

PARTIE III

Téledétection des ressources en eau

20

La place des observations par capteur satellitaire dans l'estimation et la régionalisation des ressources en eau

GUY FLOUZAT ¹, OLIVIER AMRAM ¹ et JEAN-PIERRE FORTIN ²

¹ *Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CNES-CNRS-UPS), B.P. 2801, 18 avenue Edouard-Belin, 31401 Toulouse Cedex 4, France; téléphone : +33 (5) 61 55 66 38; télécopieur : +33 (5) 61 55 85 00; courriel : guy.flouzat@cesbio.cnes.fr*

² *Institut National de la Recherche Scientifique-EAU, B.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7; téléphone : +1 (418) 654-2591; télécopieur : +1 (418) 654-2600; courriel : j.-p._fortin@inrs-eau.quebec.qc.ca*

1. Introduction

Dans de nombreuses régions, la connaissance des ressources en eau est un problème majeur pour le développement économique. Lorsque cette connaissance est nécessaire sur de grands territoires, les mesures ponctuelles, même si elles sont très précises, ne peuvent conduire à la vision synoptique dont les scientifiques, les gestionnaires et les aménageurs ont besoin. Ainsi, la demande sociale de plus en plus forte impose d'élucider les grandes questions qui se posent tant aux chercheurs qu'aux gestionnaires afin de mieux connaître les mécanismes conditionnant la disponibilité et la répartition de cette ressource.

En particulier, la nature des échanges entre bassins versants et atmosphère ainsi que les caractéristiques spatiales et temporelles des flux d'eau en surface et en profondeur sont encore insuffisamment connues. Ces différents processus de la phase continentale du cycle de l'eau correspondent à des variables caractéristiques : précipitations, ruissellement, infiltration, drainage profond vers les nappes, remontée capillaire, évaporation des surfaces minérales, transpiration des couverts végétaux, humidité des sols (en surface et dans la zone non saturée) ainsi que, par relation, le bilan radiatif et la météorologie. Ce sont ces flux qui déterminent les bilans et les réserves, et, compte tenu de leur diversité et de leur

complexité, on admet actuellement que la régionalisation des bilans hydriques ne peut être obtenue qu'en s'appuyant sur la modélisation du couplage de ces transferts verticaux et horizontaux.

Ces modèles décrivent les transferts sol-végétation-atmosphère (TSVA) et les flux hydrologiques superficiels et profonds dans des systèmes maillés (MHM) et doivent être fortement contraints par les interactions entre flux d'eau et structure des écosystèmes. Aussi, ils nécessitent de bien décrire : 1) les hétérogénéités des milieux dans lesquels se déroulent les flux d'eau et de matières associées ; 2) les couplages de processus de transfert eux-mêmes conditionnés par les propriétés de ces milieux. Une grande amélioration de la connaissance des bilans hydriques vient souvent de cette meilleure prise en compte des caractéristiques des écosystèmes et des bassins versants.

Dans ces conditions, on voit bien la place que peuvent prendre les données de télédétection dans cette perspective : d'une part, certains termes de flux ou de réserves peuvent être estimés directement et, d'autre part, la description quantitative des milieux naturels contribue à améliorer la qualité des sorties de modèles. Or, beaucoup de mesures satellitaires sont devenues couramment accessibles dans les trois principaux domaines d'énergie (optique, infrarouge, micro-ondes) utilisés en observation de la Terre. Cependant, elles restent généralement utilisées séparément comme des estimateurs directs de quantités (surfaces d'eau libre), de paramètres (réflectance, température) ou comme des termes d'assimilation. Dans l'estimation des ressources en eau, il est souvent indispensable de mettre en oeuvre la synergie de plusieurs types de mesures afin d'initialiser différents termes dans des modèles de flux.

Aussi, dans cet article, on s'efforce de donner un bref rappel sur les ressources planétaires et les différents termes de la phase continentale du cycle de l'eau. Ensuite, on met l'accent sur la diversité des observations et des traitements de données de télédétection qui contribuent à l'estimation des différents termes de flux et de bilans d'eau. À cet effet, seront décrites les approches utilisant les mesures satellitaires et leurs différentes résolutions spatiales et temporelles disponibles en visible, en infra-rouge et en micro-ondes. Leurs combinaisons permettent : 1) la détection directe de certaines caractéristiques de réservoirs de la ressource en eau ; 2) le calcul des quantités physiques qui conduisent au couplage des flux hydriques verticaux et horizontaux ; 3) la quantification des propriétés structurales et fonctionnelles des systèmes naturels.

2. Ressources en eau et apport de la télédétection dans l'estimation des flux

La connaissance de la ressource en eau nécessite d'appréhender les quantités existant sous forme de réservoirs (ou stocks) et sous forme de flux (ou transferts). La somme des réservoirs constitue la ressource proprement dite et l'ensemble des flux forme le cycle de l'eau avec les transports et les changements d'états entre les réservoirs.

2.1. Les grands réservoirs

Il n'est pas original d'indiquer que l'eau est indispensable à la vie. Par contre, il est important de rapporter, qu'en 1995, une enquête de la Banque mondiale avait montré que 80 pays et 40 % de la population mondiale étaient touchés par le manque d'eau. Cela souligne l'importance de la ressource en eau et de sa connaissance pour les décennies à

venir.

Du point de vue quantitatif, quelques chiffres synthétisent l'état global de la ressource. Ces valeurs proviennent de diverses synthèses ou de compilations numériques (CIEAU, 1999; CHOISNEL, 1997; DE MARSILLY, 1995; PEIXOTO et OORT, 1990; RAMADE, 1994; UNESCO, 1978)

Ainsi, 72 % de la surface terrestre est recouverte par les mers, les océans et les calottes glaciaires, et les océans contiennent 97,4 % de la masse totale de l'eau sur Terre (environ $1,4 \times 10^9 \text{ km}^3$). Cette eau est salée et il n'y a que 2,7 % d'eau douce. Une synthèse sur ces quantités est donnée sur le tableau 1.

Tableau 1. Volumes des principaux milieux réservoirs d'eau

Réservoirs	Volume (10^4 km^3)	Quantité relative
Océans, mers (eau salée)	1 350	97.4 %
Calottes glaciaires	27.8	2.01 %
Eaux souterraines (nappes phréatiques)	8.10	0.58 %
Eaux superficielles (lacs, rivières)	0.225	0.02 %
Vapeur d'eau atmosphérique	0.0013	0.001 %

2.2. Les flux dans la phase continentale du cycle de l'eau

La quantité relative de l'eau dans l'atmosphère (0,0013 %) est très faible puisqu'elle n'aurait qu'une épaisseur de 3 cm si elle était uniformément répartie sur tout le globe. Lorsque cette eau se recondense en précipitations, 60 % s'évapore à nouveau, 15 % ruisselle et alimente les cours d'eau et les océans alors que le 25 % restant s'infiltre et rejoint les nappes et les réserves souterraines. C'est cette très faible quantité relative qui détermine la circulation de l'eau et son cycle biogéochimique dans sa phase continentale.

Les mécanismes d'évaporation et de transpiration de l'eau des réservoirs superficiels (voir ci-dessous) et les mécanismes de transport de la vapeur d'eau atmosphérique par la circulation générale dans l'atmosphère font que 78 % des précipitations arrive à la surface des océans. Les flux hydriques qui constituent les variables caractéristiques de la phase continentale du cycle de l'eau ne sont donc déterminés que par le 22 % de l'eau atmosphérique qui interagit avec les terres émergées.

Dans ce contexte, on présente ces flux en deux grands ensembles. On admet que les flux verticaux représentent l'ensemble des transferts de masse (phases solide, liquide, vapeur) entre atmosphère, végétation ou sol. Les flux horizontaux constituent l'ensemble des transferts de masse (essentiellement en phase liquide) à la surface et en sous-surface.

2.3. Les flux verticaux

2.3.1 Précipitations

Les précipitations qui tombent sur les continents ont un volume d'un peu moins de 120 000 km³, ce qui donnerait une hauteur d'eau uniforme sur les terres émergées de 780 mm. Ces quantités résultent des différentes formes d'eau entrant dans les écosystèmes terrestres : pluie, condensation de brouillard, grêle, neige.

La répartition de la pluviométrie contribue fortement à la zonation climatique à l'échelle planétaire mais elle est très inégale aux échelles plus locales. Elle est mesurée ponctuellement par des réseaux de pluviomètres dont les résultats doivent être traités avec deux objectifs : 1) recherche et correction éventuelle de biais dû au vent; 2) interpolation entre les stations du réseau pour obtenir une donnée régionalisée, c'est-à-dire estimée en tout point.

C'est pour améliorer cette régionalisation que des expérimentations sont menées sur le thème « estimation des pluies par satellite » : le principe est que la mesure satellitaire est uniforme sur tout le territoire considéré même s'il reste encore beaucoup à faire pour améliorer le calage des données obtenues. En particulier, des études ont été réalisées sur des images provenant de AVHRR de NOAA en zone tropicale à faible relief (KAKANE and IMBERNON, 1992). Grâce aux deux bandes thermiques, on obtient une information sur la température au sommet des nuages, indicateur de leur développement vertical. Plus ce développement vertical est important plus la probabilité que ce nuage soit précipitant est grande. On peut donc, par cette technique indirecte, fournir des cartes de probabilité de précipitation. Malheureusement, cette estimation reste médiocre, en partie à cause de la fréquence temporelle de la prise d'image (toutes les 6 heures) qui est trop longue par rapport à l'évolution des masses nuageuses.

Par contre, en complément à ces précipitations, on admet que les surfaces enneigées sont identifiables dans les domaines du visible et du proche infra-rouge si l'on dispose de bandes spectrales permettant de s'affranchir de la confusion avec les nuages. De plus, de nombreuses études sont menées actuellement afin d'évaluer le potentiel des radars pour la caractérisation des surfaces de neige : les résultats laissent penser que cette approche est pertinente. Si l'on souhaite s'intéresser à des épaisseurs importants de neige, il est vraisemblable que ce sont des mesures à des fréquences encore plus basses qui seront utiles.

L'humidité des sols modifiée par les précipitations (voir 2.3.3) peut être évaluée dans les premiers centimètres du sol par le signal radar en fonction de la fréquence utilisée. Dans les autres longueurs d'onde (visible, proche ou moyen infrarouge ou infrarouge thermique), le pouvoir de pénétration de l'onde électromagnétique est nul. On obtient seulement une caractérisation de la couche pelliculaire de surface. Par contre, les micro-ondes ont un pouvoir de pénétration dans le couvert végétal ou dans le sol. Malheureusement, si le signal émis ou rétrodiffusé dans cette gamme de longueurs d'onde est porteur d'informations sur l'humidité du sol, il dépend aussi de la rugosité de surface et de la plus grande énergie du relief. L'estimation de l'humidité ne peut donc être effectuée que dans des conditions où les autres facteurs d'interaction sont bien connus, ce qui en limite actuellement la généralisation.

2.3.2. Interception

Lorsqu'une quantité de précipitation (p , généralement exprimée en mm) arrive sur un couvert végétal, une partie est interceptée par la surface foliaire (estimée par l'indice foliaire : LAI en m^2/m^2) : ce mécanisme d'interception des précipitations par la végétation peut être très important pour les flux verticaux. En effet, la lame d'eau qui arrive réellement au sol dépend de la structure verticale de la végétation et de l'indice foliaire de chacune des strates. La pluie efficace au sol (p_{sol}) est donc du type :

$$p_{sol} = p - i_{totale} \text{ avec } i_{totale} = f(\int LAI, \text{ pour toutes les strates}).$$

Après écoulement, égouttement et évaporation, cette interception peut être un obstacle important à l'alimentation en eau du sol. Dans des milieux de savanes et de steppes en Afrique de l'ouest, un modèle de bilan hydrique a permis d'estimer qu'une valeur $i = 0,1$ mm par unité de LAI et par événement ajustait correctement l'humidification du sol (AMRAM, 1996). Par ailleurs, des mesures ont montré qu'une hêtraie à l'équilibre en milieu tempéré (LAI = 8) pouvait intercepter jusqu'à 30 % des précipitations en fonction de la distribution temporelle des précipitations.

L'importance de la structure de la végétation et de l'évolution de son indice foliaire dans ce mécanisme d'interception montre bien l'impact de l'occupation du sol d'un bassin versant sur son fonctionnement hydrique. De plus, il apparaît déterminant d'exploiter des données de télédétection à différentes résolutions spatiales et temporelles pour estimer l'indice foliaire avec une bonne fréquence temporelle.

2.3.3. Infiltration-percolation

La quantité p_{sol} de pluie efficace donne naissance à l'infiltration et à la percolation. C'est ce flux qui augmente l'humidité du sol. Le mécanisme d'infiltration à la surface dépend de l'occupation du sol et de la nature de la surface du sol lors de la précipitation. Ainsi, la présence ou l'absence de matière organique à la surface agit fortement sur la pénétration de l'eau. L'état de fissuration et de battance du sol est également très important.

L'infiltration ou la percolation dans le profil de sol (c'est-à-dire à l'échelle macroscopique) est fonction de l'énergie mécanique (E_m) de l'eau avec $E_m = E_c + E_p$ et où E_c est l'énergie cinétique et E_p est l'énergie potentielle. La migration dans la phase solide du sol est freinée par la résistance à l'infiltration qui détermine la conductivité hydraulique (K). La conductivité est faible pour un sol sec et augmente non linéairement avec l'humidité. Cette variation de K avec le temps en milieu non saturé conduit à une valeur de conductivité à saturation (K_s) qui dépend de la structure de la porosité du sol. Le flux d'eau entre deux points A et B dépend alors du gradient de charge (H , charge ou potentiel total de pression de l'eau dans le sol) entre H_A et H_B et de la conductivité hydraulique du sol (K) pour l'humidité correspondant à H .

Lorsque le sol est saturé, les valeurs de K_s donnent des infiltrations de 10 mm/h pour les sols sableux à des vitesses inférieures à 1 mm/h dans les sols argileux. Si les précipitations ne maintiennent pas la saturation, l'infiltration profonde (percolation ou drainage profond) se développe jusqu'à l'équilibre entre le potentiel de pression et les forces de gravité à un atmosphère. La quantité d'eau correspondante est appelée capacité au champ. Par exemple, un sol argileux d'un mètre de profondeur peut retenir une lame d'eau de 400 à 450 mm, un sol argilo-limoneux retient 300 à 350 mm alors qu'un sol sableux ne retient que 150 mm pour la même épaisseur.

Dans ce domaine, la télédétection ne peut apporter que des informations sur les états de surface qui interviennent dans la première phase de l'infiltration. Pour la suite du

mécanisme d'infiltration, les observations par capteur satellitaire peuvent apporter une information indirecte : la physiographie des paysages correspond souvent à la répartition des caractéristiques des sols correspondants. Des informations précisant les propriétés physiques des sols par unité de paysage peuvent ainsi être régionalisées et indiquer la répartition des caractéristiques intervenant fortement dans ces processus.

Tous ces transferts de précipitations, d'interception (avec l'écoulement et l'égouttement) ainsi que l'infiltration (ou la percolation) sont qualifiés de flux verticaux entrants.

La végétation (naturelle ou cultivée) et les processus physiques à l'interface sol et végétation avec l'atmosphère sont à l'origine des flux verticaux sortants (ou montants).

2.3.4. Remontée capillaire

La remontée capillaire est un de ces flux ascendants les plus importants. Elle est due aux forces de tension superficielle qui peuvent induire un gradient de charge hydraulique orientant le flux vers le haut. Ce mécanisme est analogue à l'ascension capillaire décrite par la loi de Jurin : si les couches supérieures du sol voient leur humidité diminuer, le gradient de pression descendant fait que l'eau remonte dans la porosité du sol.

Dans un sol argileux ou argilo-limoneux, la hauteur de remontée capillaire peut atteindre 1 m. Cela explique que, lorsque la réserve en eau disponible dans l'épaisseur de sol prospectée par les racines a été utilisée, un flux venant des strates inférieures peut amener un transfert d'eau vers le haut et permettre aux racines d'alimenter le couvert végétal.

2.3.5. Transpiration

La transpiration des végétaux est le second flux sortant de grande importance. Ce transfert est un mouvement de vapeur d'eau qui quitte les tissus foliaires vers l'atmosphère. Ce mécanisme de transpiration par les végétaux résulte donc d'un changement d'état de l'eau qui passe de l'état liquide à l'état vapeur. Cette vaporisation s'effectue dans les chambres stomatiques des feuilles et permet ainsi à la plante de dissiper de l'énergie pour limiter l'augmentation de la température de ses tissus. Cette énergie est donc libérée sous forme de chaleur latente de vaporisation ($2,3 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$). Cette perte d'eau dépend évidemment du rayonnement net apporté au couvert végétal et de la tension de vapeur d'eau dans la couche limite atmosphérique dans laquelle s'échangent ces flux de masse et d'énergie.

La physiologie du végétal va réguler la transpiration en fonction de ces conditions énergétiques ambiantes et en fonction des résistances rencontrées dans les transferts d'eau dans le sol, à l'interface sol-racines et dans le végétal lui-même. Lorsque la demande atmosphérique (énergie disponible pour la vaporisation) est trop forte, la plante s'oppose à cette perte hydrique par la fermeture des stomates. Cette situation va se traduire par un échauffement des tissus et un arrêt de la photosynthèse puisque le CO_2 atmosphérique n'entrera plus dans les stomates.

Dans de bonnes conditions d'alimentation en eau, de nombreuses formations végétales peuvent transpirer jusqu'à 10 mm/jour. Cette quantité montre que la réserve en eau d'un sol peut rapidement être épuisée s'il n'y a pas de réapprovisionnement par des précipitations ou des remontées capillaires.

Dans ce domaine, la télédétection ne peut permettre d'évaluer directement un flux de transpiration. Par contre, des estimations de rayonnement global et de rayonnement net avec des capteurs en visible et en infra-rouge thermique (fenêtre atmosphérique de 8 à 14 μm) sont des contributions évidentes au bilan d'énergie qui conditionne le flux de chaleur latente. De plus, le suivi thermique des couverts est un indicateur de leur stress hydrique

puisque l'échauffement et le gradient thermique par rapport à l'air sont de bons indicateurs. Il est donc important de pouvoir estimer correctement la température de surface.

2.3.6. Évaporation

L'évaporation des surfaces de sol répond aux mêmes mécanismes de dissipation d'énergie que chez les végétaux. Il s'agit également d'un flux mettant en jeu un changement d'état par vaporisation. Cependant, le flux de chaleur latente correspondant s'accompagne d'autres flux qui satisfont le principe de conservation d'énergie et que l'on peut schématiser ici par l'équation du bilan d'énergie : $R_n + HC + LE + G + P = 0$ (où : R_n : rayonnement net, HC : flux de chaleur sensible, LE : flux de chaleur latente, G : flux de chaleur dans le sol, P : énergie de photosynthèse; tous ces flux se comparent en W/m^2). Cette équation est valide à un t donné et pour une couche de sol qui n'emmaganisent pas d'énergie.

Par conséquent, si R_n est fortement déterminé par le rayonnement global incident, les autres flux de chaleur (HC : convection et G : conduction) vont dépendre des propriétés des matériaux du sol : capacité thermique massique et conductivité thermique. L'équilibre est obtenu par le flux de chaleur latente ou, lorsque la dissipation d'énergie ne le permet plus, le transfert de chaleur augmente la température du sol. À l'opposé de cette situation de jour, la perte d'énergie par échange de chaleur du sol vers l'atmosphère en situation de nuit permet d'abaisser la température de surface du sol.

À l'échelle planétaire, le flux d'évaporation moyen sur les terres émergées est de 470 mm par an. À l'échelle régionale, les zones où l'évaporation et la transpiration sont les plus élevées sont les forêts équatoriales : environ 1200 mm/an. Par contre, les zones désertiques peuvent avoir une évaporation de 100 mm/an ou moins.

On comprend que les variations de flux associés à l'évaporation à la surface du sol vont se traduire par des variations correspondantes de la température de surface. Ce sont ces variations qui sont intéressantes à détecter par télédétection pour comprendre la dynamique de ces flux. Malheureusement, il ne s'agit pas de mesures ou d'estimations directes de ces flux. Cependant, la connaissance de l'occupation du sol possible par observation spatiale apporte une contribution importante puisqu'elle permet de connaître, d'une part, les surfaces en végétation qui sont le siège de flux de transpiration et, d'autre part, les surfaces de sol susceptibles de perdre de l'eau par évaporation.

2.4. Les flux horizontaux

2.4.1. Ruissellement

Lorsque le sol est saturé, un apport supplémentaire d'eau ne peut s'infiltrer : il y a ruissellement sur la surface. Si la conductivité hydraulique K_s ne permet pas l'infiltration d'une quantité d'eau plus grande que l'apport, le ruissellement va se développer dans le bassin versant jusqu'au réseau hydrographique et à l'exutoire.

Dans ce flux, il n'y a pas de changement d'état. L'eau tend à diminuer son énergie potentielle par écoulement de gravité et pesanteur. L'importance des surfaces de collecte devient donc décisive et les vitesses de transfert vont dépendre de la forme des terrains et de leur occupation par différentes végétations qui ralentissent plus ou moins les écoulements de surface.

Globalement, le ruissellement représente 24 % des précipitations sur les continents et va alimenter le réservoir mers + océans (l'apport total des fleuves aux océans est de 46 000

km³/an, ce qui correspond à environ 40 % des précipitations sur les continents : la différence provient essentiellement de l'alimentation par les nappes).

Aux échelles locale et régionale, ce processus n'est pas spatialement uniforme, c'est-à-dire que, sur un même bassin versant, l'eau ruisselée en un point peut s'infiltrer en un autre point. Cela explique que le débit à la sortie d'un bassin hydrographique est souvent inférieur au débit correspondant à la lame d'eau ruisselée. Cette différence s'accroît évidemment avec la superficie de la région considérée.

2.4.2. Ruissellement hypodermique

Le ruissellement de surface s'accompagne souvent d'un ruissellement latéral dans le sol qui est qualifié de ruissellement hypodermique.

Cet écoulement dépend de la conductivité hydraulique et se trouve provoqué par la topographie qui peut entraîner un transfert latéral dans l'épaisseur du sol sans que l'eau ne contribue à l'alimentation des nappes en profondeur.

Ce phénomène est mal connu et difficile à quantifier.

2.4.3. Écoulements libres

On appelle ici, écoulements libres, les flux hydriques en phase liquide qui ont lieu dans le réseau hydrographique.

Ces flux résultent donc des processus de surface (entrants et sortants) ainsi que des ruissellements. Alors que la plupart des transferts peuvent être quantifiés en lames d'eau (exprimées en mm), les flux dans le réseau hydrographique sont quantifiés par des débits en un point donné et exprimés en m³/s. Le comportement de ce débit en réponse à un flux entrant est décrit par un hydrogramme caractéristique du bassin versant amont, de son état hydrique et de son occupation du sol.

Ces écoulements sont contraints par la géométrie des réseaux dans lesquels ils ont lieu. Cependant, les quantités concernées vont influencer le régime d'écoulement. Lorsque le niveau est élevé et permanent dans un chenal, on admet que le régime est laminaire : les frottements interviennent peu sur la variation d'énergie cinétique. Par contre, si le débit devient plus faible, il y a perte du régime laminaire et apparition de turbulences. Les pertes d'énergie par frottements ne sont plus proportionnelles à la vitesse v (m/s) mais à une puissance de v . Ainsi, dans les régimes d'étiage, lorsque le rapport de la rugosité du fond à la hauteur d'eau augmente, la perte d'énergie cinétique devient élevée et l'écoulement se ralentit.

Les écoulements libres contribuent, avec les ruissellements, à mettre en place les réservoirs d'eau en surface : étangs, lacs, retenues. Ces réservoirs sont caractérisés par leur grand volume d'eau.

Dans ce domaine, la télédétection est généralement très efficace pour identifier les surfaces d'eau libre. D'une part, on sait que la signature de l'eau se différencie fortement des autres éléments de l'occupation du sol dans les longueurs d'onde du visible et du proche infra-rouge. D'autre part, les propriétés de réflexion spéculaire des ondes radar sur une surface d'eau libre non agitée font que la rétrodiffusion en direction du capteur est très faible et permet ainsi une bonne identification.

Toutefois, ces méthodes ne peuvent devenir totalement quantitatives que si l'on dispose de la forme, et donc du volume, des réservoirs. Cette observation renvoie aux interactions des flux horizontaux avec la géomorphologie.

2.4.4. Relations avec la géomorphologie

L'ensemble des flux horizontaux interagit fortement (comme cela vient d'être indiqué pour le ruissellement superficiel) avec l'occupation du sol dans les bassins versants. On ne reprend pas ici l'apport de la télédétection dans la quantification de l'occupation du sol; par contre, il convient de se reporter à la dernière partie où il est montré en fonction de quelles voies on peut actuellement améliorer la description spatio-temporelle des surfaces.

Une autre interaction majeure de ces flux avec la surface intervient par la géomorphologie. En effet, l'influence de la géométrie des surfaces et des chenaux d'écoulement libre est très marquante.

L'organisation du relief détermine l'imbrication des bassins versants en fonction d'une hiérarchie donnée. Celle-ci provient de la géographie des lignes de crêtes qui sont à l'origine des surfaces de collecte des différents bassins d'écoulement. Inversement, la répartition des lignes de thalweg donne naissance aux réseaux d'écoulement libre et au réseau hydrographique. En tout point, la pente intervient sur l'énergie cinétique qu'elle communique à l'eau. L'exposition des facettes a deux effets : un effet direct sur le bilan d'énergie local et un effet indirect sur l'utilisation naturelle ou cultivée du sol.

Dans le domaine de la géomorphologie, la télédétection peut être un apport déterminant. La capacité de certains systèmes spatiaux, comme ceux de la filière HRV, à observer la même cible sous des géométries de prise de vue différentes permet une perception stéréoscopique du relief. Il est donc possible d'obtenir en tout point (x, y) une valeur de la fonction $z(x, y)$ qui donne son altitude. Cela délivre un modèle numérique d'altitude. L'application d'opérateurs de différentiation locale à la fonction $z(x, y)$ donne ensuite les informations de pente et d'orientation.

Il semble donc actuellement possible de réaliser une description quantitative d'un bassin versant dans des termes bien adaptés à la connaissance des flux d'eau en milieu naturel.

3. Modélisation et estimation de flux

Comme cela a été indiqué dans les flux, peu de mesures permettent d'obtenir directement des grandeurs utiles. La plupart donne accès à des termes intermédiaires. Les estimations ne peuvent alors provenir que de modèles qui utilisent ces grandeurs en entrée ou comme des termes de forçage. En outre, afin de tenir compte de la variabilité spatiale du milieu, la modélisation des flux doit reposer sur une description maillée du milieu dans laquelle on introduit la structure et la phénologie dans chaque maille du modèle. Pour cela, il est nécessaire de réaliser un couplage entre la description physique du continuum sol-plante-atmosphère et la modélisation des flux latéraux de surface et de subsurface. Ces sous-modèles contribuent à la spatialisation de l'ensemble en appliquant des transferts latéraux aux termes de ruissellement calculés à partir des états successifs des équations de conservation de la masse. Chacune des mailles est dotée de ses flux 1D et fait communiquer les termes résultants à la surface avec les mailles voisines. Les forces de gravité responsables de ces transferts sont générées à partir du modèle de sol et appliquées en 3D aux écosystèmes considérés avec les données de géomorphologie numérique.

3.1. Les flux verticaux

La modélisation des processus d'échange dans les écosystèmes fait traditionnellement appel aux fonctions SVAT (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer*) qui représentent les différents termes de flux hydriques : précipitation, interception, égouttement, évapotranspiration et infiltration.

Pour décrire ces processus, il existe de nombreux modèles, différant par leur niveau de complexité, le nombre et le type de variables en jeu, la finesse de description des mécanismes et les possibilités d'utilisation à différentes échelles. On peut en distinguer trois grands types : 1) les modèles détaillés, multicouches traitant une partie ou l'ensemble des processus évoqués; ils résolvent explicitement les équations de conservation et de transfert en jeu; 2) les modèles qui assimilent les surfaces sol-couvert à une surface foliaire fictive exposée à un microclimat moyen; ce sont les modèles dits « mono-couches » ou *big leaf*; 3) les modèles, enfin, reposant sur des hypothèses plus fortes, permettant par exemple d'exprimer l'évaporation en fonction des grandeurs climatiques.

Ces approches permettent donc de calculer l'évolution temporelle des flux d'énergie et des flux hydriques verticaux; par contre il néglige le plus souvent les flux horizontaux.

3.2. Les flux horizontaux

Les flux horizontaux de ruissellement et d'écoulement déterminent les quantités qui vont sortir d'un écosystème par l'exutoire d'un bassin versant. Ces termes de sortie dépendent de l'organisation spatiale du milieu et de ses caractéristiques.

Le développement des études sur des systèmes complexes comme les milieux naturels (e.g. bassins versants, rivières, nappes, lacs, etc.) a provoqué au cours de ces 30 dernières années une prolifération de modèles dans les sciences de l'eau. On peut distinguer les différentes approches en tenant compte des champs d'applications et de la structure du modèle : 1) mécanistes, 2) conceptuels et 3) empiriques et stochastiques.

Toutes ces approches décrivent de façon plus ou moins détaillée les flux horizontaux pour fournir une estimation la plus correcte possible du débit à l'exutoire. Dans ces modèles les flux verticaux sont souvent considérés comme des termes de pertes. Ces flux sont alors décrits de façon simplifiés qui ne permet pas une bonne connaissance de la distribution verticale de l'humidité dans le sol.

3.2.1. Les modèles mécanistes

Les modèles déterministes ou mécaniques se basent sur des lois de la mécanique, de la physique, de la chimie ou de la biologie et sur une « parfaite » connaissance de la structure physique du système. En théorie, ce type de modèle est indépendant du calage car tous les paramètres sont censés être mesurables. Dans les sciences de l'eau, on est loin d'une théorie déterministe des processus hydrologiques. Même dans des secteurs relativement réduits, où l'on dispose de modèles mécanistes qui représentent bien le comportement du système, certains paramètres ne sont pas directement mesurables sur le terrain (e.g. conductivité hydraulique dans la loi de Darcy, coefficient de Strickler dans les équations de Saint-Venant, etc.).

3.2.2. Les modèles conceptuels

En raison d'incertitudes, ou de la pauvreté des informations, on procède alors à une

simplification du comportement du système. Ces modèles intègrent des facteurs complexes et décrivent le concept physique par une représentation plus simple dépourvue de réalité physique. Les plus utilisés sont les modèles à réservoirs qui se remplissent et se déversent les uns dans les autres par des lois de vidange semi-empiriques. Dans ces modèles à réservoirs, on distingue deux fonctions principales : 1) la fonction de production qui regroupe les phénomènes responsables des pertes subies par l'eau de pluie tombant sur le sol et empêchant l'eau d'atteindre l'exutoire du bassin (interception, évapotranspiration, stockage temporaire); 2) la fonction de transfert qui permet la transformation de la fraction de la pluie qui va devenir écoulement à l'exutoire du bassin versant.

3.2.3. Les modèles empiriques et stochastiques

Les modèles empiriques sont des modèles qui expriment directement des relations entre grandeurs déterminantes en entrées et grandeurs résultantes en sortie. Les modèles empiriques ne font pas référence aux processus internes du système et se contentent d'établir des relations directes entre les variables de forçage et les variables de sortie. Lorsque des grandeurs impliquées sont des variables aléatoires représentées par une fonction de distribution des probabilités, on appelle ce type de modèles un modèle stochastique. Le but de ces modèles est de fournir une description statistique de la réponse du système. Ces types de modèle n'impliquent donc pas la connaissance physique des phénomènes mais nécessite, en général, de longues séries d'observations pour l'ajustement des paramètres.

3.3. Vers un modèle 3D

Le couplage de ces deux approches verticale et horizontale devrait donc permettre d'interpréter correctement à terme les flux entrants (pluie, égouttement, infiltration), les flux sortants (évapotranspiration réelle, remontée capillaire), les flux de ruissellement en surface et dans le réseau hydrographique d'écoulement libre ainsi que l'évolution du profil d'humidité sur la profondeur racinaire active. C'est la disponibilité simultanée et cohérente de ces différents termes qui est indispensable pour préciser les relations flux hydriques - écosystèmes et les qualités de l'eau qui en dépendent.

4. Amélioration de la description des écosystèmes et des paysages

On considère actuellement qu'une grande amélioration de la connaissance des flux et des bilans hydriques viendra de cette meilleure prise en compte des caractéristiques des écosystèmes terrestres.

En effet, cette idée du besoin de coupler tous ces processus est de plus en plus partagée mais se heurte toujours à la difficulté de représenter la variabilité des paramètres induite par l'hétérogénéité des milieux physiques et biologiques. Aussi, différents grands programmes recommandent maintenant ce thème comme une priorité. En particulier, le National Research Council (USA) montrait en 1995 l'intérêt d'une modélisation des interactions entre changements dans les écosystèmes terrestres et modification des flux et des bilans hydriques et énergétiques.

De son côté, le premier colloque Biospheric Aspects of Hydrological Cycle (1995) a montré que la distribution de la végétation, de ses changements physiologiques, des

paramètres mal connus dans le sol et des insuffisances sur la description de la redistribution de l'eau en surface sont des limitations qui doivent être levées. De même, une connaissance affinée des facteurs qui introduisent des non-linéarités difficiles à modéliser est à rechercher particulièrement pour le sol et son humidité, la végétation et la topographie. Ces orientations se sont trouvées confortées par les conclusions de la 5^{ème} Assemblée Internationale des Sciences Hydrologiques (avril 1997).

L'étude des interactions entre flux hydriques et écosystèmes terrestres par télédétection nécessaire à la connaissance peut répondre en partie à cette demande mais pose de nombreux problèmes méthodologiques dus à la multiplicité des échelles qui sont pertinentes pour en décrire les mécanismes. En effet, les constituants des écosystèmes (la structure) et leurs processus (le fonctionnement) ont une imbrication spatiale et temporelle qui rend indispensable leur étude aux différentes échelles où existe une information utile à la description et à la modélisation des flux.

Les relations structurales et fonctionnelles qui unissent ces constituants peuvent donc être appréhendées par une approche multi-niveaux puisqu'il y a analogie entre :

- le concept décrivant les écosystèmes comme un ensemble de composants emboîtés ayant leur signification propre à différentes échelles,
- et la télédétection offrant une capacité d'observation continue en surface et à différents niveaux de résolution spatiale et temporelle.

Dans cette perspective, les stratégies d'observation de la Terre font émerger les deux tendances suivantes pour faire coopérer des données à haute résolution spatiale et à haute fréquence temporelle. Par exemple, SPOT 4 possède deux capteurs complémentaires : HRV qui a une bonne résolution spatiale mais une mauvaise résolution temporelle et VEGETATION qui a une mauvaise résolution spatiale mais une bonne résolution temporelle; cela ouvre de nouvelles perspectives de surveillance si l'on parvient à une utilisation combinée des deux sources.

4.1. Décomposition des pixels mixtes

Un premier type d'approche consiste à exploiter les méthodes nouvelles permettant la désagrégation de l'hétérogénéité perçue à différentes échelles d'espace et de temps par les mesures satellitaires. Cette approche conduit à la restitution de profils temporels de réflectance à haute résolution spatiale et à haute fréquence temporelle.

Le besoin de l'analyse temporelle pour le suivi des états de surface et en particulier de la végétation conduit à exploiter les données des capteurs satellitaires à faible résolution spatiale (e.g. de l'ordre du kilomètre) mais à haute résolution temporelle (e.g. le jour) : AVHRR de NOAA et depuis peu VEGETATION de SPOT-4. Dans la plupart des situations, les paysages naturels sont hétérogènes constitués d'éléments très mélangés et imbriqués entre eux. Une amélioration de la connaissance des processus de fonctionnement d'un écosystème ne peut être obtenue qu'en améliorant la perception des processus de fonctionnement des différents éléments constitutifs de cet écosystème. Il faut donc caractériser chacun de ces éléments car leur contribution aux mécanismes propres des systèmes écologiques est spécifique. Dans ces conditions, le pixel à basse résolution est un pixel hétérogène. C'est la notion de pixel mixte.

La réponse d'un tel pixel mixte, dans les courtes longueurs d'onde, peut être considérée comme une combinaison linéaire des réponses des différents composants pondérées par leur probabilité d'occurrence dans cette surface. Cela signifie qu'une connaissance de la structure fine (ensemble des probabilités d'occurrence des différents constituants à haute résolution spatiale) doit permettre de déconvoluer la mesure grossière au kilomètre carré

et donner les réflectances séparées des composants purs.

Dans ce but, l'utilisation conjointe de deux types de données, soit les données à haute résolution spatiale (e.g. SPOT-HRV 20 m) mais à faible répétitivité temporelle qui décrivent la structure des écosystèmes et les données à haute résolution temporelle mais à faible résolution spatiale qui permettent l'observation du fonctionnement, permet d'affiner la signature de chaque objet constituant ce pixel mixte. Le modèle mathématique sous-jacent à cette approche est la régression linéaire multiple.

Grâce à cela, il est possible de restituer les profils temporels de réflectance des différentes classes de végétation et d'occupation du sol.

4.2. Analyse multirésolution et fusion par des pyramides

Un second type d'approche met en œuvre les méthodes d'analyse multirésolution et de reconstruction par des pyramides qui permettent la description d'une image et des informations imbriquées qu'elle contient par des traitements hiérarchiques (JOLION and ROSENFELD, 1994).

Par exemple, l'approche de MARR (1982) est à la base de nombreux développements lorsqu'il s'agit de rechercher une caractérisation complète des transitions, c'est-à-dire des contours entre les objets. De même, la recherche d'une représentation multirésolution d'une image a été montrée par BURT et ADELSON (1983) et CROWLEY et STERN (1984) avec les pyramides de laplaciens.

La préservation du signal significatif des régions d'images peut être assurée également par une analyse multirésolution basée sur l'analyse en ondelettes (GROSSMANN and MORLET, 1984) qui permet de recomposer une image à partir de sa représentation multiniveaux. Une structure de reconstruction pyramidale a été proposée par MALLAT (1989) à partir de l'information extraite à chaque niveau de résolution et significative à ce niveau. Ainsi, dans le cas des images de télédétection, la transformée en ondelettes a déjà montré l'intérêt d'une analyse multirésolution pour la fusion de données et la synthèse d'images multicapteurs (PROENCA et FLOUZAT, 1990 et 1991; PROENCA, 1992).

L'analyse multirésolution appliquée à la fusion de données peut également exploiter les opérations de la morphologie mathématique (SERRA, 1982). La morphologie multirésolution fait appel à des suites d'opérations comme les filtres alternés séquentiels (SERRA, 1986) qui sont utilisés comme filtres passe-bas. L'échantillonnage de la composante basse fréquence obtenue génère le niveau de résolution suivant (FLOUZAT, 1997).

Dans toutes ces méthodes d'analyse multirésolution, la fusion de données est obtenue lors de la phase de reconstruction de la pyramide : la donnée basse fréquence spatiale est remplacée par l'image d'un capteur à basse résolution spatiale. Comme cette image peut être acquise à une fréquence temporelle élevée, la donnée composite obtenue contient donc une information à haute fréquence spatiale et temporelle.

5. Conclusion

La connaissance des ressources en eau et de leur régionalisation conduit à un besoin de quantification de volumes, de lames d'eau et de débits. Mais il est également indispensable de décrire les interactions avec les écosystèmes (tant en partie aérienne que souterraine) car les mécanismes biophysiques sont déterminants pour les flux.

C'est donc la disponibilité de cette diversité d'observations et de traitement de données qui contribue à l'estimation des différents termes de flux et de bilans d'eau. En effet, seules les mesures satellitaires peuvent fournir des caractéristiques physiques avec une uniformité d'observation valide pour tous les milieux indépendamment de la diversité et de l'hétérogénéité des bassins versants concernés. Les différentes résolutions spatiales et temporelles disponibles en visible, en infra-rouge et en micro-ondes et leurs combinaisons permettent ainsi : 1) la quantification des propriétés structurales et fonctionnelles des systèmes naturels et la détection directe de certains termes de la ressource en eau; 2) le calcul des quantités physiques qui conduisent au couplage des flux verticaux et horizontaux en conditionnant les interactions entre les deux compartiments du modèle général.

En conclusion, les progrès réalisés en télédétection dans ces domaines proposent quelques lignes directrices sur les apports que l'on peut raisonnablement en attendre dans les années à venir. En particulier, on comprend la place importante que vont prendre les systèmes d'observation dans cette perspective si l'on associe les données invariantes aux mesures spatiales qui assurent la surveillance.

6. Références

- AMRAM, O., 1996. Régionalisation du bilan hydrique à l'aide de mesures satellitaires pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes d'Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier.
- BURT, P.J. and ADELSON, E.H., 1983. The Laplacian pyramid as a compact image code. IEEE Trans. on Comm. vol. 31, n° 4, p. 532-540.
- CIEAU, 1999. L'eau et le cycle de l'eau. Documentation du Centre international de l'eau (Site Internet : www.cieau.com), Paris.
- CHOISNEL, E., 1997. Le cycle de l'eau : processus physiques et aspects planétaires. La Météorologie 8^e série, n° 20, Paris.
- CROWLEY, J.L. and STERN, R.M. 1984. Fast computation of the difference of low pass transform. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 6, p. 212-222.
- DE MARSILLY, G., 1995. L'eau. Flammarion, Paris, 126 p.
- FLOUZAT, G., 1997. Contribution de la morphologie mathématique à l'interprétation des images d'observation spatiale des surfaces terrestres. H.D.R., Université Paul-Sabatier, Toulouse.
- GROSSMANN, A. and MORLET, J. 1984. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape - SIAM J. Math. Anal, p. 723-736.
- JOLION, J.M. and ROSENFELD, A., 1994. A pyramid framework for early vision. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- KAKANE, V.C.K. and IMBERNON, J., 1992. Estimation of rainfall in Senegal using satellite NOAA-9/AVHRR. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, n°11, p. 2059-2069.
- MALLAT, S., 1989. Multifrequency channel decompositions of images and wavelets models. IEEE - ASSP, vol. 37, n° 12.
- MARR, D., 1982. Vision. A computational investigation into the human representation and processing of visual information. Freeman, New York.
- PEIXOTO, J.P. et OORT, A., 1990. Le cycle de l'eau. La Recherche, n° 220, p. 570-571.

- PROENCA, M.C. et FLOUZAT, G., 1990. Un concept d'analyse multirésolution pour le suivi temporel de paysage en évolution. 3^e Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990.
- PROENCA, M.C. and FLOUZAT, G., 1991. Orthogonal wavelet analysis: a multiresolution tool applied to remote sensing images. IGARSS'91, vol. III, p.1463-1465.
- PROENCA, M.C., 1992. La transformée en ondelettes appliquée au traitement d'images de télédétection. Thèse de doctorat. Université Paul-Sabatier, Toulouse.
- RAMADE, F., 1994. Éléments d'écologie : écologie fondamentale. 2^e édition, Ediscience international, Paris.
- SERRA, J., 1982. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London.
- SERRA, J., 1986. Éléments de théorie pour l'optique morphologique. Thèse de doctorat. Université de Paris VI, Paris.
- UNESCO, 1978. World water balance and water resources of the earth. V.I. Korzun ed., Studies and reports in hydrology, n° 25, Paris, 663 p.

21

Apport de la télédétection et des SIG pour la recherche hydrogéologique dans la région du Sahel central des Doukkala (Maroc occidental)

HAFIDA BOUAOUDA ¹ et YOUSSEF TIMOULALI ²

¹ *Faculté des sciences, Université Mohamed V, avenue Ibn Battouta, B.P. 1014, Rabat, Maroc; téléphone : (212) 7 771957; télécopieur : (212) 7 703577; courriel : bouaouda@hotmail.com*

² *Centre National de Coordination et Planification de la Recherche Scientifique et Technique (CNCPRST), 52, avenue Omar Ibn Khattab, B.P. 8027, Agdal, Rabat, Maroc; téléphone : (212) 7 778674; télécopieur : (212) 7 778678; courriel : timoulali@cnr.ac.ma*

Résumé

La région du Sahel des Doukkala située au Maroc occidental a connu dernièrement d'épineux problèmes d'approvisionnement en eau. Ainsi, plusieurs recherches hydrogéologiques se sont avérées nécessaires en vue d'assurer une bonne alimentation en eau pour les populations locales. Dans cet article, nous proposons de montrer l'apport des techniques de télédétection et des SIG pour la prospection hydrogéologique. Les différents traitements numériques d'images ont été effectués avec le logiciel Erdas alors que le SIG utilisé est Arc/Info. À partir d'une image de haute résolution spatiale TM de Landsat enregistrée pendant la saison sèche et couvrant la zone d'étude, nous avons pu extraire l'information concernant l'humidité du sol en appliquant la transformation du chapeau haut-de-forme (*tasseled cap*) et le rapport des bandes TM5/7. Nous avons aussi utilisé l'opération des filtres directionnels de Moore pour élaborer une carte de densité de drainage. Les différentes cartes obtenues ont ensuite été intégrées dans un SIG afin de délimiter les zones les plus favorables pour l'implantation des forages. La confrontation

du résultat avec la carte piézométrique existante de la région étudiée a bien montré la présence de deux zones de recharge de la nappe qui pourront faire l'objet de forages hydrogéologiques.

1. Introduction

L'eau est une substance fondamentale pour le maintien de la vie. C'est aussi un facteur d'une grande utilité pour la production agricole, la production de l'énergie, le domaine de l'industrie, les usages domestiques et dans d'autres activités de la vie courante. Devant la nécessité croissante des besoins humains en eau, plusieurs techniques, dont la télédétection, ont été développées. Cependant, l'analyse hydrogéologique des données de télédétection est d'une certaine complexité. En effet, l'eau souterraine ne peut pas être directement observée sur les images satellitales. Par conséquent, il faut procéder à l'identification et à l'étude d'un certain nombre d'indices révélateurs de l'occurrence de cette eau, notamment les phénomènes associés aux zones de recharge ou aux zones de décharge, la persistance du sol humide pendant la saison sèche, la nature lithologique des roches, les traits structuraux régionaux, le système de fracture et la densité du réseau de drainage (ANDERSSON *et al.*, 1992).

Le travail présenté dans cet article met en valeur l'apport de la télédétection et des SIG dans le domaine de l'investigation hydrogéologique à travers l'exemple de la région du Sahel des Doukkala qui a connu ces dernières années, comme les autres régions du Maroc, d'importants problèmes d'approvisionnement en eau potable.

1.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie du Sahel de Doukkala. Elle est située entre les latitudes 32°45' - 33°15' et les longitudes 8°24' - 8°40', avec une superficie de 5 400 km². La zone est délimitée par l'oued Oum Er Rabia au nord-est, l'océan Atlantique au nord-ouest et la plaine de Doukkala au sud (figure 1).

Du point de vue géomorphologique, c'est un pays de dunes fixées, dont l'altitude maximale est d'environ 250 m, allongées en longues crêtes d'orientation SO-NE, parallèles au rivage.

À cause de sa proximité immédiate de l'océan et de son relief très peu accidenté, les températures sont modérées dans les zones près de l'océan et plus contrastées à l'intérieur (25 °C en moyenne). Les pluies tombent régulièrement en automne et en hiver; une longue saison sèche s'étend au printemps et en été (à l'exception des périodes de grande sécheresse). Du point de vue hydrologique, aucun des oueds des Rhemna et des collines des Mouissates ne trouve un exutoire naturel vers l'océan à l'exception de l'oued Felfel (FERRÉ et RUHARD, 1975).

1.2. Données utilisées

Pour la réalisation de ce travail, on a utilisé les différentes données suivantes :

- une image numérique TM de Landsat enregistrée le 9 octobre 1984;
- des cartes topographiques au 1 : 50 000 datant de 1983 qui ont servi aussi bien pour la correction géométrique que pour les missions de terrain;

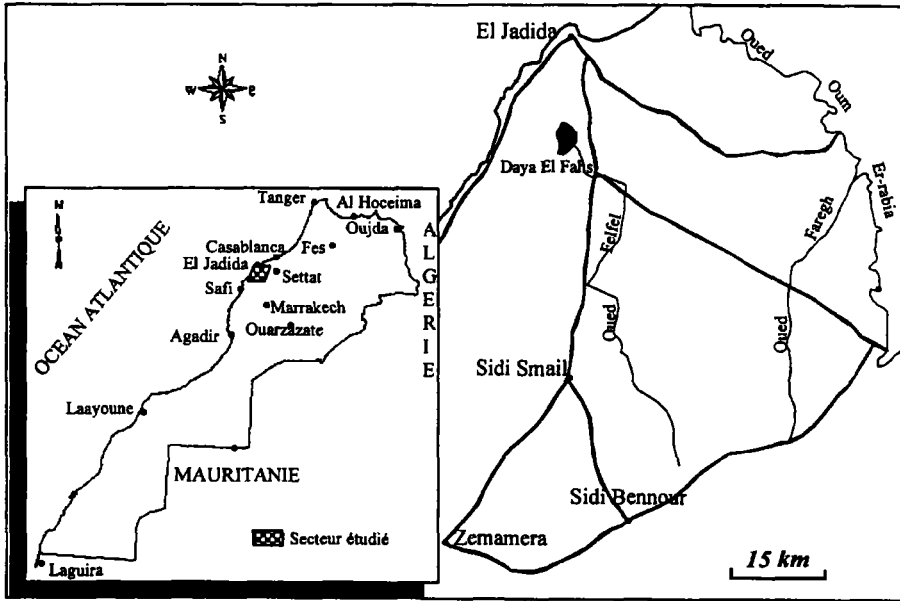


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

- des photographies aériennes au 1 : 20 000 datant de 1986;
- une carte piézométrique de la zone d'étude pour la période 1984 - 1985 (CHTAINI, 1987).

2. Méthodologie

L'ensemble des étapes suivies et des produits obtenus est représenté dans l'organigramme méthodologique de la figure 2.

2.1. Analyse des images TM

Après correction géométrique de l'image TM de la région, on a procédé à l'extraction de l'information concernant l'humidité du sol et le réseau de drainage.

2.1.1. Détermination de l'humidité du sol

L'information concernant l'humidité du sol a été obtenue en appliquant deux techniques différentes : la transformation de type chapeau haut-de-forme et le rapport des bandes TM5/TM7.

La transformation du chapeau haut-de-forme est une technique qui consiste en une combinaison linéaire des bandes originales de TM permettant ainsi de générer de nouvelles composantes dont les trois premières sont la brillance (*Brightness*), la verdure (*Greenness*) et l'humidité (*Wetness*). Les composantes brillance et verdure définissent le plan de végétation, la brillance et l'humidité définissent le plan des sols, alors que la verdure et

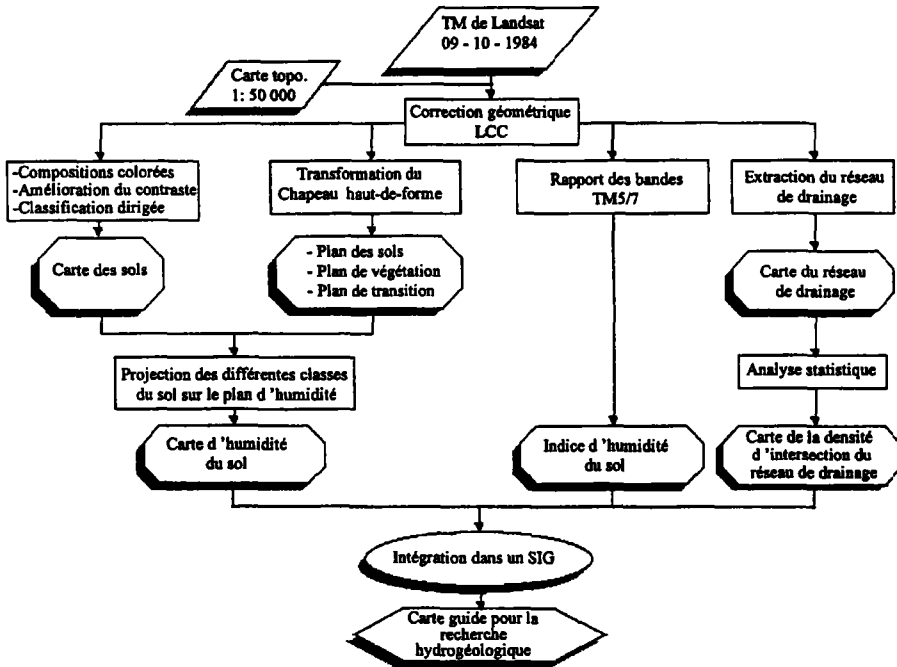


Figure 2. Organigramme méthodologique

l'humidité définissent le plan de transition (KAUTH and THOMAS, 1976; CRIST and CICONE, 1984). L'application de la transformation du chapeau haut-de-forme sur la zone d'étude a généré trois nouvelles images. Sur la figure 21-3 (voir cahier couleur), on montre les plans végétation, sols et transition, obtenus pour les données TM de la zone d'étude. Sur ces plans, on a projeté les différentes classes des sols obtenues par une classification dirigée basée sur la méthode du maximum de vraisemblance de la zone d'étude (figure 21-4) (voir cahier couleur). L'analyse de la disposition des classes en présence sur le plan des sols a permis de les reclasser selon leur degré d'humidité.

Le rapport des bandes TM5/7 est sensible à l'humidité du sol qui prend de fortes valeurs au fur et à mesure que l'humidité augmente (MUSICK and PELLETIER, 1986; BATELAAN and DE SMEDT, 1994). L'application de la méthode sur la région du Sahel central des Doukkala a permis de définir les zones plus humides qui peuvent être des zones de recharge, d'écoulement ou de décharge d'eau ou bien une zone de transition.

2.1.2. Analyse du réseau de drainage

Dans le but d'obtenir une carte de la densité d'intersection du réseau de drainage, on a procédé au rehaussement et à l'extraction des structures linéaires liées au réseau de drainage (humide et sec) suivis d'une analyse statistique. Le rehaussement des structures linéaires a été effectué en appliquant les filtres de MOORE (1983). Sur la figure 5, on montre le résultat du relevé du réseau de drainage obtenu par cette démarche.

Pour l'analyse statistique, on a choisi les linéaments de longueur supérieure à un kilomètre et on a dressé une carte de densité d'intersection des linéaments qui correspond aux zones d'infiltration maximale des eaux (BROOK, 1988).

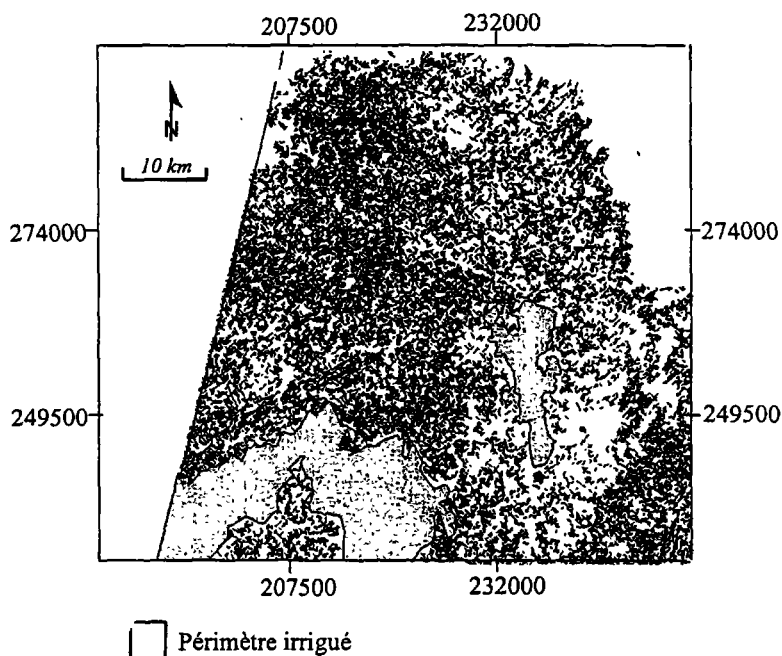


Figure 5. Carte du réseau de drainage détecté par la méthode de MOORE

2.2. Intégration des données dans un SIG

Chacune des cartes établies dans les étapes précédentes est transformée en code binaire, et ensuite représentée comme une couche d'information dans le SIG. Une simple multiplication entre ces différentes couches a permis de localiser les régions qui répondent le mieux aux conditions d'occurrence d'eau souterraine à savoir les zones représentant à la fois une humidité du sol et une forte densité du réseau de drainage.

3. Résultats

L'évaluation de la classification obtenue s'exprime par une matrice de confusion (tableau 1) qui montre une précision globale de l'ordre de 77 %.

La carte d'humidité obtenue à partir de la transformation du chapeau haut-de-forme (figure 6) contient deux grandes classes, la première correspond à la classe des zones humides dans laquelle on a regroupé l'eau, la végétation, les sols isohumiques et les calcimagnésiques, alors que la deuxième est celle des zones non humides où on a regroupé les sols fersiallitiques, les sols peu évolués, les sols minéraux bruts et le bâti.

Le rapport des bandes TM5/TM7 a permis de dresser une carte d'humidité (figure 7) correspondant à des zones de recharge ou de transition.

Les deux cartes d'humidité obtenues sont corrélées à 75 % (BATELAAN and DE SMEDT, 1994), ce qui nous pousse à les considérer toutes les deux pour l'établissement de la carte finale.

Tableau 1. Matrice de confusion de la classification dirigée de l'image TM de la zone d'étude.

TERRAIN	cl 1	cl 2	cl 3	cl 4	cl 5	cl 6	cl 7	cl 8	cl 9	cl 10	cl 11	Total
CLASSIFICATION												
Calcaimagnésiques à faible charge (cl 1)	14	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	22
Calcaimagnésiques à moyenne charge (cl 2)	3	20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	26
Calcaimagnésiques à forte charge (cl 3)	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Isohumiques (cl 4)	1	0	1	6	0	0	0	0	0	0	1	9
Fersiallitiques (cl 5)	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Fersillitiques ensablés (cl 6)	0	0	0	0	3	10	0	0	0	0	0	13
Sols minéraux bruts (cl 7)	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	5
Sols peu évolués (cl 8)	0	1	2	0	0	0	0	11	1	0	0	15
Bâti (cl 9)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
Végétation (cl 10)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	11	0	12
Eau (cl 11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Total	18	21	8	14	6	11	4	11	4	11	3	111

L'analyse et le calcul de la densité d'intersection des linéaments (figure 8) nous montre l'existence de deux zones de forte densité qui correspondent à des zones d'alimentation de la nappe souterraine. Ces zones sont situées au SE du Jorf Lasfar et au niveau de Had Ouled Fraj.

L'intégration et la multiplication des différentes couches d'informations obtenues (humidité du sol et densité du réseau de drainage) dans un SIG a permis d'élaborer une carte finale (figure 9) où sont délimitées les zones à fort potentiel hydrogéologique. Ces zones sont en nombre de deux, l'une localisée au SE du Jorf Lasfar et l'autre au NE du Sidi Smail.

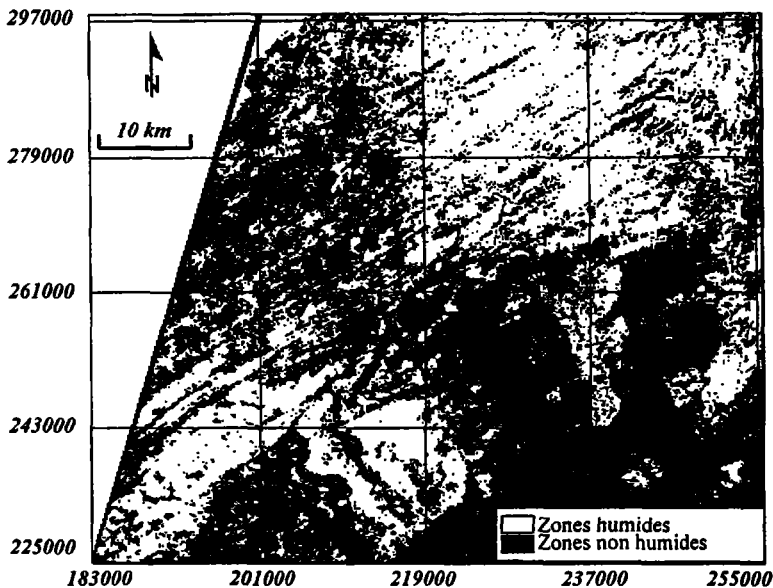


Figure 6. Carte de l'humidité du sol obtenue par application de la transformation du chapeau haut-de-forme

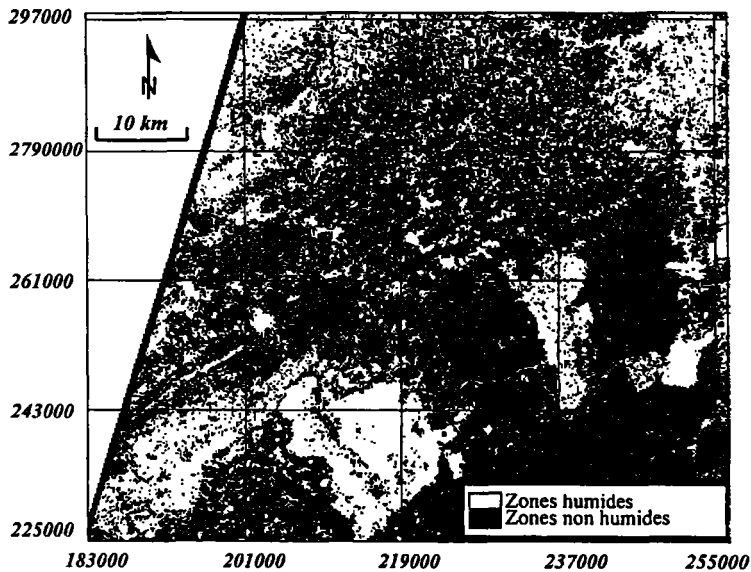


Figure 7. Carte d’humidité du sol issue du rapport des bandes TM5/TM7

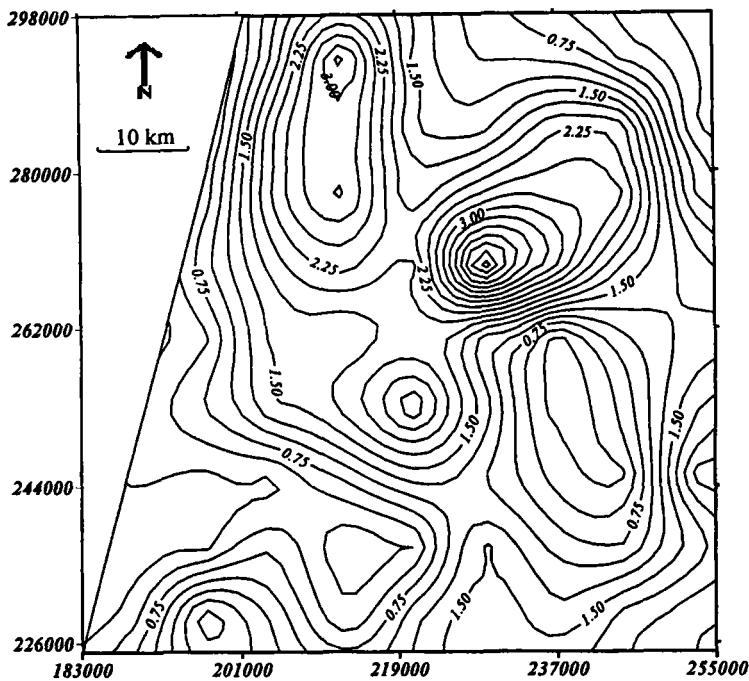


Figure 8. Carte de la densité du réseau de drainage

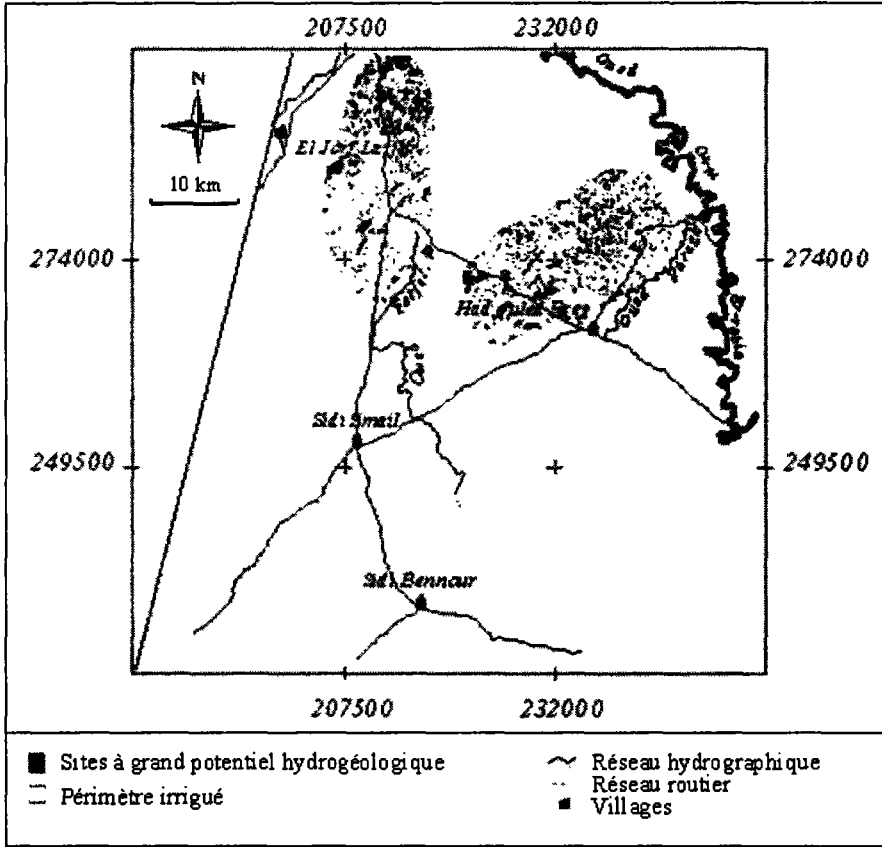


Figure 9. Carte de localisation des sites favorables à l'implantation des forages

4. Discussion des résultats

La carte piézométrique régionale et les observations continues des piézomètres au niveau de la région d'étude montrent que la nappe souterraine est alimentée au niveau de deux zones, l'une à proximité de Sidi Smail et l'autre au SE du Jorf Lasfar. Au niveau de Sidi Smail, l'alimentation est assurée par les eaux d'irrigation, alors qu'elle est d'origine profonde au SE du Jorf Lasfar (CHTAINI, 1987).

La carte obtenue par notre étude délimite les mêmes zones d'alimentation de la nappe, ce qui confirme que la méthodologie appliquée est efficace pour la recherche hydrogéologique dans cette région.

5. Conclusion

L'utilisation simultanée des techniques de traitement numérique d'images satellitaires et d'un SIG a permis de localiser les sites les plus favorables aux implantations futures des forages, ce qui permettra un gain du temps et une réduction du coût d'investigation hydrogéologique. La méthodologie adoptée dans cette étude peut être appliquée à d'autres régions avec quelques adaptations appropriées au site étudié. Cependant l'exploitation des données géophysiques et thermiques au niveau des zones déjà délimitées est souhaitable en vue d'une meilleure précision dans la localisation des sites proposés pour l'implantation des forages.

6. Remerciements

Les auteurs remercient le Centre National de Télédétection Spatial du Ministère de l'Agriculture (Maroc) pour son soutien logistique.

7. Références

- ANDERSSON, C., BENABDERRAHMANE, A., BYSTRÖM, J. and ÖBERG, M., 1992. Remote sensing as a tool in groundwater assessment. *Hydrogéologie*, n° 1-2, p. 93-99.
- BATELAAN, O. and DE SMEDT, F., 1994. Use remote sensing in groundwater discharge identification. European GRASS, Users Meeting, Paris, p. 1-19.
- BROOK, G. A., 1988. Hydrological factors influencing well productivity in crystalline rock regions of Georgia Southeastern. *Geology*, vol. 29, p. 65-81.
- CHTAINI, A., 1987. Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc). Thèse de doctorat, Université scientifique et médicale de Grenoble, 159 p.
- CRIST, E.P. and CICONE, R.C., 1984. A physically-based transformation of Thematic Mapper data - The TM tasseled cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-22, n° 3, p. 343-352.
- FERRE, M. et RUHARD, J. P., 1975. Le bassin des Abda-Doukkala et du Sahel de Azemmour à Safi. Note et Mémoire du Service Géologique du Maroc, n° 231, p. 261-297.
- KAUTH, R.J. and THOMAS, G.S., 1976. The tasseled cap. A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, p. 4B-41-4B-50.
- MUSICK, H.B. and PELLETIER, R.E., 1986. Response of some Thematic Mapper band ratios to variation in soil water content. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, n° 10, p. 1661-1668.
- MOORE, G.K., 1983. Objective procedures for lineament enhancement and extraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, n° 5, p. 641-647.

22

Appréhension de la cinématique paysagère par télédétection spatiale en estuaire de Seine (Normandie, France) : contribution au Programme national de recherche sur les zones humides

ALBAN BOURCIER, JEAN-CÔME BOURCIER et THOMAS POUCHIN

Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales (CIRTAI), Groupe « Environnement & Estuaire », Université du Havre, 25, rue Lebon, 76057 Le Havre Cedex, France; téléphone : + 33 (0) 2-32-74-41-35; télécopieur : + 33 (0) 2-32-74-41-34; courriel : alban.bourcier@univ-lehavre.fr

Résumé

Un secteur important de l'estuaire de la Seine (Normandie, France) est couvert de zones humides. Leur spécificité, leur grande richesse et leur rareté ont déterminé la création d'une équipe scientifique pluridisciplinaire, travaillant dans le cadre du programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH). L'équipe « Environnement & Estuaire » du Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales est une des neuf composantes scientifiques retenues dans le cadre du programme et il travaille principalement à l'aide de l'imagerie aérospatiale pour étudier la dynamique paysagère et plus particulièrement les transformations ayant trait aux zones humides. L'image satellitale s'offre comme un moyen efficace d'observation et de caractérisation des entités paysagères, tout en facilitant la reconnaissance et l'identification des principaux changements d'état. Une base de données géographiques a donc été constituée à partir d'une série chronologique comportant des enregistrements répartis sur dix ans. Les différentes procédures utilisées ont permis de mieux décrire les structures spatiales et de transformer les données contenues dans l'image en information géolocalisée directement exploitable par le biais de spatiocartes.

Les meilleurs résultats ont été obtenus par l'intermédiaire de combinaisons multidates sélectionnées en fonction de leur aptitude à mettre en évidence un type d'évolution.

1. Introduction

Un secteur important de l'estuaire de la Seine (Normandie, France) est couvert de zones humides. Leur spécificité, leur grande richesse et leur rareté ont déterminé la création d'une équipe scientifique pluridisciplinaire, travaillant dans le cadre du Programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH). L'équipe « Environnement & Estuaire » du Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales (CIRTAI) est une des neuf composantes scientifiques retenues dans le cadre du PNRZH en estuaire de Seine. Cette cellule de recherche œuvre depuis quatre ans à l'élaboration d'un système d'informations territoriales (SIT) centré sur le site estuarien et travaille principalement à l'aide de l'imagerie aérospatiale pour étudier la dynamique paysagère et plus particulièrement les transformations ayant trait aux zones humides (LYON and Mc CARTHY, 1995). Dans cette optique, le paysage est utilisé comme principal support pour opérer une partition méthodique de l'espace puisqu'il semble être un témoin significatif des mutations importantes qui affectent le milieu estuarien. L'observation du paysage sur une durée de 11 ans (1987 à 1998) a permis d'isoler des zones en proie à certains phénomènes particulièrement dynamiques. Le marais du Hode (figure 1), en rive droite de l'estuaire, offre un important domaine composé de prairies humides, de vasières nues (slikke) et de vasières végétalisées (schorre) en fonction d'une organisation spatiale obéissant à une répartition auréolaire à partir de l'axe fluvial. Cette zone a été retenue comme le secteur en mutation le plus significatif des transformations en cours dans l'estuaire de la Seine. En effet, elle se caractérise par la diversité des acteurs de l'aménagement et de la planification régionale qui interviennent régulièrement sur ce territoire. Une variété de conflits d'usages liés à la gestion de l'eau et à l'implantation de nouveaux équipements d'aménagement oppose chasseurs, gestionnaires du port autonome du Havre, écologues, agriculteurs et pêcheurs. Aussi, le développement de la zone industrielle et portuaire du Havre, l'implantation du pont de Normandie, l'extension des dépôts de déchets ou encore le futur

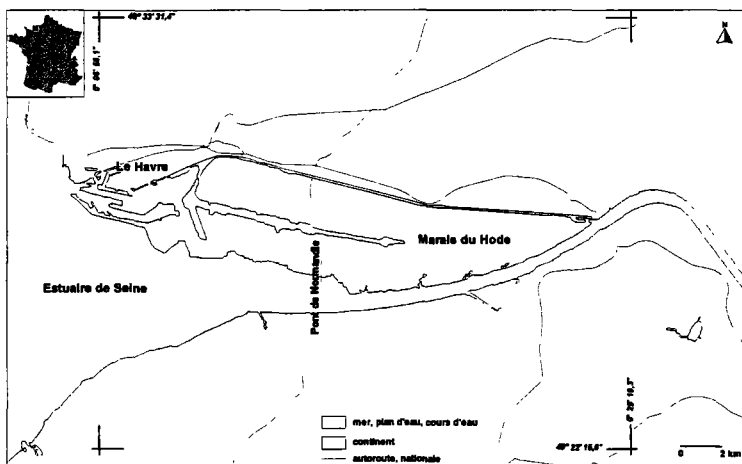


Figure 1. L'estuaire de la Seine

terminal conteneur Port 2000 sont autant d'atteintes à l'intégrité de cette zone humide désormais classée en réserve naturelle. Enfin, les surfaces de vases nues, vitales pour la majeure partie de la faune (oiseaux limicoles, poissons, etc), disparaissent très rapidement au profit de la roselière. Ce phénomène est le témoin d'une sédimentation particulièrement importante et spectaculaire causée notamment par l'endiguement progressif et l'entretien du chenal navigable de la Seine. Les études diachroniques menées grâce à la télédétection aérospatiale nous ont permis de dresser un synopsis des mutations paysagères dans l'estuaire de la Seine. Après avoir isolé les zones particulièrement dynamiques, nous avons quantifié ces mouvements en terme de surface. La quantification régulière (année après année) de la transformation d'un milieu permet de dresser un graphique dont la courbe illustre bien la tendance d'évolution du phénomène. Il est alors possible de prévoir les évolutions futures, mais aussi de régler le pas d'acquisition des données en fonction de la rapidité d'évolution.

2. Objectifs

L'image satellitale s'offre comme un moyen efficace d'observation et de caractérisation des entités paysagères, tout en facilitant la reconnaissance et l'identification des principaux changements d'état. Une base de données géographiques (BDG) en mode image a donc été constituée à partir d'une série chronologique comportant neuf enregistrements répartis sur dix ans. Ainsi, le développement de la zone industrielle et portuaire du Havre, la construction d'un des plus longs franchissements à haubans du monde (le pont de Normandie), l'accentuation de la sédimentation sur l'estran, ou encore les premiers chantiers relatifs à l'extension du port du Havre (Port 2 000) sont autant de phénomènes qui ont pu être observés à intervalles réguliers de manière à mieux cibler les études d'impact et contribuer au diagnostic territorial. Six images multibandes HRV de SPOT (1987, 1990, 1992, 1993, 1994 et 1997), combinées à trois enregistrements en mode panchromatique (1988, 1991 et 1998), ont donc fait l'objet d'un calage dans un système de coordonnées de référence (géoréférencement national) avant d'être importées au sein d'un système d'informations géographiques (SIG) comptant à ce jour 74 strates (BOURCIER *et al.*, 1998). Quelques clichés aériens verticaux panchromatiques et infrarouges ont été également numérisés et intégrés pour les analyses détaillées à grande échelle (1 : 10 000). Au terme de cette phase de prétraitements, des tests d'interprétation analogique (visuelle) ont permis de sélectionner plusieurs composés diachroniques en fonction de leur aptitude à mettre en évidence un type d'évolution, révélé ici par un changement d'occupation du sol. Ces compositions colorées multidates sont ensuite employées pour qualifier, mais aussi quantifier (pourcentages de couverture au sol), les mutations du paysage. Il est plus facile de dégager ensuite les grandes dynamiques évolutives de chaque thème (agriculture, végétation, urbanisation, infrastructures de transports, etc.) et d'identifier les zones de conflit d'usage sur requêtes spatiales au moyen du SIG. L'expérimentation principale vise à étudier l'évolution des vasières du Hode sur la rive nord de l'estuaire de la Seine, à proximité du site d'implantation du pont de Normandie. Il ne s'agit pas d'élaborer ici une cartographie des évolutions, mais de mesurer l'écart entre plusieurs états du paysage.

3. Environnement de travail et protocole méthodologique

Une série chronologique (tableau 1) couvrant un intervalle temporel de 10 ans a été constituée à l'aide de 9 images satellitales HRV de SPOT panchromatiques et multibandes dans le but de mieux appréhender la cinématique paysagère dans l'estuaire de la Seine. Des clichés aériens zénithaux panchromatiques et infrarouges numérisés à 1 m de résolution ont été intégrés dans cette base de données géographiques (BDG) pour optimiser les études à très grande échelle et faciliter le travail de reconnaissance.

La BDG a été géoréférencée selon la projection conique conforme de Lambert et calée selon le système de coordonnées de référence de la zone Lambert 1 (système local du Nord de la France). Ces prétraitements géométriques ont permis l'intégration des images satellitales dans le système d'informations territoriales de l'estuaire de la Seine dans le but d'effectuer plusieurs analyses relevant de la combinatoire de données issues d'environnements distincts. Le logiciel de traitement d'image Multiscope NT version 3.0 bêta et les SIG MapInfo et Arc/Info sont utilisés pour gérer et exploiter ces bases de données géographiques.

La cinématique paysagère de l'estuaire de Seine, révélée à court terme par les mutations opérées au sein des zones humides, a été étudiée à l'aide de composés diachroniques. Malgré l'absence de corrections atmosphériques, il est possible d'entreprendre une analyse multodate par différence entre deux ou trois images enregistrées à des dates distinctes (PÉDRON, 1988). Il suffit d'être prudent quant à l'interprétation des nuances colorées les moins marquées. La détection des changements peut être améliorée par une composition colorée formée de trois canaux résultant de la différence ou du rapport entre chacune des bandes spectrales d'une première image sur les mêmes canaux d'une deuxième et d'une troisième image.

Les configurations utilisées pour les études diachroniques font alors appel à des images dont les couleurs ne doivent plus être considérées comme révélatrices d'une thématique particulière. En effet, si le codage coloré est toujours dépendant des radiométries, la

Tableau 1. Série chronologique de l'observatoire du paysage estuarien

Date	Type de données	Mission / KJ	Résolution géométrique (m)	Intervalles radiométriques
31-05-1997	Image HRV de SPOT	35-250	10	P
12-03-1997	Image HRV de SPOT	35-250	20	R, V, PIR
22-07-1994	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
1994	Clichés aériens	1 : 30 000	1	P
26-06-1996	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
10-10-1992	Image HRV de SPOT	35-250	20	R, V, PIR
29-08-1991	Image HRV de SPOT	34-250	10	P
04-05-1990	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
26-11-1988	Image HRV de SPOT	34-250	10	P
24-05-1987	Image HRV de SPOT	34-250	20	R, V, PIR
1985	Clichés aériens	1 : 20 000	1	P, PIR
1979	Clichés aériens	1 : 30 000	1	P

Notes : P = Panchromatique R = Rouge V = Vert PIR = Proche Infrarouge

combinaison d'images enregistrées à des dates différentes impose un autre mode d'appréhension de la couleur : les variations de teintes caractérisent désormais un type d'évolution en cours ou réalisée. Il faut insister sur le fait que ce type d'analyse suppose que les images à comparer aient au moins la même géométrie. Il convient alors de les transformer pour qu'elles deviennent superposables à une image présentant la précision géométrique souhaitée. La combinaison d'images prises à des dates différentes dans la même bande spectrale peut constituer un moyen additionnel pour étudier l'occupation des sols (BONN et ROCHON, 1992).

En utilisant une couleur primaire différente pour afficher trois observations espacées dans le temps d'une série d'images HRV de SPOT, il est possible de générer des compositions colorées offrant au photo-interprète une forme de synthèse de l'information spectrale perçue sur une période donnée. La méthode traditionnelle vise la création d'une composition colorée formée de trois images d'un même territoire espacées dans le temps. Seules sont alors représentées en gris les réflectances du sol qui n'ont pas changé. En outre, les couleurs révèlent les endroits où des changements sont intervenus à l'une ou l'autre des dates considérées. Une tel traitement s'applique bien au repérage des structures, dont le comportement radiométrique est connu et qu'il faut rechercher dans la bande spectrale où elles apparaissent le mieux (BOURCIER, 1993). Il a été démontré qu'une image est d'autant plus intéressante à observer que l'information y est plus contrastée, c'est-à-dire qu'elle s'écarte (statistiquement) de l'information moyenne (l'écart type ou variance) servant de mesure à la richesse de l'information (BOURCIER, 1994). Tout comme pour une analyse sur les bandes spectrales d'une même prise de vue, celle appliquée à partir d'une même bande spectrale, mais enregistrée à des dates différentes, va créer de nouveaux plans image à partir des canaux originaux. Cette opération va permettre une meilleure identification des classes de pixels homogènes révélant une évolution. Les tendances évolutives du paysage sont définies à travers des trajectoires dans un espace factoriel de référence.

En effet, en projetant dans le même espace factoriel les images de 1987, 1990 et 1992 (dates des plus grands changements), chaque axe résultant de l'analyse en composantes principales donne lieu à la création d'un néocanal dont les valeurs correspondent à la distance parcourue par les pixels dans cet espace. Une représentation synthétique de cette évolution peut également être fournie par l'affichage d'images trichromes intégrant les axes principaux de chaque enregistrement qui fournissent les plus fortes variances et ayant donc le plus grand pouvoir explicatif.

4. Mise en évidence de la cinématique des zones humides

Au terme d'une analyse consacrée à la reconnaissance des unités paysagères des zones humides en usant de procédures variées de traitement de l'image satellitaire (BOURCIER *et al.*, 1998), il convient de montrer que le paysage n'est pas une constante, mais qu'une observation sur un laps de temps relativement court de quelques années suffit pour mettre en évidence la dynamique de l'environnement dans un secteur sensible.

La première étape opérationnelle a été d'étudier, entre 1985 et 1990, le recul des vasières nues au profit des vasières végétalisées par confrontation des différentes lignes de partage entre ces deux domaines. La ligne de référence de cette étude est issue d'une interprétation d'un cliché aérien proche-infrarouge au 1 : 20 000 enregistré en 1985 sur lequel il a été possible de repérer les deux unités paysagères d'intérêt (la slikke et le schorre). Cette opération ne pouvait pas être menée sur la carte topographique du Havre (révision 1989)

dans la mesure où la limite cartographiée correspond à la laisse des plus hautes mers et que la dimension paysagère n'apparaît pas sur ce type de document. Ensuite, il a fallu retracer, à partir de l'image multibande HRV de SPOT de 1987, la nouvelle limite séparant les herbues des vases nues. La superposition des deux premières lignes de partage tracées à l'aide de couleurs différentes sur la spatiocarte élaborée a fait d'ores et déjà ressortir quelques évolutions : la plus flagrante est le colmatage du chenal de drainage principal, alors que les travaux d'implantation du pont de Normandie ne sont pas encore commencés.

Ensuite, il a été aisé de repérer la progression des herbues sur les vases nues, en particulier à l'ouest du chenal en cours de colmatage. En revanche, le chevelu de drainage oriental semble s'être développé.

Le deuxième stade de l'évolution a été obtenu par l'interprétation de l'image de 1990. Le tracé matérialisant la nouvelle limite entre les deux secteurs étudiés constitue une troisième information qui a été confrontée à la ligne de partage des eaux de 1987. Le colmatage du chenal de drainage s'est accentué et la progression des herbues apparaît encore plus nettement, au même titre que quelques groupements pionniers localisés sur les vases nues. Il faut également noter, sur cette image, le début des travaux d'aménagement de la petite vasière artificielle dont la réalisation a été décidée dans le cadre des mesures compensatoires du pont de Normandie. La comparaison des limites de 1987 et de 1990 met en évidence l'importance des transformations survenues dans ce secteur de vasières. Le chevelu de drainage oriental s'est effectivement développé aux dépens du chenal principal localisé à l'est du pont de Normandie. Cet axe d'écoulement subit de plein fouet l'accélération de la sédimentation et son colmatage est un phénomène qui prouve l'atterrissement des vasières. L'évacuation des eaux pose moins de problèmes par l'autre artère, ce qui explique sa croissance. À terme, le premier site va se retrouver à l'intérieur des terres émergées et éloigné du fleuve, tandis que le second va conserver sa position actuelle par rapport au chenal de Rouen et assurer le drainage des vasières.

Quelques travaux de diagnostic opérés sur l'image d'octobre 1992 et de mars 1997 permettent de contempler l'ampleur des transformations 10 ans après la première observation. Il faut tout particulièrement retenir l'étendue de la vasière artificielle, identifiable par sa forme en arborescence.

Cette étude ponctuelle permet de confirmer plusieurs diagnostics qui ont été émis quant à l'évolution prochaine de l'estuaire de la Seine. Les digues construites en travers de la progression de la marée et le remblai du pont de Normandie renforcent incontestablement la sédimentation. De plus, le front de végétation, qui colonise ensuite les vases nues stabilisées, progresse d'environ 50 à 100 m par an. Le recul des vasières nues au profit des roselières et celui de ces dernières au profit des prairies humides semblent donc inexorables (BOURCIER et FRUIT, 1995).

5. Analyse des changements à l'aide de composés diachroniques

Il ressort de l'analyse précédente que la plupart des phénomènes paysagers sont spatialement interdépendants. Par conséquent, les aménageurs doivent faire face à des problèmes complexes pour l'étude de systèmes spatio-temporels. L'expérience précédente a permis d'exposer l'intérêt des études d'évolution en privilégiant l'analyse comparative. Cependant, seuls les changements de grande envergure ou ceux intervenus dans une thématique au centre des préoccupations ont pu être identifiés. Un certain nombre de techniques permettant de mieux analyser et gérer les transformations qui surviennent dans les milieux humides ont été validées dans le cadre de cette recherche.

Une étude détaillée des changements intervenus à proximité du pont de Normandie a été menée par l'intermédiaire de plusieurs composés diachroniques autorisant la comparaison du paysage entre deux dates. Les documents sont toujours constitués d'après le même modèle : les deux premiers axes principaux de l'image la plus récente sur les plans rouge et vert, ainsi que le premier facteur de l'image la plus ancienne sur le plan bleu. L'analyse effectuée a porté sur la reconnaissance des mutations détectées dans le marais du Hode entre 1987 et 1997.

Les travaux relatifs à l'implantation du pont de Normandie apparaissent très nettement. L'extension du dépôt de phosphogypses se détache sans difficulté des accumulations antérieures à mai 1987 et l'ensemble apparaît colonisé par les formations herbacées après sa fermeture et sa réhabilitation. Les principales surfaces conquises par la végétation intéressent les secteurs de vase nue colonisés par les herbues. L'analyse des derniers enregistrements multispectraux montre que la progression des formations végétales sur les vases nues est encore très marquée dans le secteur du pont, mais semble ralentir dans la partie est.

6. Le recours à d'autres combinaisons linéaires multidates

L'utilisation combinée des indices de végétation normalisés élaborés pour chaque enregistrement multibande a permis de prendre connaissance des variations temporelles qui s'opèrent au niveau des formations végétales. La configuration visualisée admet respectivement sur les plans rouge, vert, bleu, les indices de 1992, 1990 et 1987 (figure 22-2) (voir cahier couleur). Les vases nues apparaissent en gris foncé (1), l'eau en noir (2) et les formations végétales qui n'ont guère évolué en blanc (3). Toutes les autres couleurs sont révélatrices d'une évolution de la biomasse verte. Il est possible de localiser en bleu foncé les espaces encore végétalisés en mai 1987 (4), qui ont été transformés en surfaces artificialisées. En cyan apparaissent les secteurs dont la mutation est postérieure à mai 1990 (5). En vert interviennent les surfaces qui étaient recouvertes de végétation seulement en 1990 (6) et en rouge (7) celles qui l'ont été en 1992. Les composantes en vert-jaune révèlent des aires artificialisées qui ont été récupérées par le domaine végétal après l'enregistrement de 1987, mais dont la réponse spectrale de 1990 s'affirme sur celle de 1992 compte tenu de la saison (mai pour 1990 et octobre pour 1992). Il faut citer comme exemple certaines parcelles agricoles et les premières terres conquises par les roselières au détriment des vases nues (8). Le magenta est plus difficile à interpréter dans la mesure où il peut traduire une réponse un peu plus forte des données de 1992 par rapport à celles des autres années (rouge clair, rose) ou le dépérissement des formations végétales en 1990. Dans tous les cas, cette couleur signale une reprise de l'activité chlorophyllienne. La seconde proposition s'est vérifiée dans le domaine des roselières avec l'aire de chantier qui a été provisoirement aménagée pour la réalisation de la vasière expérimentale (9).

Il semble donc que les variations temporelles d'indices de végétation révèlent avec une remarquable précision les mutations opérées au niveau de la biomasse verte.

7. Conclusion

L'observatoire paysager aide à mieux comprendre le fonctionnement du territoire estuarien et son évolution. Il convient de rappeler avant tout la pertinence des analyses statiques répétées. En effet, la collecte d'une série d'images satellitaires sur plusieurs années permet donc de dégager la logique de développement d'un site. Par simple analyse de situations différentes, l'organisation temporelle du développement d'une zone est facilement décelable. La comparaison de plusieurs états du paysage permet de vérifier le bilan interprétatif dressé à une date donnée et de confirmer ou non les tendances évolutives dégagées.

Les applications exposées montrent qu'incontestablement l'imagerie HRV de SPOT apporte sa contribution à une meilleure connaissance des milieux, à leur protection et à leur développement. En terme d'aménagement, elle peut intervenir dans la réalisation d'un état initial du milieu récepteur d'un projet d'équipement afin de mettre en évidence les contraintes de l'environnement et d'étudier les impacts prévisibles sur ce milieu. De plus, le bilan sur l'apport des combinaisons temporelles semble convenir aux objectifs de veille environnementale.

L'intérêt de la télédétection diachronique pour le suivi des paysages se résume à sa capacité de mettre en évidence de manière automatique les mutations dans l'occupation des sols. L'interprétation d'une image des changements permet de localiser les secteurs en évolution et de rendre compte, éventuellement, du type de mutations en cours ou réalisées. Une telle démarche pourrait permettre de rationaliser les actions de gestion du territoire de manière plus précise en n'ayant recours aux renseignements nécessaires que sur les seules zones intéressantes (ici les milieux humides). Les images de télédétection aérospatiale ont trouvé une nouvelle dimension lors de leur intégration dans le SIT, notamment grâce à la combinaison avec des informations vectorielles. Les spatiocartes résultantes sont des documents de travail fiables, précis et complètement opérationnels pour orienter les missions sur le terrain (BOURCIER *et al.* 1998).

Au-delà des préoccupations exprimées au sujet de l'embouchure de la Seine, il faut reconnaître que les estuaires constituent des zones de convoitise qui se caractérisent par un dynamisme important perceptible à moyen terme. Forts des tests effectués sur l'estuaire de Seine et de l'expérience acquise, la mise en place d'un programme de recherche sur les estuaires européens de l'Atlantique nord devrait nous permettre de vérifier la répétitivité et la transposabilité de cette méthode d'observation sur d'autres sites estuariens. Les investigations ont déjà débuté sur le Solent (Grande-Bretagne) et l'Elbe (Allemagne). Les secteurs du Tage (Portugal) et de la Gironde (France) sont d'ores et déjà prévus. À terme, il s'agit de mettre à disposition des acteurs de l'aménagement toute une série d'indicateurs physiques (paysage) et fonctionnels (activités) par le biais d'une grille d'analyse comparative.

8. Références

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes, Presses de l'Université du Québec et AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

- BOURCIER, A. 1993. Une méthode originale pour le suivi des mutations paysagères - Cinématique de l'estuaire de la Seine (Normandie, France). 16^{ème} Symposium canadien sur la télédétection et 8^{ème} Congrès de l' Association québécoise de télédétection, La télédétection : un outil pour la modélisation et la gestion des changements environnementaux, p. 431-436.
- BOURCIER, A. 1994. Télédétection & combinaison d' informations géographiques en mode image : application à l' aménagement de l' estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 421 p.
- BOURCIER, J.-C., BOURCIER, A. et POUCHIN, Th. 1998, L' Observatoire des zones humides - Zones humides de l' estuaire et des marais de Seine : structure, fonctionnement et gestion. Rapport de l' exercice 1998, Projet pilote n° 48, Programme national de recherche sur les zones humides, Centre interdisciplinaire de recherches en transports et affaires internationales, Université du Havre, 234 p.
- BOURCIER, A. et FRUIT, J.P. 1995. Développement industrialo-portuaire et qualité de l' environnement dans la vallée de la Seine (Haute-Normandie, France). Conférence régionale de l' Union Géographique Internationale (U.G.I.) sur Environnement et qualité de la vie en Europe Centrale - Problèmes de transition, 22-26 août 1994, Prague (République Tchèque), Support Cédérom.
- BOURCIER, A., VAGUET, O. et VAGUET, A. 1998. Les références de terrain dans l' initialisation et la validation des traitements de données aérospatiales : contribution aux études environnementales multicritères. In DUBOIS, J.-M..M., BERNIER, M., FORTIN, J.-P. et BOIVIN, F. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 271-279.
- LYON, J. and McCARTHY, J. 1995. Wetland and environmental applications of GIS. Lewis Publishers, 373 p.
- PÉDRON, C. 1988. Intégration de données SPOT dans une banque de données urbaines : la localisation des chantiers. Photo-interprétation, vol. 88-2, p. 47-52.

23

Essai méthodologique exploitant les images spatiales dans un SIG pour la protection des ressources en eau de surface au Maroc

ABDELKADER EL GAROUANI¹, RAOUF JABRANE¹ et ABDELAZIZ MERZOUK²

¹ *Laboratoire de géologie appliquée, Faculté des sciences et techniques Fès-Saïss, B.P. 2202 ; route d'Imouzzar, Fès-Saïss, Maroc; téléphone : 212 (5) 60 29 53; télécopieur : 212 (5) 60 82 14; courriel : garouani@caramail.com*

² *Laboratoire des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, avenue Allal Fassi, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc; téléphone/télécopieur : 212 (7) 77 85 12; courriel : merzouk@mtds.com*

Résumé

Face aux problèmes de la dégradation de la qualité des ressources en eau au Maroc, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes et des actions visant la préservation et la sauvegarde de ces ressources. La création des zones de protection constitue, entre autres, un des moyens les plus préventifs et curatifs pour cette sauvegarde. Le secteur d'étude concerne le barrage 9 Avril 1947, situé au Rif Occidental Marocain. Pour faciliter la gestion, le stockage et l'analyse des données nécessaires pour la délimitation des zones de protection, on a eu recours à un système d'information géographique (SIG). Cet article, fait ressortir l'opportunité de la mise en place d'un SIG pour la définition des zones de protection d'une ressource de surface pour l'alimentation en eau potable, à savoir la retenue d'un barrage. On y a également défini les différentes étapes nécessaires pour la conception d'un prototype intégrant les données de télédétection à un SIG, adapté à la délimitation de ces zones. Les images satellitales ont permis l'obtention d'informations thématiques précises (caractérisation de l'état de surface de bassin versant) pour une extrapolation spatiale des informations à partir de la connaissance de quelques données locales. Grâce

à leur répétitivité temporelle, ces images offrent aussi la possibilité de suivre le changement des caractéristiques du bassin versant.

1. Introduction

Au Maroc, les ressources en eau sont devenues plus vulnérables à la pollution et le problème de la qualité de l'eau s'accroît à terme en raison de l'augmentation des rejets polluants dans les milieux récepteurs sans traitement préalable. À cet effet, il est nécessaire de prendre toutes les mesures susceptibles de garantir la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable (ANONYME, 1992). La réalisation des périmètres de protection des ressources en eau constitue un outil important pour atteindre cet objectif.

La délimitation des zones de protection constitue un travail de grande envergure dans la mesure où, d'une part, elle nécessite beaucoup de temps pour la collecte des données et le suivi de certains paramètres à variation temporelle et, d'autre part, il s'agit d'un travail multidisciplinaire faisant appel à des expertises diverses (KRAUSE et LAMRHARY, 1995).

Les données utilisées sont diversifiées et géoréférencées (image HRV de SPOT, données cartographiques, etc.) et se rapportent à un espace bien défini. Pour leur gestion, leur enregistrement et leur analyse, l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) s'avère nécessaire (BETLAAN *et al.*, 1996). Cependant, la mise en place d'un SIG pour les zones de protection des eaux de surface interpelle des critères tels que l'objectif qu'on lui assigne, le volume, le type et la qualité des données de base, la complexité de l'analyse requise, l'échange d'information avec les organismes cibles pour la définition des zones de protection, etc. (EL GAROUANI, 1995)

Les besoins des services de l'état (Office national de l'eau potable, Direction de l'hydraulique, etc.) dans le domaine de la protection des ressources en eau sont :

- la gestion des bases de données géographiques et alphanumériques des ressources en eau ;
- la cartographie thématique;
- l'intégration de données spatiales provenant de divers formats (Arc/Info, ArcView, Idrisi, Access, Excel, etc.);
- les outils statistiques et d'analyse de données;
- la sélection d'objets, l'interaction et la localisation multicouches.

La région d'étude concerne le barrage 9 Avril 1947, mis en service en 1995, situé au Rif Occidental Marocain à environ 30 km au sud de la ville de Tanger et à 15 km à l'est de la ville d'Asilah. Le bassin versant a une superficie de 220 km² et des précipitations moyennes annuelles de 900 mm. La capacité utile de la retenue est de 270 millions de mètres cubes. Ce barrage, en mobilisant 90 millions de m³/an en année normale, permettra en complément des ouvrages existants de couvrir les besoins en eau potable et d'irrigation de la région comprise entre Tanger et Asilah au-delà de l'horizon 2015. La retenue du barrage reçoit un apport solide de 609 000 tonnes/an à cause de l'érosion des versants favorisée par le déboisement (ANONYME, 1996).

2. Matériel et méthode

2.1. Concepts des zones de protection pour les eaux de surface

Pour faire face aux menaces par la pollution, dont l'importance diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la ressource à protéger de manière appropriée, on partage la région qui alimente la ressource en eau (le bassin versant) en plusieurs zones. Il s'agit de trois zones suivant la législation marocaine : la zone de protection immédiate (zone I), la zone de protection rapprochée (zone II) et la zone de protection éloignée (zone III) (ANONYME, 1995). La délimitation de ces zones fait appel à plusieurs disciplines et à diverses expertises (KRAUSE et LAMRHARY, 1995).

Dans la zone I, il faut assurer la protection contre la pollution de l'eau d'une retenue. La dimension de cette zone doit permettre :

- d'intervenir convenablement en cas d'accident;
- de supprimer chaque influence humaine;
- d'implanter une forêt ou une zone de végétation à vocation protectrice.

Dans la zone II, on doit assurer la protection contre la pollution et d'autres détériorations résultantes des diverses activités et aménagements humains, dont la proximité pourrait mettre particulièrement en danger les eaux de captage. En fin, dans la zone III, on doit assurer la protection des eaux contre les détériorations étendues, en particulier contre les pollutions persistantes ou difficiles à éliminer et contre la pollution chimique ou radioactive (ONEP-GTZ, 1995).

2.2. Préparation des données et choix des méthodes d'acquisition

L'opération d'acquisition de données à intégrer dans le SIG doit d'abord commencer par la délimitation de l'aire de l'étude pour permettre à l'utilisateur du SIG de procéder à la collecte des données qui seront la base des couches d'information et à les préparer convenablement en fonction de leur nature pour permettre leur enregistrement et leur analyse. Ces opérations de préparation concernent particulièrement la numérisation des cartes, la conversion et l'organisation des données (ESRI, 1994a).

L'étude du contexte de la retenue du barrage nous a permis d'identifier les flux d'information, de les analyser et de les rassembler sous forme de couches d'information comportant à la fois des données cartographiques et alphanumériques (tableau 1).

Pour délimiter les zones de protection autour des ressources en eau de surface, on procède à des ajustements et à des analyses multicritères en tenant compte à chaque fois d'un certain nombre de paramètres (tableau 1).

Pour automatiser les différentes opérations informatiques requises, on a établi un organigramme entrée/sortie qui illustre les différentes étapes de la délimitation des zones de protection (figure 1). Cet organigramme est le résultat de :

- l'examen des concepts utilisés pour l'élaboration des périmètres de protection d'une ressource en eau de surface;
- l'analyse des données techniques nécessaires pour la délimitation de ces périmètres.

Tableau 1. Couches d'information identifiées et utilisées pour la délimitation des zones de protection des ressources en eau

Couches thématiques d'entrée	Données alphanumériques correspondantes
- Morphologie et géographie	- Caractéristiques physiques du bassin versant
- Cadre administratif et cadastral	- Données statistiques de la population
- Occupation des sols	- Types des espèces forestières - Type des engrais utilisés, type des pesticides
- Foyers de pollution	- Descriptions des foyers de pollution
- Hydrogéologie	- Fluctuation piézométrique
- Pédologie	- Caractéristiques des unités pédologiques
- Géologie	- Nature, caractéristiques et âge des roches
- Données sur l'ouvrage	- Caractéristiques générales de l'ouvrage
- Climatologie	- Pluviométrie et températures moyennes mensuelles
- Hydrologie	- Bilans hydrologiques, mesures de jaugeage, paramètres hydrologiques et qualité de l'eau
- Gestion de l'eau	- Besoins et productions en eau potable annuelles - Traitement de l'eau brute, qualité de l'eau
Couches d'informations de sortie	Données alphanumériques correspondantes
- Modèle numérique d'altitude	
- Carte des pentes	
- Limites des bassins versants	
- Carte du réseau hydrographique	Données alphanumériques correspondantes
- Carte de l'occupation des sols	à chaque type de carte
- Carte d'aménagements proposés	
- Carte du potentiel des menaces	
- Zone de protection immédiate	
- Zone de protection rapprochée	
- Zone de protection éloignée	
- Cartes thématiques diverses	

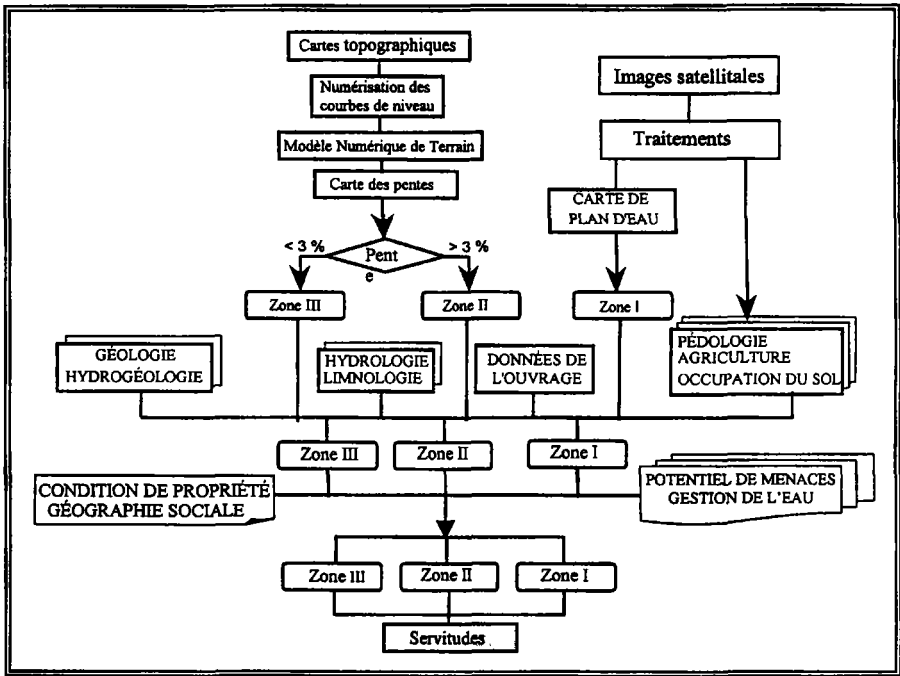


Figure 1. Organigramme pour l'élaboration des zones de protection

2.3. Apport de la télédétection et du SIG pour la délimitation des zones de protection

Les données de télédétection apportent une contribution précieuse aux activités de gestion de ressources en eau pour plusieurs raisons (PUECH, 1993) :

- continuité spatiale et flexibilité géométrique;
- couvertures diachroniques;
- vision synoptique;
- formats numériques permettant l'analyse et le traitement automatique ainsi que la sortie de documents adaptés à des besoins variés.

La télédétection a permis d'accéder à la description du milieu naturel (occupation du sol, types de cultures, infrastructures et aménagements, réseau hydrographie, etc.). L'approche cartographique suivie est celle de l'analyse des signatures spectrales des principaux types d'occupation du sol pour une classification dirigée basée sur la méthode du maximum de vraisemblance (image HRV de 28-04-1998).

Le SIG, lui, peut accomplir plusieurs fonctions essentielles (ESRI, 1994b) :

- acquisition des données spatiales et descriptives;
- stockage, gestion et mise à jour de ces données;
- analyse et croisement de données;
- restitution sous forme de tableaux, de graphiques ou de cartes.

La manipulation du système mis en place est assurée moyennant des utilitaires bien structurés qui offrent à l'utilisateur toutes les possibilités de gestion du SIG depuis l'entrée de données jusqu'aux sorties des résultats (figure 2 et 3).

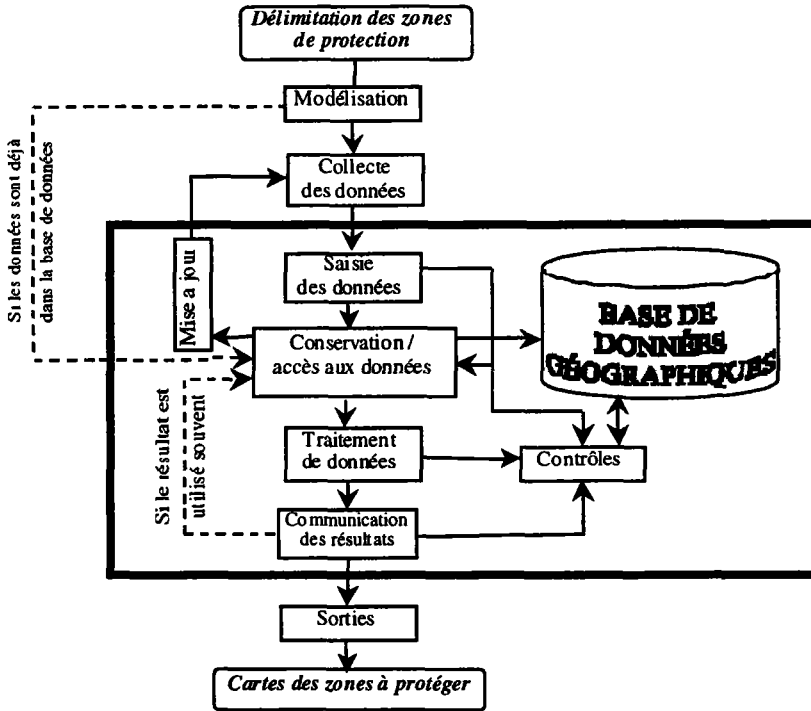


Figure 2. Enchaînement des opérations effectuées par le SIG

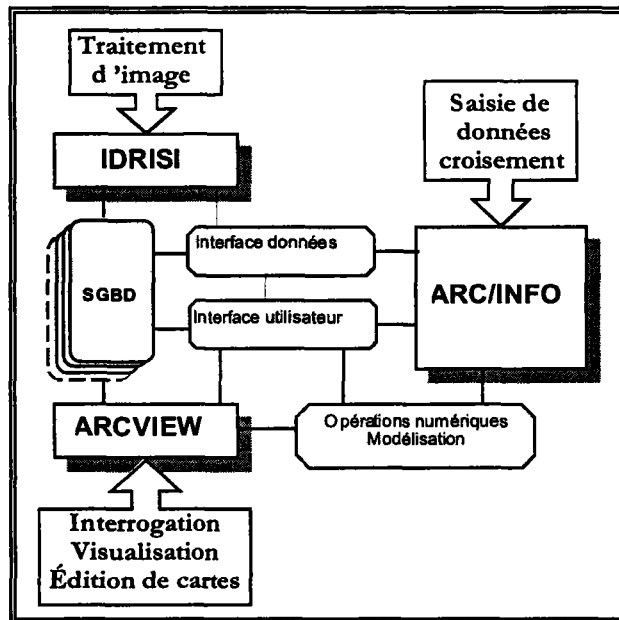


Figure 3. Organisation du SIG

3. Résultats

L'étude de la région concernée à partir des données de télédétection à haute résolution, a permis de distinguer la répartition des différentes classes d'occupation du sol (figure 23-4) (voir cahier couleur). L'interprétation des photographies aériennes et les observations sur le terrain ont permis d'établir la réalité de terrain à laquelle sont confrontés les résultats de traitement d'images.

L'organisation du SIG adopté englobe un ensemble de logiciels et de programmes nécessaires pour la réalisation des différentes tâches requises pour la délimitation des zones de protection (figure 23-5) (voir cahier couleur). Ces logiciels englobent :

- des modules de saisie de données provenant de différentes sources (cartes existantes, images satellitaires, photographies aériennes, tableaux, etc.);
- des modules d'enregistrement et de gestion de la base de données qui servent surtout à la structure de l'information géographique;
- des modules pour des opérations numériques et de simulation;
- des modules d'édition des résultats qui ont pour fonction la communication avec les différents périphériques de sortie.

Après l'analyse des paramètres existants dans la base de données, on a constaté que les facteurs géologiques et hydrogéologiques ont un apport négligeable en nutritifs vers la retenue, par contre la morphologie, la dégradation du couvert végétal, le ruissellement et l'agriculture sont des facteurs importants pour la délimitation des zones de protection.

La mise en relation des facteurs précédemment évoqués a permis la délimitation des trois zones de protection telle qu'elle est présentée sur la figure 23-5 (voir cahier couleur). L'installation de ces dernières présente une possibilité de protéger efficacement les ressources en eau et de prolonger la durée de leur exploitation. Ceci entraîne également une plus grande rentabilité des investissements et infrastructures réalisés.

4. Conclusion

Cette étude fait ressortir l'opportunité de la mise en place d'une démarche utilisant un SIG et des données de télédétection pour la délimitation des périmètres de protection d'une ressource de surface pour l'alimentation en eau potable. Les données thématiques obtenues à partir du traitement d'image sont mises en relation avec d'autres données multi-sources (cartographiques, météorologiques et hydrologiques) au sein d'une base de données gérée par un SIG. Elle a également défini les différentes étapes nécessaires pour la conception de la méthodologie SIG adaptée aux zones de protection.

Cette étude apparaît donc encourageante quant au développement futur de l'utilisation de la télédétection spatiale et du SIG pour l'étude des ressources en eau. Elle vise l'objectif fondamental d'amélioration des connaissances nationales sur les ressources en eau et de leurs protection, et fournit une base pour toute étude expérimentale ultérieure en matière de protection des ressources en eau de surface.

5. Références

- ANONYME, 1992, Plan Directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins de Bergreg Oum Rbia. Conseil supérieur de l'eau du Maroc, 6^{ème} session, janvier 1992.
- ANONYME, 1995. Loi N° 10-95 sur l'eau au Maroc. Bulletin officiel du Maroc, n° 4325, 20 septembre 1995.
- ANONYME, 1996. Barrage Hachef (9 Avril). Rapport du Ministère des travaux publics du Maroc, Rabat, 16 p.
- BETLAAN, O., WANG, Z.M. et DE SMEDT, F., 1996. An adaptive SIG toolbox for hydrological modelling. In *HydroSIG 96 : Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, Proceedings of the Vienna Conference, April 1996*, LAHS Publication, n° 235, p. 3-9.
- EL GAROUANI, A. 1995. Méthodologie pour l'élaboration du SIG pour la Région Économique du Centre dans le cadre de la monographie de l'environnement. Rapport au Ministère de l'environnement du Maroc, 50 p.
- ESRI, 1994a. Understanding SIG : The ARC/INFO method. Environmental Systems Research Institute, Longman, Redlands, USA, 500 p.
- ESRI, 1994b. PC ARC/INFO User's guide. Environmental Systems Research Institute, Longman, Redlands, USA, 400 p.
- KRAUSE, H. et LAMRHARY, A. 1995. Manuel relatif à la délimitation des zones de protection des captages d'eaux des surface. Rapport, Office national de l'eau potable, Rabat, 40 p.
- ONEP-GTZ, 1995. Étude en vue de la requête pour l'installation des périmètres de protection pour la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur l'oued Bou Regreg. Office national de l'eau potable et Gesellschaft für technische zusammenarbeit, Rapport à l'Office national de l'eau potable du Maroc, 175 p.
- PUECH, C. 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble 1, 234 p.

24

Suivi des anomalies pluviométriques en Afrique équatoriale et tropicale à l'aide d'images VISSR de Météosat : quelques résultats de recherche sur le bassin du fleuve Congo

KAMUTANDA KALOMBO

Collaborateur scientifique, Département de géographie physique, Université de Liège, B. B11, 2, allée du 6 Août, Sart Tilman, 4100 Liège, Belgique; téléphone: + 32.41.3665754; télécopieur: + 32.41.3665720 ; courriel : aozero@ulg.ac.be

Résumé

Les résultats que nous présentons, font suite à une série de recherches sur la relation qui existe entre la pluie mesurée au sol et les indicateurs VISSR de Météosat, notamment les occurrences des nuages à sommet froid (les cumulo-nimbus : « Cub ») en Afrique équatoriale. Ces résultats montrent que les déficits pluviométriques observés au cours de la saison des pluies 1991-1992 sur la majeure partie de l'Afrique Équatoriale et la pluviométrie contrastée observée au cours des mois de mars 1993 et 1994 dans le sud-est du Congo sont confirmés par l'analyse des « Cub ». Cette analyse est faite en référence avec leur évolution moyenne sur la période 1986-1992. En outre, l'étude montre que les relations spatiales et temporelles entre les précipitations et l'indice normalisé de la végétation (NDVI) sont globalement bonnes sur le plan qualitatif. Cependant, des améliorations pourraient être apportées sur le plan quantitatif en prenant en compte plusieurs types de nuages et en étoffant le réseau pluviométrique au sol.

1. Introduction

Le suivi de l'évolution de la pluviométrie en Afrique équatoriale s'impose dans la mesure où les travaux récents concernant cette région (KALOMBO, 1994) font état d'une variabilité pluviométrique de plus en plus importante. Malheureusement, leur analyse et leur suivi ont été jusqu'à présent rendus difficiles suite à l'insuffisance du réseau pluviométrique au sol, à l'étendue du bassin versant du fleuve Congo (3,7 millions de km²) et aux difficultés d'accès. De ce fait, l'intérêt de la méthode de thermographie infrarouge VISSR de Météosat dans le suivi de la pluviométrie de vastes régions comme l'Afrique équatoriale est évident. L'indicateur VISSR retenu « Cub » a déjà été utilisé pour les mêmes objectifs dans plusieurs régions intertropicales, notamment dans les régions sahélo-soudaniennes (CARN *et al.*, 1989). D'autre part, l'analyse combinée des précipitations et de l'indice normalisé de la végétation (NDVI) semble également un bon moyen d'investigation spatio-temporelle.

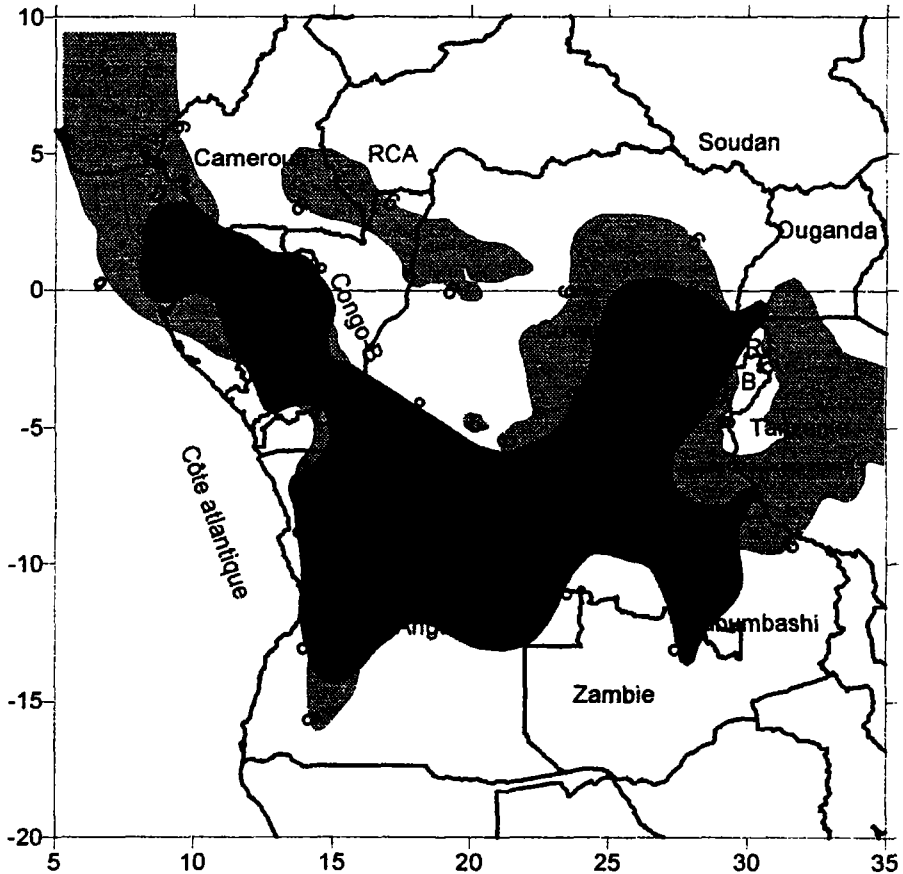
2. Matériel et méthode

Dans le cadre du suivi des pluies au sol à l'aide des « Cub », on compare les occurrences des « Cub » et les précipitations mensuelles de 1991-1992, de mars 1993 (excédentaire) et de mars 1994 (déficitaires) respectivement aux moyennes de la période de 1986-1992. Les « Cub » sont exprimés en pourcentage du nombre d'images infrarouges VISSR traitées et sont comptabilisées en utilisant un seuil discriminatoire de température radiative fixé à -40 °C (DAGORNE, 1988). D'autre part, on compare la répartition spatio-temporelle des pluies à celle du NDVI. Les données de NDVI sont des maxima enregistrés au pas de temps de 10 jours, soit trois valeurs par mois, et donc 360 données décennales pour la période de 1981-1990. Le fait de ne retenir que ces valeurs maximales est une précaution généralement prise afin de minimiser le plus possible l'impact sur le NDVI des nuages, des aérosols et des autres particules atmosphériques très fréquents en régions intertropicales. Pour une formation végétale dense (NDVI > 0,6) l'erreur liée à la présence des nuages varie entre 10 et 30 % (ISLSCP, 1996). En outre, les fenêtres spectrales utilisées pour le calcul de NDVI [$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$] où NIR et VIS sont respectivement des valeurs standardisées de la radiation dans les canaux du proche infrarouge et du visible, sont généralement caractérisées par une bonne transmissivité dans l'atmosphère (KIMES *et al.*, 1984). Ces données, qui proviennent des capteurs AVHRR des satellites NOAA ont été fournies par la F.A.O *et al.*, 1992).

3. Interprétation des résultats

3.1. Situation en mars 1994 dans le sud-est du Congo

Sur la figure 1, on montre que la désintégration de l'Équateur météorologique (matérialisée par la présence des « Cub ») s'accompagne d'un déficit des « Cub » très important sur le sud-est du Congo : -5 % à -11 % d'écart entre les « Cub » en mars 1994 et la moyenne de 1987-1994. Il faut en effet descendre en latitude (figure 1) jusqu'à la périphérie de la cuvette centrale pour retrouver quelques amas nuageux froids témoins d'une remontée



Pourcentage d'occurrences par rapport au nombre d'images (610) traitées

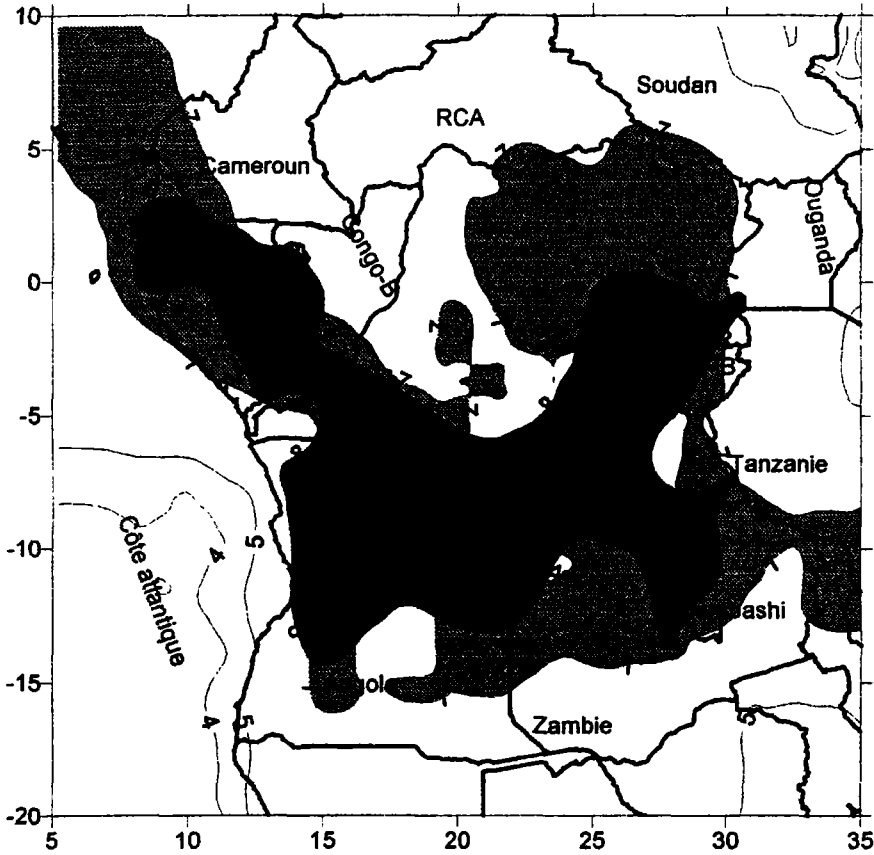
6 : 15 à 19 %

7 : 20 à 24 %

8 : 25 % et +.

Figure 1. Occurrences de nuages à sommet froid ($T < -40^{\circ}\text{C}$) :  : mars 1994 (610 images) déficitaire par rapport à la moyenne de la période 1989-1992 () avec comme conséquence, le déficit pluviométrique sur le sud-est du Congo-Kinshasa (44 mm de pluie à Lubumbashi pour 215 mm de normale) suite à la dislocation et à la remontée précoce de la zone de convergence intertropicale.

précoce de la convergence intertropicale (CIT). Sur la même figure, on montre que le reste de la confluence interocéanique (CIO) est complètement décalé vers l'ouest et se localise le long des côtes angolaises alors que sa position moyenne en cette période la situe au centre de la Zambie. La CIT, est décalée vers l'est (figure 1) et est centrée sur un axe d'orientation méridienne allant du sud de l'Ouganda jusqu'au sud de la Tanzanie.



Pourcentage d'occurrences par rapport au nombre d'images (659) traitées
 6 : 15 à 19 %
 7 : 20 à 24 %
 8 : 25 % et +.

Figure 2. Occurrences de nuages à sommet froid ($T < -40^{\circ}\text{C}$) : ■ : mars 1993 (659 images) plus expansive que la moyenne de la période 1989-1992 (■) avec comme conséquence, des précipitations excédentaires notamment sur le sud-est du Congo-Kinshasa (400 mm de pluie à Lubumbashi pour 215 mm de normale) suite à la stagnation de la zone de convergence intertropicale dans la région.

3.2. Situation en mars 1993 dans le sud-est du Congo

Mars 1993 a été exceptionnellement humide sur le sud-est : 400 mm pour 215 mm de moyenne à Lubumbashi. Grâce aux images VISSR (figure 2), on a constaté une stagnation et un étalement de l'Équateur météorologique dans cette région. On voit en effet la présence d'une large bande nuageuse d'orientation zonale (de 8° à 20° S.) allant du nord-est de l'Angola jusque dans le nord et le centre de la Zambie en passant par le sud-est du Congo. Cette bande est caractérisée par des écarts positifs de « Cub » de mars 1993 par rapport à

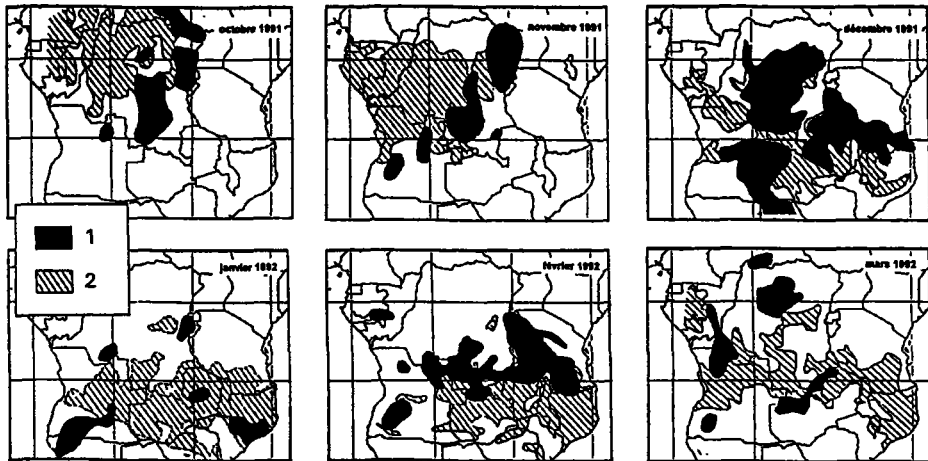


Figure 3. Comparaison pour chaque mois de la saison des pluies 1991-1992, entre la zone d'occurrence des nuages à sommet froid ($T < -40^{\circ}\text{C}$) en noir et la zone de forte pluviosité au sol dans une période largement antérieure (plus de 200 mm/mois), en hachuré (KALOMBO, 1995) montrant la désintégration de la zone de convergence intertropicale responsable du déficit pluviométrique en Afrique équatoriale.

la moyenne de 1987-1994 (de 5 % à plus de 11 %), son étalement en latitude et, par conséquent, sa stagnation sur la région par rapport à sa position moyenne. L'examen des images VISSR de la région révèle en effet que la limite la plus au sud de la CIT a été plus au sud que d'habitude (entre 18 et 19° S). Par contre, la limite sud de la CIT en mars 1994 a dépassé à peine 10° S.

3.3. Suivi de la saison des pluies en 1991-1992 à l'aide des « Cub »

La comparaison entre les taux de convection mensuelle au cours de la saison 1991-1992 et la moyenne de 1986-1992 a permis de se rendre compte de l'état déficitaire de la convection au cours de cette saison sur la majeure partie de l'Afrique équatoriale. On a noté notamment les faibles « Cub » au centre de la cuvette centrale (figure 3) : en octobre 1991 (8 % à 14 % contre une moyenne de 13 % à 17 %); en novembre de la même année (9 % à 13 % contre 11 % à 16 % de moyenne) et en janvier 1992 (7 % à 13 % contre 5 % à 15 % de moyenne). Sur le rebord occidental de la cuvette et le long de la côte atlantique, les déficits les plus élevés en taux de convection ont été observés au début de la saison des pluies (octobre: 0 % à 11 % contre 3 % à 14 % de moyenne; novembre: 2 % à 13 % contre 6 % à 14 % de moyenne) et en janvier (figure 3) (4 % à 11 % contre 7 % à 15 % de moyenne). Sur le rebord oriental de la cuvette (région montagneuse), le taux de convection a été déficitaire en octobre 1991 (14 % contre 19 % à 21 % de moyenne), en mars (1992 : 7 % à 9 % contre 14 % à 16 % de moyenne). Enfin, pour ce qui est de la région du sud-est du Congo, le taux de convection a été déficitaire au cours des mois de pleine saison pluvieuse notamment le mois de janvier (KALOMBO *et al.*, 1995). Ce dernier est parmi les mois de janvier les plus déficitaires en précipitations que le sud-est du Congo ait connu depuis le début des relevés pluviométriques en 1917 à Lubumbashi : 128 mm de pluie seulement pour 280 mm de normale (1951-1980).

Pour ce qui est de la relation entre la pluie et le NDVI, nous avons constaté, qu'au niveau des grands espaces paysagers, il existe globalement des liens entre ces deux paramètres : en janvier, mois de saison des pluies, le NDVI varie entre 0,33 et 0,5 au niveau des forêts et dans la partie sud, et entre 0,17 et 0,33 le long de la côte atlantique, dans des sites sous abri de la région montagneuse ainsi que dans la frange au nord de l'équateur marquée par la présence de la saison sèche en cette période. En juillet (mois de saison sèche), on a constaté une bonne relation spatiale entre la pluie et le NDVI ($R = 0,7$) vraisemblablement due à la prédominance de la saison sèche sur le bassin et à son intensification en direction du sud de l'Équateur.

L'évolution temporelle décadaire est marquée par une forte variabilité des pluies par rapport à NDVI, les corrélations sérielles de NDVI varient entre 0,6 et 0,9; alors qu'elles ne dépassent pas 0,5 pour les précipitations. D'autre part, nous avons noté un décalage de trois à quatre décades entre les occurrences des pluies et NDVI notamment sur les hauts plateaux et à la périphérie de la cuvette. Cependant, cette réponse de la végétation aux précipitations peut varier non seulement d'une région à l'autre, mais aussi dans une même région, en fonction de la durée des saisons et de la répartition des pluies pendant la saison humide.

4. Discussion et conclusion

L'évolution à l'échelle mensuelle des nuages à sommet froid, notamment les cumulonimbus « Cub » constitue un indicateur important dans le suivi de l'évolution de la pluviométrie au sol en Afrique Equatoriale et Tropicale humide. La saison de 1991-1992 a été déficitaire sur une grande partie du bassin du fleuve Congo : la hauteur du fleuve Congo à la plage de Brazzaville avait atteint son niveau le plus bas depuis 1948 en février 1992 (environ 50 cm de moins). Ce résultat est confirmé par l'analyse comparative entre l'indicateur Météosat « Cub » et les moyennes de 1986-1992. De même l'excédent et le déficit pluviométriques records enregistrés respectivement en mars 1993 et e mars 1994 ont été confirmés par l'analyse des occurrences nuageuses. L'exploitation des valeurs de NDVI, à l'échelle certes, d'une cartographie de base ($\pm 1 : 5\,000\,000$) permet malgré tout, de donner des indications précieuses sur l'évolution spatio-temporelle de cet indice en fonction des précipitations. Le recours à l'approche comparative entre la fréquence des nuages à sommet froid et les précipitations au sol constitue un meilleur moyen de suivi des saisons pluvieuses dans une région aussi vaste, difficile d'accès et mal équipée qu'est l'Afrique Équatoriale. L'avènement de la seconde génération de Météosat avec une image toutes les 15 minutes dans 12 canaux spectraux différents (EUMETSAT, 1999), permettrait une nette amélioration de ces résultats, notamment dans le suivi des dépressions mobiles à la base des manifestations orageuses.

5. Remerciements

Nous remercions très sincèrement Messieurs B. GUILLOT et J.P. LAHUEC de nous avoir accueillis à l'Antenne ORSTOM (IRD)/CMS de Lannion dans le cadre de ce travail.

6. Références

- CARN, M., DAGORNE, D., GUILLOT, B. et LAHUEC, J.P. 1989. Estimation des pluies par satellite en temps réel en Afrique Sahélo-soudannienne. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 28, p. 47-57.
- DAGORNE, D. 1988. Traitement des données satellitaires à l'antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel Triskel. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 23, p. 17-22 et n° 24, p. 38-42.
- EUMETSAT. 1999. The Meteosat system. Satellites - Ground segment - Missions - Global coordination. EUM TD 05, Darmstadt, 64 p.
- F.A.O (Food and Agriculture Organisation) and D.S.E.(Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung) 1992. Application of remote sensing and geographic information system in environmental and natural resources management and monitoring. Training course, Allemagne.
- ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) 1996. Dataset documents. FASIR (Fourier-Adjustment, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed) NDVI document. FSR-NDVI.html.
- KALOMBO, K. 1994. Anomalies pluviométriques dans le sud-est du Zaïre au cours de la période de sécheresse australe (1980-1994). Rapport de bourse d'excellence (AUPELF-UREF), Université de Liège.
- KALOMBO, K., LAHUEC, J.P. et ERPICUM, M. 1995. Suivi de la saison des pluies 1991-1992 en Afrique équatoriale à l'aide des indicateurs Météosat : occurrences des nuages à sommet froid et températures de brillance maximum de surface. Publ. de l' A.I.C. (Association Internationale de Climatologie), vol. 8, p. 154-162.
- KALOMBO, K. 1995. La pluviométrie pendant la période de sécheresse récente (depuis 1980) dans le sud-est du Zaïre. *Geo-Eco-Trop*, vol. 19, n° 1-4, p. 17-34.
- KIMES, D.S., HOLBEN, B.N., TUCKER, C.J. and NEWCOMB, W.W. 1984. Optimal directional view angles for remote sensing missions. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, p. 3493-3518.

25

Application de la télédétection et d'un modèle de simulation d'écoulement des fluides pour l'identification de couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines en milieu cristallophyllien dans la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire)

FERNAND KOFFI KOUAMÉ, PIERRE GIOAN, JEAN BIÉMI, KOUADIO AFFIAN et KAPO COULIBALY

Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire; téléphone : (225) 22 44 52 70; télécopie : (225) 22 44 35 00; courriel : kouamef@syfed.ci.refer.org / Kouamef@yahoo.fr

Résumé

L'identification des couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines est indispensable pour mieux appréhender le mode de fonctionnement des systèmes hydrauliques de l'ouest semi-montagneux de la Côte d'Ivoire. Dans cet environnement de roches de nature essentiellement cristallophyllienne, la télédétection permet une bonne approche quantitative des structures cassantes à fonction hydraulique. Les données structurales ont été extraites des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT, puis analysées selon des méthodes statistique et fractale afin de définir les paramètres géométriques quantitatifs. Le modèle de FRANCISS, conçu pour illustrer l'écoulement des fluides en milieu fissuré, est adapté pour le calcul des perméabilités induites par les fractures à partir des paramètres : nombre total de fractures, longueur et orientation de chaque fracture, ouverture, densité et

conductivité hydraulique des fractures. Une analyse multicritère, associant différentes cartes thématiques : cartes de perméabilités induites, des domaines structuraux, des données lithologiques, hydrographiques et structurales permet de dresser une cartographie des différents couloirs souterrains potentiels à partir des seules données de surface. Deux couloirs à forte perméabilité, associés à des axes secondaires et à des bassins souterrains de concentration des eaux, sont mis en évidence. On constate bien l'existence d'une forte corrélation entre le réseau hydrographique et les nappes d'eau souterraine suspectées. Cependant, l'application du modèle de FRANCISS ne peut être étendue à l'ensemble de la zone de montagne. Dans ce cas, l'emploi du modèle numérique d'altitude est recommandé pour vérifier la pertinence de ces couloirs.

1. Introduction

La région semi-montagneuse de Man-Danané, située à l'ouest de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 7° 21' et 8° N et les longitudes 7° et 8° 05' O (figure 1) a fait l'objet de nombreuses études sur le plan hydrogéologique. Depuis 1996, une évaluation du potentiel hydrique a été entreprise par le CURAT (BIÉMI *et al.*, 1998; KOUAMÉ, 1999; KOUAMÉ *et al.*, 1999a) pour répondre à un besoin urgent de très forte demande en eau, engendrée par une pression anthropique (taux de natalité élevé, migration de réfugiés libériens, guinéens et sierra leonnais, exode rural, etc.) toujours croissante dans la région. Divers programmes d'aménagements hydrauliques, conduits par le Gouvernement et la Banque africaine de développement (BAD) sont en cours d'exécution et nécessitent une utilisation rationnelle des réserves d'eau disponibles. Pour cela, une bonne compréhension des modes de fonctionnement des systèmes hydrauliques souterrain et de surface s'impose. L'identification de couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines dans un environnement de socle

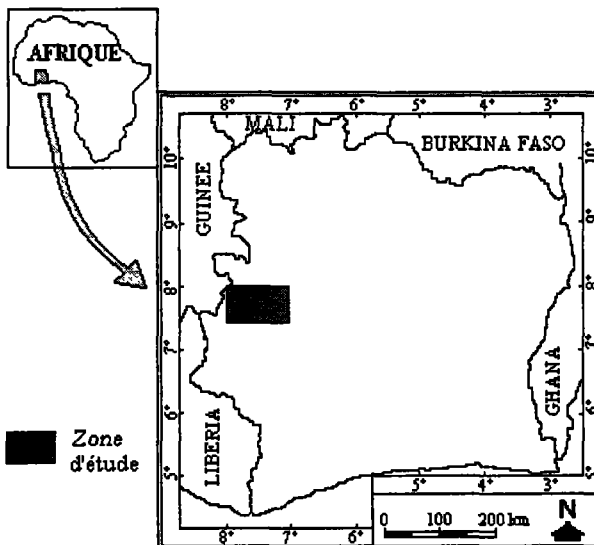


Figure 1. Localisation de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire)

archéen, constitué essentiellement de roches cristallines et cristallophylliennes (charnockites, gneiss migmatitiques, quartzites ferrugineux, etc.), apparaît comme l'une des voies privilégiées de prospection et d'évaluation du potentiel hydrique. Dans un tel contexte géologique, les roches sont imperméables (aquifuges) dans leur état primaire et ne peuvent constituer de réservoir hydrogéologique que lorsqu'elles sont fracturées et/ou altérées. C'est pourquoi, l'évaluation des ressources en eau des aquifères discontinus comporte toujours une première phase de cartographie des systèmes de fractures affectant les roches (CASTAING *et al.*, 1989; RAZACK, 1986). La télédétection peut parfaitement être intégrée aux différentes étapes de l'évaluation du potentiel hydrique de l'ouest ivoirien. Les travaux de KOUAMÉ *et al.* (1999a), basés sur l'interprétation des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT ont permis d'élaborer la carte détaillée des linéaments. La caractérisation des paramètres géométriques quantitatifs à partir des approches statistique et fractale (KOUAMÉ *et al.*, 1999b) permet de mieux cerner la géométrie des réservoirs. Mais comment circule l'eau dans ce réseau de fractures très complexe ? C'est à cette problématique que tente de répondre cet article, dans lequel on propose d'exploiter les paramètres géométriques issus de la carte linéamentaire pour simuler l'écoulement de l'eau à travers les réservoirs souterrains. Les nombreux modèles de simulations développés assimilent les réseaux de fractures soit à des milieux continus (LONG *et al.*, 1982) soit à des milieux discontinus (SNOW, 1969). Dans tous ces modèles, la question de l'échelle de représentativité des données pour laquelle le milieu est considéré comme continu ou non doit être aussi examinée. Dans notre cas, la maille élémentaire représentative (DELAY *et al.*, 1992), définie par une maille carrée de 4 km de côté permet de résoudre ce problème. La forte densité linéamentaire permet d'assimiler les aquifères de cette région à des milieux poreux équivalents (KOUAMÉ, 1999). Le modèle de FRANCISS (1970) est bien adapté à ce type de milieu considéré pseudo continu et permet de calculer les perméabilités induites par les fractures.

La combinaison des données multisources (lithologie, hydrogéologie, structural) et l'analyse multicritère aboutit à la cartographie du réseau souterrain se répartissant entre deux couloirs orientés nord-sud à fort potentiel de circulation d'eau souterraine, séparés par des axes au contraire à faible potentiel et des bassins d'accumulation d'eaux.

2. Matériel et méthode

2.1. Matériel

La carte linéamentaire (figure 2) établie par KOUAMÉ *et al.* (1999a) à partir des images satellitales TM de Landsat (scène 198-55, enregistrée le 04-01-1985) et HRV(P) de SPOT (scène 44-335, enregistrée le 17-03-1988) constitue le document de base sur lequel est appliqué le modèle de calcul des perméabilités induites. Les données auxiliaires comprennent les cartes des densités linéamentaires, définissant les domaines structuraux (KOUAMÉ *et al.*, 1999b), les cartes géologiques de CAMIL (1984) au 1 : 500 000, de KOUAMÉLAN (1996) au 1 : 1 000 000, le chevelu hydrographique, extrait de la carte du bilan forestier du CENTRE DE CARTOGRAPHIE ET DE TÉLÉDÉTECTION (1992) au 1 : 200 000, des données issues des fiches techniques de forages, recueillies auprès des services de l'antenne de l'hydraulique villageoise de Man et enfin de quelques mesures structurales effectuées sur le terrain.

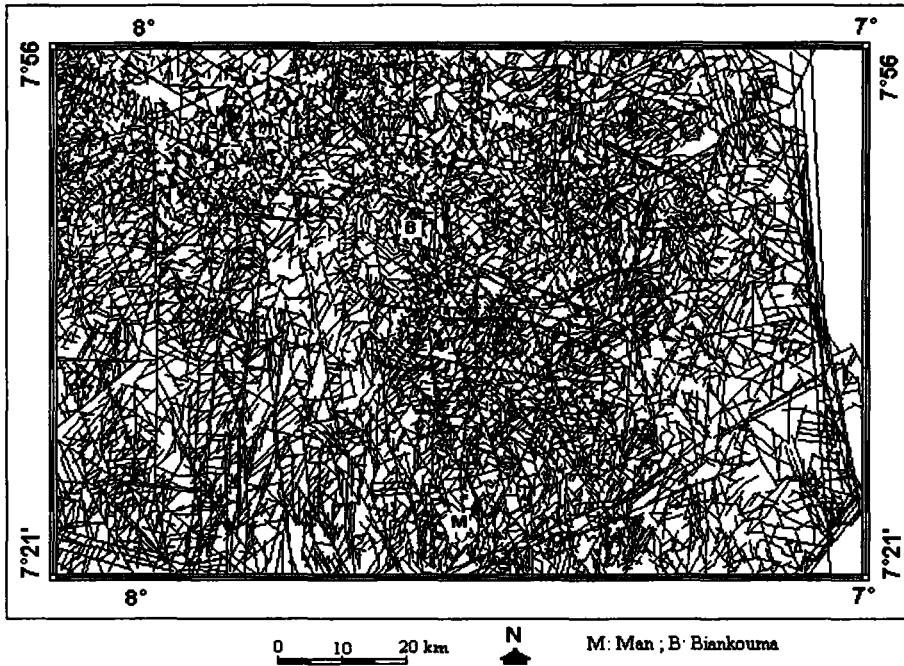


Figure 2. Carte linéamentaire établie à partir des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Tirée de KOUAMÉ *et al.*, 1999a)

2.2. Modèle de simulation des écoulements

2.2.1. Principe du modèle de calcul des perméabilités induites

Pour établir son modèle, en milieu fissuré, FRANCISS (1970) propose d'intégrer des paramètres déterminés à partir des données de terrain, soit la conductivité hydraulique des fractures (K_f) et le coefficient de proportionnalité (C) entre les longueurs et les ouvertures des fractures, d'une part, et des paramètres géométriques extraits de la carte linéamentaire soit le nombre total de fractures, la longueur et l'orientation de chaque fracture, d'autre part.

Certaines hypothèses simplificatrices sont retenues :

- fractures supposées verticales ou sub-verticales;
- fractures supposées continues à l'intérieur du système spatial considéré;
- épaisseur de la zone broyée (e), considérée comme une fonction linéaire empirique de la longueur (L) de la fracture ($e = C \times L$).

En milieu fissuré, la conductivité hydraulique (K_f) d'une fracture est assimilable à la perméabilité moyenne apparente caractérisant cette fracture, et peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$K_f = \frac{T_i}{e_i}$$

où K_f représente la conductivité hydraulique en mètres par seconde;

T_i la transmissivité du secteur en mètres carrés par seconde;

e, l'épaisseur de la zone broyée en mètres, estimée à partir de la différence entre les côtes des premières et dernières arrivées d'eau dans les forages.

Selon FRANCISS (1970), le coefficient de perméabilité K_i d'une fracture plane s'exprime par un tenseur de deuxième ordre et le tenseur K qui exprime l'effet cumulé de plusieurs fractures est obtenu par la somme des tenseurs de chaque fracture contenu dans le système spatial considéré.

Les vecteurs et les valeurs propres de K donnent les valeurs des perméabilités maximale ($K_{\max}$) et minimale ($K_{\min}$) et indiquent les directions de perméabilités maximale ($\lambda_{\max}$) et minimale ($\lambda_{\min}$) par les formules ci-dessous :

$$K_{\min}^{(\max)} = \frac{1}{2}(K_{NN} + K_{OO}) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(K_{NN} - K_{OO})^2 + 4K_{NO}^2}$$

$$\text{et } \lambda_{(\max)} = \frac{1}{2}tg^{-1} \frac{2K_{NO}}{K_{NO} - K_{OO}} \quad \text{et } \lambda_{(\min)} = \frac{1}{2}tg^{-1} \frac{K_{NO} - K_{OO}}{2K_{NO}}$$

K_{NN} et K_{OO} sont les perméabilités par rapport à un système d'axes nord-sud et est ouest. $K_{\max}$ et $K_{\min}$ correspondent respectivement aux modules des vecteurs de K suivant le grand axe et le petit axe de l'ellipse des K et forment entre eux un angle de 90° .

La perméabilité moyenne (K_{moy}) est déterminée par la relation suivante :

$$K_{\text{moy}} = 1/2 (K_{\max} + K_{\min})$$

2.2.2. Application du modèle

À partir des données recueillies sur le terrain, les paramètres K_i et C sont déterminés. Les données d'essai de pompage issues des fiches techniques de 54 forages permettent de calculer les transmissivités moyennes des roches grâce aux méthodes d'approximation de GRINGARTEN et BERTRAND (1978) et de THIÉRY (1981). Avec l'épaisseur de la zone broyée au niveau de chaque forage, K_i (rapport entre transmissivité et épaisseur de la zone broyée au niveau de chaque forage) est estimée à $3,51 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. À partir des mesures des longueurs et des ouvertures effectuées sur 1 500 fractures observées sur le terrain, la constante C est déterminée en faisant le rapport de ces deux variables. C est sans dimension et est égal à $2,8 \times 10^{-3}$.

Concernant les paramètres géométriques, un maillage de la région d'étude en cercles de 4 km de diamètre est effectué. Chaque cercle est inscrit à l'intérieur d'un carré dont le côté est égal au diamètre du cercle correspondant. À l'intérieur de chaque cercle, on détermine le nombre total de fractures, la longueur et l'orientation cas par cas des fractures.

L'application du modèle de FRANCISS permet d'intégrer K_i , C et les paramètres géométriques pour déterminer les valeurs de perméabilités induites par les fractures. Celles-ci sont utilisées pour dresser des cartes d'iso-valeurs de perméabilité, simulant l'écoulement des eaux dans les nappes du socle cristallophyllien fissuré de l'ouest ivoirien.

Différentes cartes thématiques obtenues lors des diverses étapes d'exploitation des données linéamentaires, combinées aux données auxiliaires existantes (lithologie, hydrogéologie, structurale) permettent de constituer une base de données hydrostructurales. Pour définir les différents couloirs, on associe les niveaux d'informations suivants : lithologie, domaines structuraux, perméabilités induites et réseau hydrographique. Une analyse multicritère est effectuée en fixant les contraintes, et les conditions spatiales à partir des tables attributaires associées aux différentes couches thématiques et aboutit à la cartographie des zones de circulation potentielle des eaux souterraines.

3. Résultats

3.1. Cartes de perméabilités induites

Les cartes de perméabilités induites sont formées de courbes d'iso-valeurs de perméabilité. On y distingue des axes à perméabilité relativement élevée, associés à des axes secondaires et des nodules à perméabilités forte et très forte. Sur la carte de la perméabilité induite moyenne (figure 25-3) (voir cahier couleur), s'observe une aire à perméabilité élevée, de forme polygonale et située dans la partie centrale du secteur d'étude. La forte densité de fracturation et les différentes structures particulières (structures circulaires, en sabliers, en étoiles et en damiers) détectées en imagerie satellitale par KOUAMÉ (1999) induisent de fortes variabilités des perméabilités induites par les fractures. Deux axes à forte perméabilité jouxtent cette aire : l'un à l'ouest de direction nord-sud reliant les nodules de Yorodougou et de Dropleu, l'autre à l'est de même direction, débutant dans les environs de Kamahi pour se prolonger jusqu'à Taobli au sud. L'axe occidental est connecté à la zone centrale par le biais d'un axe secondaire de direction est-ouest. La répartition irrégulière des perméabilités le long des principaux axes est, selon SAVADOGO (1984), due à la structure planaire des fractures, mais aussi à l'anisotropie des aquifères discontinus. Une bonne circulation des eaux souterraines sera donc fonction du degré d'interconnexion des accidents.

3.2. Cartes des couloirs de circulation potentielle des eaux souterraines

Le croisement des cartes thématiques (lithologie, perméabilités induites, domaines structuraux et hydrographie) permet de mieux appréhender le fonctionnement des systèmes hydrauliques. Les axes préférentiels et les principales zones d'alimentation des aquifères se présentent avec des morphologies variées. Dans la partie occidentale de la région étudiée, un premier axe nord-sud relie les bassins de Yorodougou, Bountra et Dropleu. La liaison entre les trois nappes d'eau de fissure est assurée par les accidents majeurs affectant le socle. Le bassin de Yorodougou est vraisemblablement alimenté par le fleuve Bafing, alors que les nodules de Bountra et de Dropleu le sont respectivement par les fleuves N'zo et Gbé (figure 25-4) (voir cahier couleur). À l'extrême est, un second axe nord-sud se superpose parfaitement à l'accident du Sassandra dans lequel coule le fleuve du même nom. Cette zone de broyage intense induit de fortes valeurs de perméabilité et met ainsi en place un important réseau souterrain, confirmant ainsi, le rôle joué par les fractures dans la constitution des nappes souterraines et dans le guidage des cours d'eau de l'ouest ivoirien.

La zone centrale se caractérise par trois bassins de concentration des eaux de forme polygonale. Le premier bassin est celui de Biankouma-Sandougou Soba, qui comporte trois branches et qui mobilise les eaux de surface dont le Koué, des environs de Biankouma, Mangouin et Sandougou Soba. Le deuxième bassin, en forme de fourche, allongé selon la direction N 170°, se développe à proximité de Zérolé. Quant au troisième, celui de Zagoué-Gbonné-Zouandié, il relie les deux précédents. Les diverses zones d'accumulation recensées se superposent à la fois aux accidents majeurs et au réseau de drainage. Il existe donc une relation incontestable de type alimentation-drainage entre réseaux souterrain et de surface, facilitant ainsi la recharge des réservoirs souterrains. Toutefois, l'aspect montagneux du secteur étudié tend à réduire sensiblement les zones à potentiel en eau exploitable. Il convient donc d'utiliser le modèle numérique d'altitude pour vérifier la pertinence ou non des couloirs définis.

4. Discussion

Les valeurs moyennes de perméabilité induite calculées varient de $5,2 \cdot 10^{-8}$ à $2,06 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. Ces valeurs sont inférieures à celles de BIÉMI (1992) qui varient entre 10^{-6} et 10^{-4} m.s^{-1} , mais sont très supérieures à celles de SAVADOGO (1984) et SAVANÉ et BIÉMI (1999), respectivement de l'ordre de 10^{-8} et $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ obtenues en contexte géologique identique. La densité de fracturation est un paramètre majeur qui influe sur le tenseur de perméabilité, preuve que la région semi montagneuse de Man-Danané est plus fracturée que le nord-ouest ivoirien étudié par SAVANÉ et BIÉMI (1999). En procédant à des tests de sensibilité, on constate que la densité en longueur cumulée des linéaments est le principal facteur qui joue sur les résultats. La corrélation existant entre la densité et les directions des linéaments, d'une part, et les perméabilités calculées, d'autre part, confirme l'usage approprié de la méthode de FRANCISS dans ce type d'environnement géologique. En effet, l'anisotropie directionnelle qui règne dans un tel milieu, est prise en compte dans cette méthode de calcul. Les limites de cette méthode sont soulignées par l'ignorance du rôle des joints horizontaux dans la fonction drainante et par les paramètres K_f et C qui demeurent très variables dans l'espace. L'emploi de valeurs moyennes introduit une erreur d'estimation. Enfin, l'obtention de résultats fiables reste conditionnée par la densité de fracturation élevée, qui nécessite un travail de cartographie précis et très détaillé, pas toujours possible sous nos latitudes et soumis également à la subjectivité et à l'expérience de l'opérateur.

5. Conclusion

L'emploi de la télédétection et d'un modèle de simulation des écoulements permet d'établir une cartographie des couloirs et des principales zones d'accumulation d'eau souterraine de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Les différents couloirs souterrains suspectés sont alimentés par les principaux cours d'eau du secteur étudié. La géométrie des réseaux de fractures joue un rôle très important dans la mise en place des réservoirs et dans le guidage structural des cours d'eau. Ces résultats déduits des données linéamentaires extraites de l'imagerie satellitale sont déjà très satisfaisants, mais restent encore partiels pour pouvoir décrire la complexité des aquifères, développés dans un contexte cristallophyllien et en région semi-montagneuse. Il est donc vivement recommandé d'associer aux données auxiliaires existantes (lithologie, hydrogéologie et structurale), celles d'un modèle numérique d'altitude (pente, concavité, convexité, etc.) pour rendre le modèle esquissé, plus représentatif de la zone étudiée en prenant en compte le maximum de contraintes et de spécificités morphologiques. Ce travail doit se poursuivre par l'établissement de cartes d'accessibilité, d'exploitabilité et de disponibilité en eau permettant une gestion et une planification efficaces de la répartition des ressources hydriques entre les différents secteurs d'activités.

6. Remerciements

Les auteurs remercient l'AUF-UREF d'avoir pu bénéficier du soutien de l'allocation du Fonds francophone de la recherche.

7. Références

- BIÉMI, J. 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'État, Université d'Abidjan, 480 p.
- BIÉMI, J., GIOAN, P., AFFIAN, K., JOURDA, J. P. et KOUAMÉ, F. 1998. Système d'informations hydrogéologiques pour une évaluation des potentialités hydriques en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (ouest de la Côte d'Ivoire). in J.-M. Dubois, M. Bernier, J. P. Fortin et F. Boivin (dir). La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes, Édition Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, p. 261-270.
- CAMIL, J. 1984. Pétrographie, chronologique des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'État, Université de Côte d'Ivoire, 306 p.
- CASTAING, C., DUTARTRE, Ph., GOUYET, J.-F., LOISEAU, P., MARTIN, P. et POINTET, T. 1989. Étude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuités images en milieu granitique couvert. Implications en hydrologie des milieux fissurés. Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection, vol. 113, n° 1, p. 13-23.
- CENTRE DE CARTOGRAPHIE ET DE TÉLÉDÉTECTION, 1992. Carte du bilan forestier du degré carré de Man, Côte d'Ivoire. Abidjan, 1 : 200 000.
- DELAY, F., BRACQ, P. et COLBEAUX, J. P. 1992. Cartographie numérique de linéaments morphostructuraux : exemple d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. Bulletin de la Société géologique de France, t. 163, n° 3, p. 345-352.
- FRANCISS, F. O. 1970. Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1, 108 p.
- GRINGARTEN, A. C. et BERTRAND, L. 1978. Détermination des caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés par pompage d'essai en régime transitoire. Application aux nappes de la craie. Rapport du Bureau de recherches géologiques et minières, n° 78, service géologique national, 669, département aménagement hydrogéologique, 34 p.
- KOUAMÉ, K. F. 1999. Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitaires, des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de doctorat, Université de Cocody, 200 p.
- KOUAMÉ, K. F., GIOAN, P., BIÉMI, J. et AFFIAN, K. 1999a. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires : exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, vol. 1, n° 2, p. 1-18.
- KOUAMÉ, K. F., GIOAN, P., BIÉMI, J. et LASM, T. 1999b. Approche de la géométrie des aquifères en milieu cristallophyllien fissuré par les analyses statistique et fractale des données linéamentaires extraites des images satellitaires : cas de la région semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. VIII^e Journées du réseau Télédétection de l'AUF. Lausanne, 21 au 25 novembre 1999.
- KOUAMÉLAN, A. N. 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 277 p.
- LONG, J. C. S., REMER, J. S., WILSON, C. R. et WITHERSPOON, P. A. 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. Water Resources Research, vol. 18, n°3, p. 645-658.

- RAZACK, M. 1986. Approche probabiliste de l'étude en subsurface de la géométrie des réservoirs fissurés. Effet de l'échelle d'investigation. Hydrogéologie, n° 2, p. 215-230.
- SAVADOGO, A. N. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat d'État, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350 p.
- SAVANÉ, I. et BIÉMI, J. 1999. Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, n° 1, p. 47-64.
- SNOW, D. T. 1969. Anisotropic permeability of fractured media. Water Resources Research, vol. 5, n° 6, p. 1273-1289.
- THIÉRY, D. 1981. Analyse statistique des conditions de succès des forages réalisés en région de socle fissuré : application au Togo. Rapport Bureau de recherches géologiques et minières, n° 81, Service géologique national, 674, Département Eau, 67 p.

26

Approche de la géométrie des aquifères en milieu cristallophyllien fissuré par les analyses statistique et fractale des données linéamentaires extraites des images satellitales : cas de la région semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire

FERNAND KOFFI KOUAMÉ ¹, PIERRE GIOAN ¹, JEAN BIÉMI ¹ et THÉOPHILE LASM ²

¹ *Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire; téléphone : (225) 22 44 52 70; télécopie : (225) 22 44 35 00; courriel : kouamef@syfed.ci.refer.org / Kouame.fernand@yahoo.fr*

² *Laboratoire d'hydrogéologie, Université de Poitiers, UMR 6532-HydrASA-CNRS, 40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France; téléphone : (33) 05 49 45 40 79; télécopie : (33) 05 49 45 42 41; courriel : Theophile.lasm@hydrasa.univ-poitiers.fr*

Résumé

L'évaluation du potentiel hydrique de la région semi-montagneuse de l'ouest de la Côte d'Ivoire passe par une meilleure compréhension de la géométrie des aquifères de socle fissuré. Une approche originale est proposée en combinant méthodes statistiques d'une part (distribution des orientations, des longueurs, des densités et lois statistiques les régissant) et géométrie fractale d'autre part (méthodes de comptage de boîtes et de répartition spatiale de masse), pour caractériser le champ linéamentaire (témoin de la fracturation). La maille de représentativité des données est de 4 km et les paramètres de

taille (longueurs et ouvertures) des fractures sont distribués log-normalement. Les linéaments présentent une quasi-invariance de forme à diverses échelles et correspondent donc à des objets fractals dont les dimensions fractales varient entre 1,6 et 1,8. On constate une anisotropie directionnelle des dimensions fractales, corroborant les pics directionnels relevés sur les rosaces d'orientation. À l'aide des paramètres géométriques obtenus, une carte des domaines structuraux, définissant les secteurs à degré de fracturation identique et constituant un outil indispensable pour l'évaluation du potentiel hydrique est dressée. Les deux méthodes (statistique et fractale) concordent bien et s'avèrent complémentaires pour définir les propriétés géométriques et les lois d'échelles des réservoirs de fissures de l'ouest ivoirien. Cependant, ces résultats restent encore partiels pour décrire toute la complexité de la fracturation du socle et un contrôle sur le terrain de la chronologie linéamentaire, associé à l'analyse de leur comportement hydraulique pourraient faciliter la conception de modèles géométriques mieux ajustés.

1. Introduction

La région d'étude est semi-montagneuse et se situe à l'ouest de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), entre les latitudes $7^{\circ} 21'$ et 8° N et les longitudes 7° et $8^{\circ} 05'$ O (figure 1). Le relief se répartit entre une chaîne de montagne de direction NE-SO, encadrée par une zone de plateau. Le secteur montagneux présente des sommets avec des altitudes dépassant généralement les 1 000 m et correspondant au prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djallon dont la plus grande partie se trouve en Guinée.

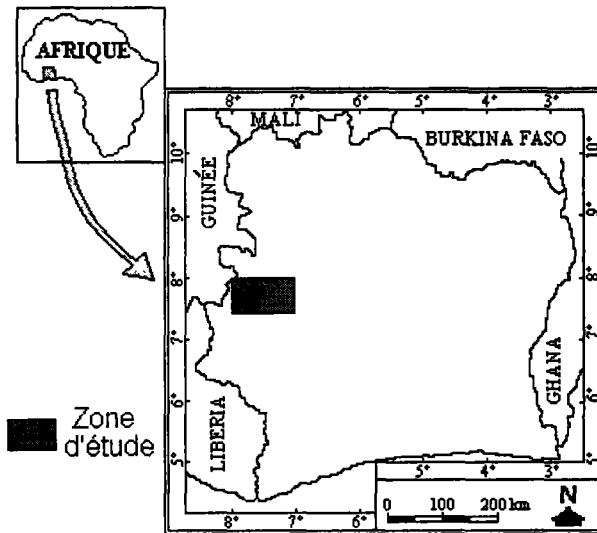


Figure 1. Localisation de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire)

Depuis 1989, cette région est soumise à une forte pression anthropique liée à un fort taux de natalité associé à un flux migratoire brutal de réfugiés (Libériens, Guinéens et Sierra léonais) et à un exode des jeunes en quête d'emploi vers les centres urbains et de développement minier. Cette situation entraîne une consommation excessive des réserves d'eau qui, sont de plus en plus affectées par une diminution quantitative des précipitations enregistrées depuis trois décennies (PATUREL *et al.*, 1995). Pour faire face à ce surcroît de demande en une période à dominante sèche, une évaluation du potentiel hydrogéologique s'avère indispensable (BIÉMI *et al.*, 1998; KOUAMÉ, 1999). De plus, les programmes d'aménagements hydrauliques (irrigation, pisciculture, approvisionnements urbain, rural et industriel en eau) initiés par le Gouvernement et la Banque africaine de développement (BAD) posent avec acuité le problème de la gestion durable des ressources en eau. Pour ces raisons, une meilleure connaissance de la géométrie des aquifères complexes en contexte cristallin et cristallophyllien s'impose. Dans un tel environnement géologique, les possibilités de formation des réservoirs souterrains sont liées à la nature lithologique et surtout au degré de fracturation et/ou d'altération des roches. Du point de vue lithologique, les travaux de CAMIL (1984) et de KOUAMÉLAN (1996) distinguent deux compartiments séparés par la faille de Man-Danané (figure 2). Le compartiment nord, de nature granulitique,

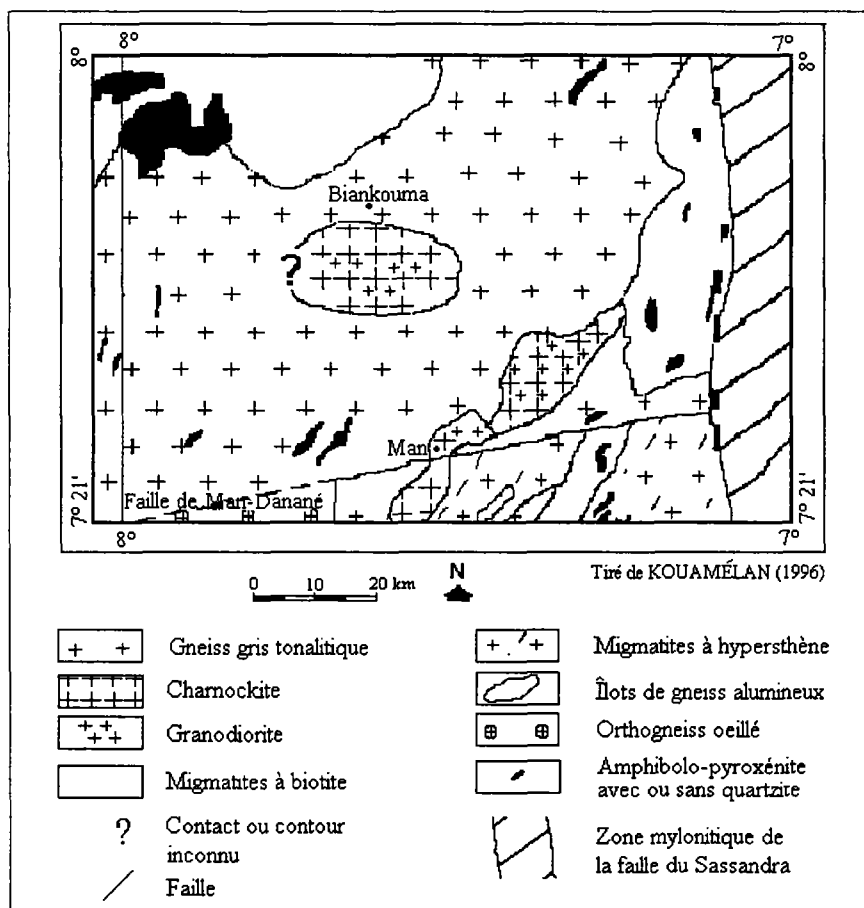


Figure 2. Aperçu géologique de la région d'étude

comporte des gneiss gris tonalitiques, des charnockites, des granodiorites, des migmatites à biotite et des amphibolo-pyroxénites. Le compartiment sud comprend des migmatites, des gneiss alumineux, des orthogneiss ceillés et des quartzites à magnétite. L'analyse de la fracturation est opérée sous un double aspect : l'analyse quantitative des grandeurs géométriques et la compréhension des lois d'échelles du réseau linéamentaire 2 D (assimilable au réseau de fracture) extrait d'images satellitales par KOUAMÉ *et al.* (1999). Le traitement des données linéamentaires est proche de celui adopté par BODIN et RAZACK (1999).

2. Méthodologie

2.1. Données utilisées

La carte linéamentaire de KOUAMÉ *et al.* (1999) au 1 : 200 000 (figure 3), élaborée à partir des images satellitales TM de Landsat (scène 198-55, enregistrée le 04-01-1985, en saison sèche) et HRV(P) de SPOT (scène 44-335, enregistrée le 17-03-1988, en saison sèche également) constitue le support de base. Les données auxiliaires proviennent des cartes géologiques de CAMIL (1984) au 1 : 500 000, de KOUAMÉLAN (1996) au 1 : 1 000 000 et, enfin, de quelques mesures structurales effectuées à l'affleurement.

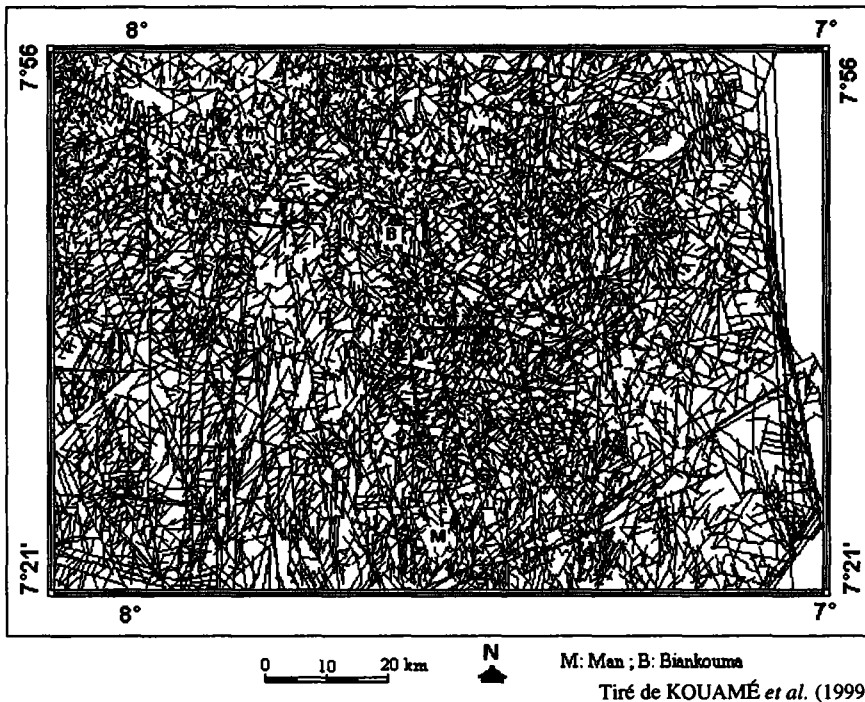


Figure 3. Carte linéamentaire extraite des images satellitales TM de Landsat et HRV (P) de SPOT de l'ouest semi-montagneux ivoirien

2.2. Analyses statistique et fractale

Le traitement statistique des données relatives à la fracturation permet de définir divers paramètres géométriques : orientation, longueurs, ouvertures des fractures, ainsi que leurs lois de distribution. Les discussions sur les modèles d'ajustement de ces paramètres sont encore très controversées (lois log-normale, exponentielle négative pour certains (RAZACK, 1982; ROULEAU and GALE, 1985) ou puissance pour d'autres (BOUR and DAVY, 1997; BODIN et RAZACK, 1999). Les avis sont divergents quant à la signification physique de ces lois et l'on pense que la nature de la loi de distribution est liée aux mécanismes génétiques de la fracturation (SORNETTE *et al.*, 1993).

Par ailleurs, l'échelle de représentativité des données est déterminée par le calcul des surfaces élémentaires représentatives (SER). Cette notion dérivant de celle du volume élémentaire représentatif (VER) est définie par BRACQ (1994) comme étant une surface à deux limites. La limite inférieure correspond à la surface minimale susceptible de contenir le minimum d'informations permettant l'établissement d'une rosace de directions représentatives et la limite supérieure représente la surface pour laquelle la rosace ne donne plus de directions représentatives. L'analyse des SER permet de définir la maille élémentaire représentative dont l'importance a été soulignée dans les travaux de DELAY *et al.* (1992), portant sur la détermination des relations directionnelles entre les linéaments morphostructuraux et les écoulements souterrains de la nappe du Cran d'Escalles. Cette maille de représentativité permet de calculer les densités linéamentaires et de dresser la carte des domaines structuraux.

L'approche fractale (MANDELBROT, 1975) permet d'analyser la répartition des linéaments à diverses échelles. L'intérêt du modèle fractal est de donner la possibilité d'extrapoler à des échelles supérieures, les caractéristiques géométriques des linéaments, mesurées sur des surfaces réduites. Les méthodes utilisées sont celles de comptage de boîtes et de répartition spatiale de masse appliquées par BODIN et RAZACK (1999).

3. Résultats et interprétations

3.1. Distribution des orientations, des longueurs et des ouvertures

Les rosaces directionnelles des linéaments de la région étudiée (figure 4a) présentent une répartition relativement homogène des directions avec certains pics dans les directions N170-180, N40-60 et N20-30. Dans la portion gauche (figure 4b) du territoire étudié, un léger pic dans la direction N80-90 s'ajoute aux directions précédentes. Quant à la portion droite (figure 4c), la même homogénéité, observée sur le secteur entier apparaît. À l'échelle régionale, les accidents de direction est-ouest sont à faible taux fréquentiel et disparaissent même des rosaces alors qu'au niveau de certains secteurs, ces pics directionnels ressortent. Sur les affleurements, les directions mesurées s'accordent aux résultats extraits des données satellitales.

La répartition des longueurs des linéaments dont les dimensions varient entre 91 m et 21 154 m, n'est pas uniforme. Les ajustements aux lois exponentielle négative et log-normale (figure 5a) n'expliquent pas de façon significative cette distribution (khi-2 négatif, au seuil de 10 %). Cependant, au niveau des mailles de 4 km, on observe une dissymétrie positive et un ajustement satisfaisant du modèle log-normale. Les mesures structurales effectuées à l'affleurement (longueurs et ouvertures) montrent aussi une distribution log-

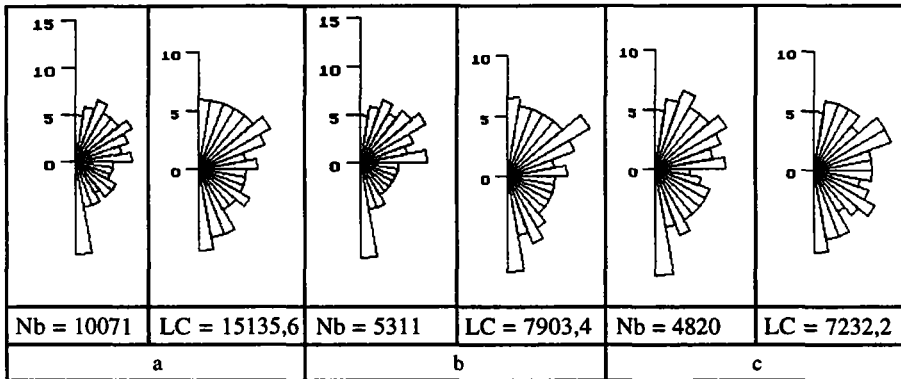


Figure 4. Distribution des orientations des linéaments : a) secteur entier, b) secteur gauche, c) secteur droit (Nb : nombre ; LC : Longueur cumulée)

normale (figures 5b et 5c). Cette loi statistique, vérifiée par le test du Khi-2 traduit la nature très complexe du champ fissuré.

3.2. Maille élémentaire représentative

En se basant sur les critères de représentativité portant sur le nombre critique de linéaments et le poids relatif des classes directionnelles, 200 SER ont pu être définies dans notre région d'étude. Les surfaces inférieures des SER varient entre 4,84 km² (2,2 x 2,2) et 19,36 km² (4,4 x 4,4), alors que les surfaces supérieures varient entre 7,29 km² (2,7 x 2,7) et 228,01 km² (15,1 x 15,1). À l'échelle des SER, 2 à 5 directions préférentielles s'individualisent et varient d'une SER à l'autre. La répartition des directions est cohérente pour la maille de

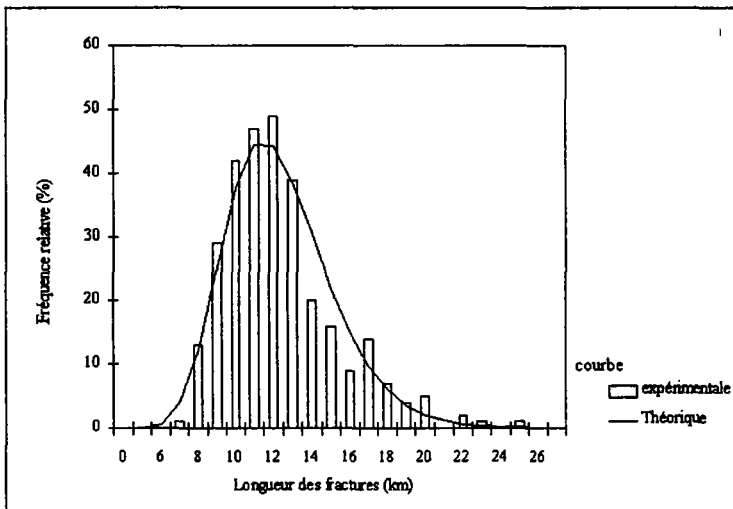


Figure 5a. Ajustement à la loi log-normale : longueurs des linéaments extraits des images satellitales.

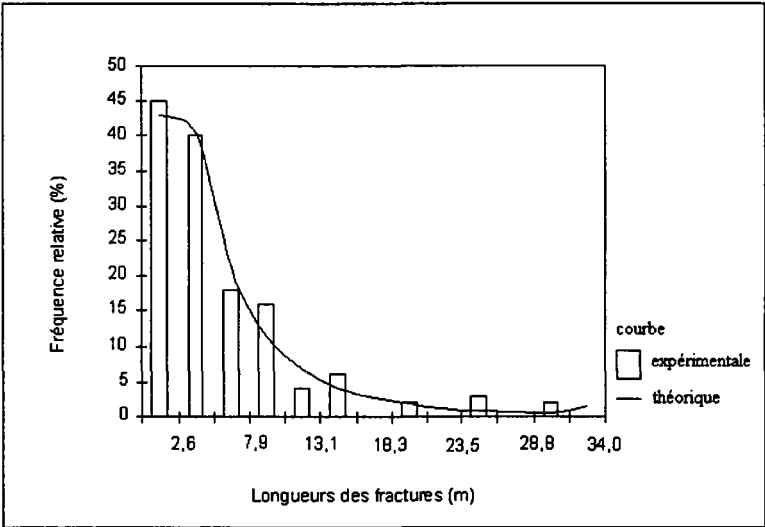


Figure 5b. Ajustement à la loi log-normale : longueurs des fractures relevées à l’affleurement.

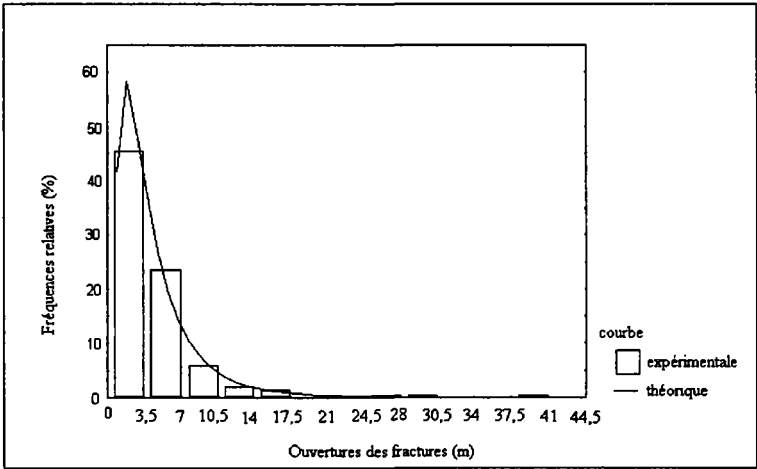


Figure 5c. Ajustement à la loi log-normale : ouvertures des fractures relevées à l’affleurement.

4 km de côté, correspondant à la maille élémentaire représentative, qui est utilisée pour la détermination des densités linéamentaires servant à la cartographie des domaines structuraux. Lorsque la taille de cette maille augmente significativement, de nombreuses données sont intégrées et les pics directionnels s'estompent progressivement, preuve que l'échelle d'investigation joue un rôle primordial dans la définition des paramètres géométriques quantitatifs des réseaux fissurés.

3.3. Répartition spatiale de la densité de fracturation

Deux cartes de densité de fracturation sont établies : l'une est basée sur le nombre de linéaments par maille, l'autre sur la longueur cumulée de linéaments par maille. Quatre classes (faible, moyenne, forte et très forte densités) sont déterminées en fonction du degré d'occurrence des linéaments (tableau 1). La combinaison des ces cartes a l'avantage d'associer les deux paramètres pour définir la carte des principaux domaines structuraux (figure 26-6) (voir cahier couleur). D'un point de vue général, la région semi-montagneuse est très fracturée et les ensembles à forte et très forte densités linéamentaires représentent environ 60 % du secteur étudié. Ils se localisent dans la zone centrale (Biankouma, Gbatodié, Zagoué, Gbonné et Zouandié). Deux axes de direction nord-sud s'ajoutent à cet ensemble. L'un, situé à l'est, est en rapport avec le couloir mylonitique du Sassandra, matérialisé sur la figure 1 et l'autre, à l'ouest, dans les environs de Yorodougou. Deux autres couloirs sub-orthogonaux se recoupant dans les environs de Zagoué sont matérialisés : l'un débutant à Fougouéssou (extrême Nord de la carte) et se prolongeant jusqu'à Zagoué selon une direction NO-SE et l'autre commençant à Zouandié et se terminant à Zagoué.

3.4. Analyse fractale

Le caractère fractal du réseau linéamentaire est mis en évidence sur la figure 7a, sur une gamme d'échelle s'étendant sur à peu près 2 ordres de grandeurs (0,2 – 10 km). La dimension fractale est égale à 1,8. Les semis des centres de linéaments (figure 7b) présentent également un caractère fractal (dimension fractale estimée à 1,6) sur plusieurs ordres de grandeurs (0,2 – 50 km). Les linéaments présentent une quasi-invariance de forme à diverses échelles et correspondent à des objets pseudo auto-similaires. La limite inférieure estimée à 0,2 km, est liée à l'effet de troncature des linéaments de petite taille, que l'on attribue à la fois au type de support cartographique utilisé (images satellitaires TM de Landsat et HRV (P) de SPOT) et à la technique d'extraction linéamentaire. L'analyse fractale par classe directionnelle donnent des dimensions fractales variant entre 1,6 et 1,8

Tableau 1. Classification des densités linéamentaires en nombre et en longueur cumulée.

Critères	Nombre de linéaments par maille	Longueur cumulée de linéament par maille (km)
Classes de densité		
Très forte	> 40	> 30
Forte	26-40	25-30
Moyenne	19-26	20-25
Faible	< 19	< 20

et qui sont du même ordre que celles définies par HIRATA (1989) au Japon. On constate une anisotropie directionnelle et la dimension fractale est la plus élevée dans les directions N170-180 (1,7) et N120-130 (1,6). Par ailleurs, VELDE *et al.* (1991) soutiennent que l'anisotropie directionnelle peut aussi être utilisée pour définir la chronologie des accidents.

L'intérêt des paramètres de géométrie fractale réside dans leur utilisation pour la modélisation des réseaux linéamentaires. Dans la simulation des écoulements au niveau des chenaux du réseau hydrographique, DEPRAETERE (1996) utilise la dimension fractale de l'arbre hydrographique comme un facteur de modulation des longueurs et des pentes en fonction de la résolution spatiale. Quant aux écoulements souterrains, les modèles déterministe de TAKAYUSU (1985) et stochastique de WATANABE (1986) intègrent également la dimension fractale des fractures pour simuler le transit de l'eau. La dimension fractale apparaît comme un paramètre morphologique indispensable à la connaissance des réseaux de fissure. En effet, sur la gamme d'échelle où le réseau est fractal, on peut extrapoler aisément les paramètres géométriques et générer des réseaux synthétiques, plus proches des réseaux naturels afin de modéliser les processus d'écoulement.

4. Conclusion

L'analyse des données linéamentaires 2D, orientée sur la définition des lois d'échelles caractérisant les longueurs et les ouvertures ainsi que la distribution spatiale des réseaux et centres de fractures constitue un moyen d'investigation adapté pour quantifier les

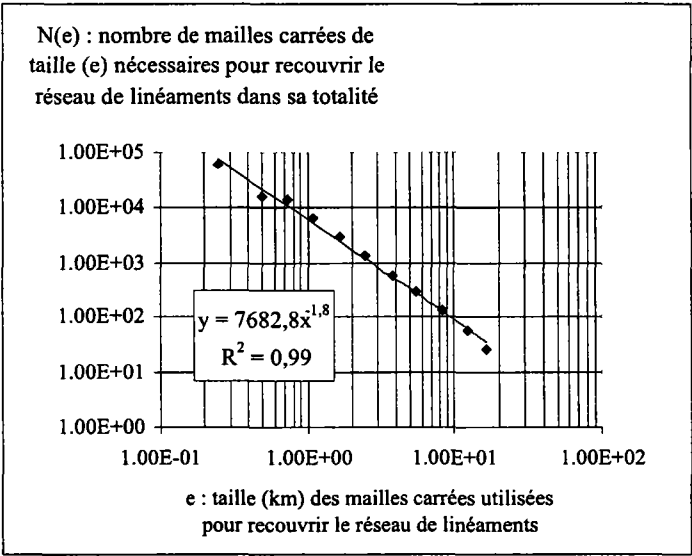


Figure 7a. Résultat de l'analyse fractale : réseau de linéaments par la méthode du « comptage de boîtes ». La régression entre les couples de valeurs [N(e), e] peut être ajustée par une loi de puissance mettant en évidence le caractère fractal du réseau linéamentaire.

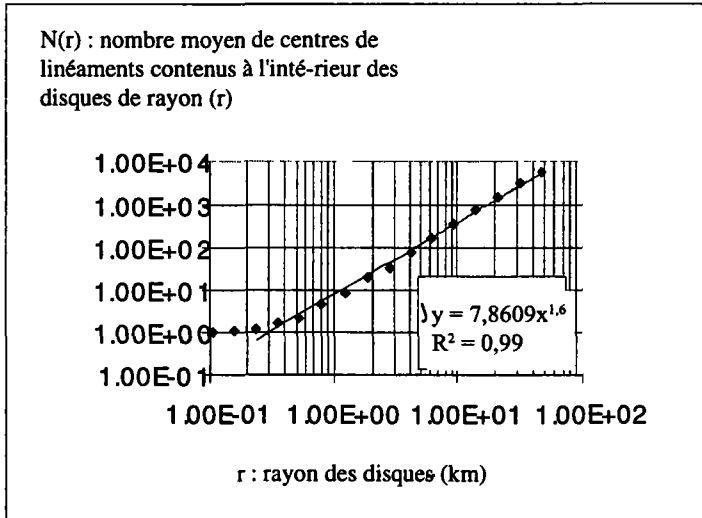


Figure 7b. Résultat de l'analyse fractale : centres de linéaments par la méthode de « répartition des masses ». La régression entre les couples de valeurs $[N(r), r]$ peut être ajustée par une loi de puissance mettant en évidence le caractère fractal des centres de linéaments.

paramètres géométriques des réseaux de fractures. Les longueurs et les ouvertures des fractures sont distribuées log-normalement. Les linéaments présentent une quasi invariance de forme sur plusieurs ordres de grandeurs et correspondent à des objets fractals. La distribution spatiale des linéaments reste donc la même à diverses échelles. En combinant ces deux approches, statistique et fractale, les paramètres géométriques définis permettent de mieux appréhender la géométrie des réseaux linéamentaires de la région. Dans la suite de l'étude, un contrôle de la chronologie des accidents, associé à une analyse de leur comportement hydraulique et la recherche d'éventuelles relations entre les paramètres : longueur, espacement, position spatiale devraient réussir à mieux caractériser les lois d'échelles.

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'AUFELF-UREF d'avoir pu bénéficier de l'allocation du Fonds francophone de la recherche qui a financé partiellement cette étude.

6. Références

- BIÉMI, J., GIOAN, P., AFFIAN, K., JOURDA, J. P. et KOUAMÉ, F. 1998. Système d'informations hydrogéologiques pour une évaluation des potentialités hydriques en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (ouest de la Côte d'Ivoire). *in* J.-M. Dubois, M. Bernier, J. -P. Fortin et F. Boivin (dir). La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes, Édition Agence universitaire de la francophonie, Montréal, p. 261-270.
- BODIN, J. et RAZACK, M. 1999. L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelles. Bulletin de la Société géologique de France, t. 170, n° 4, p. 579-593.
- BOUR, O. and DAVY, P. 1997. Connectivity of random fault networks following a power law fault length distribution. Water Resources Research, vol. 7, p. 1567-1583.
- BRACQ, P. 1994. L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux : apports de l'analyse morphostructurale. Société géologique du nord, Lille, 244 p.
- CAMIL, J. 1984. Pétrographie, chronologique des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'État, Université de Côte d'Ivoire, 306 p.
- DELAY, F., BRACQ, P. et COLBEAUX, J. P. 1992. Cartographie numérique de linéaments morphostructuraux : exemple d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. Bulletin de la société géologique de France, t. 163, n° 3, p. 345-352.
- DEPRAETERE, C. 1996. Module de simulation des écoulements : Fonction de Transfert Morphologique (FTM). Annales de l'ORSTOM, n° 56, 44 p.
- HIRATA, T. 1989. Fractal dimension of fault systems in Japan : fractal structure in rock fracture geometry at various scales. Pure Application Geophysics, vol. 131, n° 1-2, p. 157-170.
- KOUAMÉ, K. F. 1999. Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). Apports des données des images satellitales, des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de doctorat, Université de Cocody, 200 p.
- KOUAMÉ, K. F., GIOAN, P., BIÉMI, J. et AFFIAN, K. 1999. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales : exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, vol. 1, n° 2, p. 1-18.
- KOUAMÉLAN, A. N. 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 277 p.
- MANDELBROT, B. 1975. Les objets fractals : forme, hasard et dimension. Édition Flammarion, Paris, 190 p.
- PATUREL, J. E., SERVAT, E., KOUAMÉ, B. et BOYER, J. F. 1995. Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. Sécheresse, vol. 6, n° 1, p. 95-102.
- RAZACK, M. 1982. À propos d'une loi de distribution des fractures : intérêt pour l'hydrogéologie des aquifères fissurés. Compte rendu de l'Académie des sciences de Paris, t. 294, série II, p. 1295-1298.
- ROULEAU, A. and GALE, J. E. 1985. Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 22, n° 6, p. 353-367.

- SORNETTE, A., DAVY, P., and SORNETTE D. 1993. Fault growth in brittle-ductile experiments and mechanics of continental collisions. *Journal of Geophysics Research*, vol. 98, n° 12, p. 111-139.
- TAKAYUSU, H. 1985. A deterministic model of fracture. *Progress of Theoretical Physics*, 74, p. 1343-1345.
- VELDE, B., DUBOIS, J., MOORE, D. and TOUCHARD, G. 1991. Fractal patterns of fractures in granites. *Earth and Planetary Science Letters*, n° 104, p. 25-35.
- WATANABE, K. 1986. Stochastic evaluation of the two dimensional continuity of fractures in rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 23, n° 7, p. 431-437.

27

Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso : cas du bassin versant de Bidi (province du Yatenga)

YOUSSEUF KOUSSOUBÉ et ALAIN NINDAOUA SAVADOGO

Laboratoire d'hydrogéologie, Université de Ouagadougou, B.P. 7021, Ouagadougou, Burkina Faso; téléphone : (226) 30 70 20; télécopieur : (226) 30 72 42; courriel : youssouf.koussoube@univ-ouaga.bf

Résumé

Dans la zone Sahélo-soudanienne de Bidi, l'utilisation des données de télédétection et le recalage par des données de terrain a permis de caractériser les fractures. Des images HRV de SPOT en formats numérique et analogique ainsi que des photographies aériennes panchromatiques ont permis l'identification et la caractérisation des linéaments. Ces linéaments ont été confirmés sur le terrain par des dispositifs appropriés de mesures géophysiques (électriques et électromagnétiques) et par des observations de terrain (en hydrogéologie, en microtectonique, en géomorphologie et en botanique). Cette méthodologie de travail a permis de cerner et de différencier trois signatures de fractures enfouies sous des altérites épaisses de 10 à 50 m : 1) les fractures signalées par des alignements de végétation (type A) sont les plus nombreuses dans le massif granitique syntectonique de Bidi (80 % de la surface du bassin versant); certaines espèces végétales hydrophiles soulignent bien ces fractures ouvertes; 2) les fractures signalées par des contrastes de tonalité et de texture (type B) correspondent à des failles qui s'illustrent par des paliers de résistivité apparente; 3) les fractures signalées par des corniches rectilignes de cuirasses latéritiques (type C) correspondent à des failles tardives qui ont imposé leur direction à des zones d'altération privilégiée. En matière d'hydrogéologie de socle cristallin, les chances de succès des forages d'eau sont plus importantes lorsque l'on s'adressera préférentiellement,

par ordre de préférence, aux linéaments de type B, de type A et de type C.

1. Introduction

En hydrogéologie et en géologie minière du socle cristallin, il importe de trouver les signatures permettant de cartographier rapidement des structures de déformations majeures (failles, structures filoniennes, contacts géologiques, zones de cisaillement) qui sont enfouies sous des altérites. En hydrogéologie notamment, des études récentes ont montré des débits importants dans des zones de failles et de filons ainsi qu'au niveau des contacts géologiques (DU BERGER *et al.*, 1996). La détection rapide de ces structures dans les zones cristallines trouve donc son importance et leurs signatures par diverses méthodes d'approche. C'est pourquoi nous allons tenter de reconnaître ces fractures dans la zone granitique du bassin de Bidi situé au nord du Burkina Faso (figure 1).

2. Contexte physique de l'étude

Le bassin de Bidi couvre une superficie de 157 km² environ. Il se situe entre les coordonnées 13°25' et 14°00' N et 2°25' et 2°35' O. Le climat est de type sahélo-soudanien selon la définition de AUBRÉVILLE (1949). La région est caractérisée par un recouvrement quasi général du sol par des produits d'altération de sable hydro-éolien, d'épandage gravillonnaire, de cuirasse latéritique et d'altérites argileuses (saprolite, argiles tachetées indurées) dont l'épaisseur peut souvent dépasser 50 m. Le substratum est formé de roches cristallines dont

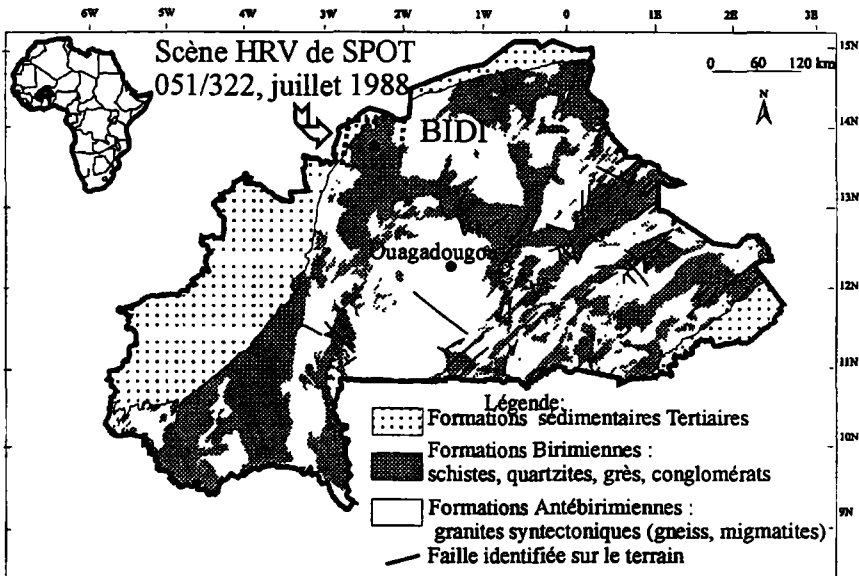
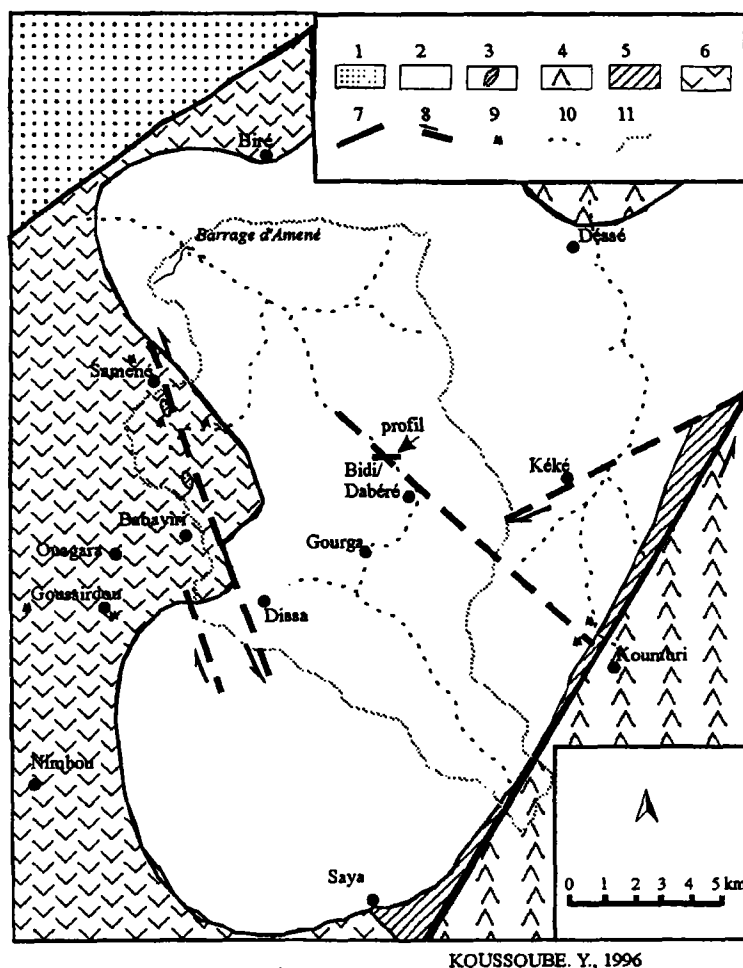


Figure 1. Carte géologique simplifiée du Burkina Faso (d'après HOTTIN et OUÉDRAOGO, 1975) et situation de la zone d'étude

les aires de répartition sont de 91 % pour le granite syntectonique (2,1 milliards d'années d'après BOHER *et al.*, 1992), de 8 % pour l'unité volcano-sédimentaire (gabbros, schistes, etc.) et seulement de 1 % pour les volcanites basiques (figure 2). La végétation est de type steppe arbustive et arborée sur interfluve et de type forêts-galeries dans les bas-fonds. Le relief est peu contrasté avec des altitudes variant entre 280 et 360 m. Les buttes latéritiques en plateau, en croupe ou en cuesta, forment l'essentiel du relief. C'est dans ce contexte physique que plusieurs méthodes ont été utilisées pour bien caractériser les fractures du socle cristallin.



Légende : 1- grès et argiles sableuses du Continental terminal; 2- granitoïdes du massif de Bidi; 3- séries de roches volcaniques et sédimentaires acides et basiques; 4- gabbros (unité volcano-sédimentaire); 5- schistes versicolores (unité volcanique); 6- basalte et andésite (unité volcanique); 7- faille transcurrente de Koumbri; 8- zone de cisaillement; 9- zone d'orpaillage; 10- réseau hydrographique; 11- limite du bassin versant de Bidi

Figure 2. Carte géologique de la région d'étude (Bidi, province du Yatenga)

3. Méthodologie

Une interprétation visuelle de l'imagerie aéroportée et spatiale (figures 27-3 et 27-4) (voir cahier couleur) a permis de distinguer trois types linéamentaires : 1) les alignements de végétation (type A) correspondant à des alignements d'arbres et de hautes herbes bien visibles sur les photographies aériennes (mission 84066B de décembre 1984 dont la prise de vue aérienne eut lieu entre 8 h 00 et 9 h 30 avec des lignes de vols est-ouest) et les compositions colorées d'images satellitaires HRV de SPOT (scène 051/322, juillet 1988); 2) les contrastes de tonalité et de texture (type B) représentant les plages sombres contrastant avec des plages plus claires ou inversement; 3) les alignements de corniches de cuirasses latéritiques (type C).

Plusieurs méthodes ont été déployées pour la vérification sur le terrain des trois types de linéaments identifiés : examen des états de surface du sol (géologie, géomorphologie, microstructures sur affleurement rocheux, faune du sol notamment les termitières en cheminées), prospection géophysique par des profils électriques (méthodes des résistivités, dispositif Schlumberger) et électromagnétiques (Apex MaxMin en bobines horizontales). Ces résultats sont exprimés sous forme de cartes et de courbes.

4. Résultats et interprétations

4.1. États de surface du sol et linéaments

Les alignements de végétation représentent plus de 80 % des linéaments distingués dans le bassin versant de Bidi, dont le substratum est essentiellement granitique (figure 27-4) (voir cahier couleur). Parmi les espèces arborées d'interfluves, on peut citer *Butyrospermum parkii*, *Ficus gnaphalocarpa*,

Parkia biglobosa, *Lannea microcarpum* des espèces arbustives et sous-arbustives (*Piliostigma reticulatum*, *Diospyros mespiliformis*) ; des hautes herbes comme *Andropogon guyanus*, qui soulignent bien les zones humides. En plus des espèces végétales, il y a également les édifices de termitières en cheminées (*Macrotermes bellicosus*, *Macrotermes subhalinus*) qui soulignent bien la fracturation par des alignements souvent remarquables (SAVADOGO, 1984). Le type linéamentaire B (contraste de tonalité et de texture) représente 8 % de l'ensemble des photos-linéaments du bassin de Bidi, avec la nature du substratum rocheux. La plus grande densité de linéament de type B se rencontre dans la zone à substratum volcanique et volcano-sédimentaire. Les signatures sur le terrain sont très diversifiées : il peut s'agir de contact géologique, de limite d'affleurement ou des altérations différentielles des sols. Le type linéamentaire C (corniches rectilignes de cuirasse latéritique) ne représente que 1 % des photos-linéaments du bassin de Bidi. Leur prépondérance est remarquable dans les environnements volcaniques et volcano-sédimentaires à nombreux reliefs cuirassés ou carapacés. Très fréquemment, les trois types de linéaments identifiés sont soulignés par des édifices biologiques de termitières épigées (*Macrotermes*).

4.2. Répondants des linéaments avec les méthodes géophysiques

4.2.1. Le type A

Les courbes des traînés électriques montrent des anomalies conductrices de résistivités apparentes qui présentent des formes variées correspondant à des linéaments de type A. Par ailleurs, ces alignements de végétation sont aussi soulignés par des paliers de hautes valeurs de résistivités apparentes (horst à substratum sub-affleurant) et des basses valeurs de résistivités apparentes (graben à substratum effondré).

4.2.2. Le type B

Dans certains cas, les failles sont soulignées par un contraste de tonalités marqué par des zones de hautes valeurs de résistivités apparentes passant à des zones de basses valeurs. Les cartes de résistivités apparentes illustrent bien ces zones de failles (KOUSSOUBÉ, 1996).

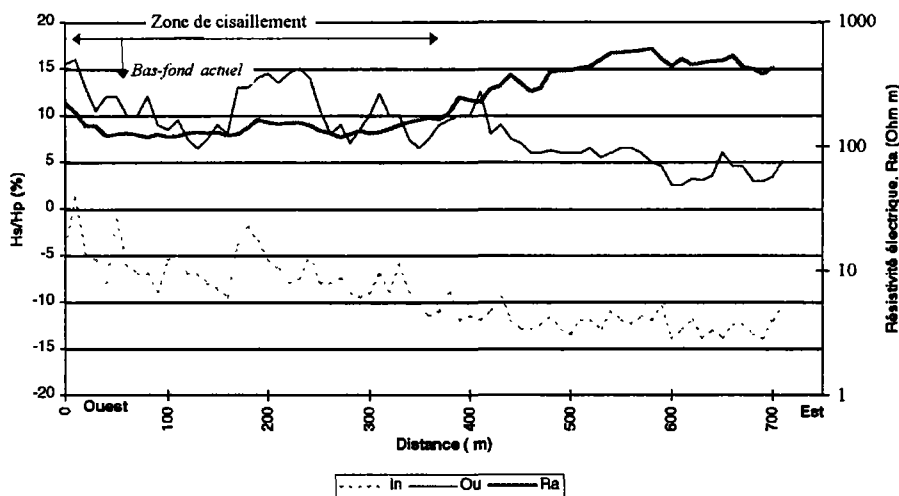
4.2.3. Le type C

Les contacts anormaux entre granite et volcano-sédiments correspondants à des linéaments apparaissent sous forme de contraste de tonalité (type B), d'alignement de cuirasses latéritiques (type C) et de termitières épigées; ils sont bien identifiés par la composante imaginaire (*outphase*).

La zone de cisaillement central du bassin de Bidi montre une large anomalie conductrice en résistivités apparentes avec un sursaut de la composante imaginaire du MaxMin dans la zone axiale de la structure (figure 5). Ce couloir de déformation majeure, long de plusieurs kilomètres, correspond à une association des types linéamentaires A, B et C (figures 1 et 3).

4.3. Mesures structurales et directions de déformation

Les observations et mesures faites sur les affleurements rocheux ont permis de mieux comprendre et de relativiser les directions linéamentaires mises en évidence. Deux directions principales de forte densité (est-ouest) et nord-sud sont observés sur les affleurements rocheux. De plus, ces fractures tardives sont en majorité verticales (KOUSSOUBÉ, 1996). En outre, l'étude structurale de terrain a révélé une faille transcurrente sénestre N50°E passant près de Koumbri (figure 2) se manifestant sur l'image satellitaire sous forme d'un contraste de tonalité diffus (figures 27-3 et 27-4) (voir cahier couleur). Elle est identifiée par télédétection spatiale et par des marqueurs divers de terrain : étirement de minéraux de quartz, paragenèse minérale à chlorite + séricite + calcite + quartz, boudinage de quartz faiblement minéralisé en or, panneaux sigmoïdes d'andésite dans le basalte. Des zones de cisaillements identifiées sur le terrain et correspondant à des laminages affectent aussi bien les roches encaissantes volcano-sédimentaire et volcanique que le massif granitique lui-même. Ces zones sont allongées en couloirs de longueur pluri-kilométrique et de largeur métrique à hectométrique suivant trois directions reconnues : N65°E, N165°E et N130°E (figure 2).



Légende: Ra : Résistivité apparente du sol par la méthode électrique des résistivités (pas de mesure de 10 m, longueur de ligne de 180 m, mesure de la différence de potentiel de 20 m); In, Ou = composantes en phase et en quadrature du MaxMin en bobines horizontales (séparation des bobines de 100 m, fréquence d'émission 3520 hertz); Hs/Hp: rapport du champ secondaire Hs sur le champ primaire Hp (en %).

Figure 5. Signature de la zone de cisaillement central de Bidi (voir situation des profils sur la figure 2 par les méthodes géophysiques électromagnétique (MaxMin) et électrique

5. Discussion

Les photos-linéaments à l'échelle du 1 : 50 000 ne montrent pas les directions des failles décrochantes tardives (failles en relais, faille transcurrente) qui sont pourtant bien observées sur le terrain, malgré l'échelle assez grande des photographies aériennes par rapport à l'imagerie satellitaire. Cette lacune des directions N120 à N140°E serait liée en partie à la position du soleil qui ne permet pas de bonnes réflectances des structures au sol orientées sud-est pour des lignes de vol est-ouest. Par ailleurs, l'image numérique HRV de SPOT (XS) présente également une lacune suivant les directions N15 à N30°E (figure 27-4) (voir cahier couleur) correspondant à la trajectoire du satellite SPOT; les structures linéamentaires qui sont parallèles ou sub-parallèles à la trajectoire du satellite (N25°E) sont ainsi masquées.

6. Conclusion

Le réseau linéamentaire en trois types (alignements de végétation, contraste de tonalité et de texture, corniches de cuirasses) établi à partir d'images satellitaires à haute résolution et de photographies aériennes panchromatiques en période sèche de l'année, permet de bien caractériser le réseau de socle cristallin. Ces linéaments montrent la prépondérance des alignements de végétation dans un contexte granitique de milieu sahélo-soudanien. Ces linéaments de type A représentent donc des couloirs où le stock hydrique important permet

la bonne croissance d'espèces végétales. Mieux, lorsque la structure linéamentaire résulte de l'association des trois types de linéaments (contraste de tonalité et de texture, corniches de cuirasse), l'anomalie conductrice est plus importante comme l'ont confirmé les travaux de géologie de terrain et de géophysique.

De plus, les travaux de terrain ont permis d'identifier des zones de cisaillements sub-méridiennes sénestres et NE-SO dextres ainsi qu'une large zone (plus de 150 m) centrale longeant et prolongeant l'axe majeur du bas-fond de Bidi à la hauteur de Dabéré correspondant à une structure linéamentaire A + B + C. Cette structure centrale contrôlerait les déformations majeures dans le bassin granitique de Bidi. Les fractures, filons et failles tardives en ouverture ou en extension peuvent présenter une conductivité hydraulique plus élevée que la roche cristalline initiale. Ces fractures ouvertes s'expriment dans la géomorphologie par le réseau hydrographique et les alignements de corniches de cuirasse. Les linéaments de type A correspondent à une végétation active et dense qui peut être un indice intéressant de prospection hydrogéologique, surtout en saison sèche. Les linéaments de type contraste de tonalité et de texture sont des failles d'importance hydrogéologique certaine. Aussi, les directions sud-est correspondent-elles à celles des filons de pegmatites sont des structures ouvertes à rechercher dans les investigations géophysiques. Les linéaments de type B sont les expressions de l'ouverture par distension du socle granitique syntectonique de Bidi. Le potentiel hydraulique de ce genre de structures est évident comme le témoigne le seul forage à gros débit de tout le bassin de Bidi. Les fractures de type C sont nombreuses dans la zone sahélo-soudanienne et constituent des zones de circulations préférentielles d'eau et de fluides minéralisateurs. Les anomalies fortement marquées présagent des altérations épaisses qui rendraient difficile le sondage des forages d'eau.

7. Remerciements

Les auteurs remercient le Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie dont la contribution a été déterminante dans notre participation aux VIII^{èmes} journées scientifiques de Lausanne (Suisse).

8. Références

- AUBRÉVILLE, F. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales. Paris, 351 p.
- BOHER, M., ABOUCHAMI, W., MICHARD, A., ALBARÈDE, F. and ARNDT, N.T. 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, n° B1, p. 345-369.
- DU BERGER, R., LEMIEUX, G.H., ROULEAU, A., BÉGIN, R., SAVADOGO, A.N., NAKOLENDOUSSÉ, S., KOUSSOUBÉ, Y. et DIALLO, S. 1996. Etude des facteurs de productivité des aquifères de socle cristallin du Burkina Faso. Rapport final, Centre d'études des ressources minérales de l'Université du Québec à Chicoutimi et Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou, 70 p.

- HOTTIN, G. et OUÉDRAOGO, O.F. 1975. Notice explicative de la carte géologique à 1 : 1 000 000 de la république de Haute-Volta. Éditions du Bureau de recherches géologiques et minières, 56 p.
- KOUSSOUBÉ, Y. 1996. Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso, cas du bassin versant du bas-fond de Bidi. Thèse de doctorat, Université de Dakar, 210 p.
- SAVADOGO, A.N. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de doctorat, Université Scientifique et médicale de Grenoble, 340 p.

28

Télédétection appliquée à l'étude de l'érosion hydrique et de l'ensablement des rizières dans la région sud du lac Alaotra (Madagascar)

LEA JACQUELINE RAHARIJAONA RAHARISON, TOKINOMENA
AIMBELONTSIRY RAMERISON et RAFANOMEZANTSOA MANUEL
ANDRIANILAINA

Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, B.P. 1500, Antananarivo, Madagascar; téléphone : 261 20 22 276 96; télécopieur : 261 20 22 248 54; courrier : ljarahari@syfed.refer.mg

Résumé

Les données TM de Landsat de la région sud du lac Alaotra (Madagascar) ont fait l'objet de traitements numériques pour l'évaluation des états de surface face à l'érosion hydrique et à l'ensablement des rizières. L'état de surface a été caractérisé en termes de types de sols, d'hydrologie et de couverture végétale. La carte de couverture du sol obtenue est le résultat de la classification dirigée par maximum de vraisemblance. Deux sites-tests ont été choisis pour évaluer la capacité de l'imagerie TM pour identifier, classer et cartographier. Le premier site retenu est la plaine rizicole de Sasomangana pour l'identification des zones d'ensablement dans les rizières. Pour l'étude de l'érosion hydrique, nous avons utilisé, comme second site, le bassin versant de Sasomangana, en raison de la diversité de ses sols. La classe hydrologique des sols est établie selon la méthode SCS (*Soil Conservation Service*). La combinaison des classes de pente et d'occupation du sol a permis de classer les sols entre quatre groupes hydrologiques A, B, C et D. L'utilisation conjointe du SIG et de la télédétection permet de déterminer les zones sensibles à l'érosion en vue d'une meilleure prévention des risques.

1. Introduction

La région sud du lac Alaotra est particulièrement touchée, ces 30 dernières années, par l'érosion hydrique très importante dans les sols ferrallitiques issus surtout de l'altération des migmatites (RAUNET, 1984). Les conséquences économiques sont importantes au plan des pertes en sols. Les rizières sont constamment menacées par l'ensablement dont on connaît les effets néfastes sur les rendements et les coûts de production (RAHARIJAONA RAHARISON et RANDRIANARISON, 1997).

L'objectif de ce travail vise à tester l'utilisation de l'imagerie TM de Landsat pour estimer la répartition en plaine des zones ensablées et les classer ainsi qu'identifier les zones hydrologiques homogènes des sols du bassin de Sasomangana et les cartographier.

Une longue vallée, dont la superficie agricole couvre 9 350 ha, est occupée principalement par la plaine de Sasomangana. Quant au bassin versant de Sasoamangana (16 450 ha), il repose sur un substratum rocheux migmatitique recouvert d'une savane arborée. Ce bassin est en climat tropical et reçoit en moyenne 1 138,9 mm de pluie par an concentrée entre octobre et mars, d'après les données de la Météorologie nationale.

2. Matériel et méthode

L'étude a été réalisée sur image TM de Landsat 158-072 du 15-09-1993. Les vérifications et les aides à l'interprétation ont été effectuées à partir de cartes topographiques de 1974 au 1 : 50 000 et de photographies aériennes de 1988 au 1 : 20 000. Les logiciels utilisés sont VISTA pour le traitement d'images, IDRISI pour les SIG, ROOTS et TOSCA pour la numérisation des cartes topographiques. Les pentes sont dérivées du MNA. Sur la figure 1 (tableau 1), on résume le schéma de traitement de l'image sur les données du domaine de la plaine. La démarche adoptée doit déboucher sur une statistique et une cartographie des classes identifiées et permet d'apprécier le degré de corrélation entre les réponses spectrales et les paramètres de terrain.

3. Résultats

3.1. Ensablement dans la plaine de Sasomangana

L'élimination du domaine extérieur à la plaine a été réalisée par création d'un masque. Les canaux TM2, TM3 et TM4 ont été retenus pour réaliser la composition colorée sur laquelle a été effectuée la classification dirigée à huit classes (figure 28-2) (voir cahier couleur). Les zones ensablées se répartissent sur l'image en deux classes : les sols nus (classe 6) très réfléchants lorsqu'ils sont secs, même s'ils sont très partiellement ponctués par de la végétation éparse, et les sols de marais (classe 8) moins réfléchants, car ils sont humides.

La méthode de quantification utilisée a permis de comptabiliser le nombre de pixels à l'intérieur de chaque zone identifiée et de le convertir en hectares de superficie couverte par chaque classe. La superficie totale des zones ensablées a été estimée à 1 796 ha, dont 648 ha de surface à sables secs et 1 147 ha occupés par des sables humides de marais (tableau 2). Les rizières intactes couvrent une superficie de 4 815 ha, soit 52 % de celle de la plaine. Les types d'états de surface rencontrés dans la région sont décrits sur le tableau

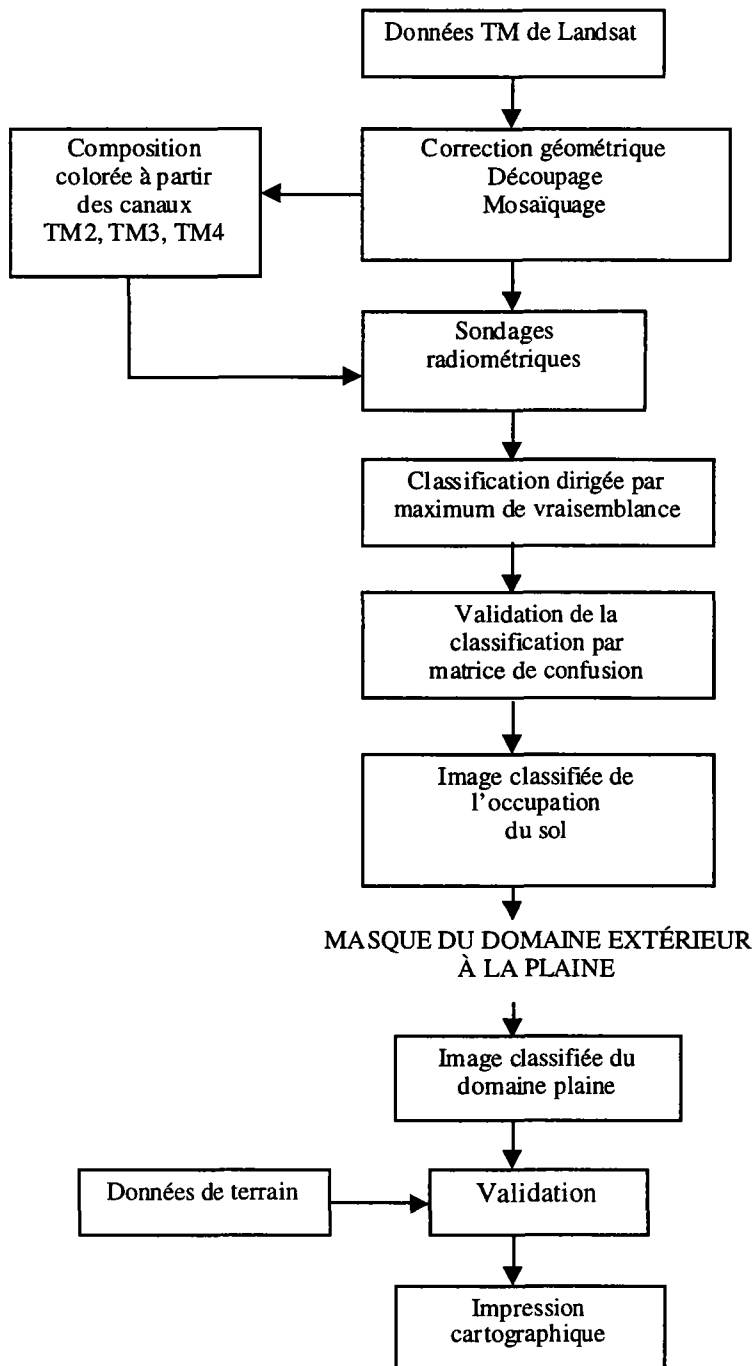


Figure 1. Organigramme des traitements numériques des données TM de Landsat de la plaine rizicole de Sasomangana

Tableau 1. Statistiques d'occupation du sol dont la cartographie a été établie par télédétection pour la plaine rizicole de Sasomangana (figure 1).

Numéro et nom de classe (sous-classe)	% de surface couverte	Superficie en ha
1 Plans d'eau	0,8	78,1
2 Rizières	51,5	4814,9
3 Forêt ripicole	7,1	666, 9
4 Prairie à <i>Cynodon dactylon</i>	1,8	168,0
5 Prairie à <i>Digitaria humberti</i>	17,4	1622,4
6 Sols nus (sable sec)	9,9	648,4
7 Forêts primaire	2,1	199,2
8 Marais (sable mouillé)	12,3	1147,4
Total	102,9	9345,3

2, ce qui représente 88,3 % de la superficie totale des rizières.

3.2. Cartographie hydrologique des sols

À l'échelle du bassin de Sasomangana, la carte de l'occupation du sol et celle des groupes hydrologiques de sols ont été établies. Le résultat de la classification a permis d'identifier cinq grands ensembles (figure 28-3) (voir cahier couleur). La statistique a montré qu'il s'agit d'un bassin versant dont 43 % de la surface est occupée par ce type de couverture.

Tableau 2. Description des états de surface de chaque catégorie d'occupation du sol identifiée dans la plaine de Sasomangana en tenant compte des critères du mode d'utilisation et du type de sol selon sa répartition et son état d'humidification.

Occupation sol	Utilisation sol	Description des états de surface
Sols nus (n° 6)	Jachère	Surfaces à sables grossiers, sans couvert herbacé, sols secs réfléchants
Rizière (n° 2)	Jachère	Surfaces à limons argileux sur champ labouré
Marais (n° 8)	Riziculture avec travaux de drainage	Surfaces à sables fins sur sols hydromorphes, semi-tourbeux, sables mouillés à Cypracées, peu réfléchants
Forêt primaire (n° 7)	Réboisement et arboriculture frutière	Surfaces à sols humifères portant des vestiges de forêt naturelle.
Forêt ripicole (n° 3)		Surfaces à sols argilo-sableux sur bas-fonds humides
Prairie à <i>Cynodon dactylon</i> (n° 4)	Pâtures	Surfaces à sols hydromorphes tourbeux sur marécages
Prairie à <i>Digitaria humberti</i> (n° 5)	Pâtures	Surfaces à sols hydromorphes argileux sur bourrelets alluviaux.

La précision globale de la classification, calculée à partir de la matrice de confusion, est de 95 %.

Sur la carte de la figure 28-4 (voir cahier couleur), on présente les interactions entre l'occupation du sol et les états de surface du sol face à l'érosion : texture du sol, son état de dénudation et son état hydrologique. Les valeurs de coefficient de ruissellement utilisées (tableau 3) sont celles proposées par COLOMBET (1977). Pour notre zone, les valeurs de potentiel de ruissellement CN s'échelonnent entre 36 et 94, connaissant les paramètres : occupation du sol, pente et type de sols. Pour les types de sols, chaque unité pédologie identifiée est traduite dans le groupe hydrologique correspondant dans le modèle SCS (tableau 3). BOUSSEMA et CHAIRAT BEN ABDALLAH (1995) ont évalué CN en appliquant la méthode de pondération.

Tableau 3. Description des catégories d'utilisation du sol suivant la méthode SCS permettant de classer les sols en groupes hydrologiques identifiés par les lettres A, B et C pour une situation de fin de saison sèche/début de saison de pluies. Les états de surface sont caractérisés en termes de sol selon sa texture, son état de dénudation et son état hydrologique. Les rizières se comportent hydrologiquement comme une jachère à cette période de l'année.

Occupation	Catégories	Classes des sols par groupe hydrologique et description de leurs états de surface	Etat hydrologique	Potentiel de ruissellement CN par groupe hydrologique de sols			
				A	B	C	D
Forêt	Végétation arbores-cente	<u>Sols du groupe A :</u> Surface humifère très faiblement érodée, sols forestiers, légère érosion en nappe, $c=0,20$	Moyen	36	60	73	79
		<u>Sols du groupe C :</u> Surface légèrement perméable et durcie, à couvert arboré clair et à sols fins à moyens ferrallitiques sableux sur migmatites, sols dénudés par suite d'érosion en nappe, en ravin et en la lavaka, $c=0,60 - 0,80$	Moyen si non brûlée Mauvais si brûlée	49 44	69 66	79 77	84 83
Sols nus	Jachère	<u>Sols du groupe B :</u> Surface dénudée ponc-tuée de végétation éparse, à sols absorbants sableux, érosion faible ou nulle, plutôt ensablement, $c=0,30$	Mauvais	68	79	86	89
Rizières	Jachère	<u>Sols du groupe D :</u> Surface peu soumise à l'érosion, sols limono-sableux, absorbants $c=0,40$	Mauvais	77	86	91	94

4. Discussion

L'image du 15 septembre 1993 traduit une situation de fin de saison sèche où le riz a été récolté et les champs récemment labourés, d'où l'intérêt de travailler sur des données acquises en période sèche pour la mise en évidence des surfaces rizicoles ensablées. C'est en cette période de l'année (septembre à mi-octobre) que les sols dénudés sont le plus étendus. Au cours du temps, l'évolution de dégradation des sols de savane à la suite de feux de défrichement répétitifs, va modifier l'état de surface du sol, donc sa réflectance. Cette évolution va être fonction des paramètres géologiques, topographiques et climatiques qui conditionnent l'érosion hydrique et le recouvrement végétal de la surface (RAHARIJAONA RAHARISON et RANDRIANARISON, 1997). L'influence du brûlis sur les propriétés physiques du sol et son comportement hydrologique se manifestent de façon évidente en modifiant ses caractéristiques radiométriques. Par rapport aux sols forestiers, les sols de savane sont moins perméables par durcissement superficiel dû aux feux. Du point de vue texture, ils sont moins sableux mais plus argileux, entraînant une réduction de la porosité et une mauvaise capacité d'infiltration (BRAND et RAKOTONDRANALY, 1997), créant ainsi les conditions favorables au développement de l'érosion. Superposée au SIG avec les cartes de pentes et d'occupation du sol, cette carte des sols montre la sensibilité des sols du groupe hydrologique C à l'érosion en lavaka pour des valeurs de c comprises entre 0,7 et 0,8 et à partir de 25 % de pente.

5. Conclusion

L'imagerie TM de Landsat offre les possibilités d'identifier, de localiser et de classer sans ambiguïté notable les grands ensembles d'occupation du sol et de groupe hydrologique de sols, et de les cartographier. Cette précision dans la localisation des objets a facilité les contrôles sur le terrain.

Le pouvoir de résolution de cette imagerie est suffisant pour la reconnaissance des zones d'ensablement et des zones hydrologiques homogènes, mais insuffisant pour identifier et évaluer les surfaces affectées par les lavaka en raison de la grande dispersion de la répartition des pixels appartenant à des zones qui ne sont pas parfaitement homogènes.

Les résultats obtenus sont susceptibles d'être intégrés dans les modèles de prévision de statistiques agricoles pour étudier les rendements à la parcelle. Pour la répartition des lavaka, il sera souhaitable de disposer d'autres images satellitaires de plus grande résolution spatiale, acquises à différentes dates et saisons.

6. Remerciements

Cet article a pu être réalisé grâce à l'appui matériel du FTM : M. Andrianjafimbelo RAZAFINAKANGA, Directeur Général et M. Joseph RAMBOAZANAKOLONA, Ingénieur géographe et à la collaboration de l'Institut d'Observatoire géophysique d'Ambohidempona : M. Jean Bruno RATSIMBAZAFY et Dr Solofo RAKOTONDRAOMPIANA, géophysicien.

7. Références

- BOUSSEMA, M.R. et CHAIRAT BEN ABDALLAH, S. 1995. Modélisation hydrologique et de l'érosion à l'aide d'un SIG : Systèmes d'information géographique utilisant des données de télédétection. Actes du colloque scientifique international, Hammamet, 1-2 novembre 1995, Centre de recherche pour le développement international (CRDI), Hammamet, p. 63-75.
- COLOMBET, L. 1977. Assainissement des agglomérations. Techniques de l'ingénieur, 11, 91 p.
- BRAND, J. et RAKOTONDRANALY, N. 1997. Les caractéristiques et la fertilité des sols. Cahiers Terre-Tany, n°6 : un système agro-écologique dominé par le tavy : la région de Beforona, Falaise de Madagascar. Projet Terre-Tany/BEMA, Centre pour le développement et l'environnement, CDE/GIUB, FOFIFA/Madagascar, p. 34-48.
- RAHARIJAONA RAHARISON, L. J. et RANDRIANARISON, J. 1997. Facteurs géologiques et climatiques influençant l'érosion en lavaka et ensablement des rizières : le cas du massif d'Ambohitrandriampotsy du sud du lac Alaotra. 4^e Conférence internationale de l'Association pour les montagnes africaines (AMA), 26 mai–1 juin 1997, Antananarivo, 15 p.
- RAUNET, M. 1984. Le milieu physique : aptitude à la mise en valeur agricole – Système et structure, région du lac Alaotra, Madagascar. Institut de recherches agronomiques tropicales (IRAT), Montpellier, 325p.

29

Cartographie des aquifères de fissures en milieu cristallin du nord-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection

ISSIAKA SAVANÉ¹ et JEAN BIÉMI²

¹ *Centre de recherche en écologie (CRE), 08 B.P. 109 Abidjan 08, Côte d'Ivoire; téléphone: (225) 25 73 36; télécopieur (225) 25 73 36; courriel : savanei@hotmail.com*

² *Université de Cocody, Centre Université de recherche et d'application en télédétection (C.U.R.A.T.), 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Laboratoire Associé Francophone LAF 401; téléphone (225) 44 52 70; télécopieur (225) 44 57 39*

Résumé

Dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, l'emploi des techniques de télédétection pour l'étude des aquifères de fissures et l'interprétation, dans un système d'information géographique (SIG), des perméabilités induites par les fractures montre que 36 % des linéaments sont orientés N60° et 32 % N130°. Les forages à gros débit sont implantés dans 29 % des cas en relation avec les fractures NE-SO, contre 22 % en relation avec les fractures N-S, les moins sollicitées en hydraulique villageoise. À l'intérieur du SIG, les principales mégafractures correspondant aux couloirs souterrains de circulation des eaux dans les fissures ont été identifiées. La superposition de la carte des perméabilités induites à celle de la densité de drainage met en évidence la relation qui existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines au droit des mégafractures. Les cartes d'accessibilité, d'exploitabilité et d'indices de productivité des aquifères de la région, établies à partir de la combinaison de plusieurs facteurs (probabilité de succès des puits, profondeur d'extraction, niveau piézométrique et débit d'exploitation) mettent en évidence les zones favorables à l'implication des forages d'eau dans le socle grâce à l'introduction de la prospection

géophysique. Des campagnes géophysiques, visant certaines mégafractures décelées par la télédétection, ont permis d'implanter quelques forages dont les débits varient de 3 à 10 m³/h; c'est le cas des localités comme Neniesso (12 m³/h), Tougoussou (6 m³/h) et Kabala (3 m³/h)

1. Introduction

Située au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, la région d'Odienné couvre 13 340 km², entre les longitudes 7° et 8°15 O et les latitudes 9° et 10°25 N (figure 1). Dans ce secteur, notre recherche vise à étudier l'hydraulicité des fractures affectant le socle cristallin ainsi que les indices de productivité des formations géologiques en vue de déterminer le potentiel en eau, les conditions d'accessibilité et d'exploitabilité des aquifères, tout en précisant la relation entre eaux de surface et eaux souterraines et en décrivant la géométrie des réservoirs.

La découverte de bonnes quantités d'eau exploitables dans le socle cristallin nécessite de plus en plus l'utilisation de technologies modernes variées et performantes, surtout dans les zones semi-arides et arides d'Afrique où les problèmes d'eau se présentent avec acuité. En effet, si l'eau souterraine doit de plus en plus occuper une place importante dans les activités quotidiennes de ces zones (domestiques, industrielles et agricoles), des informations exactes sont indispensables sur les facteurs qui influencent la productivité des puits, l'accessibilité et l'exploitabilité des aquifères dans ces régions.

En milieu cristallin, la cartographie et l'analyse des fractures ainsi que du profil d'altération qui leur est associé permettent de guider l'implantation au sol des forages capables de fournir un gros débit suffisant. L'importance du couple fracturation-altération est incontestable dans les roches cristallines parce que l'eau souterraine est limitée aux structures secondaires où les vides ont été produits par l'action conjuguée de la tectonique et de l'altération. Les parties massives de la roche ne peuvent contenir d'eau que si les ouvertures secondaires sont présentes parce que la porosité matricielle et la perméabilité primaire induite de la plupart des roches cristallines sont extrêmement faibles.

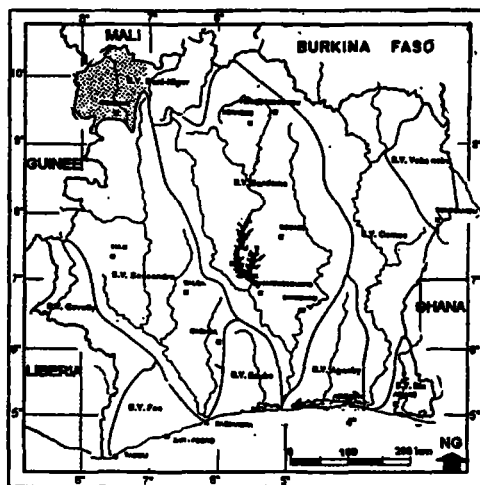


Figure 1. Localisation de la région étudiée (Odienné)

2. Méthodologie

Les études géomorphologiques et celles d'une grande partie des linéaments régionaux ont été faites au départ à l'aide de plus de 200 photographies aériennes noir et blanc, à l'échelle du 1 : 50 000, obtenues en 1979 par la mission NC-29 XI-XII, de l'Institut géographique de Côte d'Ivoire (IGCI). La densité de drainage a été calculée à partir d'images TM de Landsat à l'échelle du 1 : 100 000. Un maillage de dimension 1 km x 1 km de côté a été adopté pour chaque carré au centre duquel est portée la longueur totale des cours d'eau mesurés à l'intérieur du carré (SAVANÉ *et al.*, 1997). La carte d'isovaleurs qui en découle donne des indications sur la densité de drainage dans le bassin.

Le secteur est couvert par trois images TM de Landsat prises le 6 janvier 1986 : 198-53 (quadrants 1 et 3), 198-54 (quadrants 1 et 2) et 199-53 (quadrants 2 et 4). Le traitement d'image a porté sur la recherche des combinaisons d'images rehaussées favorisant la discrimination des ensembles lithologiques et l'identification des linéaments. L'étude a été menée à partir des filtres directionnels de Sobel utilisant une matrice 3 x 3 ou 7 x 7 (figure 2). Les linéaments sont relevés sur une image au 1 : 200 000 au moyen du logiciel ArcInfo.

Pour établir les cartes d'accessibilité, d'indices de productivité et d'exploitabilité des aquifères de la région, nous avons fait appel à plusieurs groupes de facteurs : probabilité de succès dans les formations géologiques, profondeur d'extraction, niveau piézométrique, débit, etc. (tableau 1).

3. Résultats et interprétation

3.1. Discontinuités images

Dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire, la carte détaillée des linéaments à l'échelle du 1 : 200 000, basée sur l'interprétation des images TM, comporte 2 740 segments assimilables à des discontinuités-images réparties dans les quatre directions tectoniques d'Afrique (E-O, NE-SO, N-S et NO-SE) dont 36 % sont orientés N60°E et 32 % N130°E (figure 3).

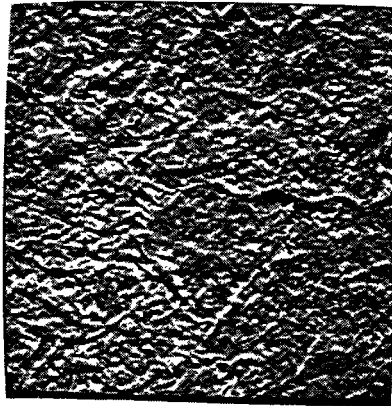


Figure 2. Filtrage directionnel de Sobel matrice 3 x 3 permettant de rehausser les discontinuités images dans la direction NE.

Tableau 1. Facteurs utilisés dans la conception du système d'information géographique

Critère	Prob. succès (%)	Prof. Extract (m)	Niveau piézo (m)	Débit m ³ /h
Excellent	> 80	< 15 m	< 10 m	> 6
Bon	50-80	15-40 m	10-25 m	2 - 6
Médiocre	30-50	40-60 m	25-40 m	1 - 2
Mauvais	< 30	> 60 m	> 40 m	< 1

À échelle réduite (1 : 500 000), la carte détaillée des linéaments fait ressortir plus de 1 160 mégafractures d'intérêt régional (SAVANÉ et BIÉMI, 1999).

3.2. Relation entre fractures, positionnement et productivité des forages

Si l'on tient compte des critères d'implantation des forages dans le socle qui sont les suivantes (BIÉMI, 1992) :

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

On doit admettre que chaque forage réalisé dans le socle se trouve plus ou moins près d'un accident appartenant à une direction tectonique déterminée. Par conséquent, l'étude des relations entre forages et fractures peut s'avérer intéressante pour expliquer le rôle hydraulique de certaines directions d'accidents.

La carte de linéaments réalisée à partir des images satellitaires a été introduite dans le logiciel ArcInfo. Nous avons classé les fractures en fonction des directions N-S, NE-SO, E-O et NO-SE, puis nous avons superposé la base des données sur les ouvrages à la carte de linéaments, après avoir produit une carte thématique représentant la distance de tout point de la zone d'étude par rapport au linéament le plus rapproché. Enfin on a déterminé la distance séparant chacun des 134 ouvrages de la fracture la plus proche dans chacune des quatre directions précitées.

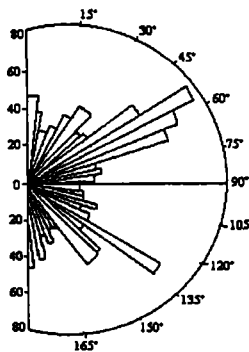


Figure 3. Diagramme de répartition de l'orientation des fractures dans le nord ou nord-ouest de la Côte d'Ivoire .

3.2.1. Influence des accidents sur le positionnement des forages dans le socle

La répartition des débits suivant les quatre directions est consignée sur le tableau 2. L'influence des accidents N-S et NE-SO n'est remarquable que sur des débits moyens. En effet dans ce cas, 55 % des ouvrages à débits moyens sont liés à ces directions de fracture.

3.2.2. Relation entre les pourcentages de forages et l'éloignement par rapport aux fractures

Nous avons superposé la carte des linéaments conçue à partir des images TM à celle des ouvrages réalisés sur le terrain lors des campagnes d'hydraulique villageoise dans le système ArcInfo et nous avons étudié la distribution des ouvrages à l'intérieur des classes d'éloignement de 200 en 200 m par rapport aux fractures.

La figure 4 permet de distinguer trois domaines :

- une droite des implantations idéales localisées sur l'axe des ordonnées, évaluée à 9,5% et représentant le nombre de puits implantés directement sur les fractures;
- une courbe de croissance entre 0 et 1 000 m, avec un pic à 400 m; cette croissance correspond à 69,2 % du nombre de forages; ce sont des ouvrages à la fois les plus proches des accidents et les plus sollicités par les campagnes de forage;
- une courbe de décroissance faible entre 1 200 m et 3 000 m représentant 30,8 % du nombre de forages; ce sont les ouvrages les plus éloignés des fractures.

En général, les ouvrages issus des campagnes d'hydraulique villageoise, réalisés dans les années 1976, ont été implantés de façon aléatoire :

- 9,5 % des ouvrages captent directement un bon nombre des fractures correspondant à ceux qui offrent des débits forts, supérieurs ou égaux à 6 m³/h; parmi eux, on peut citer Doumbala (20 m³/h), Kadiola (17,6 m³/h), Gueuisso (12 m³/h), Nienesso (10 m³/h), etc.;
- 59,7 % des ouvrages sont plus ou moins proches d'une fracture, offrent des débits intermédiaires compris entre 2 et 4 m³/h; ce sont des ouvrages tels que Sélé et N'goloblasso (2,9 m³/h), Bougoussou (3,3 m³/h), Nabagala (4,5 m³/h), etc.;
- 30,8 % des ouvrages offrent des débits inférieurs ou égaux à 2 m³/h.

Tableau 2. Pourcentages de forts et moyens débits pour les forages les plus proches des quatre directions de fractures

Pourcentage des débits supérieurs à 6 m ³ /h	
N - S	2,73 %
NE - SO	29,80 %
NO - SE	32,36 %
E - O	35,12 %
Pourcentage des débits compris entre 3 et 6 m ³ /h	
N - S	23,83 %
NE - SO	31,74 %
NO - SE	26,93 %
E - O	17,50 %

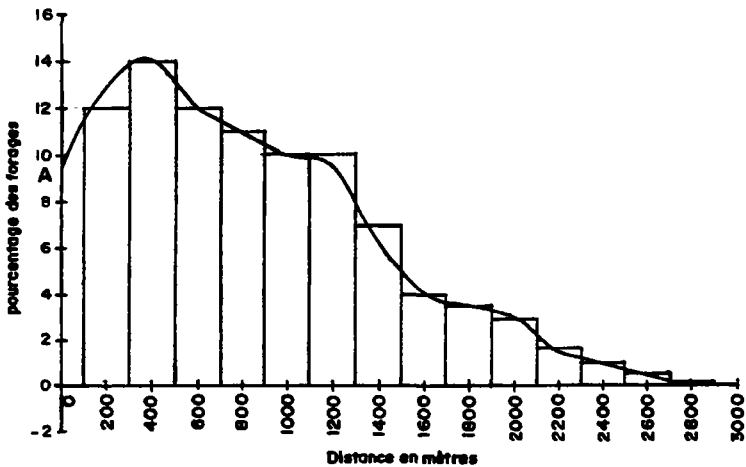


Figure 4. Histogramme montrant la relation entre le pourcentage et la distance d'éloignement par rapport aux fractures. A: implantations idéales (9,5%)

Dans la recherche hydrogéologique en milieu de socle, l'idéal serait de rencontrer une fracture ouverte susceptible d'offrir un débit maximum. Si un ouvrage est placé sur des fractures profondes ou, mieux, sur l'intersection de deux ou plusieurs fractures, il est possible d'obtenir un grand débit d'eau souterraine. La cartographie des fractures est donc recommandée dans les zones de socle parce que l'eau souterraine se trouve dans les structures secondaires où les vides sont développés par l'action tectonique et l'altération.

Le nombre de fractures et le nombre d'intersections de fractures sont donc des mesures de la perméabilité secondaire moyenne de l'aquifère de roche cristalline et, par conséquent, de l'importance d'écoulement d'eau souterraine autour du puits (BROOK, 1988). Ainsi, l'on constate qu'un forage réalisé dans ces zones, sur la base des photographies aériennes ou de la géophysique, doit être au plus distant de 1 km d'un accident pour être productif. Par conséquent, chaque forage doit se situer à proximité d'au moins une fracture dont il est censé capter les eaux souterraines.

3.3. Cartes d'accessibilité et d'exploitabilité

Sur la carte d'accessibilité, le centre de la zone d'étude offre de meilleures conditions d'accessibilité des nappes (figure 29-5) (voir cahier couleur). C'est le domaine qui se caractérise par plus de 80 % de succès sur forage, une profondeur d'extraction de l'eau inférieure à 15 m et un niveau piézométrique proche du sol de moins de 10 m. Cette zone occupe une position méridionale sur la carte avec une bifurcation vers le nord-ouest. Les zones à conditions d'accessibilité médiocres se rencontrent sur la bordure orientale (depuis Tienko au nord jusqu'à Tiémé au sud), la bordure sud-ouest aux environs de Ouéléban et au nord-ouest de la région à Maninian.

La carte d'exploitabilité des nappes s'apparente assez bien à la précédente (figure 29-6) (voir cahier couleur). En effet, les nappes les plus accessibles sont, de ce fait, les plus exploitables hydrauliquement. Les zones de bonne exploitabilité se superposent presque entièrement à leurs homologues de bonne accessibilité.

Les cartes thématiques ainsi établies ont été utilisées pour l'implantation des puits d'une nouvelle campagne d'hydraulique villageoise. Les implantations des puits ont été orientées en fonction des critères d'exploitabilité et d'accessibilité favorables sur les différentes cartes. Des activités de sondages électriques ont menées sur ces zones afin de tester la fiabilité des cartes thématiques.

3.4. Sondage électrique

Une campagne d'hydraulique villageoise a été menée en 1995 par la coopération japonaise. Nous avons participé à cette campagne en proposant nos cartes d'accessibilité et d'exploitabilité qui sont les résultats du système d'information hydrogéologique à référence spatiale réalisé dans cette région. Ces cartes ont été exploitées conjointement avec une étude de sondages électriques. L'objectif de cette approche était de cerner les fractures sur la carte à partir de la géophysique et, d'implanter les forages sur ces fractures s'ils étaient situés dans une zone favorable en fonction de la carte d'accessibilité ou de la carte d'exploitabilité.

La représentation des résultats enregistrés sur le résistivimètre permet d'obtenir une courbe de sondage électrique qu'on trace habituellement sur du papier bilogarithmique ou qu'on obtient automatiquement par le biais d'un logiciel. En abscisse, on représente le demi écartement de AB, c'est-à-dire $AB/2$, en fonction du déplacement des électrodes. En ordonnée, on représente la résistivité apparente ra calculée à partir du courant et de la différence de potentiel (d.d.p) relevés sur le terrain. Plusieurs sondages ont été menés. Les résultats de l'interprétation des courbes de sondages électriques sont, pour la plupart, des courbes en fond de bateau, caractéristiques des sondages trois terrains (figure 7). On distingue ici cinq couches en fonction de la valeur de la résistivité apparente ra des formations géologiques traversées :

- la première couche est constituée de terre latéritique mélangée de graviers humides; l'épaisseur est évaluée à 1,30 m;
- la deuxième couche est constituée d'argile et de graviers, avec une épaisseur de 0,70 m;
- la troisième couche est formée de sables et de graviers secs; l'épaisseur est de 2,9 m;
- la quatrième couche est constituée d'argile sableuse de 8,10 m d'épaisseur;
- la cinquième couche enfin est constituée d'arènes granitiques, faisant 4 m d'épaisseur.

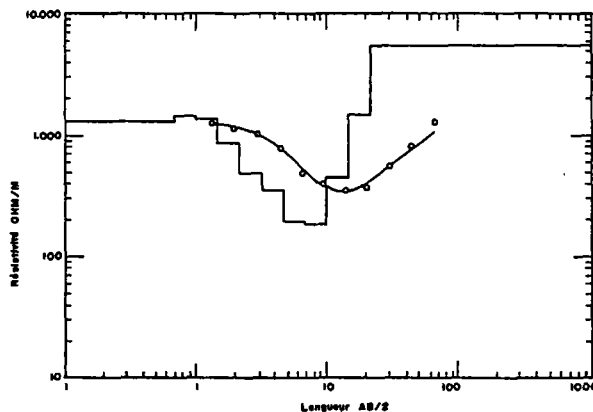


Figure 7. Courbe d'interprétation des sondages électriques dans une localité d'Odienné

Il faut noter qu'une anomalie conductrice peut produire un forage négatif en ce sens que la fracture peut contenir de la boue ou, dans d'autres cas, l'eau qui a circulé dans cette fracture a migré vers une autre zone.

Les forages réalisés sur les anomalies conductrices des fractures dans les zones favorables ont donné les résultats suivants (tableau 3) : ces résultats représentent 88 % des ouvrages réalisés dans le cadre de ce projet. Environ 12 % des ouvrages ont connu des débits inférieurs à 2 m³/h. C'est un résultat assez intéressant que nous allons continuer à vérifier sur le terrain.

Tableau 3. Quelques résultats de forages réalisés sur les anomalies conductrices des fractures

Localités	Profondeur du socle (m)	Arrivée d'eau (m)	Débit (m ³ /h)	Géologie
Mamougoula	18,24	30	10	granite à biotite
Zebenin	33,60	41,1	24	granite rose
Kodougou	27,50	46,8	2,25	gneiss
Tiemba	22,50	35	3,9	arène grenue
Karabiri	31,25	45	3,2	granite
Farakoro	7,40	36	15	granite
Tiesserila	24,22	27	6	gneiss
Nanguina	38,70	35	10,8	granite
Kongohila II	32,85	53	2,54	granite
Kongohila	25,10	35	7,2	granite à amphibole
Kimbirila-nord	48,50	50	5,4	granite
Sandjougouna	26,85	30	13,5	gneiss
N'doniegue	14,85	20	3,7	granite
Foula	30,55	32	3,4	gneiss altéré
Bohisso	27,60	37	16,2	granite
Niarala	27,10	25	2,27	granite rose
Banakoro	30,35	35	3,6	geiss
Bougoudala	30,46	40	2	gneiss
Tchigbela	47,61	55,1	4,99	gneiss
Sokorodougou	54,88	60	20	granite rose
Korondougou	24,26	30,7	6,75	gneiss
korondougou	22,31	30	5,4	gneiss
Kessedougou	20,95	30	2	gneiss gris
Kanlo	30,69	35	3	granite rose altéré
Gouya	34,30	45	3,6	granite altéré
Koba	45,24	48	4,3	granite à biotite
Gouando	27,90	30	10	granite
Missila	11	40	10,8	granite
Madiana-sokurani	17,30	40	2,16	arène grénue
Tahara	3,82	23,2	8	granite rose

4. Conclusion

Au nord-ouest de la Côte d'Ivoire, l'étude d'hydraulicité des fractures par la télédétection et le SIG met en évidence que 36 % des linéaments qui affectent le socle cristallin sont orientés N60°E contre 32 % dans la direction N130°E. Les forages à gros débit sont implantés, dans 29 % des cas, par rapport aux fractures NE-SO, contre 22 % pour les fractures N-S, moins sollicitées en hydraulique villageoise.

Les principales mégafractures de la région constituent en même temps les couloirs souterrains de circulation d'eau dans les nappes de fissures. La superposition de la carte des perméabilités induites à celle de densité de drainage laisse entrevoir une possibilité d'échange vertical entre eaux de surface et eaux souterraines au droit des mégafractures. Les cartes d'accessibilité des aquifères de la région, établies à partir de la combinaison de critères adéquats mettent en évidence les zones favorables à l'implantation des forages d'eau dans le socle.

Des travaux de vérification sur le terrain à partir des études de géophysiques menées sur les zones favorables des cartes d'accessibilité et d'exploitabilité ont permis d'avoir un résultat de 88 % de succès de forage lors d'une campagne d'hydraulique villageoise. Ce résultat montre la fiabilité des cartes thématiques élaborées à partir du système d'information hydrogéologique à référence spatiale.

Cette expérience bien que prometteuse doit être poursuivie dans plusieurs directions de recherche telles que l'impact de la nature de la formation géologique et de la variabilité climatique dans la productivité des puits. Il serait intéressant d'envisager des activités de recherche associant les techniques de télédétection, de GPS et les résultats du SIG afin d'évaluer les précisions de la méthode d'implantation des puits à partir des critères d'accessibilité et d'exploitabilité ainsi que les orientations des fractures. Cette démarche permettra de corriger les marges d'erreur qui peuvent survenir pendant les collectes et les saisies des données.

5. Remerciements

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

6. Références

- BIÉMI, J. 1992. Contribution géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'état, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 432 p.
- BROOK, G. 1988. Hydrological factors influencing well productivity in the cristalline rock regions of southeastern Georgia. *Geology*, vol. 29, p. 65-89.

- SAVANÉ, I., GOZE, B.B. et GWYN, Q.H.J., 1997. Évaluation de la productivité des ouvrages dans le socle par l'étude des fractures et le SIG dans la région nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Hard Rock Hydrosystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 1997). IAHS Publ. n° 241, p. 103-111.
- SAVANÉ, I. et BIÉMI, J., 1999. Télédétection et SIG pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, n° 1, p. 47-64.

30

Utilisation d'une image HRV(P) de SPOT pour l'étude de courants côtiers et de mouvements tourbillonnaires près des côtes du Liban

JANINE SOMMA et NADA BADARO-SALIBA

Département de géographie, Faculté des lettres et des sciences humaines, Université Saint-Joseph, B.P. 175-208, Beyrouth, Liban; téléphone: 961-1-200625; télécopie: 961-1-200631; courriel : jsomma@syfed.lb.refer.org; nsaliba@syfed.lb.refer.org

Résumé

De grands courants côtiers et des mouvements tourbillonnaires apparaissent très clairement sur une image HRV(P) de SPOT du 14 juin 1994 de la zone côtière du Liban. Dans un pays où les déchets ménagers sont entassés dans des décharges côtières et où les égouts sont évacués à même le rivage sans procédure d'assainissement, leur étude permettrait de savoir quels sont les sites les plus vulnérables à la dérive littorale des déchets et des eaux usées. L'image est d'un niveau 1A pour éviter au maximum tout lissage qui pourrait nuire à la distinction des moindres effets. Sa segmentation par seuils de comptes numériques permet de distinguer l'imbrication de deux grandes masses d'eau à mouvements inverses : nord-sud et sud-nord. Des transformées de Fourier appliquées dans différents secteurs des courants apparents indiquent que la dérive littorale est liée aux vents du jour et de la veille. Les vents dominants étant généralement sud-ouest nord-est les déchets sont entraînés vers le nord.

1. Introduction

Au Liban, l'utilisation de la mer comme site de décharge et de déversement d'égouts ou de rejets d'usines ne date pas d'hier (SANLAVILLE, 1977). Elle s'est accrue au fil des années de guerre et, bien que celle-ci soit terminée depuis près d'une dizaine d'années, les aménagements adéquats d'assainissement des eaux usées ou d'incinération des déchets n'ont pas suivi. La dérive littorale, généralement sud-nord (KAREH, 1981; SANLAVILLE,

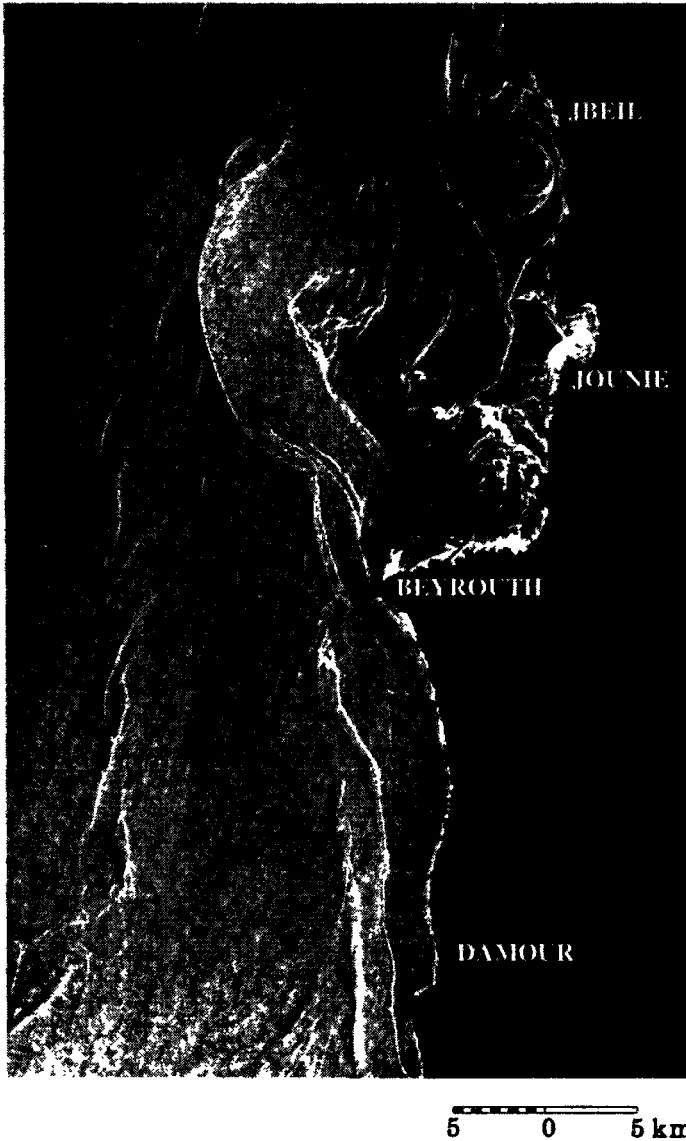
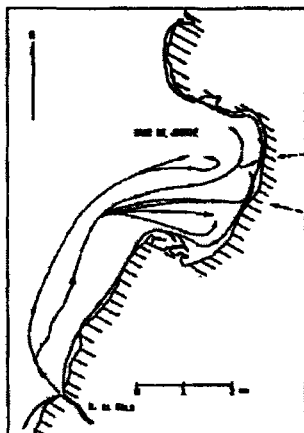


Figure 1. HRV(P) du 14 juin 1994 ; courants marins visibles; et zone (1,2,3,4) où ont été calculées les transformées de Fourier.



(Kareh 1984)

Figure 2. Courants marins.

1977), entraîne les déchets et la pollution jusqu'aux côtes turques, 600 km plus au nord. Point n'est besoin d'outils scientifiques pour s'en rendre compte : il suffit de se promener sur les plages. Cependant, certaines zones semblent plus atteintes au point que le promeneur n'ose marcher pieds nus sur le sable tant les rejets (seringues, couches, plastiques, etc.) sont abondants. Dans quelle mesure la forme de la côte, les vents et la houle interagissent-ils pour favoriser la vulnérabilité de zones plus que d'autres ? Déjà une petite recherche sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour des études environnementales (SOMMA, 1998) avait alerté sur des directions de courant importantes vers la baie de Jounié et le large (figure 1). Des études réalisées par KAREH (1984, 1985) concordaient avec l'une des directions (figure 2). Enfin, une image HRV(P) de SPOT du 14 juin 1994 mettait si bien en valeur des courants et des mouvements tourbillonnaires qu'une observation de ceux-ci s'imposait pour vérifier les premières ou leur apporter de nouveaux éléments (figure 1).

2. Zone d'étude

La zone côtière visible sur l'image HRV de juin 1994 s'étend de la région de Damour au sud jusqu'à la région de Jbeil au nord (figure 1). L'étendue marine qu'elle couvre varie selon la forme de la côte entre 20 et 30 km. Nous ne disposons malheureusement pas pour ce pays de cartes bathymétriques suffisamment détaillées pour permettre une compréhension certaine de l'influence des fonds sur le mouvement de la houle.

3. Objectifs

Dans cette étude nous tentons de répondre à un certain nombre de questions soulevées par l'observation de l'image : les différences apparentes de radiances expriment-elles des courants inverses ? Si oui, ces mouvements opposés génèrent-ils le tourbillon visible au

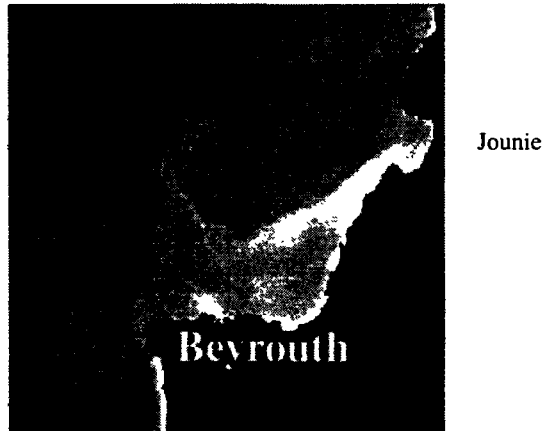


Figure 3. Courants marins sur l'image HRV(P+XS) de 1996.

large de la baie de Jbeil ? Le sens de la dérive littorale est-il tributaire des vents locaux ? Peut-on calculer l'incidence de la houle sur le rivage ? Les résultats permettront-ils de déduire des sites plus vulnérables à la dérive des déchets ? Les observations satellitaires concordent-elles avec certains résultats obtenus sur le terrain par les chercheurs précédents et suggèrent-elles des voies nouvelles d'investigation ?

4. Matériel et méthode

Si une combinaison linéaire de HRV(P + XS) de SPOT d'avril 1996 (figure 3) avait permis de mettre en évidence un courant important issu ou en direction de la baie de Jounié (SOMMA, 1998), l'essentiel des observations satellitaires de la présente étude a été effectué sur une image HRV(P) du 14 juin 1994 de la partie centrale de la zone côtière du Liban (figure 1). L'image est d'un niveau 1A pour éviter au maximum tout lissage qui pourrait nuire à la distinction des moindres effets. Les traitements ont été réalisés dans l'environnement logiciel PCI. Un des procédés utilisés pour mieux visualiser les zones d'énergie maximale et les divers mouvements de la mer a été de traiter l'image brute comme une image d'altitude et d'en dériver des images de pente et d'orientation pour, ensuite, produire des vues en perspective ou des images d'éclairement artificiel (figure 4 : a et b). Des transformées de Fourier ont été appliquées dans des secteurs-clés des zones marines homogènes de l'image (figure 1) pour déterminer les directions des houles et des trains de vagues (MOIK, 1980; ROBIN, 1998). Afin d'évaluer les longueurs d'onde de ces divers mouvements, nous avons conservé les composantes dominantes du spectre de Fourier. Sur chacune de celles-ci, la transformée inverse a été effectuée. Il en résulte une image d'ondulations sur laquelle une moyenne de distance entre chaque crête a pu être calculée. Cette distance correspond à la longueur d'onde moyenne. Nous disposions également d'une image TM de Landsat d'avril 1984. La HRV(P) de 1994 a été accordée géométriquement au canal 6 (IRT) de cette dernière. Pour ce qui est des données relatives au vent, il ressort, que le 14 juin, le vent avait une vitesse moyenne de 3,9 m/s et une direction de 237°. La veille, la vitesse moyenne était de 4,4 m/s et la direction de 214,7° (observatoire de l'Université américaine de Beyrouth).

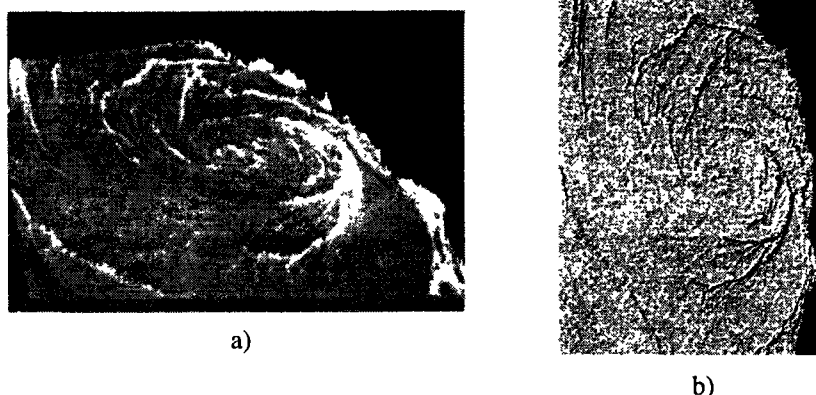


Figure 4. Tourbillon de la baie de Jbeil (HRV(P), juin 1994; a) vue en perspective; b) éclaircissement artificiel.

5. Résultats

Une première observation de la houle a été faite sur une zone (1 sur figure 1) à 13 km au large, distance où la bathymétrie n'engendre pas encore la réfraction des trains de vagues. La transformée de Fourier, effectuée sur un extrait de 512 x 512 pixels, montre l'existence de 4 pics correspondant chacun à une composante de houle (figure 5). Les deux premières composantes (figure 5 : b, c) sont les plus énergétiques et viennent probablement de loin car elles ne coïncident pas avec la direction des vents tandis que les deux dernières (figure 5 : d, e), plus faibles, sont, elles, probablement générées par les vents locaux. En effet, elles ont des directions correspondant aux vents du jour et de la veille (tableau 1). Un autre extrait de la houle plus proche du rivage (2 sur figure 1) montre que les orthogonales de houle se réfractent et ont tendance à se positionner perpendiculairement aux isobathes telles que cartographiées sur la carte topographique au 1 : 50 000. Les résultats des calculs effectués sont exprimés dans le tableau 2. Les zones 3 et 4 de la figure 3 se situent dans des plages de radiances différentes. Leurs transformées de Fourier (figure 6 : a et b) indiquent respectivement une direction générale de courant de 314° et 214° .

6. Discussion

L'angle d'incidence de la houle pour la zone 2 engendre une dérive littorale sud-nord. En effet, on constate que trois de ses composantes (2, 3, 4) se situent dans le quadrant sud-ouest et que leur angle d'incidence avec la plage génère un courant de dérive vers le nord plus important que le courant de dérive vers le sud qu'engendrerait la première composante. Le courant (4) pourrait être causé par cette dérive sud-nord tandis que le courant (3) semble s'imbriquer dans ce dernier. En effet, la transformée de Fourier de la zone (3) montre que la composante du vent de la veille a disparu. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cette zone est protégée du vent par le cap de Beyrouth. L'absence de l'influence du vent de la veille pourrait expliquer l'inversion du courant (3) par rapport au courant (4). SANLAVILLE

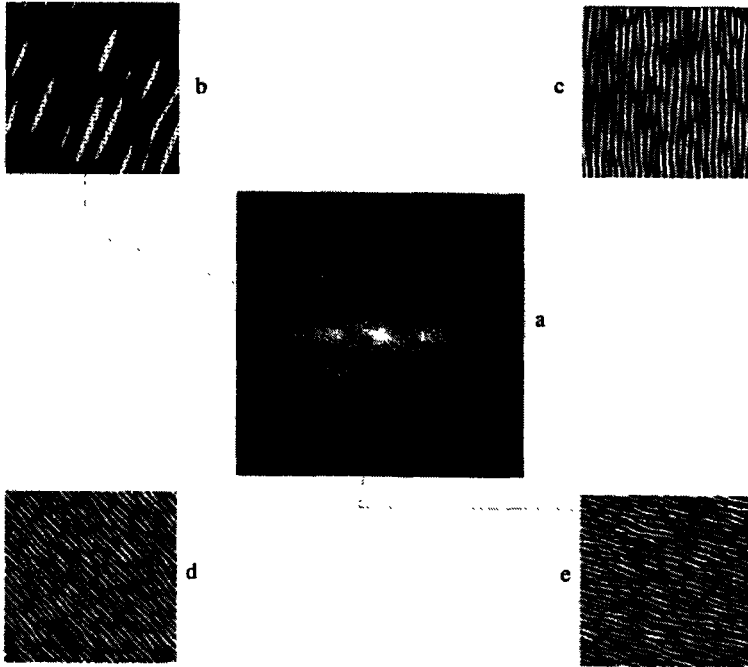


Figure 5. Transformée de Fourier de la zone 1; composantes 1 (b), 2 (c), 3 (d) 4 (e).

Tableau 1. Composantes de la transformée de Fourier de la zone 1

Composante	Longueur d'onde (m)	Direction	Angle avec la plage
1	140	314°	45°
2	60	284°	15°
3	36	237°	32°
4	40	214°	55°

Tableau 2. Composantes de la transformée de Fourier de la zone 2

Composante	Longueur d'onde (m)	Direction	Angle avec la plage
1	100	306°	37°
2	60	264°	5°
3	36	244°	15°
4	40	219°	50°

(1977) notait la présence de courants de sens opposés au niveau de Chekka (hors image) à quelques kilomètres au nord de Jbeil. De plus, le canal infrarouge thermique de la TM de 1984 montre, dans l'eau, deux grandes zones de températures différentes dont la limite ressemble étrangement à celles des deux masses d'eau de sens opposés citées ci-dessus (figure 7 : a et b) bien que décalée par rapport à celles-ci. Le tourbillon visible sur les côtes de Jbeil est vraisemblablement entraîné par l'opposition entre le courant (3) et la dérive

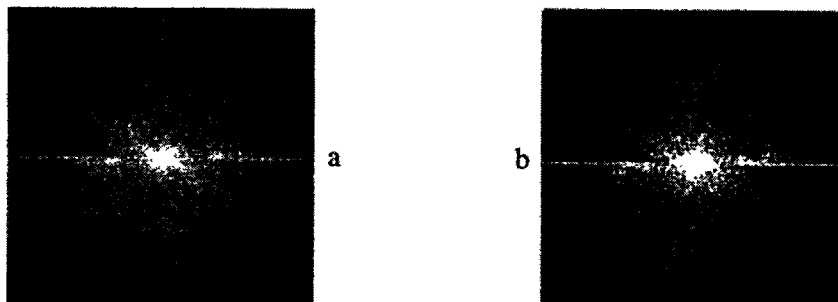


Figure 6. Transformées de Fourier des zones 3 (a) et 4 (b).

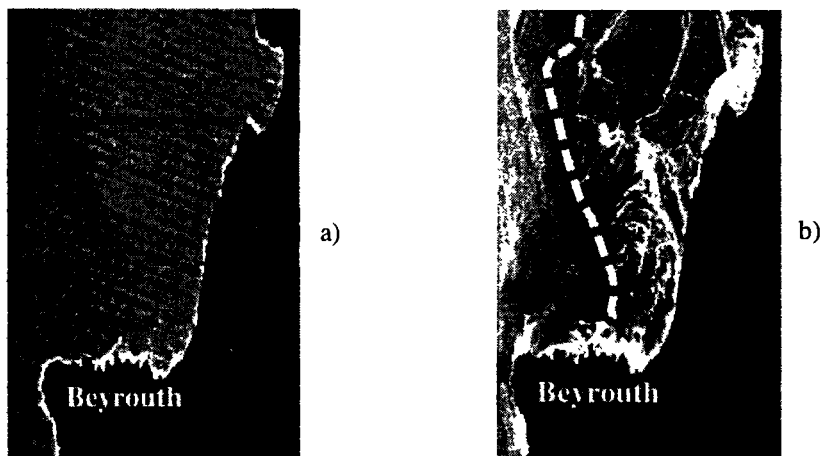


Figure 7. a) TM (avril 1994), canal 6 : zone de T° différentes; b) report de la limite de T° sur un extrait de la HRV(P) de juin 1994

littorale de la région de Jounié cartographiée par KAREH (1984). Les images mises en perspective simulent un relief de la surface marine et les images éclairées artificiellement permettent de mieux visualiser les zones d'énergie maximum.

7. Conclusion

La télédétection reste un outil valable d'investigation : elle a permis, en effet, de confirmer l'existence de deux grands courants opposés et d'observer que la dérive littorale est en relation avec les vents du jour et de la veille. Les déchets et la pollution de toute sorte dérivent donc vers le nord de Beyrouth en raison des vents dominants qui sont généralement sud-ouest nord-est. Ces déchets sont soit entraînés vers le large si pris par le courant 4, soit évoluent le long de la côte si mobilisés par la dérive littorale. Jounié reste à l'instar des recherches de KAREH (1984 et 1985) une des zones les plus affectées. Le mouvement tourbillonnaire face à Jbeil mériterait des observations plus poussées tant pour connaître son action érosive sur le littoral que pour savoir si les déchets sont maintenus dans cette zone par le vortex.

8. Références

- KAREH, G. 1981. Le Nil et les sédiments côtiers du Liban. *Annales de géographie de l'Université Saint-Joseph, Beyrouth*, vol. 2, p. 69-96.
- KAREH, G. 1984. Caractéristiques sédimentologiques de la côte libanaise et de son plateau continental. *Annales de géographie de l'Université Saint-Joseph, Beyrouth*, vol. 5, p. 82-182.
- KAREH, G. 1985. Caractéristiques sédimentologiques de la côte libanaise et de son plateau continental entre les baies de Jounié et de St-Georges (2ème partie). *Annales de géographie de l'Université Saint-Joseph, Beyrouth*, vol. 6, p. 79-221.
- MOIK, J.G. 1980. Digital processing of remotely sensed images. National Aeronautics and Space Administration, Washington, 330 p.
- ROBIN, M. 1998. Détermination de l'énergie des houles et de leur capacité à générer une dérive littorale à l'aide d'une image Spot par transformée de Fourier. Exemple de Grand Lahou, République de Côte d'Ivoire. *Cahiers Nantais*, n° 49, p. 127-137.
- SANLAVILLE, P. 1977. Étude géomorphologique de la région littorale du Liban. *Publications de l'Université Libanaise, Beyrouth*, 2 tomes, 859 p.
- SOMMA, J. 1998. Utilisation de la télédétection satellitaire pour l'observation de la dégradation de l'environnement. Communication au Colloque sur le droit de l'environnement, École supérieure des ingénieurs de Beyrouth, février 1998.