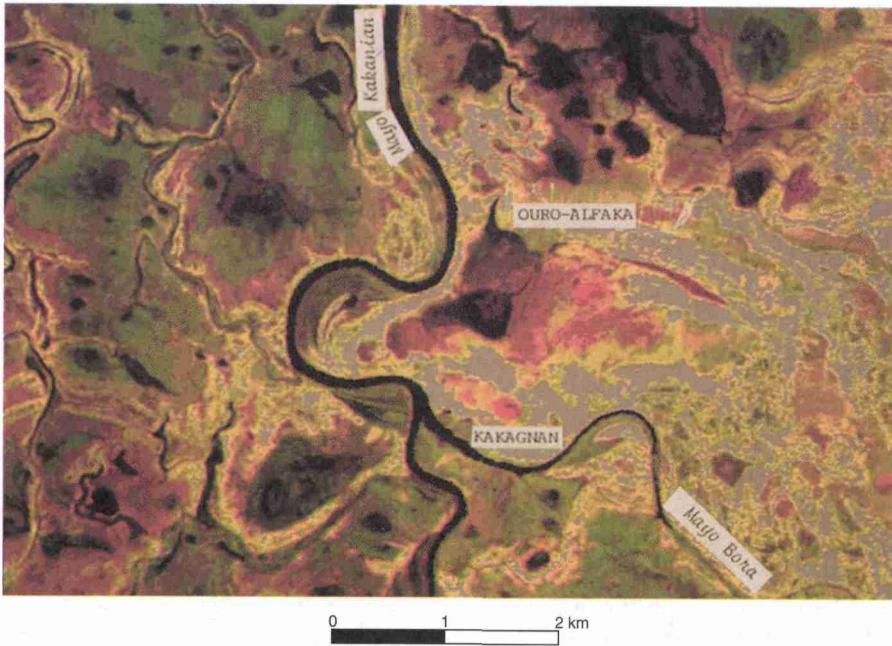


Figure 16-7. Superposition des images de 1989 (en rouge) et 1990 (en vert)

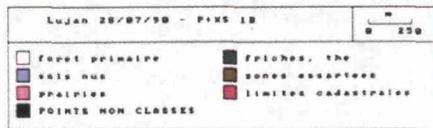
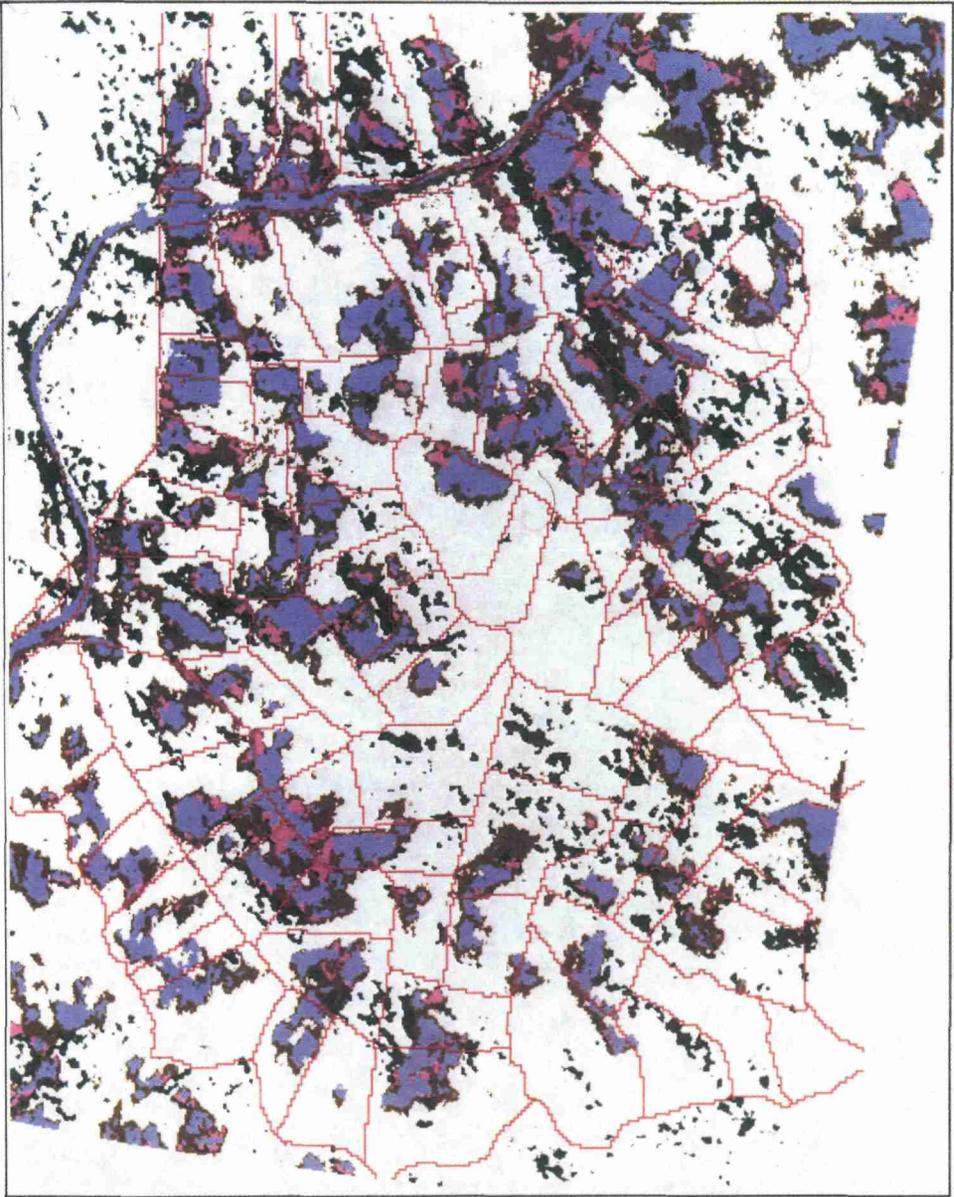


Figure 17-6. Cartographie de l'occupation du sol par analyse des images HRV de SPOT; les éléments de la légende sont, de haut en bas et de gauche à droite, 1) forêt primaire, 2) sols nus, 3) prairies, 4) points non classés, 5) friches, thé, 6) zones essartées, 7) limites cadastrales

Domaine sahélien

Secteur sahélien strict

- Steppe arbustive ou herbeuse des dunes et ensablements

Secteur sub-sahélien

- Steppe (ou savane) arbustive des glacis gravillonnaires associés aux cuirasses; culture en vallées
- Steppe (ou savane) à fourré des glacis gravillonnaires
- Steppe herbeuse ou arbustive des glacis de dénudation et des affleurements rocheux
- Steppe (ou savane) arbustive de complexes sablo-limoneux
- Steppe (ou savane) arbustive associée aux reliefs; culture en vallées
- Formation mixte des vallées associée aux cultures

Domaine soudanien

Secteur nord-soudanien

- Savane arbustive ou arborée des complexes et des glacis gravillonnaires; cultures associées
- Formation mixte des vallées associée aux cultures; savane-parc

Potentialité ligneuse



Occupation humaine

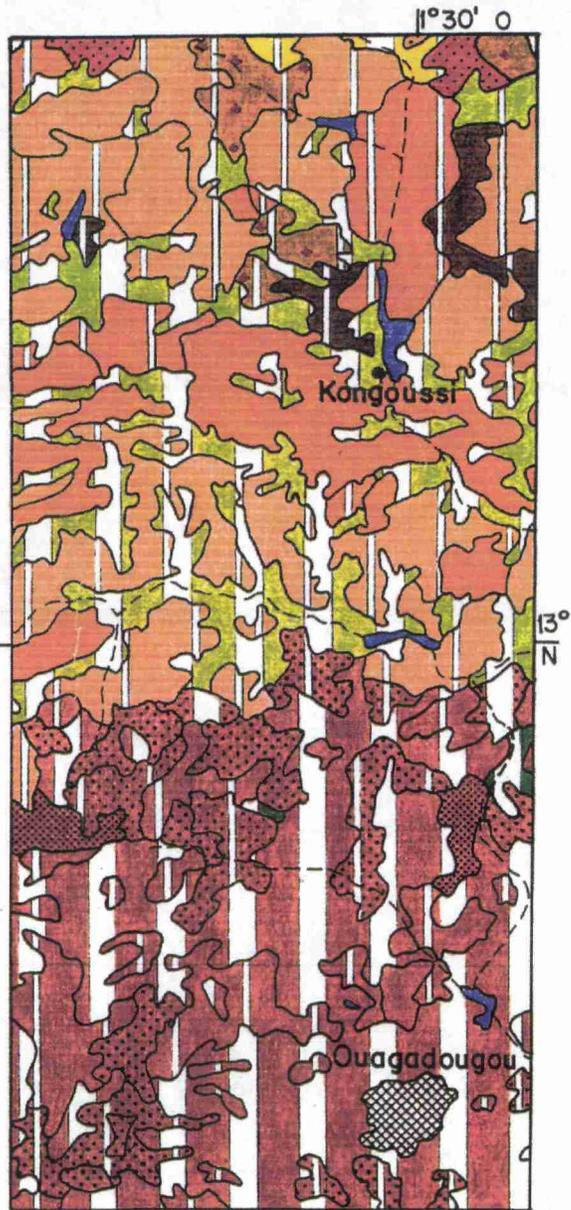


Figure 18-4. Extrait de la carte nationale de la végétation du Burkina Faso



Figure 22-2. Image en couleurs composites sur canaux TM avec intégration du panchromatique (TMP4 en cyan, TMP2 en magenta et TMP1 en jaune)

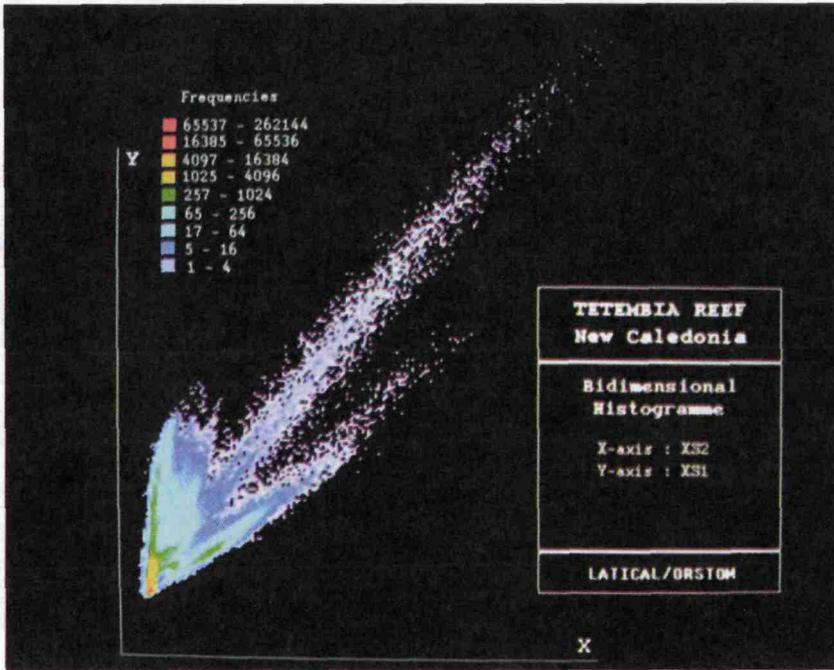


Figure 24-2. Récif Tétémbia, histogramme bidimensionnel XS1-XS2

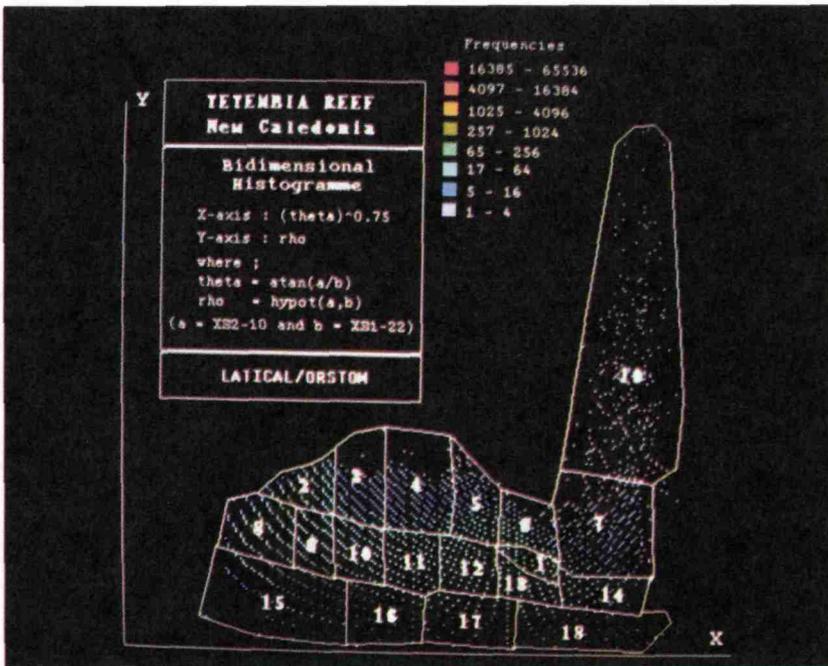


Figure 24-3. Récif Tétémbia, histogramme bidimensionnel $\rho - \theta$, classification incluse

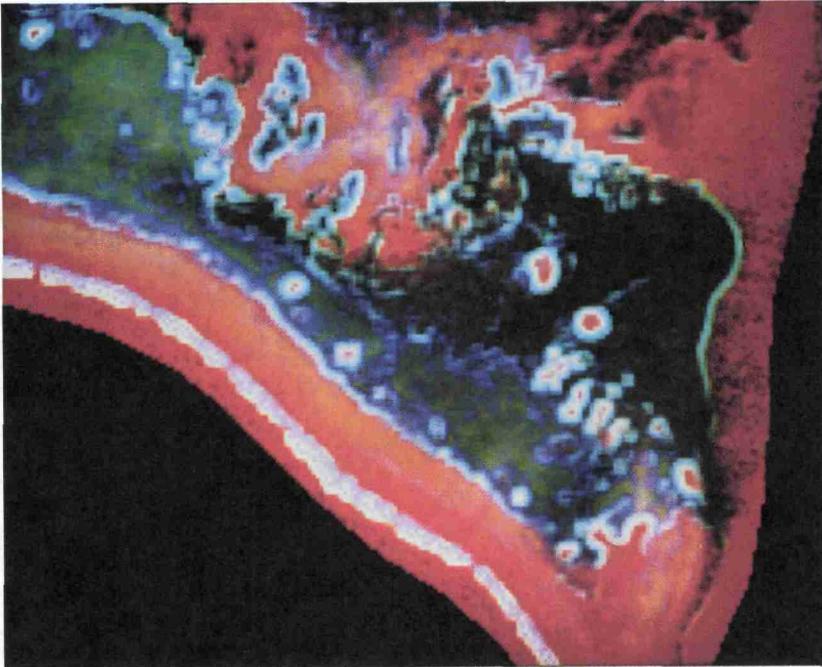


Figure 24-4. Composition colorée des composantes principales tirées des canaux ρ , θ et $\tau_{(2)}$ (rouge pour la première composante principale, vert pour la deuxième, et bleu pour la troisième)

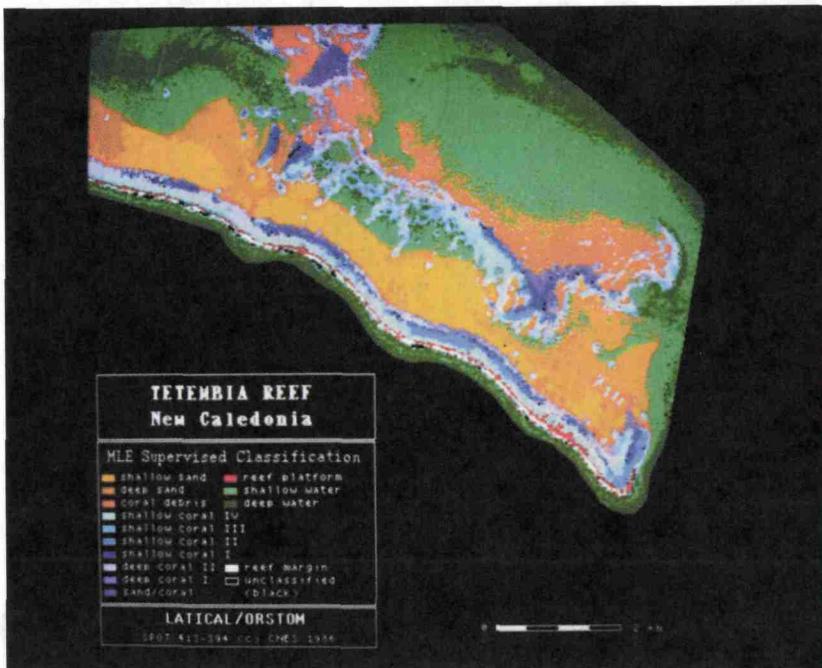


Figure 24-5. Carte thématique du récif Tétémbia

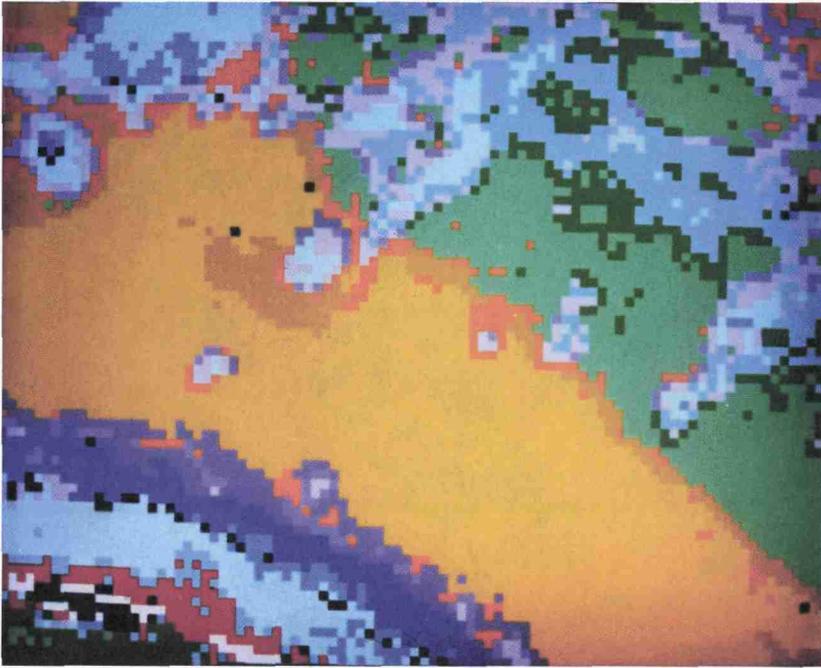


Figure 24-6. Carte thématique du récif Tétembia montrant les détails du récif interne et des pâtés coralliens

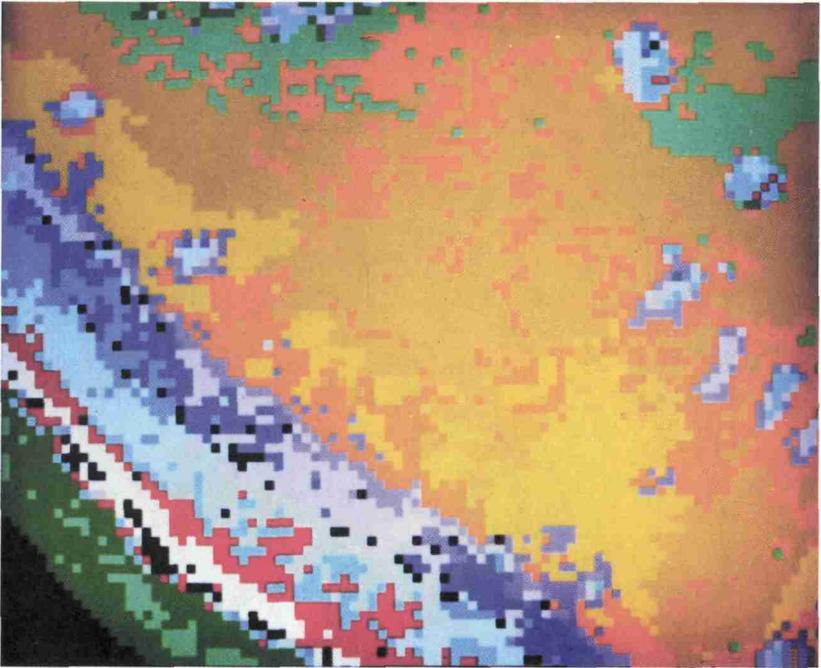


Figure 24-7. Carte thématique du récif Tétembia montrant les détails du platier récifal externe

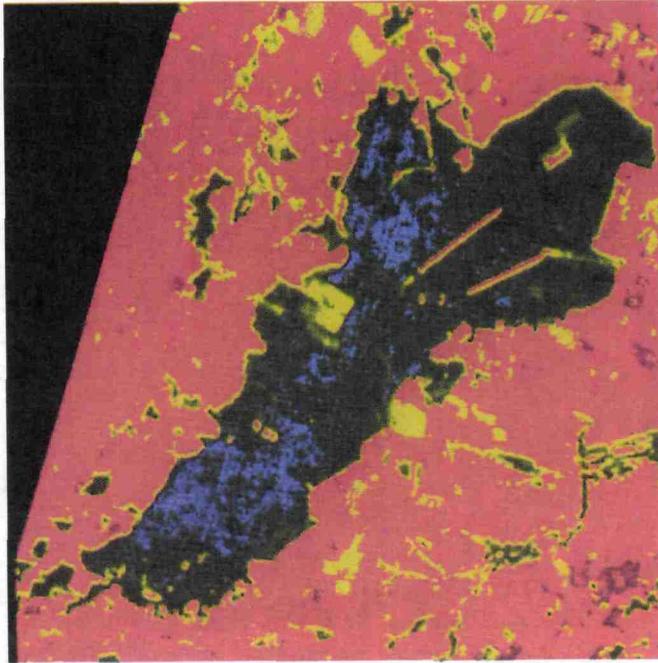


Figure 26-7. Forêt de Bouconne (canal 2 de HRV de SPOT, septembre 1988)

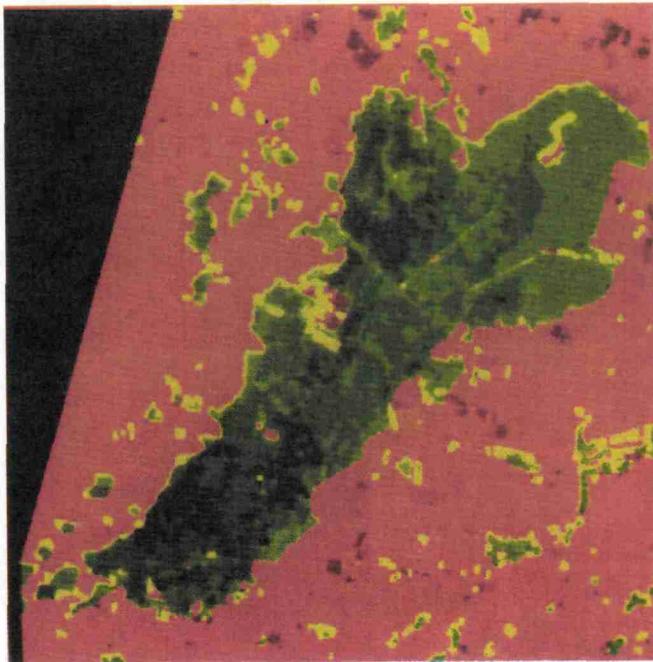


Figure 26-8. Image traitée : 3 itérations

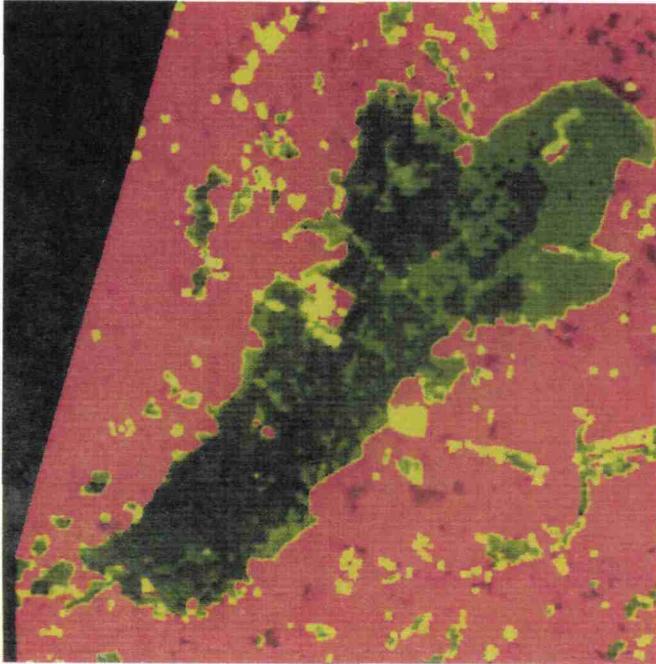


Figure 26-9. Image traitée : 5 itérations

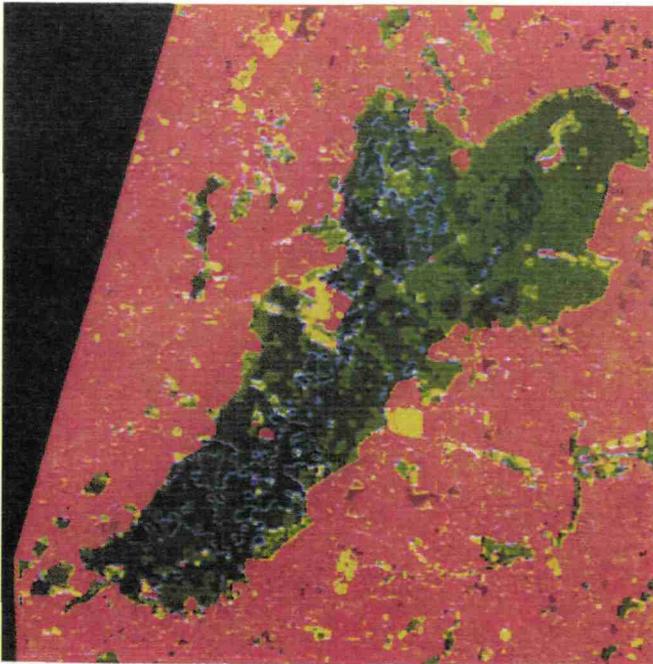


Figure 26-10. Image traitée : 5 itérations et application du Laplacien

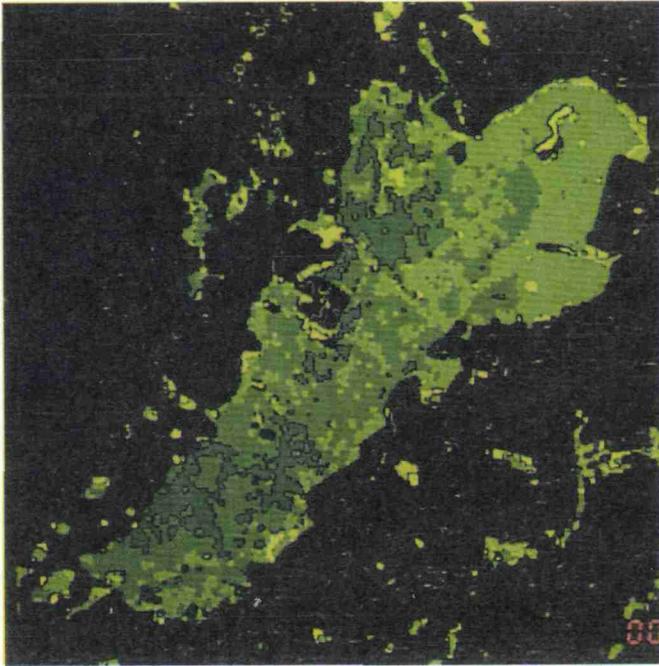


Figure 26-11. Image traitée : 10 itérations et application du Laplacien

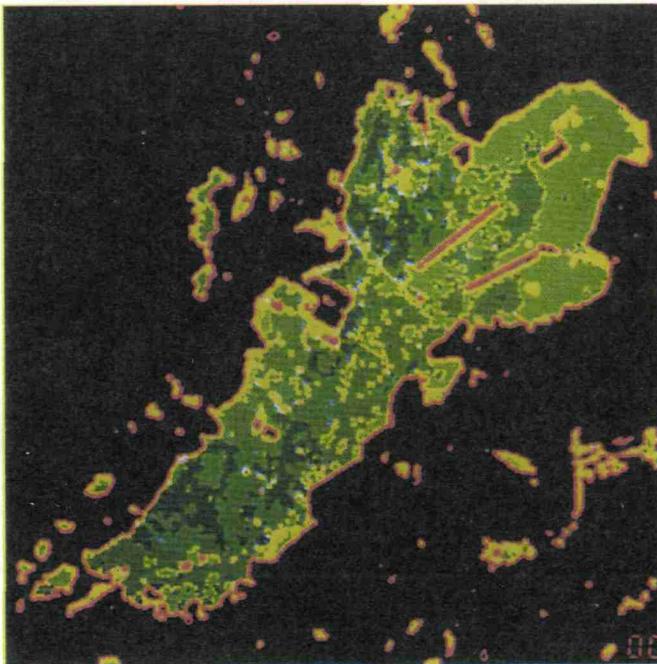


Figure 26-12. Image traitée : extraction de l'entité forêt, 3 itérations et application du Laplacien

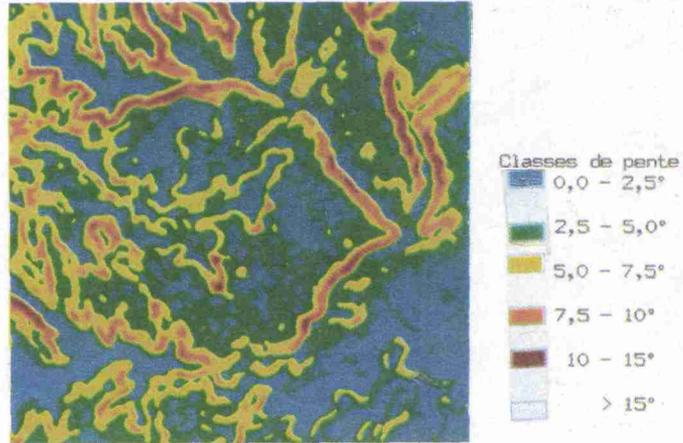


Figure 30-4. Dépression d'Aubel : les gradients de pente tirés du M.N.T.

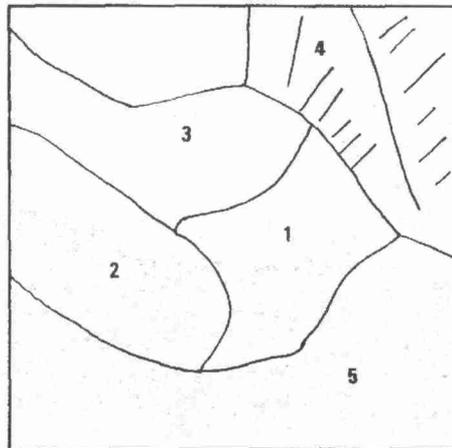
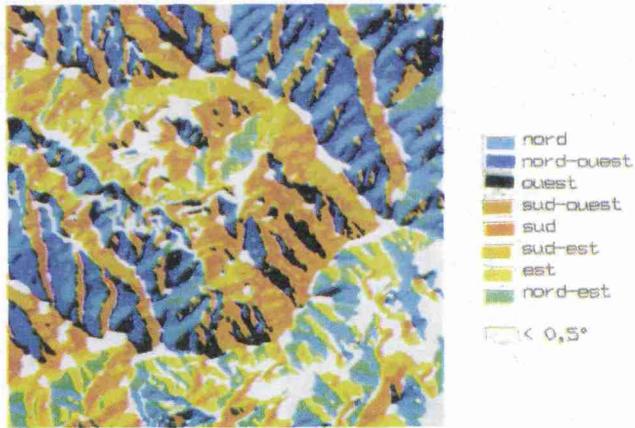


Figure 30-5. Dépression d'Aubel : a) les orientations de pente tirées du M.N.T.; b) secteurs de même orientation et linéaments

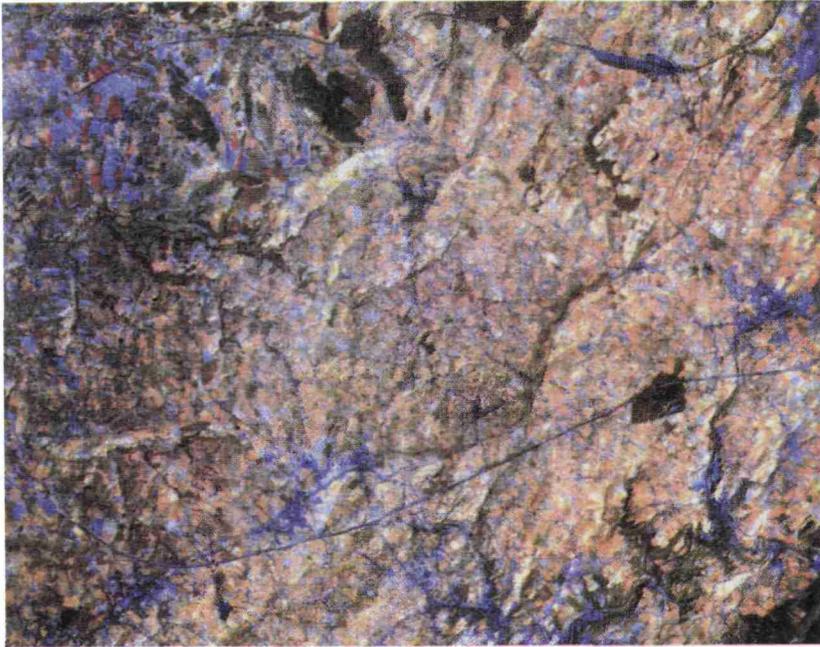


Figure 30-6. Composition colorée au départ des canaux TM 4, 5 et 7 sur une image TM de Landsat-5 du 10-09-1985

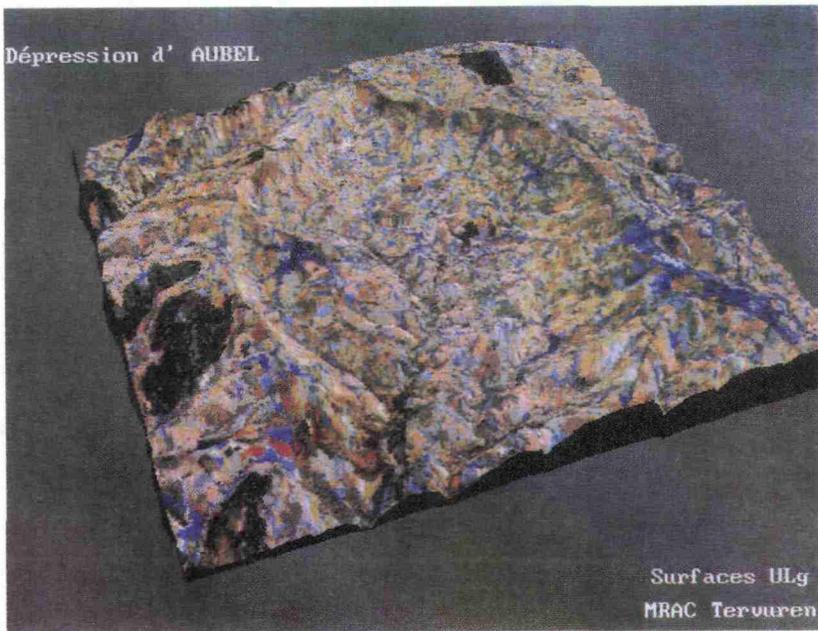


Figure 30-7. Composition colorée associée au bloc-diagramme tiré du M.N.T.; vue du nord-ouest

9

Téledétection et aptitude au ruissellement des bassins versants en Afrique soudano-sahélienne

CHRISTIAN PUECH et OLIVIER DELAHAYE

Laboratoire commun de téledétection du Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et forêts (CEMAGREF) et de l'École nationale du génie rural des eaux et forêts (ENGREF), B.P. 5095, 34033 Montpellier cedex 01, France; téléphone : (33) 67 04 63 00; télécopieur : (33) 67 63 57 95; télex : 490 990 F

Résumé

Les méthodes classiques de détermination des débits de crue sur les petits bassins versants du Sahel sont très imprécises et il est reconnu que c'est la mauvaise connaissance de l'aptitude des bassins au ruissellement qui est responsable de cette imprécision. L'objectif de ce travail est de préciser l'apport de la téledétection dans cette connaissance et dans la détermination du ruissellement. Le choix de la référence pour la liaison type de sol / ruissellement a été celui du catalogue des états de surface du Sahel de CASENAVE et VALENTIN (1989), récemment paru, catalogue qui synthétise les résultats du mini simulateur de pluie sur une dizaine d'années dans la région. Les étapes de la démarche sont les suivantes : 1) détermination des plans élémentaires «densité de végétation», «type de sol», et «culture/non culture» à partir d'images TM de Landsat de saison sèche (12-1988) et de mesures de terrain par transect; 2) reconnaissance sur le terrain des différents états de surface type, par mesures de terrain précises, dites «lignes»; 3) passage des plans élémentaires à la cartographie des états de surface type par corrélations entre les deux résultats précédents; 4) obtention d'une équation de lame ruisselée pour chaque pixel, donnant par exemple la lame ruisselée décennale. Au-delà de cette cartographie des lames ruisselées nous avons tenté une modélisation des écoulements sur les bassins versants de Manga (10,5 et 98 km²) au Burkina Faso, en nous servant du cheminement des eaux dicté par le modèle numérique de terrain. Les résultats obtenus sont encourageants.

Nous nous penchons particulièrement dans cet article sur les raisons qui permettent de penser qu'au Sahel le contexte est favorable pour l'utilisation de la télédétection à ce problème, mais aussi sur tous les écueils de la méthode proposée qui ne sont pas tous entièrement résolus.

1. Introduction

Les méthodes classiques de détermination des écoulements sur les petits bassins versants sahéliens se heurtent à une difficulté d'appréciation de l'aptitude au ruissellement. Les méthodes d'estimation élaborées pour la détermination des crues (RODIER et AUVRAY, 1965; PUECH et CHABI-GONNI, 1983) et pour celle des apports (RODIER, 1975, 1976), considèrent le bassin versant de façon globale. Or, la détermination des paramètres de description des bassins étant relativement subjective, la précision globale peut être médiocre, les résultats étant fortement dépendants de l'incertitude sur l'estimation des paramètres, notamment en ce qui concerne le terme de perméabilité. De plus, la détermination correcte du terme de perméabilité dépend grandement de l'expérience de l'hydrologue, et l'ingénieur de projet peut se sentir démuné face au problème de leur estimation. Il y a aussi des cas où la répartition des zones perméables et imperméables sur le bassin versant est inversée par rapport aux bassins ayant servis de base à l'élaboration des méthodes. Ainsi, on peut dire que c'est de la mauvaise connaissance de l'aptitude au ruissellement que viennent la plupart des difficultés d'estimation des débits sur ces bassins versants.

Nous nous sommes posés la question de savoir en quoi la télédétection et les techniques de description spatiale associées pouvaient aider pour une connaissance plus correcte de ces bassins, plus indépendante de l'opérateur et, partant, pour une meilleure détermination des critères de ruissellement.

Nous décrivons ici l'état actuel de notre recherche en ce sens.

2. Une zone *a priori* favorable à l'utilisation de la télédétection

Ce projet d'utilisation de la télédétection part d'un certain nombre de constatations faisant *a priori* du Sahel une zone où les informations satellitaires peuvent être facilement valorisées dans le contexte de la connaissance des ruissellements. Ces constatations sont les suivantes :

- grandes étendues sans données précises;
- écoulement souterrain négligeable devant le ruissellement au cours des crues;
- ruissellement essentiellement fonction de facteurs de surface;
- éléments de surface décryptés facilement sur les images satellitaires du fait de l'alternance des saisons sèche et pluvieuse et de la faible couverture arborée;
- précision très médiocre des méthodes de calcul des débits de crue sur petits bassins.

Dans ce projet nous tentons d'utiliser cette conjonction d'éléments favorables pour permettre une approche nouvelle de l'estimation du ruissellement.

Notre effort s'est porté sur plusieurs niveaux de recherche, autant de maillons permettant d'aller des données-images jusqu'aux valeurs de débits.

3. Niveau global

Une première utilisation possible de la télédétection pour la connaissance des débits pour ces bassins du Sahel a été exposée lors des Journées techniques de l'AUEP-UREF à Ouagadougou en mars 1990 (PUECH, 1990). Elle consiste à utiliser les images satellitaires pour définir les états de surface de la zone d'étude et de relier chacun de ces états à un critère de perméabilité. La connaissance de la répartition spatiale des états de surface sur les bassins à étudier permet alors de déterminer un paramètre global de perméabilité sur l'ensemble du bassin, au prorata de la répartition des divers états de surface rencontrés. On peut opérer de la même façon pour la connaissance d'un facteur pente à partir d'une série de photos aériennes ou d'un modèle numérique de terrain si l'on a les éléments pour le calculer. Dès lors, il devient possible d'utiliser ces renseignements dans une détermination des débits qui utilise les méthodes classiques.

Dans cette méthodologie, la télédétection est utilisée comme aide à l'estimation des paramètres, elle se place en quelque sorte comme un garde-fou d'estimation à opposer aux estimations plus ou moins subjectives habituelles.

Les résultats obtenus par cette méthode, appliquée sur le bassin versant du Baongo près de Titao au Burkina Faso, ont été validés à deux niveaux :

- validation de la carte des états de surface obtenus à partir de l'image HRV XS de SPOT du 21-10-1988 par comparaison à des photos aériennes basse altitude concomitantes à la fois aux observations de terrain et à l'image satellitaire;

- validation des débits estimés, en les comparant au débit observé sur le terrain lors d'une crue pratiquement décennale. Le débit observé ($52,5 \text{ m}^3/\text{s}$) est très proche des estimations effectuées à l'aide des méthodes classiques dans lesquelles on a injecté les paramètres estimés comme indiqué ci-dessus (respectivement $47,8$ et $60 \text{ m}^3/\text{s}$). Mais il est difficile de conclure sur une seule observation.

Au cours de cette première étude ont été abordés les problèmes de méthodologie de terrain et de décodage des images dans un contexte de «paysage ouvert» où les entités à décrypter au sol ne correspondent pas à un critère unique et précis (tel que «blé», «maïs», etc.), mais à une juxtaposition sur le terrain d'entités différentes en pourcentages variables : sols nus, savanes, cultures, habitations, arbres divers, composant à l'intérieur même d'un pixel HRV XS ($20 \times 20 \text{ m}$) un amalgame souvent complexe.

4. Niveau spatialisé

Nous abordons dans cet article une deuxième approche possible de l'utilisation des images satellitaires, visant cette fois une connaissance spatialisée de l'aptitude au ruissellement de ces bassins.

L'hypothèse de base est d'essayer de récupérer les informations sur les transformations élémentaires pluie - débit fournies par l'appareil dit «mini simulateur de pluie» que l'ORSTOM utilise dans le Sahel depuis une bonne dizaine d'années. Il se trouve en effet qu'une synthèse sur les états de surface du Sahel donnant pour chacun d'entre eux une équation de lame ruisselée en fonction de la pluie a été réalisée par l'ORSTOM récemment (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Malgré tous les défauts de cette connaissance, dus essentiellement à la taille de la mesure effectuée (seulement 1 m^2 !), il est apparu intéressant d'essayer de coupler ce type de renseignement à ceux issus de la télédétection.

La méthodologie a consisté à déterminer à l'aide d'images satellitaires la composition en «états de surface types» représentative de chaque pixel. À partir de cette connaissance il est possible de connaître pour chaque pixel élémentaire la fonction de production associée à une pluie donnée, ce qui conduit à une cartographie des possibilités de ruissellement du bassin versant.

Au-delà de ce but simplement cartographique, il est intéressant de voir dans quelle mesure il est possible de passer à la connaissance des débits sur l'ensemble du bassin versant avec tous les problèmes, liés au changement d'échelle, qui en découlent.

4.1. Mini simulateur de pluie et états de surface

Le mini simulateur de pluies de l'ORSTOM est un appareil qui simule une pluie sur un carré élémentaire de 1 m². Les essais sont menés de façon à pouvoir relier la lame ruisselée aux valeurs de pluie P et à l'indice de pluie antérieure I_p caractérisant l'état d'humidité du sol. Un protocole précis de pluie en fonction du temps est appliqué.

Les résultats de ces simulations permettent, en théorie, d'associer à chaque type de surface de taille 1 m², une équation hydrologique reliant la pluie, l'indice des pluies antérieures et la lame ruisselée, de la forme suivante :

$$L_r = a \cdot P + b \cdot I_k + c \cdot P \cdot I_k + d \quad (1)$$

dans laquelle :

L_r = valeur moyenne de la lame ruisselée pour le type modal (mm);

P = pluie journalière de récurrence annuelle ou décennale (mm);

a, b, c et d = coefficients dépendants du sol;

I_k = indice des précipitations antérieures (de Kohler), fonction de la pluie et de l'indice de la veille. L'indice du jour n est calculé à partir de l'indice du jour n-1 par :

$$I_{k_n} = (I_{k_{n-1}} + P_{n-1}) e^{-x} \quad (2)$$

avec t = le temps en jours;

x = coefficient d'ajustement, généralement pris égal à 0,5.

Le mini simulateur a été utilisé sur de nombreux états de surface du Sahel, à tel point qu'une synthèse a pu être présentée (VALENTIN et CASENAVE, 1989).

Cette synthèse fait ressortir les points connus précédemment, à savoir que la présence d'une croûte de battance sur le sol modifie grandement les conditions du ruissellement. Plusieurs types de croûtes ayant été définis, chacun avec sa propre réponse, il apparaît important de pouvoir les distinguer convenablement.

Le catalogue présenté a l'avantage de proposer une base de référence homogène et stable sur la zone en question, et il semble donc *a priori* intéressant de chercher à s'y ramener (tab. I).

On trouve le premier écueil de la méthode quand on se préoccupe de savoir quelles observations sont nécessaires pour définir sans ambiguïté ces états de surface types. On s'aperçoit alors que la détermination des différents types de croûtes observables nécessite la connaissance de paramètres tels que culture/non culture c'est-à-dire des éléments *a priori* détectables sur image satellitaire, mais aussi une série d'autres observations qui sont au contraire d'une finesse trop grande pour être déterminées à partir des images : par exemple le nombre de micro horizons, la présence de termites, etc. (fig. 1).

Il en ressort que les images satellitaires ne pourront pas nous donner directement les renseignements voulus mais qu'il faudra opérer par étapes successives.

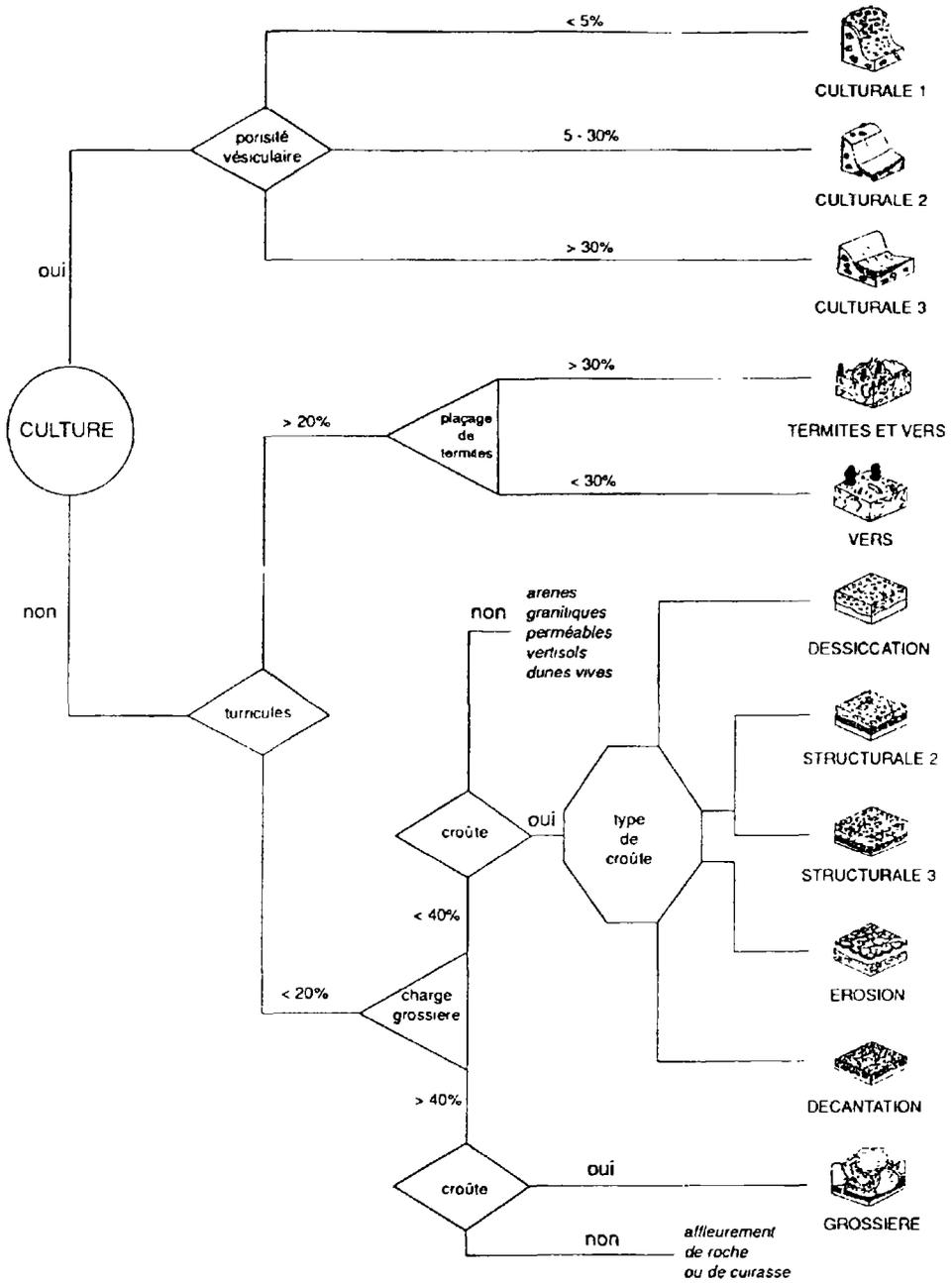


Figure 1. Clef de détermination des types de surfaces

Tableau I. Classes des états de surface types

Code	Désignation
C1	Cultures 1
C2	Cultures 2
C3	Cultures 3
TER	Termites et vers
VER	Vers
DES	Croûte de dessiccation
ST1	Croûte structurale à 1 horizon
ST2	Croûte structurale à 2 horizons
ST3	Croûte structurale à 3 horizons
ERO	Croûte d'érosion
DEC	Croûte de decantation
GRO	Croûte grossière
RUI	Croûte de ruissellement
EOL	Croûte de dépôts éoliens

4.2. Télédétection et résultats cartographiques associés

4.2.1. Zone d'étude

La zone d'étude concerne l'Afrique sahélienne et soudano-sahélienne et nous avons privilégié deux axes pour nos calculs de faisabilité.

Un premier axe nord-sud au Burkina Faso qui concerne une dizaine de bassins versants de 10 à 400 km² sous une pluviométrie annuelle moyenne allant de 400 mm à 1200 mm (fig. 2 et tab. II). Les données satellitaires correspondant à tous les bassins de cet axe ont été traitées, et nous présentons ici les résultats du groupe de Manga, contenant trois bassins très proches dont deux emboîtés : les bassins de Louré, de Kazanga et de Binndé (voir le tableau III pour leurs caractéristiques).

Un deuxième axe de support d'étude est en cours : il concerne quatre groupes de bassins du Sénégal au Burkina Faso, et doit nous aider à voir les limites dans le cas de variations des types de sols. Dans ce deuxième groupe, nous avons gardé les bassins de Manga, présentés ici, afin de pouvoir relier les résultats de cette série à ceux de la série précédente.

4.2.2. Images satellitaires utilisées

Dans cette approche, nous avons privilégié les images TM aux images HRV, pour les raisons qui suivent.

Le changement de résolution en passant de HRV XS (20 m) à TM (30 m) ne nous a pas semblé fondamentalement gênant dans ces paysages « ouverts » sahéliens combinant plusieurs entités distinctes superposées. La détection parfaite de toutes les composantes individuelles au sol demanderait en fait une résolution compatible avec chaque arbre individualisé, ce qui n'est, ni possible avec les satellites civils d'observation de la terre actuellement en service, ni peut être souhaitable quand on s'intéresse à la caractérisation de bassins versants de dizaines voire de centaines de kilomètres carrés.

Tableau II. Bassins versants étudiés au Burkina Faso

Bassins	Surface (km ²)	Surface cultivée	Latitude	Pluie annuelle (mm)
Boukouma	430	30,3 %	14° 10'	550
Sian	750	38,7 %	13° 06'	700
Gha	30	27,0 %	13° 13'	700
Zeguedeguen	490	42,9 %	12° 57'	700
Yitenga	100	25,9 %	12° 11'	800
Nagbangre	450	38,1 %	12° 12'	800
Ouedbila	150	35,0 %	12° 00'	850
Louré-Manga	98	55,9 %	11° 40'	900
Tiebele	30	55,6 %	11° 07'	1150

Tableau III. Caractères physiques et morphologiques des bassins de la région de Manga

Caractères	Louré	Kazanga	Binndé
Superficie en km ²	98,0	54,8	9,7
Périmètre en km	42,0	32,0	13,8
Indice de compacité	1,19	1,21	1,24
Longueur du rectangle équivalent en km	14,0	11,0	4,93
Largeur du rectangle équivalent en km	7,0	5,0	1,97
Cote minimum en m	260	269	299
Cote maximum en m	330	330	330
Cote 95% de surface	316,6	319,1	324,5
Cote 5% de surface	270,1	274,5	300,5
Indice global de pente en m/km	3,32	4,09	4,87

L'apport de TM nous a paru par contre intéressant par la gamme plus complète de longueurs d'onde et la possibilité de décoder des informations plus nombreuses à partir d'une seule image.

Enfin, un des critères de choix et non des moindres, est la possibilité d'avoir sur la même image, à la même date, des bassins versants contigus ou emboîtés, et donc de pouvoir couvrir l'ensemble de la zone d'étude avec une seule et même classification d'images.

La date d'image retenue est le début de la saison sèche, car elle permet à la fois de bien caractériser les sols, élément essentiel de notre quête, et de différencier culture/non culture ce qui est aussi nécessaire pour utiliser la grille d'états de surface types.

Pour les bassins versants de Manga qui vont servir d'exemples à notre démarche, l'image utilisée est l'image TM 195-52 du 18-12-1988.

4.2.3. Méthodologie de terrain mise en oeuvre

La méthodologie de terrain (partie I du schéma général, fig. 3) s'inspire à la fois de ce que nous avons mis au point dans l'étude globale précitée, et des nécessités nouvelles imposées par la grille de connaissance des états de surface types. Dans la pratique nous avons réalisé une double mesure de terrain.

Une première série de mesures était destinée à décoder les images de téledétection en plans élémentaires physiques tels que «végétation», «sols», «occupation du sol». Étant donné les difficultés de positionnement sur le terrain, il est exclu de vouloir faire des observations de terrain avec la précision d'un pixel et nous avons dû nous résoudre à faire des mesures sur des zones homogènes ayant une taille de plusieurs pixels contigus. C'est pourquoi nous avons opéré par «transects» avec des blocs d'observation ayant une échelle compatible avec la taille des pixels utilisés : on a retenu des carrés de 100 X 100 m le long de parcours de 2000 m. Ont été relevés de façon aussi précise que possible les éléments de type et densité de végétation, de type, couleur et occupation du sol, chacun en pourcentage sur le carré de mesure. Le nombre de transects étudiés a varié de 10 à 20 selon la superficie des groupes de bassins versants étudiés (de 30 à 400 km²).

Par exemple sur le bassin versant de Louré-Manga (98 km²), 12 transects d'une longueur totale de 18 000 m ont été étudiés (fig. 4). Ceci correspond donc à une «surface enquêtée» de 1,8 km² pour une superficie de 30 km² (soit un taux d'échantillonnage de $1,8/30 = 5\%$).

Une deuxième série de mesures, sur une échelle plus fine et un nombre de paramètres plus grand, a aussi été faite conjointement afin de connaître, localement, la liaison entre les paramètres visibles sur images satellitaires et ceux nécessaires à l'utilisation de la grille des états de surface types.

Ces mesures ont été faites par «lignes» de 250 m de long, et l'on a associé une «ligne» à chaque «transect» défini plus haut.

Un grand problème s'est révélé lors des premières manipulations : le positionnement exact des transects dans l'image s'est révélé être très délicat par l'absence de points de repère précis dans ces zones, et l'absence de cartes topographiques adaptées, et ceci malgré l'utilisation conjointe de photographies aériennes.

Dans certains cas, le positionnement du transect par l'équipe de terrain s'est révélé avoir dérivé de 1000 à 1500 m par rapport à la position exacte (insuffisance de points de repère, ou déplacement de pistes entre la date de réalisation des divers documents et celle du terrain).

La solution, très satisfaisante, mise ensuite en pratique a été l'utilisation systématique d'un appareil de positionnement par satellite (GPS : Global Positioning System), qui, utilisé en relatif nous a donné des positions avec une précision de l'ordre de 30 m, c'est-à-dire une mesure totalement compatible avec la taille du pixel satellitaire.

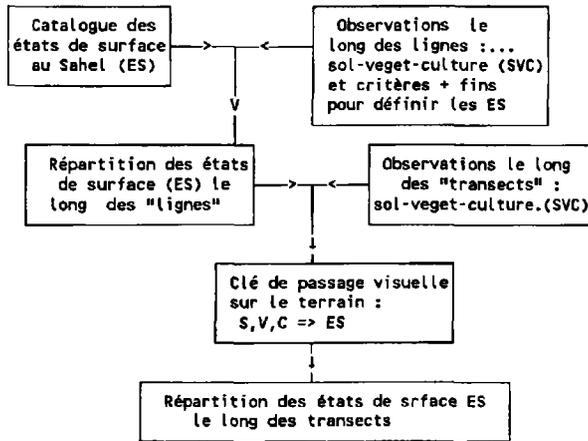
4.2.4. Dépouillement des images

Les classifications d'images ont été faites sur un mode dirigé, sur logiciel Multiscopie en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, et l'on a cherché à définir une série de classifications différentes donnant des plans physiques d'explication élémentaires (partie II du schéma général, fig. 3).

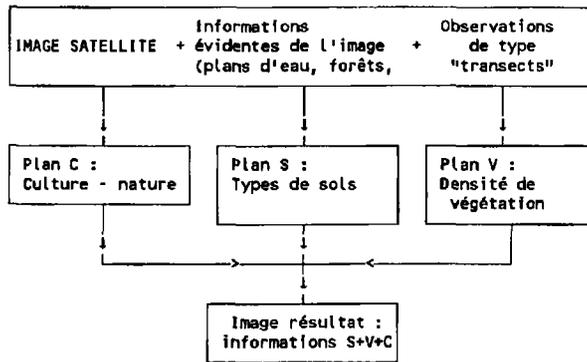
L'apprentissage a été fait essentiellement à partir des mesures de terrain par transects, en nous basant sur la portion de relevés présentant une stabilité du critère étudié sur un ensemble d'au moins trois carrés consécutifs (300 m). Il a été complété à partir d'éléments évidents de l'image : eau, village, cuirasses latéritiques, marigots, etc.

Un premier plan dit «végétation» a été élaboré sur la base de cinq classes de densité de végétation séparées par les seuils 2%, 5%, 15% et 40%. La précision géographique a été

1. TRAVAIL DE TERRAIN



2. TELEDETECTION



3. PASSAGE AUX LAMES RUISSELEES

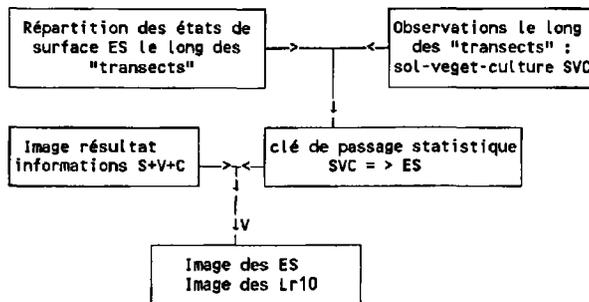


Figure 3. Schéma de la méthode utilisée pour décoder les images

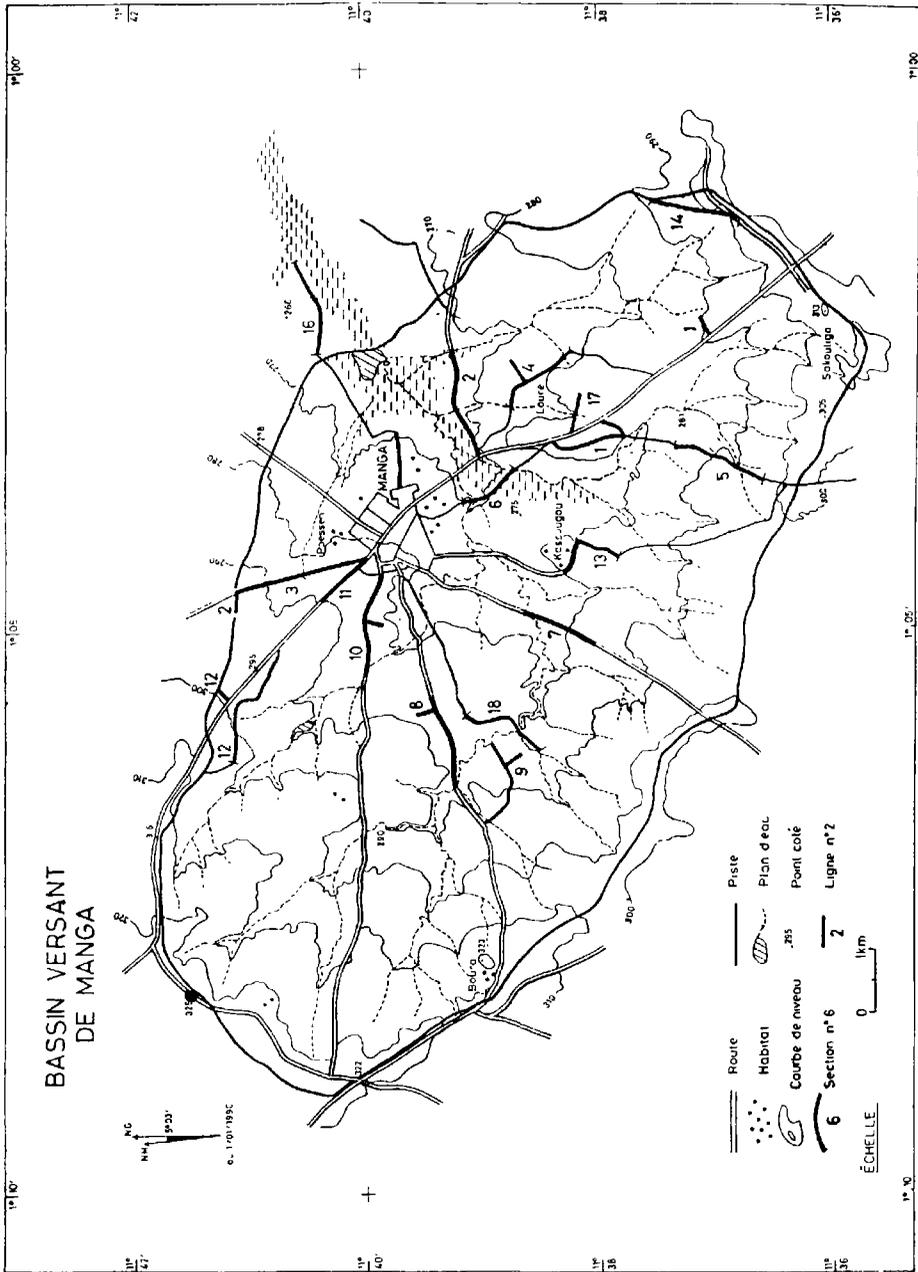


Figure 4. Bassin versant de Louré-Manga

évaluée sur parcelles de contrôle. Par exemple sur le bassin de Louré-Manga elle est de 71%, 90%, 31%, 30% et 69% pour les cinq classes de végétation et 92% pour l'eau.

De même a été défini le plan «occupation du sol» cherchant à séparer les zones de culture, jachère et «nature». Après regroupement de classes, on arrive à une précision géographique de 71% pour la classe culture majoritaire et 70% pour celle de nature majoritaire.

Enfin, le plan «types de sols» a différencié les zones suivantes : affleurements rocheux et cuirasses, blocs et graviers, gravillons, sables grossiers, sables fins, limons. La précision géographique par classe varie de 54% à 90%.

Les confusions auxquelles on arrive sont tout à fait acceptables surtout si l'on se place dans le contexte de prise d'information de cette zone. En effet les matrices de confusion dont nous venons de donner quelques résultats ci-dessus, ne sont pas adaptées à la détermination de la qualité de décodage de l'image satellitaire avec ce type de paysage et des parcelles d'apprentissage de cette taille.

Prenons un contre-exemple simple : supposons une parcelle d'apprentissage (100 X 300 m) à laquelle nous avons attribué une densité de végétation moyenne de classe 3 (5% à 15%). Dans la réalité cette parcelle peut être composée d'un mélange de pixels de classes 2, 3 et 4 dont la densité moyenne est comprise entre 5 et 15%. La classification, au contraire, individualise chacun des pixels et les range dans la classe correspondante. Aussi, quand on comptabilise à la fin du calcul les pixels bien classés, même si le calcul est parfait, on doit observer sur la matrice de confusion une dérive de pixels vers les zones voisines : classe 3 vers classes 2 et 4 dans l'exemple ci-dessus.

C'est en fait ce que l'on a observé sur les matrices calculées et ceci nous permet de dire que la qualité de décodage de l'image est peut être bien meilleure que celle indiquée par les chiffres ci-dessus. La seule façon de trancher sera de faire des validations autres de ces résultats.

4.2.5. Obtention des cartes d'états de surface et de l'aptitude au ruissellement

Arrivés à cette étape, nous connaissons pour chaque pixel de l'image l'état de sa surface par le triplet SVC, S pour sol, V pour végétation, et C pour le plan culture/non culture qui est un dérivé de l'occupation du sol (fig. 9-5, voir cahier couleur).

Pour l'obtention des cartes d'états de surface (partie III du schéma général, fig. 3) nous faisons intervenir la deuxième série de mesures de terrain, qui nous donne pour le bassin versant étudié, des statistiques sur l'apparition simultanée des critères «grossiers» (SVC) déjà cartographiés et de ceux plus fins nécessaires à l'utilisation de la grille de détermination.

Nous partons de l'hypothèse que, localement, la présence ou l'absence de micro horizons, termites et autre critères «fins» est associée à la description grossière des paysages. Et que si, localement, on a pu déterminer la combinaison d'états de surface types associée à tel triplet SVC, on suppose que dans toute l'image on retrouvera la même association.

Il suffit donc de trouver localement une règle statistique de passage entre les triplets SVC et les combinaisons d'états de surface.

On peut, si le bassin versant est grand et la stabilité statistique non assurée, travailler en parties d'images segmentées.

Ainsi à tout triplet SVC, donc à tout pixel est associée une équation de lame ruisselée de forme :

$$Lr = a \cdot P + b \cdot P \cdot Ip + c \cdot Ip + d$$

où a, b, c et d sont des coefficients fonction du triplet, donc dépendants du type d'état de surface.

Le passage à une carte des valeurs de ruissellement ne pose alors plus de problème puisqu'il suffit de faire l'hypothèse d'une pluie donnée et d'un indice de pluies antérieures donné pour avoir la cartographie de la production élémentaire au niveau du pixel.

La figure 9-6 (voir cahier couleur) est un exemple d'un tel résultat pour les bassins de Manga, avec une pluie de 120 mm et un indice de pluies antérieures de 20 mm.

4.3. Essai d'utilisation de cette carte dans une connaissance globale des débits sur le bassin versant

L'extrapolation de ces résultats élémentaires à une surface hétérogène plus grande, comme le bassin versant, pose de grands problèmes.

4.3.1. Détermination du volume de crue

La méthode la plus simple consiste à faire cette extrapolation par la somme des équations des lames élémentaires, pondérées au prorata de leurs étendues respectives.

$$Lrc = \sum_i (Lri * s) / S \text{ (lame ruisselée calculée)}$$

$$Krc = \sum_i (Lri * s) / S / P10 \text{ (coefficient de ruissellement calculé)}$$

où Lri est la lame ruisselée produite par le pixel i ,

S la surface du bassin, s la surface du pixel,

$P10$ est la pluie décennale pour un événement.

Or, on sait bien que le ruissellement global d'un bassin n'est pas la somme des ruissellements partiels. Une dérive certaine se produit, que l'on peut appeler «effet d'échelle», ou de globalisation, et qui vient du comportement différent de parcelles juxtaposées, ce qui fait que, théoriquement, on n'a pas le droit de faire cet amalgame.

Ce problème d'échelle est, pour l'instant, le point le plus obscur de la démarche qui atteint ici ses limites : un tel passage, de 1 m² à la taille d'un petit bassin de l'ordre de 10 à 100 km², correspond à un facteur d'échelle de 10⁷ à 10⁸ ! Or, il est déjà évident que le comportement hydrologique d'un mètre carré est très différent de celui d'un champ ou d'un versant. Que dire alors quand on passe au bassin en entier ?

De plus cette méthodologie ne tient pas compte :

- des pentes : heureusement celles-ci sont généralement faibles dans le Sahel et leur influence sur le ruissellement moins importante que celle des états de surface;

- de la modification des infiltrations due au ruissellement provenant de l'amont du carré de mesure;

- de la succession des perméabilités lors du cheminement des eaux : la présence d'une zone sableuse n'a pas le même effet en haut de versant et en bas de pente.

C'est pourtant la solution que l'on retrouve habituellement dans les documents de l'ORSTOM, qui contourne par l'aval la difficulté en utilisant un «coefficient de calage» : rapport entre valeurs calculées et valeurs observées, qui rattrape ou cache tous les défauts de la méthode. Ce coefficient est établi à partir de mesures hydrologiques (débits) qui sont comparées aux résultats calculés par mini simulation de pluie étendue au bassin versant.

Ce coefficient de calage nécessaire pour raccorder cette estimation à la réalité peut s'exprimer sous forme d'une régression linéaire :

$$(Lr \text{ observée}) = A * (Lr \text{ calculée}) + B \quad (3)$$

La validité de la méthode n'est donc pas résolue puisque ce coefficient de calage est une «boîte noire» déterminée *a posteriori* et qui englobe tout ce que ce modèle ne sait pas encore quantifier, comme en particulier la hiérarchisation des états de surface au sein du bassin versant, les effets de pentes, etc. De plus, ces coefficients de calage sont non seulement variables dans l'espace (d'un bassin à l'autre), mais aussi dans le temps (d'une année à l'autre sur le même bassin).

Malgré ces graves inconvénients, on garde l'espoir de parvenir directement de la mesure locale, à l'estimation de la lame ruisselée à l'échelle du bassin versant (ALBERGEL, 1987).

Sur les trois bassins de Manga, nous avons établi cette fonction de calage en comparant les résultats bruts de lames ruisselées donnés par notre détermination et les observations hydrologiques effectuées sur le terrain en 1963-1965 et 1983-1985 par les équipes de l'ORSTOM. On a obtenu :

Bassin de Louré : $Lro = 0,90 Lrc + 1,5$ ($r=0,81$ et $n=23$) (voir fig. 7);

Bassin de Kazanga : $Lro = 0,53 Lrc + 0,2$ ($r=0,64$ et $n=72$);

Bassin de Binndé : $Lro = 0,53 Lrc - 0,56$ ($r=0,86$ et $n=106$).

Appliquant ces résultats à l'averse décennale, il est alors possible de trouver les valeurs de ruissellement décennales de chaque bassin.

Ce que l'on a synthétisé sur le tableau IV et la figure 8, où l'on peut comparer les résultats (Kr10 calculé) à ceux obtenus par l'ORSTOM sur le terrain (SIRCOULON et KLEIN, 1964; KLEIN 1964 et 1967; ALBERGEL, 1987).

4.3.2. Détermination de l'hydrogramme de crue

Pour passer du volume de crue au débit maximal de la crue, il est nécessaire d'avoir des informations sur la forme de l'hydrogramme, soit par des coefficients types de passage du débit moyen au débit maximal, soit mieux, si c'est possible, par reconstitution de l'hydrogramme de crue.

Nous présentons ici une ébauche de modélisation de l'hydrogramme, effectuée surtout dans le souci de montrer qu'à partir d'une connaissance pixel à pixel des facteurs de ruissellements et d'une fonction de transfert déterminée elle aussi pixel à pixel il était possible d'aller jusqu'au bout du calcul. Et que, grâce aux outils spatialisés que nous en offrent la télédétection et les modèles numériques de terrain, il était possible de construire une chaîne entièrement automatisée pour produire le débit de crue du bassin.

La modélisation présentée part des hypothèses déjà énoncées pour la partie volume de crue à savoir que la lame ruisselée calculée sur chaque pixel à l'étape précédente est un bon index de la partie de ruissellement qui va effectivement arriver jusqu'à l'exutoire.

Elle utilise aussi de nouvelles hypothèses basées sur l'utilisation d'un modèle numérique de terrain pour la détermination de la fonction de transfert associée à chaque pixel.

À partir du modèle numérique de terrain (MNT, fig. 9-9, voir cahier couleur), on peut en effet calculer pour chaque pixel la distance qui le relie à l'exutoire compte tenu du cheminement hydraulique le long des pentes. Si l'on suppose, en première approximation, que la vitesse de propagation des eaux est constante dans tout le bassin dès que l'eau est arrivée dans des chenaux de drainage, il est possible de déterminer le temps mis par une goutte d'eau pour aller d'un point quelconque à l'exutoire.

Nous pouvons résumer les hypothèses utilisées de la façon suivante :

1) la pluie est homogène dans le temps et dans l'espace pendant l'épisode pluvieux étudié (cette hypothèse n'est pas impérative mais si on l'utilise, cela limite l'emploi du modèle à des bassins de taille inférieure à 120 km²);

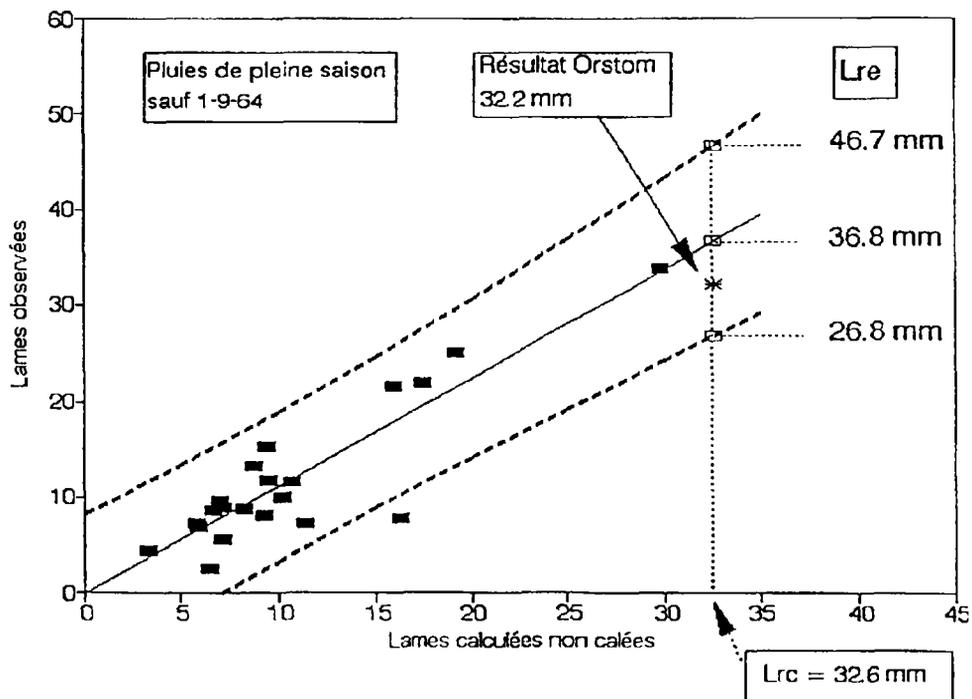


Figure 7. Fonction de calage sur Louré-Manga; intervalle de confiance à 95%

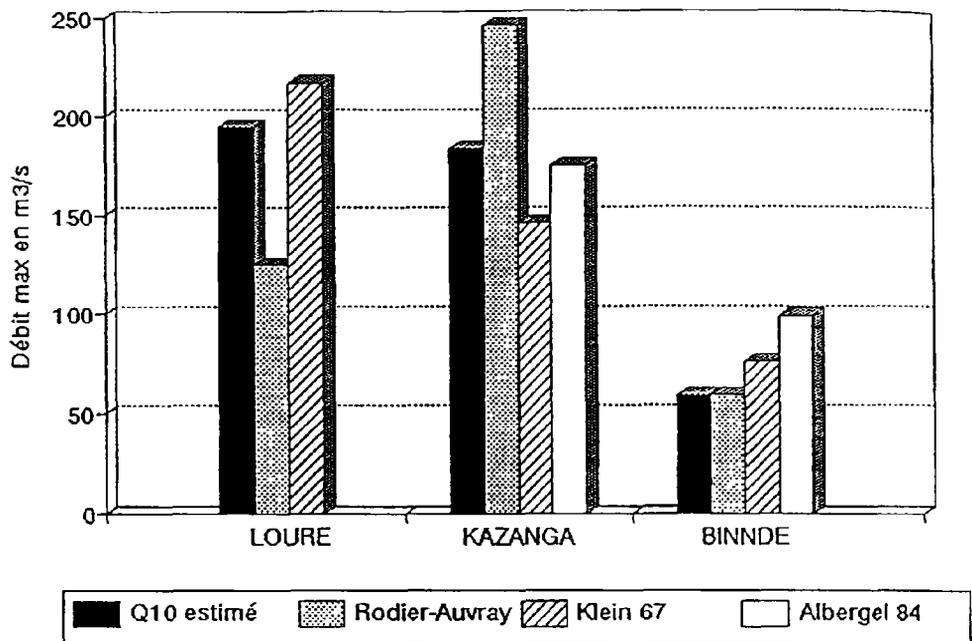


Figure 8. Comparaison des évaluations du débit de crue décennale; bassin de Manga

Tableau IV. Comparaison des coefficients de ruissellement pour une averse décennale selon différentes méthodes

Bassin	Louré	Kazanga	Binndé
Télédéttection			
Pluie décennale ponctuelle	101	101	101
P10 sur le bassin	79,8	83,0	92,4
Pourcentage de culture	55,9%	58,2%	63,2%
Lr10 calculée	33,8	38,9	41,0
Kr10 calculé sans végétation herbacée	42,4%	46,9%	44,4%
Kr10 calculé avec végétation herbacée	28,4%	32,4%	28,6%
Mesures de terrain			
Kr10 par Sircoulon en 1964	50%	53%	43%
Kr10 par Klein en 1967	41%	41%	38%
Kr10 par Albergel en 1984		35,5%	39%
Estimation			
Par la méthode Rodier-Auvray	36%	40%	38%

- 2) tout le débit provient du ruissellement;
 - 3) la connaissance des paramètres d'écoulement est possible par télé-déttection;
 - 4) les équations de lame ruisselée du catalogue des états de surface sont extrapolables au bassin en entier : c'est un des plus gros problèmes posés par cette méthode (on a vu qu'un coefficient de calage global était nécessaire);
 - 5) les pentes ne sont pas prises en considération pour la fonction de production : ceci vient directement des résultats du simulateur de pluie qui n'en tient pas compte; au Sahel les pentes sont très faibles et leur influence peut souvent être supposée peu importante et homogène d'un bassin à l'autre;
 - 6) les vitesses d'écoulement entre chaque point et l'exutoire sont supposées constantes, et le temps de transfert ne dépend que de la distance de drainage, calculée automatiquement à partir du modèle numérique de terrain; le ruissellement se transporte à l'exutoire avec un simple décalage en temps : c'est le mode de transfert de type hydrogramme unitaire.
- À partir de ces hypothèses un modèle de propagation a été écrit en langage Turbo C sur micro ordinateur et appliqué aux bassins versants étudiés.
- Nous donnons ci-dessous quelques résultats obtenus pour les bassins de Manga (fig. 10 et 11).

La comparaison entre les hydrogrammes de crues estimés à l'aide de notre méthodologie et ceux observés ou estimés de façon traditionnelle, montre une grande cohérence globale entre observations et estimations. Les résultats que l'on observe pour les trois bassins étudiés sont tout à fait acceptables, et donc encourageants.

4.3.3. Suite de l'étude, validations

Notre souci pour la suite de cette recherche porte d'abord sur la validation précise de chaque niveau de la démarche, en tenant compte de variations régionales possibles :

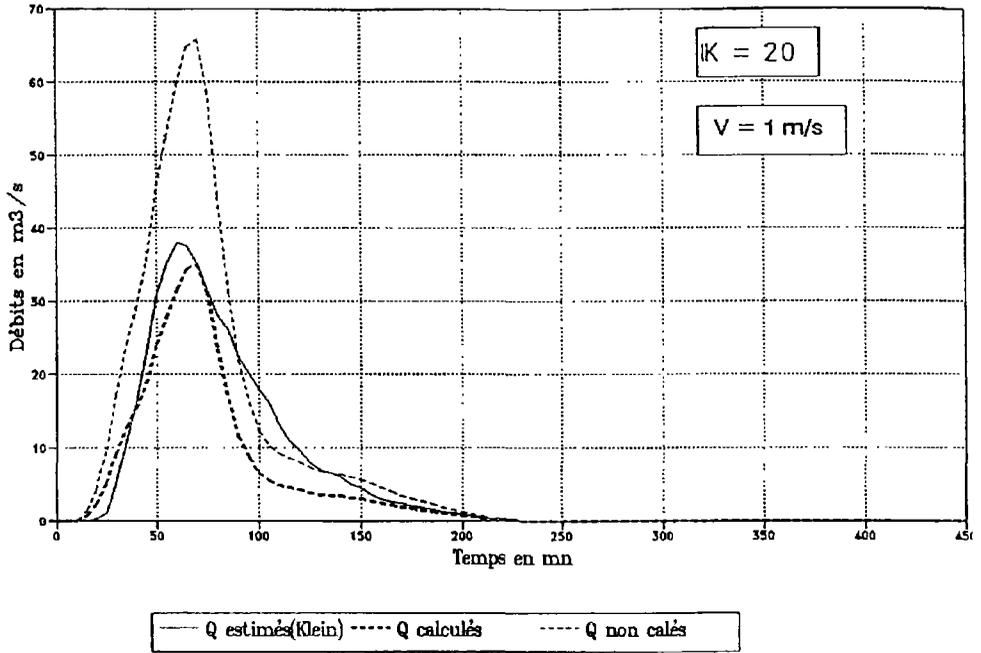


Figure 10. Reconstitution de la crue annuelle sur Binndé-Manga (à partir du hyétogramme décennal type)

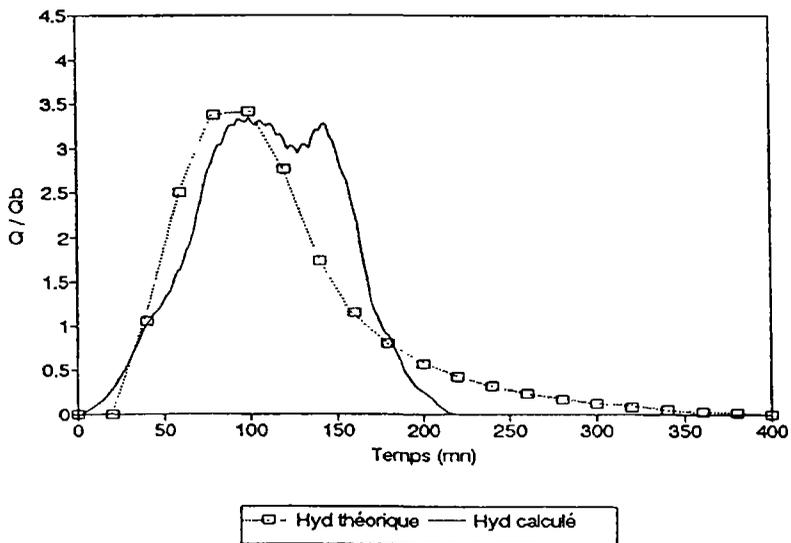


Figure 11. Reconstitution de l'hydrogramme unitaire sur Kazanga-Manga

- validation du traitement des images, ce que l'on peut approcher en comparant la carte des états de surface obtenue par rapport à celles définies sur le terrain;

- validation du calcul des lames ruisselées, à savoir la comparaison cartographique des lames ruisselées élémentaires calculées par rapport à celles qui ont été obtenues *in situ* par des mesures de l'ORSTOM, et ceci dans des conditions régionales diversifiées.

Nous pensons aussi améliorer l'approche hydrologique en utilisant des observations à d'autres résolutions spatiales ou temporelles, par exemple :

- la connaissance des conditions d'écoulement à la parcelle et sur un versant élémentaire; il serait intéressant, au niveau de la parcelle, de préciser les conditions d'écoulement, de façon à pouvoir mieux simuler la composition des ruissellements élémentaires; il manque en effet beaucoup d'informations sur le passage d'échelle du m² au versant puis du versant au bassin : les mesures existantes au niveau de versant élémentaire sont quasi inexistantes;

- l'utilisation des images à basse résolution spatiale.

Les calculs précédents à partir des images haute résolution nous permettent d'estimer les états de surface du bassin versant, états supposés stables dans le temps et décrits sans ambiguïté. Or, ne serait-ce qu'au cours de la saison des pluies, les états de surface du Sahel sont éminemment changeants. Il apparaît donc utile de pouvoir différencier à l'intérieur même de l'année ces variations d'états de façon à les inclure dans les calculs du ruissellement. Et une des meilleures façons d'estimer ces fluctuations passe par l'utilisation des images basse résolution (1 km) mais forte répétitivité (1 jour) du satellite NOAA.

5. Conclusion

L'objectif était avant tout de définir, en la testant, une méthode aussi fiable que possible de caractérisation hydrologique des bassins versants du Sahel, pour ce qui concerne leur aptitude au ruissellement; cette méthode devant combiner la connaissance au sol des états de surface type ORSTOM et l'utilisation de la télédétection satellitaire.

Si des démarches voisines ont déjà été mises en oeuvre pour le bassin du Baongo à Titao (Laboratoire commun de télédétection) et pour la mare d'Oursi (ORSTOM), la méthode appliquée dans cette étude en diffère sensiblement. Un des premiers problèmes a été de combiner les deux méthodologies : on s'est arrêté sur le choix de l'utilisation du catalogue des états de surface de l'ORSTOM, à coupler avec les techniques de télédétection du LCT.

Au niveau décodage des images de télédétection, l'étude montre qu'on s'approche plus finement de la réalité des états de surface par une superposition de plans descripteurs pertinents, qu'en s'appuyant sur un seul critère intégrant les états de surface.

Le couplage télédétection-hydrologie demande encore à être affiné, mais semble donner finalement des résultats cartographiques intéressants. Il faudrait toutefois les comparer à des résultats obtenus par d'autres approches pour en déduire la validité : contrôle de la validité du catalogue des états de surface par simulation de pluie directe et contrôle des conclusions de lames ruisselées grâce à des mesures hydrologiques.

Un des problèmes majeurs se rencontre au moment de l'utilisation des résultats de lames ruisselées qui ne sont théoriquement valables que pour une surface de 1 m² isolée du contexte. Nous avons ébauché ici les quelques possibilités d'utilisation de ces cartographies sans toutefois pouvoir les valider sur des données hydrologiques conséquentes : débit à l'exutoire, modélisation sommaire des écoulements.

6. Références

- ALBERGEL, J. 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. ORSTOM, Études et thèses, 341 p.
- CASENAVE, A. et VALENTIN, C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. ORSTOM, Collection Didactiques, Paris.
- DELAHAYE, O. 1991. Apports de la téledétection à l'étude des ruissellements en zone soudano sahélienne. Mémoire de 3^e année de l'ENITRIS, Strasbourg, 90 p.
- KLEIN, J.C. 1964 et 1967. Étude hydrologique des bassins versants représentatifs du sud-est de la Haute Volta. ORSTOM, tome 1 : rapport intermédiaire campagne 1964, tome 2 : rapport définitif 1963-65
- PUECH, C. 1990. Apport de la téledétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne. Communication aux Journées techniques AUPELF-UREF, Ouagadougou, mars 1990, Bulletin de liaison du Comité interafricain d'études hydrauliques, n° 81, 18 p.
- PUECH, C. et CHABI-GONNI, D. 1983. Méthode de calcul des débits de crues décennales pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. Comité interafricain d'études hydrauliques, Série Hydrologie, Ouagadougou, 100 p.
- RODIER, J. A. et AUVRAY 1965. Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. Publication ORSTOM - Comité interafricain d'études hydrauliques.
- RODIER, J. A. 1975. Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 46, Paris, 121 p.
- RODIER, J. A. 1976. Évaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique Occidentale. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol XIII, n° 4, p. 269-306.
- SIRCOULON, J. et KLEIN, J. C. 1964. Étude hydrologique de bassins expérimentaux dans le sud-est de la Haute Volta (région de Manga). Rapport intermédiaire, campagne 1963, ORSTOM, série Hydrologie.

10

Contribution de l'imagerie satellitaire à l'optimisation des aménagements hydro- agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal

LUC SÉGUIUS*, HERVÉ CHEVILLOTTE*, CHANTAL GASCUEL**,
PASCAL BOIVIN* et ERIK BRAUDEAU*

**ORSTOM, B. P. 1386, Dakar, Sénégal; téléphone : (221) 32-34-80 ou 32-34- 76;
télécopieur : (221) 32 43 07; télex : 51 468 SG*

***Laboratoire de sciences du sol, Institut national de recherche agronomique, 65, route
de St-Brieuc, 35042 Rennes cedex, France; téléphone : (33) 99 28 54 27;
télécopieur : (33) 99 28 54 30*

Résumé

Dans un contexte de sécheresse persistante, l'aménagement hydro-agricole de la vallée du fleuve Sénégal est capital pour la recherche de l'auto-suffisance alimentaire des pays riverains. Actuellement, l'achèvement des barrages de Diama (Sénégal) et de Manantali (Mali) offre la possibilité d'une irrigation sécurisée. Mais, les acteurs du développement notamment au Sénégal soulignent la faiblesse des rythmes d'aménagement et de mise en valeur. Au-delà de problèmes structurels et conjoncturels, cet échec relatif est attribué à une prise en compte partielle des contraintes physiques et humaines de la vallée, dans la conception des aménagements. L'objectif du programme «Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal» est de fournir aux aménagistes un outil d'aide à la décision dans le domaine des sciences de la terre et des sciences sociales. Les thèmes abordés, visant à la compréhension globale de la plaine alluviale sont multiples : caractérisation hydro-physique des sols (état structural, réserve hydrique, variabilité spatiale), comportement hydrologique des cuvettes (remplissage, vidange), situation socio-économique et perspectives en fonction des aménagements pour les cultures et l'élevage. Les pédologues

et hydrologues étudient la cuvette de Nianga (16°33'N-14°55'O) à proximité de Podor. À partir d'une image HRV de SPOT datée du 25 septembre 1990 (fin de la crue), une classification supervisée a permis de distinguer 22 classes d'eau, de sols et de cultures. Les principales classes de sol ont servi à délimiter des parcelles d'échantillonnage (d'environ 2,5 km²) de luminance homogène. Sur celles-ci, on détermine la moyenne et la variabilité des paramètres pédo-hydriques par les techniques de la géostatistique. Par ailleurs, l'image HRV a permis de localiser les zones inondées de manière pérenne, les eaux libres et les voies d'accès de l'eau à la cuvette. La combinaison du fond topographique à l'image satellitaire sera comparée au cubage des zones inondées sur le terrain. La modélisation du remplissage de la cuvette devrait prendre en compte l'hypsométrie, la longueur des drains et les états de référence constitués par le fond d'images HRV. Des relations entre luminance et caractéristiques pédo-hydriques ou bathymétrie seront calculées. L'extension de l'étude à la moyenne vallée sera envisagée à partir de l'ensemble de ces travaux, de données satellitaires et de protocoles de terrain allégés.

1. Introduction

La sécheresse persistante depuis quinze ans a rendu capital l'aménagement hydro-agricole de la vallée du fleuve Sénégal en vue de l'autosuffisance alimentaire des pays riverains. Actuellement, l'achèvement des barrages de Diama (Sénégal) et de Manantali (Mali), offre la possibilité d'une irrigation sécurisée par le maintien d'une ligne d'eau suffisante en saison sèche. Mais de nombreux problèmes restent posés pour le développement des surfaces irriguées (DIEMER et LAAN, 1987). Les acteurs du développement au Sénégal (Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (O.M.V.S.), Ministère sénégalais du développement rural et de l'hydraulique, Cellule de l'après-barrage, Société d'aménagement pour l'exploitation des terres du delta et de la vallée du fleuve Sénégal (SAED), etc.) soulignent la faiblesse des rythmes d'aménagements et de mise en valeur des surfaces dans la moyenne vallée. Au-delà des problèmes structurels ou conjoncturels, cet échec relatif est attribué à une prise en compte partielle des contraintes physiques et humaines de la vallée, dans la conception des aménagements.

L'objectif du programme «Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal» est de fournir aux aménagistes un outil d'aide à la décision dans le domaine des sciences de la terre et des sciences sociales. Les thèmes abordés par les pédologues et les hydrologues sont la caractérisation hydro-physique des sols (état structural, réserve hydrique, variabilité spatiale) et le comportement hydrologique des cuvettes (remplissage, vidange). La première phase du programme consiste en une collecte des données, une connaissance des mécanismes et une définition de protocoles d'échantillonnage et de mesures à l'échelle d'une cuvette qui seront utilisables lors de l'extension de l'étude à la moyenne vallée.

L'outil satellitaire représente ici, une première contribution pour répondre aux objectifs de ce programme.

2. Cadre de l'étude

La cuvette de Nianga, au sud de la ville de Podor (16°39'N-14°58'O) sur la rive gauche du Sénégal a été choisie comme objet d'étude. De forme elliptique (25 km est-ouest sur 10 km

nord-sud), la cuvette est ceinte par une digue depuis les années 1970. L'ouvrage protège le périmètre irrigué de Nianga (1000 ha en culture, actuellement).

Dans le cadre du programme, une image multibande HRV (KJ 24/317) a été prise le 25 septembre 1990. L'image s'étend de la rive droite mauritanienne au Ferlo sénégalais et comporte la ville de Podor (16°39'N-14°58'O). Pour l'étude de la cuvette de Nianga, une zone de 638 km² a été extraite de l'image.

Les caractéristiques des luminances dans les 3 canaux sont regroupées sur le tableau I.

Bien que la corrélation XS1-XS3 soit plus faible que celle entre XS2 et XS3, la classification a été effectuée sur les canaux 2 et 3 car l'image du canal 1 présentait des défauts (linéations).

Tableau I. Caractéristiques des luminances de l'image

Canal	min.	max.	moyenne	écart-type	Matrice de corrélation		
					XS1	XS2	XS3
XS1	130	159	146,4	3,5	1,00	0,81	0,27
XS2	129	194	163,3	7,6	0,81	1,00	0,40
XS3	114	159	136,0	6,4	0,27	0,40	1,00

3. Définitions des classes

À l'aide de la carte au 1:50 000 d'aptitudes culturales de la zone (F.A.O., 1969) et des comportements spectraux généraux des grands thèmes (eau, sol, végétation) (GIRARD et GIRARD, 1989), nous avons identifié 22 classes.

Une attention particulière a été portée sur le thème «eau». Huit classes d'eau ont été définies en fonction d'une luminance croissante dans le proche infrarouge. Les thèmes retenus pour la classification et leurs caractéristiques dans les canaux 2 et 3 sont réunis sur le tableau II.

L'augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge pour l'eau est attribuable à une diminution de la tranche d'eau ou à une turbidité plus grande (les deux phénomènes peuvent être associés) (PAGES *et al.*, 1988).

La figure 1 présente les ellipses de confiance à 80% des 22 classes. Les classes sont relativement disjointes. Elles sont distribuées en fonction de l'importance des composantes eau, sol et végétation. Les classes à composante unique sont :

- la première classe d'eau (n° 1) correspondant aux zones les plus profondes du fleuve Sénégal,
- le sommet des dunes (n° 16) à forte luminance dans les deux canaux,
- la zone pilote du périmètre irrigué de Nianga (n° 10) où le riz est plus dense et vigoureux.

L'absorption importante dans le canal 2 indique une forte activité chlorophyllienne.

Les sols s'organisent en fonction d'une augmentation conjointe des luminances des fonds de cuvette de couleur sombre (n° 11) aux parties sommitales claires des dunes (n° 16). La classification effectuée permet de délimiter les principales unités géomorphologiques telles qu'elles sont définies par MICHEL (1973). Ces unités géomorphologiques correspondent à des sols relativement bien différenciés d'une unité à l'autre, comme l'ont montré les études pédologiques antérieures menées sur la cuvette de Nianga (BRAUDEAU, 1978). Ainsi on peut définir les correspondances suivantes : 1) la classe 11 délimite les fonds de cuvette et correspond à des vertisols modaux, sols très argileux à caractère vertique accentué; 2) la classe

Tableau II. Caractéristiques des 22 classes

n°	Thème	Canal 2		Canal 3		Coefficient de corrélation XS2-XS3
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
1	Eau	159,77	0,83	116,92	0,39	0,09
2	Eau	159,97	1,31	118,33	0,64	0,11
3	Eau	160,22	1,56	120,55	0,68	-0,13
4	Eau	157,13	1,05	122,45	0,55	-0,15
5	Eau	162,29	1,23	124,40	0,53	0,11
6	Eau	158,89	1,08	126,26	0,61	0,20
7	Eau	166,97	0,94	128,59	0,71	-0,19
8	Périmètre irrigué villageois	145,72	3,04	138,23	1,49	-0,45
9	Périmètre de Nianga	139,89	1,89	146,51	0,98	-0,45
10	Périmètre pilote de Nianga	133,14	1,03	150,61	0,71	0,11
11	Fond de cuvette, végétation de méandre	157,22	1,03	132,17	1,84	0,06
12	Cuvette	161,14	0,92	134,38	1,92	0,46
13	Transition levée-cuvette, sillon interdunaire	162,89	2,18	141,99	1,27	-0,17
14	Partie basse des levées	165,16	1,16	137,74	1,03	0,52
15	Dune	170,78	1,36	145,44	1,38	0,62
16	Sommet de dune sans végétation	176,31	0,93	149,49	0,66	0,43
17	Périphérie des mares à végétation	148,83	3,12	124,78	2,40	-0,60
18	Rizière en eau	153,77	1,11	121,79	1,24	0,72
19	Centre des mares à végétation	150,86	0,95	118,72	0,94	0,59
20	Zones exondées encore humides	164,53	0,98	130,33	0,78	-0,11
21	Marigot du Koundi	172,95	0,82	128,77	1,22	0,35
22	Petites levées le long des défluent	171,60	0,97	136,85	3,46	-0,40

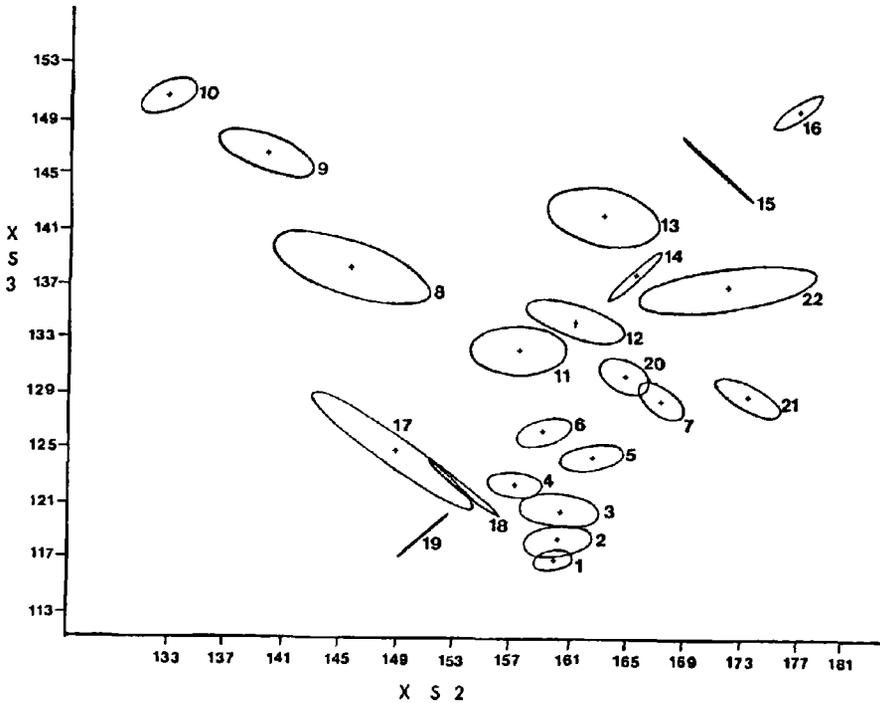


Figure 1. Ellipses de confiance à 80% des classes retenues

12 délimite les cuvettes et comprend essentiellement des vertisols vertiques, sols argileux dont les caractères vertiques sont nettement moins accentués que dans la classe précédente; 3) les classes 13 et 14, constituant les parties basses des levées, comportent des sols peu évolués, d'apport alluvial; ce sont des sols hydromorphes en général, à texture limono-sableuse ou sablo-limoneuse; 4) les classes 15 et 16, comprenant les parties hautes des levées, correspondent à des sols hydromorphes peu évolués à texture dominante sableuse.

Dans les autres classes, deux thèmes interviennent. Les rizières ennoyées (n° 18) ont une faible luminance dans le canal 3 analogue aux autres classes d'eau, par contre l'absorption plus importante dans le canal 2 indique la présence de végétation. Il en est de même pour la périphérie des mares (n° 17). Le centre des mares (n° 19) se caractérise par une eau moins turbide (décantation) et des tranches d'eau plus importantes qu'en périphérie. La luminance dans le canal 3 est donc similaire aux classes d'eau du fleuve mais la turbidité plus faible détermine une luminance inférieure dans le canal 2.

Enfin, l'intersection des ellipses des classes 7 et 20 marque la continuité entre des zones récemment exondées mais encore humides et les zones où la lame d'eau est minimale. Le rapport $XS3/XS2$ permet de classer les classes d'eau en éliminant l'influence de la turbidité. Sur la figure 2 où les classes ont été rangées en fonction d'un rapport $XS3/XS2$ croissant, la courbe présente deux cassures séparant les classes d'eau, de sols et de couvert végétal. La limite des zones ennoyées correspond aux classes 20 et 6 représentant les levées humides et les faibles tranches d'eau. La classe 22 (petites levées) n'est pas placée avec les autres classes de sol. Ceci est peut-être attribuable à une mauvaise définition spectrale dans $XS2$. Malgré sa position excentrée sur la figure 1, la classe 21 du marigot de Koundi (Mauritanie) se situe bien dans les classes d'eau. Par contre, la position dans le graphique de la classe 18 «Rizière en eau» semble indiquer la faible influence de la composante «eau» dans les luminances de cette classe.

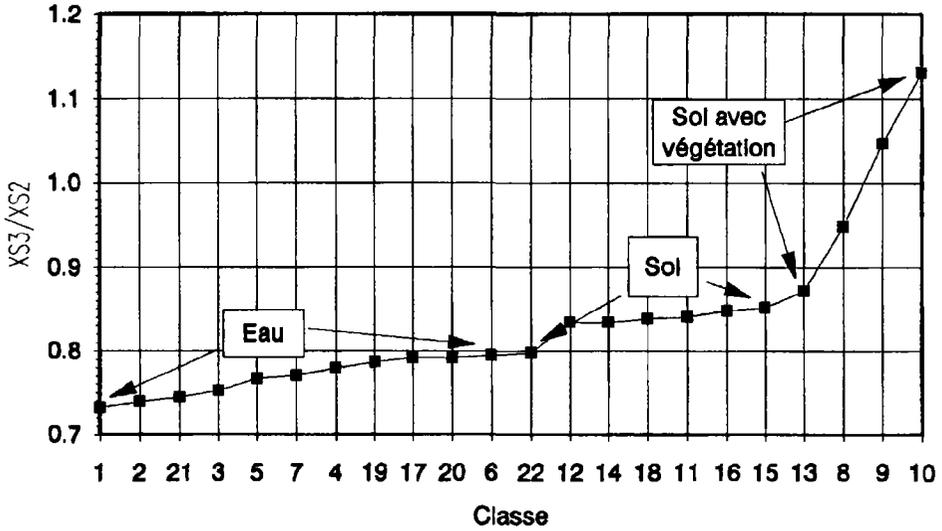


Figure 2. Rapport des canaux XS3 sur XS2

4. Classification supervisée

La classification effectuée sur les canaux 2 et 3 est de type euclidienne : chaque pixel est affecté à la classe la plus proche au sens de la distance euclidienne aux luminances moyennes de la classe. Le tableau III présente la matrice de confusion sur les pixels des polygones de définition des classes. Des éléments de la classe 7 (eau) passent dans la classe 20 (levée humide). Une fraction de la classe 11 (fond de cuvette, végétation de méandre) est redistribuée dans la classe 6 (eau). Enfin, 10% de la classe 17 (rizière inondée) passe dans la classe 4 (eau). Ces erreurs d'affectation sont dues à la difficile définition de la lisière entre les zones inondées et exondées.

L'image classifiée est présentée sur la figure 10-3 (voir cahier couleur). La figure 4 donne la répartition des pixels de l'image classée. Les voies d'eau ressortent bien ainsi que la structure de la cuvette de Nianga. Fin septembre 1990, les zones inondées de la cuvette ne concernent que le sud-ouest de l'image. L'inondation est due à la remontée du niveau de la retenue de Diama durant l'hivernage et à la vidange des casiers du périmètre irrigué. Les eaux du Sénégal se répartissent des classes 1 à 5 tandis que celles du Doué sont dans les classes 5 à 7. Il y a parfois même confusion avec la terre ferme. Ceci est peut-être attribuable à une plus grande turbidité du Doué

La figure 10-5 (voir cahier couleur) présente le détail des deux principales zones inondées de la cuvette de Nianga. Le report de la topographie sur l'image permet de vérifier que l'augmentation du rapport XS3/XS2 dans les classes d'eau correspond bien à une diminution de la tranche d'eau. Sur ces deux images, on peut fixer la cote de l'eau à environ 3 m le 25 septembre 1990.

5. Utilisation pédologique de la classification

Cette classification a servi de base à l'étude de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques des sols de la cuvette de Nianga. Elle a permis de définir une stratégie

Tableau III. Matrice de confusion des polygones de définition des classes

Classe	% des pixels d'une classe réaffectés																						Effectif
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	96	4																					83
2	8	90	2																				1472
3		3	86	9	2																		1495
4			9	88	3																		462
5					97	3																	190
6					1	99																	309
7							92												7				491
8								98	1		1												1596
9								99	1														1112
10									100														230
11						11				85	4												1803
12										10	86		3							1			1715
13												93	7										5478
14											2		98										1440
15													1	98	1								4761
16															100								1785
17				10		1											84		5				5037
18				1													13	82	4				1927
19																		5	95				1203
20																			3	97			1260
21																					99	1	181
22																					14	86	1731
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	

d'échantillonnage à deux niveaux. En premier lieu un secteur de référence a été choisi sur chacune des classes définies (fig. 10-3, voir cahier couleur). Ce secteur de 1,2 sur 2,4 km correspond à la plus grande surface possible à l'intérieur de la classe considérée, comportant une forme simple. Le tableau IV permet de vérifier l'homogénéité des luminances des canaux 2 et 3 dans chacun des secteurs.

Tableau IV. Caractéristiques des luminances des 5 secteurs sélectionnés

Secteur	Canal 2		Canal 3	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
1	160,20	2,13	134,45	1,56
2	162,49	2,50	142,12	1,29
3	158,70	1,72	134,17	1,33
4	166,22	1,79	138,20	1,39
5	165,26	2,06	137,37	1,24

Sur chaque secteur, 84 points sont répartis aléatoirement aux noeuds d'une grille régulière de 75 m de côté, avec la contrainte de disposer de deux points au moins par maille de 300 m de côté. Cet échantillonnage stratifié permet d'analyser de façon détaillée les autocorrélations

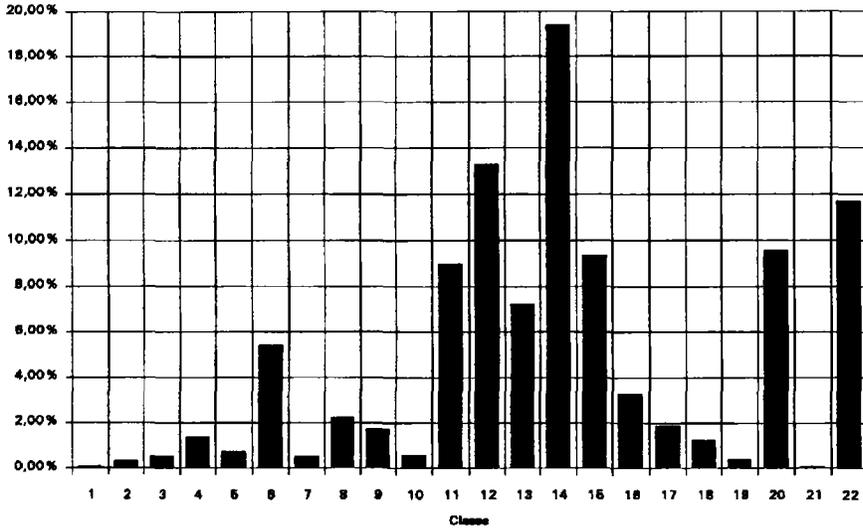


Figure 4. Répartition des pixels de l'image par classes

spatiales entre 75 et 1000 m, avec un pas de 75 m et une densité d'échantillonnage sensiblement homogène sur l'ensemble du secteur de référence. En second lieu un échantillonnage de densité beaucoup plus faible couvrira l'ensemble de chacune des classes à l'échelle de la cuvette de Nianga. Sur chacun des 84 points, l'analyse pédologique porte sur la détermination en laboratoire des caractéristiques physiques du sol telles que la courbe de retrait et les courbes caractéristiques d'humidité; elle est complétée par la description morphologique de la surface du sol et des horizons pédologiques et par la détermination des caractéristiques physico-chimiques classiques (granulométrie, capacité d'échange, cations majeurs, carbone, azote extrait 1/5^e).

Les premiers résultats concernent le secteur de référence de la classe 12 (secteur n° 1 de la fig. 10-3, voir cahier couleur), classe visée en premier lieu par la mise en place des aménagements. Ils portent sur l'analyse morphologique de la surface du sol et des horizons du sol et confirment une nette prédominance des sols à caractères vertiques sur ce secteur. Cependant on observe que 23 profils pédologiques, sur les 84 considérés, ne correspondent pas à l'interprétation pédologique donnée à cette classe. Ce fort pourcentage d'impureté, de 27%, n'est pas le fait de profils répartis au hasard; il correspond aux sols de petits marigots d'une dizaine de mètres de large, internes à la cuvette, et à ceux des petites levées de berges de quelques dizaines de centimètres bordant ces marigots. De par leur relief chaotique, ces zones ne sont pas concernées par les aménagements rizicoles envisagés et doivent être exclus de l'analyse spatiale des caractéristiques physico-chimiques des sols. Ces zones sont partiellement visibles mais mal délimitées sur l'image classée. Le couplage des données avec celles de la topographie pourrait peut-être permettre de les reconnaître *a priori*, avant de fixer tout dispositif d'échantillonnage.

6. Conclusion

Pour sa mise en route, le programme «Optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal» a grandement bénéficié de l'imagerie satellitaire. Celle-ci a permis :

- une mise à jour des cartes anciennes (digues, routes, nouveaux périmètres irrigués),
- une détermination du réseau hydrologique en fonctionnement en l'absence de crue importante.

En pédologie, la classification a servi à délimiter les parcelles d'échantillonnage de luminance homogène. En hydrologie, le pourtour des zones inondées se définit bien en fonction du rapport XS3/XS2. La superposition du fond topographique à l'image montre la bonne correspondance entre la segmentation des classes d'eau et la bathymétrie.

La suite du programme nécessitera des études radiométriques de terrain. Elles auront comme objet :

- l'étude du rapport XS3/XS2 sur une nappe d'eau en fonction de ses caractéristiques (turbidité, épaisseur, végétation, couleur du fond),
- la définition de relations entre réflectances et caractéristiques pédo-hydriques.

L'ensemble de ces travaux servira à l'extension de l'étude à la moyenne vallée.

7. Références

- BRAUDEAU, E. 1978. Étude pédologique de la cuvette de Nianga (secteur A), région du fleuve Sénégal. Mémoire ORSTOM, Dakar, 77 p.
- F.A.O. 1969. Carte d'aptitudes culturales des terres de la vallée et du delta du Sénégal au 1:50 000. 35 feuilles.
- DIEMER, G. et VAN DER LAAN 1987. L'irrigation au Sahel. Édition Karthala C.T.A., Paris, 226 p.
- GIRARD, M. C. et GIRARD, C. M. 1989. Télédétection appliquée; zones tempérées et intertropicales. Collection Sciences agronomiques, Masson, Paris, 260 p.
- MICHEL, P. 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie; études géomorphologiques. Mémoire ORSTOM, Dakar, n° 63, 3 tomes, 752 p.
- PAGES, J., CITEAU, J. et DEMARCQ, H. 1988. Bathymétrie par imagerie SPOT sur la Casamance (Sénégal); résultats préliminaires. 4^e colloque international Signatures spectrales d'objets en télédétection, 18-22 janvier, Aussois, France, 6 p.

