

Sous la direction de

Jean-Marie M. Dubois

Mohamed Rached Boussema

François Boivin

Pierre Lafrance

AS

actualité scientifique

TÉLÉDÉTECTION
DES RESSOURCES
EN EAU



Actes des Journées scientifiques
de Tunis
1993

AUPELF



Presses de l'Université du Québec



TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES EN EAU

Dans la même collection :

BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de télédétection, Volume 1, Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, Québec, 486 p.

DUBOIS, J.-M.M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (réd.) 1993. Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Québec, 422 p.

DUBOIS, J.-M. M. et BLASCO, F. (réd.) 1993. Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Québec, 492 p.

LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. M. (réd.) 1990. Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Série Actualité scientifique, John Libbey Eurotext, Paris, 320 p.

DUBOIS, J.-M. M. et LAFRANCE, P. (réd.) 1989. Télédétection en francophonie : bilans régionaux et thématiques. Série Actualité scientifique, John Libbey Eurotext, Paris, 130 p.

Diffusion de la collection selon les pays :

France et Maghreb :

Ellipses

32, rue Bague

75015 Paris, France

Téléphone : +33 (1) 45-67-74-19

Télécopieur : +33 (1) 47-34-67-94

Canada :

Presses de l'Université du Québec

2875, boul. Laurier

Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 2M3

Téléphone : +1 (418) 657-4390

Télécopieur : +1 (418) 657-2096

D. P. L. U.

5165, rue Sherbrooke Ouest, bureau 112

Montréal, Québec, Canada, H4A 1T6

Téléphone : +1 (514) 484-3940

Télécopieur : +1 (514) 484-9325

Autres pays :

Hachette Diffusion Internationale (H. D. I.)

58, rue Jean-Bleuzen

92178 Vanves cedex, France

Téléphone : +33 (1) 46-62-10-10

Télécopieur : +33 (1) 40-95-10-39 ou (1) 40-95-19-75

TÉLÉDÉTECTION

DES RESSOURCES EN EAU

Cinquièmes journées scientifiques
du « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF,
Tunis, 21-24 septembre 1993

COMITÉ SCIENTIFIQUE ET DE LECTURE :

- Jean-Marie Dubois (coresponsable de l'édition)
- Mohamed Rached Boussema (coresponsable de l'édition)
- François Boivin (coresponsable de l'édition)
- Pierre Lafrance (coresponsable de l'édition)
- Abdelkader Abdellaoui
- Régis Caloz
- Nouredine Ennabli
- Hugh Gwyn
- Ali Hamza
- Mohamed Chedly Rabia
- Diadié Traoré
- Fernand Verger
- Fouad Zargouni

1995

Presses de l'Université du Québec
2875, boulevard Laurier
Sainte-Foy (Québec) Canada
G1V 2M3

AUPELF • UREF
B.P. 400, succ. Côte-des-Neiges
Montréal (Québec) Canada
H3S 2S7

Données de catalogage avant publication (Canada)

UREF, Réseau de télédétection. Journées scientifiques
(5^{es}: 1993: Tunis, Tunisie)

Télédétection des ressources en eau : cinquièmes Jour-
nées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-
UREF, Tunis, 21-24 septembre 1993

(Collection Actualité scientifique)

Comprend des réf. bibliogr.

Public. en collab. avec : AUPELF-UREF

ISBN 2-7605-0828-5

1. Hydrologie – Télédétection – Congrès. 2. Télédé-
tection – Congrès. 3. Désertification – Télédétection –
Congrès. 4. Bassins hydrographiques – Télédétection –
Congrès. 5. Littoral – Télédétection – Congrès. 6. Im-
ages-satellite – Congrès. I. Dubois, J. M. M. (Jean Marie
Maurice), 1944- . II. Association des universités
partiellement ou entièrement de langue française.
III. Titre. IV. Collection.

GB656.2 R44U74 1993

628.1'14

C95-941878-4

ISBN 2-7605-0828-5

*Tous droits de reproduction, de traduction
et d'adaptation réservés* © 1995
Presses de l'Université du Québec

Dépôt légal – 4^e trimestre 1995
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
Imprimé au Canada

Sommaire

Liste des participants et auteurs	XI
Introduction Jean-Marie Dubois, Mohamed Rached Boussema, François Boivin et Pierre Lafrance	XIX
Partie I. Bassins versants et érosion hydrique	1
1. Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien à l'aide de la télédétection satellitaire. Aichouche Belhadj-Aissa et Youcef Smara	3
2. Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un système d'information géographique (rivière Eaton, Québec). Hédia Chakroun, Ferdinand Bonn et Jean-Pierre Fortin	11
3. Contribution de la télédétection à l'optimisation et à la maintenance d'un réseau d'assainissement des eaux : application à la ville d'Oran (Algérie). Youcef Messar et Nadia Messar	21
4. Influence des failles actives sur les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay (nord du Viêt Nam). Trinh Phan-Trong	31
5. Intégration de la pente lors du processus de segmentation des images satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol : résultats préliminaires. Jacynthe Pouliot, Keith Thomson, Jean-Jacques Chevallier, Martina Chumova et Mohamed Rached Boussema	43
6. Hydrologie et télédétection : utilisation d'un découpage géographique selon la végétation pour expliquer les écoulements annuels de petits bassins versants méditerranéens. Christian Puech, Pascal Vine et Uruya Weesakul	53

Partie II. Eaux de surface et eaux souterraines	63
7. L'imagerie satellitaire pour l'étude des réservoirs : applications à la retenue du barrage de Sidi Salem (Tunisie). Abdallah Ben Mammou et Mohamed Chedly Rabia	65
8. Méthode d'exploitation de l'imagerie radar aéroportée en zone de montagne pour les ressources en eau : applications en nivologie et en hydrogéologie (exemple du site des Arcs, Savoie, France). Jean-Pierre Dedieu, Michel Fily et Frédéric Leone	79
9. Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface au Burkina Faso. Yazon Gnoumou, Michel Yergeau, Goze Bertin Bénié, Karim Traoré, Hédia Chakroun, Kalifa Goïta et Abdoulrasmane Tao	99
10. Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin : cas d'Odienné, Côte-d'Ivoire. Issiaka Savané, Goze Bertin Bénié, Q. Hugh J. Gwyn et Jean Biémi	111
11. Systèmes d'information géographique, télédétection et gestion des ressources en eau : des outils pertinents pour une problématique de taille. Marie-Hélène de Sède, Régis Caloz, Roland Prélaz-Droux, Christophe Claramunt et Laurence Vidale	121
12. Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration de matières en suspension : exemple du fleuve Sénégal. Luc Séguis	135
Partie III. Humidité des sols	151
13. Utilisation de la radiothermométrie IR pour une meilleure gestion des ressources en eau d'irrigation au Maroc. Kamal Belabbes et Bernard Itier	153
14. Cartographie de l'occupation du sol et des zones humides par télédétection dans la basse vallée de la Medjerda (Tunisie). Abdelkader El Garouani, Mohamed Ennabli et Mohamed Rached Boussema ...	163
15. Évaluation de la consommation d'eau d'un espace irrigué, par interprétation d'images satellitaires : cas de la vallée du Taje (centre de l'Espagne). Javier Garcia-Abad, José Sancho et Fernando Moreno	171
16. Caractérisation du comportement hydrique des sols dans un couloir fluvial à l'aide de données multidates TM de Landsat : vallée de la Garonne (France). Étienne Muller et Magali James	181
17. Suivi des ressources hydriques de la zone méditerranéenne du nord : premiers résultats du projet HYDRE. Jürgen Vogt et Paul Vossen	193

Partie IV. Littoral	203
18. Caractérisation du panache turbide d'un fleuve en zone intertropicale à l'aide d'une image HRV de SPOT : cas du Bandama en Côte-d'Ivoire. Kouadio Affian, Patrice Jourda, Kouame Aka et Jacques Abé	205
19. Étude par télédétection des paramètres physiques au parc national de l'Ichkeul (Tunisie). Mohamed Rached Boussema, Mohamed Fadhel Megdiche, Samira Raïs et Régis Caloz	215
20. Évolution morphodynamique et suivi par télédétection de l'embouchure du fleuve Sénégal. Alioune Kane	223
21. Apport des images RAS de ERS-1 dans l'étude de la houle et de son influence sur le transit sédimentaire littoral. André Ozer, Yves Cornet et Anne-Lise Comhaire	237
22. Apport de la télédétection pour l'évaluation de l'impact des ouvrages maritimes sur l'environnement littoral : cas de la région de la Jeffara orientale (Tunisie). Mohamed Chedly Rabia et Amor Klai	251
Partie V. Sécheresse et désertification	261
23. Propriétés spectrales des surfaces et télédétection des variations spatiales et temporelles de l'infiltrabilité de sols arides (Menzel Habib, Tunisie). Richard Escadafal, Roger Pontanier et Abderrazak Belghith	263
24. Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification dans le secteur sahélien du Niger. Salifou Karimoune, André Ozer, Philippe Tréfois et Els Goossens	273
25. Détection et classification automatique de maladies forestières. Mohammed Khamadja, Atila Baskurt et Robert Goutte	283
26. La sécheresse de 1990-1991 et de 1991-1992 à Madagascar vue à partir des images infrarouges Météosat et les données conventionnelles. Simone Randriamanga, Jean-Paul Lahuec, Dominique Dagherne, Jeanine Pennarun et Bernard Guillot	291

Préface

La diffusion de l'information scientifique et technique est un facteur essentiel du développement. Aussi dès 1988, l'Agence francophone pour l'enseignement supérieur et la recherche (AUPELF-UREF) mandatée par les Sommets francophones pour produire et diffuser revues et livres scientifiques, a créé la collection « Universités francophones ».

Lieu d'expression de la communauté scientifique de langue française, Universités francophones vise à instaurer une collaboration entre enseignants et chercheurs francophones en publiant les ouvrages, coédités avec les éditeurs francophones, et largement diffusés dans les pays du Sud grâce à une politique tarifaire préférentielle.

Quatre séries composent la collection :

- Les manuels : cette série didactique est le coeur de la collection. Elle s'adresse à un public de deuxième et troisième cycles universitaires et vise à constituer une bibliothèque de référence couvrant les principales disciplines enseignées à l'université.
- Sciences en marche: cette série se compose de monographies qui font la synthèse des travaux de recherche en cours.
- Actualité scientifique : dans cette série sont publiés les actes de colloques organisés par les réseaux thématiques de recherche de l'UREF.
- Perspectives francophones : s'inscrivent dans cette série des ouvrages de réflexion donnant l'éclairage de la Francophonie sur les grandes questions contemporaines.

Notre collection, en proposant une approche plurielle et singulière de la science, adaptée aux réalités multiples de la Francophonie, contribue efficacement à promouvoir la recherche dans l'espace francophone et le plurilinguisme dans la recherche internationale.

Professeur Michel GUILLOU
Directeur général de l'AUPELF
Recteur de l'UREF

Liste des participants et auteurs

Abdellaoui, Abdelkader, M 229, cité Baïnem, 16060 Hammamat, Alger, Algérie

Abe, Jacques, Centre de recherches océanologiques, 01 B.P. V18, Abidjan, Côte-d'Ivoire

Affian, Kouadio, Département des sciences de la terre, Faculté des sciences et techniques, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire

Aissaoui, Mustapha, Direction générale de l'aménagement du territoire, Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire, 32, rue de la Monnaie, 1001 Tunis, Tunisie

Aka, Kouamé, Département des sciences de la terre, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire

Aouni, Lamine, Centre national de télédétection, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie

Aureli, Alice, Division des sciences de l'eau, UNESCO, 1, rue Miollis, 75015 Paris, France

Bacha, Sinan, Centre national de télédétection, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie

Barbieri, Marco, Centre des activités régionales pour les aires spécialement protégées, 15, rue Ali Ibn Taleb, 1002 Tunis, Tunisie

Bargaoui, Zoubeida, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie

Baskurt, Atilla, Laboratoire de traitement du signal et ultrasons, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 20, avenue Einstein, 69621 Villeurbanne cedex, France

Belabbes, Kamal, Département de l'équipement et de l'hydraulique, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc

Belghith, Abderrazak, Centre national de télédétection, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie

- Belhadj-Aissa, Aichouche**, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El Alia - Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algérie
- Ben Mammou, Abdallah**, Département de géologie, Faculté des sciences de Tunis, Université de Tunis II, Campus universitaire, 1060 Tunis, Tunisie
- Bénié, Goze Bertin**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Bennour, Fadhel**, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Biémi, Jean**, Département des sciences de la terre, Faculté des sciences et techniques, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire
- Boivin, François**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Bonn, Ferdinand**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Bouajina, Adel**, Geosurvey, 32, avenue Menzel Bourguiba-3, Tunis, Tunisie
- Bouhlila, Rachida**, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Boussema, Mohamed Rached**, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Caloz, Régis**, DGR-SIRS, École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse
- Chakroun, Hédia**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Charfi, Moncef**, École nationale d'ingénieurs de Sfax, Route de Soukra, B.P. W, 3038 Sfax, Tunisie
- Charfi, Olfa**, 17, avenue Ahmed Telili, 1004 Menzah V, Tunis, Tunisie
- Cherif, Fethi**, Direction générale de l'aménagement du territoire, Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire, 32, rue de la Monnaie, 1001 Tunis, Tunisie
- Chevallier, Jean-Jacques**, Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4, Canada
- Chihaoui, Mohamed Tahar**, Institut supérieur technologique des industries et des mines de Gafsa, Cité des Jeunes, 2119 Gafsa, Tunisie
- Chikh, Mohamed**, Centre national des techniques spatiales, 1, avenue de la Palestine, B.P. 13, 31200 Arzew, Oran, Algérie
- Chumova, Martina**, Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4, Canada

- Claramunt, Christophe**, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CE - Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse
- Cliche, Gilles**, Centre de recherches pour le développement international, 250, rue Albert, C.P. 8500, Ottawa, Ontario, K1G 3H9, Canada
- Comhaire, Anne Lise**, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, bâtiment B-11, allée du 6 Août, 2, 4000 Liège, Belgique
- Cornet, Yves**, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, bâtiment B-11, allée du 6 Août, 2, 4000 Liège, Belgique
- Dagorne, Dominique**, Antenne ORSTOM, Centre de météorologie spatiale, B.P. 134, 22302 Lannion, France
- de Sède, Marie-Hélène**, Projet Germinal, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, GR - Ecublens, CH - 1015 Lausanne, Suisse
- Dedieu, Jean-Pierre**, Laboratoire de la montagne alpine, Institut de géographie alpine, Université Joseph Fourier (Grenoble I), 17, rue Maurice-Gignoux, 38031 Grenoble cedex, France
- Dubois, Jean-Marie**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- El Garouani, Abdelkader**, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Ennabli, Mohamed**, Agence nationale de protection de l'environnement, 12, avenue Khéreddine Pacha, B.P. 52, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Ennabli, Noureddine**, Département de génie rural, Institut national agronomique de Tunis, 43, avenue Charles Nicolle, 1004 Tunis, Cité Mahrajène, Tunisie
- Escadafal, Richard**, Institut des applications de la télédétection, bâtiment 44, Centre commun de recherche, EMAP Unit/T.P. 442, I-21020 Ispra (Varese), Italie
- Fily, Michel**, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, 54, rue Molière, Domaine universitaire, B.P. 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex, France
- Fortin, Jean-Pierre**, INRS-Eau, Institut national de la recherche scientifique, 2800, rue Einstein, suite 105, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7, Canada
- Foucher, Bernard**, 1226, rue Ste-Élizabeth, Montréal, Québec, H2X 3C4, Canada
- García-Abad Alonso, Juan Javier**, Departamento de geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Calle Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares (Madrid), Espagne
- Garry, Gérald**, Division des techniques pour l'urbanisme, Service technique de l'urbanisme, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, Grande Arche de la Défense, 92055 Paris-La-Défense cedex 04, France

- Ghanmi, Mohamed**, Office national des mines, Service géologique national, 95, avenue Mohamed V, 1002 Le Belvédère, Tunis, Tunisie
- Gnomou, Yazon**, Direction de l'inventaire des ressources hydrauliques, Projet bilan d'eau, Ministère de l'Eau, 03 B.P. 7025, Ouagadougou, Burkina Faso
- Goïta, Kalifa**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Goossens, Els**, Laboratoire de télédétection, Faculté d'agriculture, Université de Gand, Coupure Links 653, 9000 Gent, Belgique
- Goutte, Robert**, Laboratoire du traitement du signal et ultrasons, URA 1216, Institut national des sciences appliquées de Lyon, bâtiment 502, 20, avenue Einstein, 69621 Villeurbanne cedex, France
- Gueddari, Moncef**, Faculté des sciences de Tunis, Campus universitaire, 1002 Tunis, Tunisie
- Guillot, Bernard**, Antenne ORSTOM, Centre de météorologie spatiale, B.P. 134, 22302 Lannion, France
- Gwyn, Q. Hugh J.**, Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada
- Haddaïne, Mourad**, Cité du 08 mai 1945, bâtiment 22, app. 29, Bab Ezzouar, Alger, Algérie
- Hamza, Ali**, Département de génie rural, Institut national agronomique de Tunis, 43, avenue Charles-Nicollé, 1004 Tunis, Cité Mahrajène, Tunisie
- Itier, Bernard**, Station de bioclimatologie-télédétection, Institut national de la recherche agronomique, 78850 Thiverval-Grignon, France
- James, Magali**, Centre d'écologie des systèmes fluviaux, Centre national de la recherche scientifique, 29, rue Jeanne-Marvig, 31055 Toulouse cedex, France
- Jourda, Jean Patrice**, Département des sciences de la terre, Faculté des sciences et techniques, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire
- Kane, Alioune**, Département de géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar-Fann, Sénégal
- Karimoune, Salifou**, École normale supérieure, Université Abdou Moumouni, B.P. 10963, Niamey, Niger
- Khamadja, Mohamed**, Institut d'électronique, Université de Constantine, route d'Ain El Bey, 25000 Constantine, Algérie
- Klaï, Amor**, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 67, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Koussoubé, Youssouf**, Centre ORSTOM de Ouagadougou, 01 B.P. 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso

- Laborde, Jean-Pierre**, Laboratoire d'analyse spatiale Raoul-Blanchard, Université de Nice-Sophia Antipolis, 98, boulevard Édouard-Herriot, B.P. 209, 06204 Nice cedex 3, France
- Lahuec, Jean-Paul**, Antenne ORSTOM - Centre de météorologie spatiale de Lannion, B.P. 147, 22302 Lannion, France
- Larouche, Pierre**, Institut Maurice-Lamontagne, Ministère des Pêches et des Océans, B.P. 1000, Mont-Joli, Québec, G5H 3Z4, Canada
- Leone, Frédéric**, Laboratoire de la montagne alpine, Institut de géographie alpine, Université Joseph-Fourier, 15, rue Maurice-Gignoux, 38031 Grenoble cedex, France
- Makhlouf, Amel**, Institut des Nations unies pour la formation et la recherche (UNITAR), Palais des Nations, CH-1211, Genève 10, Suisse
- Mammou, Ahmed**, Direction générale des ressources en eau, Ministère de l'Agriculture, 43, Saida Manoubia, 1008 Tunis, Tunisie
- Marceau, Danielle J.**, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada
- Mathlouthi, Samir**, Département de géographie, Faculté des lettres de Manouba, Université des lettres, des arts et des sciences humaines (Tunis I), 2010 Manouba, Tunis, Tunisie
- Mbarek, Jemaïel**, Société nationale d'exploitation et de distribution des eaux, 23, rue Jawaher LeL Nehru, Montfleury, B.P. 1300, Tunis 1055, Tunisie
- Megdiche, Mohamed Fadhel**, Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Mellouli, Mohamed**, Direction générale, Ministère de l'Agriculture, 30, rue Alain-Savary, B.P. 1002, Tunis, Tunisie
- Messar, Nadia**, Laboratoire de télédétection, Centre national des techniques spatiales, 1, avenue de la Palestine, B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie
- Messar, Youcef**, Laboratoire de télédétection, Centre national des techniques spatiales, 1, avenue de la Palestine, B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie
- Mlaouhi, Ali**, Direction de la conservation des eaux et du sol, Ministère de l'Agriculture, 30, rue Alain-Savary, B.P. 1002, Tunis, Tunisie
- Moreno, Fernando**, Departamento de geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Calle Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares (Madrid), Espagne
- Mtimet, Amor**, Direction des sols, Ministère de l'Agriculture, 30, rue Alain-Savary, 1002 Tunis, Tunisie
- Muller, Étienne**, Centre d'écologie des systèmes fluviaux, 29, rue Jeanne-Marvig, 31055 Toulouse cedex, France
- Nemiri, Abdelwaheb**, Institut national de météorologie, B.P. 156, 2035 Tunis-Carthage, Tunisie

- Orban-Ferauge, Françoise**, Laboratoire GÉOSATEL, Département de géographie, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique
- Ozer, André**, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Institut de géographie, Université de Liège, bâtiment B-11, allée du 6 Août, 2, 4000 Liège, Belgique
- Padonou, Nourou Moucharaf**, Centre régional de télédétection de Ouagadougou, 01 B.P. 1762, Ouagadougou 01, Burkina Faso
- Pennarun, Jeannine**, Antenne ORSTOM, Centre de météorologie spatiale, B.P. 134, 22302 Lannion, France
- Phan-Trong, Trinh**, Laboratoire de géodynamique, Institut de géologie, Centre national des sciences naturelles et de technologie, Nghia do-Tu liem, Hanoi, Viêt-nam
- Pontanier, Roger**, Mission ORSTOM en Tunisie, B.P. 434, 1004 El Menzah, Tunis, Tunisie
- Pouliot, Jacynthe**, Centre de recherche en géomatique, Pavillon Casault, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4, Canada
- Prélaç-Droux, Roland**, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CE - Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse
- Puech, Christian**, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, Maison de la télédétection en Languedoc-Roussillon, 500, rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 05, France
- Rabia, Mohamed Chedly**, Centre des sciences de la terre, Institut national de la recherche scientifique et technique, B.P. 95, 2050 Hammam Lif, Tunisie
- Rais, Samira**, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
- Randriamanga, Simone**, Unité d'enseignement et de recherche de géographie, Université d'Antananarivo, B.P. 907, 101 Antananarivo, Madagascar
- Rasson, Jean-Paul**, Département de mathématiques, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, 8, rempart de la Vierge, 5000 Namur, Belgique
- Rougier, Christophe**, 2, boulevard Savari, app. 166, 86000 Poitiers, France
- Rouis, Jamel Eddine**, Direction générale de l'aménagement du territoire, Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire, 32, rue de la Monnaie, 1001 Tunis, Tunisie
- Sahli, Thouraya**, Centre national de télédétection, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie
- Sahnoun, Mohamed Hedi**, 45 A, boulevard Jourdan, 75014 Paris, France
- Sancho, Jose**, Departamento de geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Calle Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares (Madrid), Espagne
- Sarbaji, Mohamed Moncef**, École nationale d'ingénieurs de Sfax, route de Soukra, B.P. W, 3038 Sfax, Tunisie

- Savané, Issiaka**, Département de géologie appliquée et télédétection, Institut d'écologie tropicale de Côte-d'Ivoire, 08 B.P. 109, Abidjan 08, Côte-d'Ivoire
- Séguis, Luc**, ORSTOM-Centre de Dakar, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal
- Smara, Youcef**, Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El Alia - Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algérie
- Tahri, Mostafa**, Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Institut, Maroc
- Talbi, Mohamed**, Laboratoire de cartographie et de télédétection, Institut des régions arides, Secrétariat d'État à recherche scientifique et à la technologie, 4119 Medenine, Tunisie
- Tao, Abdoulrasmane**, Projet bilan d'eau, Direction de l'inventaire des ressources hydrauliques, Ministère de l'Eau, 03 B.P. 7025, Ouagadougou 03, Burkina Faso
- Tekari, Mohamed Habib**, Société nationale d'exploitation et de distribution des eaux, 23, rue Jawaher Lel Nehru, Montfleury, B.P. 1300, Tunis 1055, Tunisie
- Thomson, Keith P. B.**, Centre de recherche en géomatique, Pavillon Casault, Université Laval, Ste-Foy, Québec, G1K 7P4, Canada
- Tlemceni, Hela**, Direction générale de l'aménagement du territoire, Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire, 32, rue de la Monnaie, 1001 Tunis, Tunisie
- Traore, Diadié**, Direction nationale de la cartographie et de la topographie, Ministère des Travaux publics, de l'Urbanisme et de la Construction, B.P. 78, Bamako, Mali
- Traoré, Karim**, Direction régionale de l'eau des hauts-bassins, B.P. 179, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso
- Trefois, Philippe**, Département de géologie, Musée royal de l'Afrique centrale, chaussée de Louvain, 13, B-3080 Tervuren, Belgique
- Verger, Fernand**, École normale supérieure, 45, rue d'Ulm, F-75005 Paris, France
- Vidale, Laura**, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CE - Ecublens, CH-1015 Lausanne, Suisse
- Viné, Pascal**, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, Maison de la télédétection en Languedoc-Roussillon, 500, rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 05, France
- Vogt, Jürgen**, Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche, Commission des communautés européennes, TP 440, 21020 Ispra (VA), Italie
- Vossen, Paul**, Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche d'Ispra, Commission des communautés européennes, TP 440, 21020 Ispra (Varese), Italie
- Weesakul, Uruya**, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 648, rue Jean-François Breton, B.P. 5093, 34033 Montpellier cedex 01, France

Willemin Mallet, Guillemette, Hydrologie et aménagements, Institut d'aménagement des terres et des eaux, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, GR - Ecublens, CH - 1015 Lausanne, Suisse

Yergeau, Michel, Société d'initiatives et de ressources alternatives, 916, rue de Courcelette, Sherbrooke, Québec, J1H 3X7, Canada

Zargouni, Fouad, Département de géologie, Faculté des sciences de Tunis, Campus universitaire, 1002 Tunis, Tunisie

Ziadi, Khélifa, Direction de la conservation des eaux et du sol, Ministère de l'Agriculture, 30, rue Alain-Savary, B.P. 1002, Tunis, Tunisie

Introduction

Le « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF a maintenant plus de sept ans d'existence et il en est déjà à ses sixièmes journées scientifiques. Toutes ces journées ont été un succès, que ce soit celles sur les bilans régionaux et thématiques en Francophonie (Sherbrooke, 1988), sur les apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse (Thiès, 1989), sur les outils micro-informatiques et la télédétection de l'évolution des milieux (Toulouse, 1990), sur la télédétection et la cartographie thématique et topographique (Montréal, 1991), ou sur la télédétection des ressources en eau (Tunis, 1993) ainsi que maintenant celles qui viennent d'être tenues, à Liège en 1995, sur la télédétection des milieux urbains et périurbains. Avec cette série de journées scientifiques en plus des nombreuses activités de recherche partagée, de formation et d'information scientifique et technique, on peut vraiment affirmer que le Réseau Télédétection est maintenant bien implanté au sein de l'AUPELF-UREF.

Les journées scientifiques de Tunis ont réuni 90 personnes de 16 pays différents et on y a donné 28 communications orales, 11 communications par affiche et une table ronde. Les textes de 26 de ces communications, acceptés par le Comité de lecture, se retrouvent dans les actes.

Le thème des journées scientifiques de Tunis a été choisi parce qu'il constituait une suite logique aux activités de recherche du Réseau en présentant une mise au point sur un des thèmes importants de recherche partagée, soit celui de la télédétection des ressources en eau.

L'évolution sans cesse croissante des techniques aérospatiales et de l'informatique, les besoins importants en matière de connaissance et de gestion des ressources marines et terrestres font aujourd'hui de la télédétection un outil puissant qu'il faut maîtriser et développer. Ces besoins touchent un grand nombre de disciplines tout comme la recherche en eau.

L'eau est au centre de la problématique de nombreux phénomènes. Dans certaines régions de notre planète, elle devient de plus en plus rare et nécessite beaucoup d'efforts pour la gérer et la valoriser. En particulier, il est nécessaire de bien connaître et de maîtriser l'état des ressources en eau afin d'améliorer les conditions de leur utilisation.

Les applications de la télédétection aux ressources en eau intéressent tous les pays, en particulier ceux qui sont confrontés à des problèmes de sécheresse et à une très forte dégradation due à la pollution ou à des aménagements mal conduits.

Les journées scientifiques avaient cinq objectifs qui ont été rencontrés, soit de :

- 1) permettre aux chercheurs de présenter des méthodes originales d'extraction de l'information des images de télédétection;
- 2) permettre aux chercheurs de présenter des cas

d'études originales de l'évolution des milieux hydriques et de l'environnement à l'aide des images de télédétection; 3) faire le point sur les résultats obtenus jusqu'à maintenant dans le développement des procédés et des produits utiles dans l'étude des milieux hydriques et de l'environnement; 4) faire le point sur les outils informatiques mis à la disposition des chercheurs en télédétection; 5) favoriser les échanges et la création de liens entre chercheurs et praticiens d'origines différentes.

Les actes des journées scientifiques de Tunis sont divisés en cinq sections : 1) six articles portent sur les bassins versants et l'érosion hydrique; 2) six articles sur les eaux de surface et les eaux souterraines; 3) cinq articles sur l'humidité des sols; 4) cinq articles sur les littoraux; 5) quatre articles sur la sécheresse et la désertification.

La série des journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF se poursuivra, à l'automne 1997, avec celles de Québec, qui porteront sur les pratiques et méthodes de vérité-terrain en télédétection.

JEAN-MARIE M. DUBOIS
Université de Sherbrooke
Coordonnateur du Réseau Télédétection
de l'AUPELF-UREF

MOHAMED RACHED BOUSSEMA
École nationale d'ingénieurs de Tunis
Responsable des journées scientifiques de Tunis

FRANÇOIS BOIVIN
Université de Sherbrooke
Coresponsable de l'édition des actes

PIERRE LAFRANCE
Université de Sherbrooke
Coresponsable de l'édition des actes

PARTIE I

Bassins versants et érosion hydrique

1

Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien à l'aide de la télédétection satellitaire

AICHOUCHE BELHADJ-AISSA et YUCEF SMARA

Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El-Alia Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie; téléphone : +213 (2) 75-12-85 (poste 806); télécopieur : +213 (2) 75-94-57

Résumé

L'analyse et l'évaluation des ressources en eau et leur gestion est nécessaire, plus particulièrement dans les zones arides et semi-arides. L'objectif de cet article est de présenter une étude sur la mise en évidence du réseau hydrographique et des phénomènes associés dans des régions situées sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien, et ceci à l'aide de la télédétection satellitaire et des missions sur le terrain. Les méthodes adoptées, basées sur les techniques de traitement d'images et d'analyse de données, sont élaborées en fonction des caractéristiques des indicateurs liés au réseau hydrographique tels que les zones humides, le couvert végétal, les structures de drainage et le sens des écoulements sur le piémont de l'Atlas saharien. Les résultats obtenus, sur des zones représentatives du thème recherché, permettent de faire ressortir les phénomènes hydrographiques dans l'Atlas saharien lui-même, ainsi que le système de drainage et de ruissellement, et leurs effets sur les ressources en eau et la mise en valeur des terres dans la région.

1. Introduction

Parmi les ressources naturelles supportant les besoins humains et le développement économique, l'eau occupe une place privilégiée, autant en ce qui concerne sa quantité que

sa qualité. Ceci est particulièrement vrai pour les zones arides et semi-arides pour trois raisons essentielles :

- climatique : pluviométrie très limitée et irrégulière;
- anthropogénique : fort développement démographique et migration;
- économique : manque de moyens pour la gestion des ressources en eau.

En général, une distinction doit être faite entre les précipitations et les ressources en eau. En effet, les précipitations peuvent être considérées comme un potentiel de ces dernières pour les activités humaines et les besoins naturels; mais, seule une partie des précipitations contribue aux ressources en eau dans l'environnement.

Cependant, dans les zones arides et semi-arides, vu la faible quantité de précipitations, ces dernières forment la majeure partie des ressources en eau de l'environnement, lesquelles alimentent essentiellement les nappes souterraines, les écoulements, les différents types de sols et le couvert végétal (fig. 1). Tout changement affectant les caractéristiques de surface, dues aux raisons naturelles ou aux charges anthropiques, a des conséquences directes au plan des ressources en eau utilisables. La gestion et le suivi du système hydrologique pour les besoins précités deviennent alors nécessaires. Un des moyens efficaces pour ceci est l'utilisation et l'exploitation des données-images de télédétection.

Dans cet article, nous présentons une méthodologie relative à la mise en oeuvre de techniques de télédétection pour la mise en évidence du système hydrologique et les phénomènes associés sur une région du piémont sud de l'Atlas saharien, et ce à partir de données satellitaires TM de Landsat.

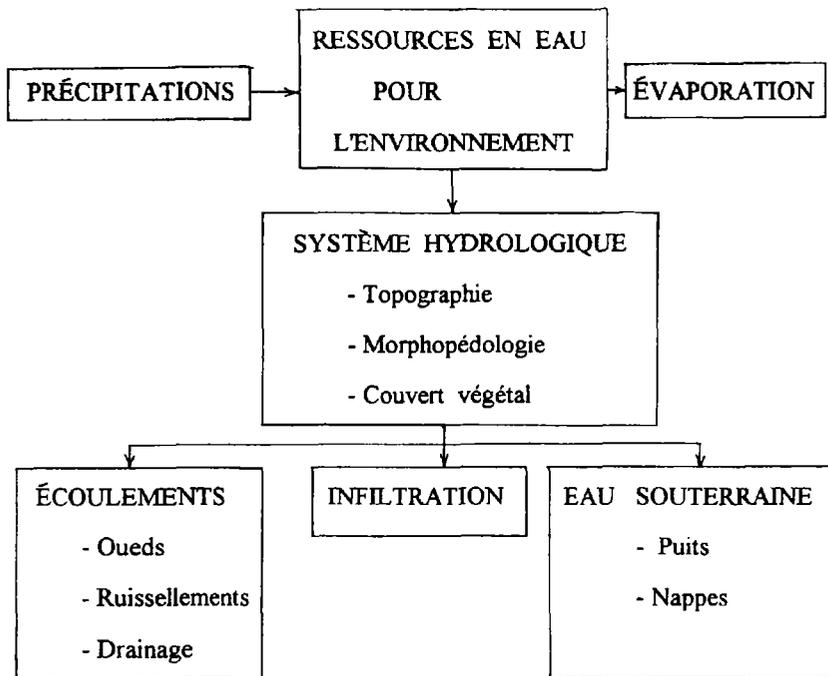


Figure 1. Synoptique décrivant le processus relationnel entre les précipitations et les ressources en eau

2. Caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude correspond à un milieu de transition entre les hautes plaines et le Sahara. Cette frange intermédiaire, relevant d'un climat et de dynamiques aride et subdésertique, vit encore sous l'influence de l'Atlas saharien. L'économie de cette région dépend essentiellement de l'eau, des crues, des sols cultivables et des phénomènes éoliens. Dans cette région, la sécheresse est un caractère dominant, particulièrement en été. En effet, les précipitations sont très irrégulières, se manifestant sous forme d'averses orageuses souvent brutales. Partout, la moyenne du total des pluies est inférieure à 200 mm/an comme l'indique l'exemple de la ville d'El-Abiod-Sidi-Cheikh. Cependant, l'année 1991 a été une année très humide et la région a connu de très grandes crues d'oueds comme nous l'ont confirmé les habitants de la région lors d'une mission sur le terrain (fig. 2) (DEWOLF *et al.*, 1992).

Après un transit variable en fonction du débit et de l'absorption des sols, les écoulements débouchent dans les puits et les dayas, ces dernières permettant alors des cultures irriguées occasionnelles.

La présente étude a été faite sur des zones pilotes qui représentent bien le thème recherché. Ces zones, contenues dans la scène 196/37 de TM qui a été acquise le 1^{er} janvier 1989 (fig. 1-3, voir cahier couleur) sont la zone du sud de Laghouat (zone 1) et la zone de Brézina (zone 2).

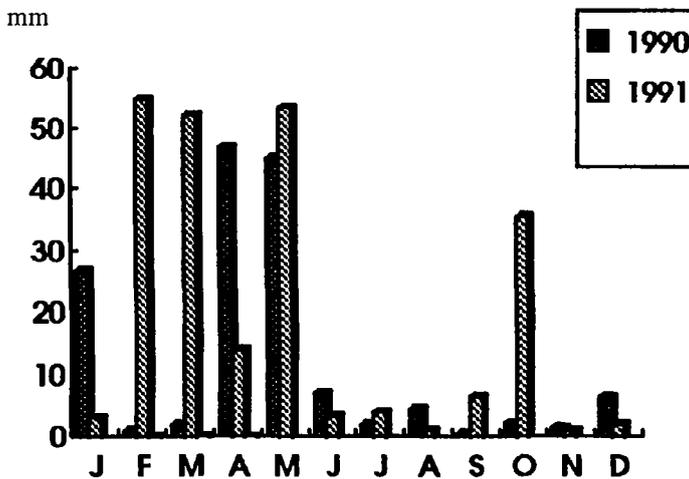


Figure 2. Pluviométrie sur El-Abiod-Sidi-Cheikh pour les années 1990 et 1991

3. Mise en évidence des phénomènes hydriques par télédétection

La télédétection permet de donner, à courts intervalles de temps, des observations synoptiques du réseau hydrographique. Cependant, contrairement à d'autres phénomènes, telles que les formes géologiques et la végétation qui sont bien détectables par la télédétection, l'information concernant les ressources en eau, et plus particulièrement dans

les zones arides, ne peut être extraite directement à partir des images satellitaires. Afin d'utiliser effectivement la télédétection pour le thème étudié, l'accent doit être mis sur les indicateurs hydrogéologiques et la connaissance des ensembles hydrogéologiques. Ceux-ci incluent les éléments suivants :

- formes de structures (linéaments, fractures géologiques, vallées, deltas, etc.);
- géomorphologie (forme des sols, surfaces d'érosion, etc.);
- systèmes de drainage;
- présence de couvert végétal.

Les caractéristiques de certaines formes, tel que le réseau de drainage, peuvent être facilement détectables avec des conditions de prise de vue adéquates. En effet, un faible angle d'élévation du soleil, qui est possible pendant la période allant du 1^{er} novembre au 15 février environ dans l'hémisphère nord, permet de rehausser la topographie et donc d'accentuer les formes hydrographiques.

D'autre part, on sait que l'absorption du rayonnement électromagnétique par la végétation est élevée dans le visible, contrairement à celle obtenue dans le proche infrarouge, correspondant respectivement aux canaux TM3 et TM4. Les méthodes de calcul d'indices appliquées sur ces données permettent alors de faire ressortir les zones de couvert végétal, lequel est un indicateur privilégié des ressources en eau.

Par ailleurs, plusieurs études ont été faites sur l'utilisation de la télédétection infrarouge thermique pour la détermination des zones humides. MOORE et MYERS (1972) ont montré qu'il existe une corrélation entre la radiométrie de température et la présence d'eau en sous-surface (profondeur de 1,5 à 4,5 m). EZRA *et al.* (1982) ont, pour leur part, utilisé effectivement les techniques thermiques de télédétection pour la distinction des zones humides en milieu semi-aride dans un environnement d'agriculture irriguée.

Parallèlement à cela, les structures de la surface, tel que les linéaments, sont des indicateurs favorables de ressources en eau et de leur dynamique, laquelle dépend principalement de la topographie. Au plan des reliefs, le réseau hydrographique est lié aux fractures des linéaments (DU WENCAI and YE DELIAO, 1993).

La région étudiée présente un relief dont la dénivellation est d'environ 600 m (de 1 500 m dans l'Atlas saharien à environ 900 m au bas du piémont). Un exemple de ce relief est donné par l'oued Seggueur (environs de Brézina) situé autour de 1 350 m d'altitude et la Dayet El Anz située, elle, aux environs de 850 m.

4. Méthodologie adoptée

La méthodologie adoptée pour la mise en évidence du réseau hydrographique s'appuie sur les constatations précédentes et consiste en la mise en oeuvre de techniques de traitement d'images et d'analyse de données tel que :

- l'analyse en composantes principales;
- le calcul d'indices;
- le filtrage des données;
- les compositions colorées.

4.1. Analyse en composantes principales

À partir de combinaisons linéaires des données d'entrée X, l'analyse en composantes principales (A.C.P.) permet de donner une nouvelle représentation de néo-canaux Y de

l'espace des images multibandes :

$$Y = G \cdot X$$

où G est la transformation linéaire définie à partir des valeurs propres issues de la diagonalisation de la matrice variance-covariance des données d'entrée.

Une décorrélation complète des nouveaux canaux est obtenue et la nouvelle distribution de la variance de ces canaux fait que nous obtenons une réduction de données. En effet, le premier néo-canal occupe près de 80 % de la variance totale des données-images et présente le maximum de contraste, alors que le deuxième néo-canal, lui, représente les structures linéaires et, parmi elles, les réseaux de drainage, les lits d'oueds, etc.

4.2. Calcul d'indices

L'indice de végétation classique est calculé à partir des canaux TM3 et TM4 par la formule suivante :

$$IV = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3).$$

Cet indice permet de mettre en évidence les zones de végétation. À partir de l'image résultante obtenue sur la zone pilote du sud de Laghouat (fig. 4), nous pouvons remarquer que la végétation est située au niveau des écoulements des oueds et des dépressions humides localisées (dayas).

D'autre part, des combinaisons sur les néo-canaux obtenus par l'analyse en composantes principales peuvent permettre de rehausser les zones de végétation, particulièrement dans cette région où le couvert végétal occupe un faible pourcentage de superficie et présente des formes souvent linéaires. L'exemple du calcul d'indice est basé sur la formule suivante :

$$IV(ACP) = (CP1 - CP2)/(CP1 + CP2)$$

où CP1 et CP2 sont respectivement le 1^{er} axe et le 2^e axe issus de l'analyse en composantes principales.

Les images résultantes de ce traitement mettent en valeur le couvert végétal qui est, dans les zones arides, un indicateur fiable de la présence d'humidité (fig. 5 et 6).

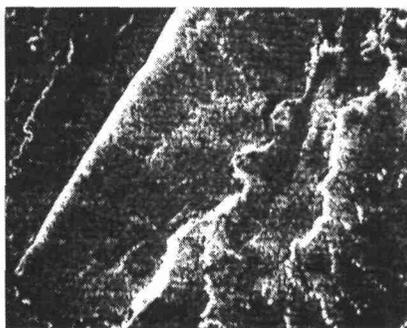


Figure 4. Mise en évidence du réseau hydrographique par le calcul de l'indice de végétation classique sur la zone du sud de Laghouat

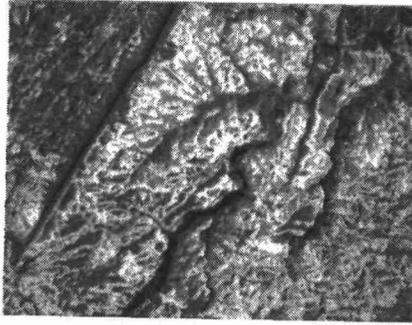


Figure 5. Mise en évidence du réseau hydrographique et des zones de cultures, par le calcul d'indice sur des canaux A.C.P., sur la zone du sud de Laghouat

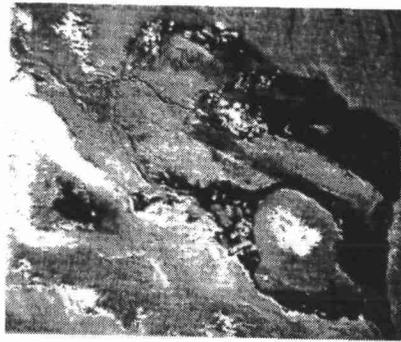


Figure 6. Mise en évidence du réseau hydrographique et des zones de cultures, par le calcul d'indice sur des canaux A.C.P., sur la région de Brézina (Dayet El Anz)

4.3. Filtrage des données

Dans le but de rehausser les structures linéaires correspondant au réseau de drainage et aux lits d'oueds, le filtre laplacien défini par le masque de taille 3x3 suivant :

$$\begin{array}{ccc} -1 & 0 & -1 \\ 0 & 5 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{array}$$

a été appliqué sur l'image correspondant au 2^e canal issu de l'A.C.P. L'image résultante présente, effectivement, une grande netteté au niveau du réseau de drainage (fig. 7).

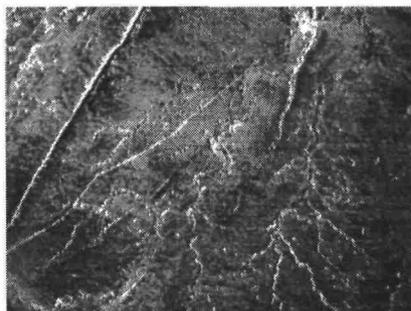


Figure 7. Rehaussement du système de drainage, par l'utilisation du filtre laplacien sur le 2^e canal A.C.P., sur la zone du sud de Laghouat

4.4. Compositions colorées

Les compositions colorées consistent à attribuer un canal par couleur fondamentale. Celles que nous avons effectuées ont consisté en un choix judicieux sur les canaux à composer. Plusieurs compositions colorées ont été élaborées avec différents canaux et dans différentes conditions de l'étalement de la dynamique des images. Une combinaison intéressante de canaux a été retenue pour sa mise en évidence du réseau hydrographique dans l'Atlas saharien et du couvert végétal sur le piémont. Elle a consisté en la composition des canaux TM4, TM5 et le canal TM6 (thermique) ayant subi au préalable un traitement de filtrage moyen local (masque 3x3). L'image résultante permet de distinguer les oueds Redad, Melah, Tassina et Seggueur, lesquels correspondent à des formations géologiques au niveau de l'Atlas saharien (fig. 1-8 et 1-9, voir cahier couleur).

5. Conclusion

Les méthodes présentées dans cet article ne sont pas exhaustives. Néanmoins, elles sont bien adaptées à l'étude de la zone du piémont qui, sur le plan hydrologique, est constituée de trois thèmes essentiels à savoir les structures des oueds liées aux linéaments de l'Atlas, le système de drainage sur le piémont et le couvert végétal alimenté par le ruissellement des eaux issues de l'Atlas.

Ainsi, la télédétection satellitaire peut fournir une information très utile concernant les linéaments, l'occupation des sols, la végétation et le système de drainage. Ceux-ci sont des indicateurs des phénomènes hydrogéologiques et de l'occurrence des ressources en eau. Cependant, l'efficacité de la recherche de ces phénomènes est relative et son succès dépend de la bonne interprétation des indicateurs précités. Les traitements effectués sur les images de télédétection en vue de l'extraction de ces indicateurs nous ont permis d'obtenir des résultats cohérents avec les documents existants. Cependant, il est bien évident que, localement, des caractéristiques hydrologiques significatives soient de trop petite dimension (puits, etc.) pour être visibles sur des images satellitaires. Dans ce cas, des études approfondies sur le terrain, aussi bien qualitatives que quantitatives, deviennent nécessaires pour une cartographie complète du système hydrographique et des ressources en eau de la région.

Pour les perspectives futures, l'acquisition et l'utilisation d'images à plus haute résolution de cette région (de type SPOT panchromatique, par exemple) permettrait une détection plus fine des linéaments, du tracé des oueds et du système de drainage. D'autre part, l'exploitation de combinaisons de données satellitaires optiques (TM de Landsat et HRV de SPOT) avec des données radar, permettra de rehausser grandement le réseau hydrographique (YÉZOU *et al.*, 1993).

6. Remerciements

Le travail présenté dans cet article est, en fait, une partie d'un projet plus global qui concerne un observatoire des évolutions, tant naturelles qu'anthropiques, sur le piémont de l'Atlas saharien, étudié conjointement avec le Laboratoire de géographie physique de l'Université de Paris VII. Nous tenons à remercier Y. Dewolf et F. Joly ainsi que Y. Callot et A. Simonin pour leur collaboration efficace sur le plan de l'interprétation des phénomènes étudiés sur le terrain. Par ailleurs, nous remercions vivement J.-P. Gilg, H. Geroyannis, P. Bildgen et toute l'équipe du Laboratoire de télédétection du Centre d'analyse et de mathématiques sociales de l'École des hautes études en sciences sociales pour les moyens mis à notre disposition pour le traitement des images et pour leurs précieux conseils.

7. Références

- DEWOLF, Y., JOLY, F., CALLOT, Y. et SIMONIN, A. 1992. Rapport technique interne de mission effectuée sur la zone Laghouat-Brézina (Algérie). Université de Paris VII, 15 p.
- DU WENCAI and YE DELIAO 1993. Methods for recognizing and extracting groundwater information from remote sensing. International symposium of operationalization of remote sensing, Enschede, April 1993, p. 105-111.
- EZRA, C. C., BONN, F. and ESTES, J. E. 1982. The feasibility of thermal inertia mapping for detection of perched water tables in semi-arid irrigated lands. First thematic conference : Remote sensing of arid and semi-arid lands. Cairo, January 1982, p. 120-128.
- MOORE, D. G., and MYERS, V. I. 1972. Environmental factors affecting thermal ground water mapping. Remote sensing instruments. South Dakota State University, Brookings, 10 p.
- YÉZOU, H., BESNUS, Y., ROLET, J., PION, J. C. and AING, A. 1993. Merging Seasat and SPOT imagery for study of geological structures over a temperate agricultural region. Remote Sensing of Environment, n° 43, p. 265-279.

2

Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un système d'information géographique (rivière Eaton, Québec)

HÉDIA CHAKROUN ¹, FERDINAND BONN ¹ et JEAN-PIERRE FORTIN ²

¹ *Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1;*
téléphone : +1 (819) 821-7964; télécopieur : +1 (819) 821-7944

² *Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Carrefour Molson, 2800, rue Einstein, Québec, Québec, Canada, G1X 4N8;*
téléphone : +1 (418) 654-2591; télécopieur : +1 (418) 654-2600

Résumé

L'énergie de base responsable de l'érosion hydrique est issue principalement de l'impact de la pluie et du ruissellement. Plusieurs études menées à l'échelle parcellaire ont pris en considération ces deux facteurs; cependant, pour faire une bonne estimation de l'érosion et de la sédimentation résultant de l'écoulement et du ruissellement, il faut considérer le bassin versant dans son intégrité. La variabilité des facteurs responsables des pertes de sol est prise en considération par l'utilisation de modèles du type distribué. L'objectif de cette étude est de modéliser les pertes de sol à l'échelle d'un bassin versant pour une période de temps pouvant aller de l'événement pluvieux à des dizaines d'années. La méthodologie proposée est appliquée au bassin versant de la rivière Eaton (Québec) de près de 200 km² de superficie; elle consiste à effectuer une prédiction de perte de sol basée conjointement sur un modèle hydrologique et sur un modèle d'érosion. Le modèle hydrologique retenu est appelé HYDROTEL et il est conçu pour être compatible avec les données de la télédétection; le modèle d'érosion est l'équation universelle de perte de sol modifiée

(*Modified Universal Soil Loss Equation* : MUSLE) qui est une version transformée de l'équation universelle de perte de sol (USLE). La simulation hydrologique permet de fournir des cartes relatives au ruissellement dans chaque maille du bassin et qui sont à la base de la détermination du coefficient d'érosion causé par le ruissellement. Le facteur érosif de ruissellement et les facteurs érosifs relatifs à la topographie, à la couverture du sol et aux mesures anti-érosives sont intégrés dans un système d'information géographique (SIG) qui permet de fournir des cartes et des statistiques relatives aux pertes de sol dans le site de l'étude.

1. Introduction

De par la diversité des facteurs affectant l'érosion, la quantification des pertes de sol a été menée durant de nombreuses années à l'échelle parcellaire. L'utilisation des simulateurs de pluie et des parcelles aménagées en fonction des besoins de ces études a permis la proposition de certaines lois valables pour les conditions expérimentales. Jusqu'à maintenant, rares sont les études qui ont essayé d'extrapoler et de vérifier la validité de ces lois à grande échelle. La difficulté majeure, qui réside dans le changement d'échelle, est de représenter les facteurs et les mécanismes responsables de l'érosion avec une précision et une homogénéité équitable sur tout le territoire d'étude.

2. Prospection de la modélisation de l'érosion à l'échelle régionale : la contribution des données satellitaires et des SIG

Les méthodes de modélisation de l'érosion traitant le bassin versant comme un système distribué nécessitent, comme toute modélisation environnementale à grande échelle, une énorme quantité de données manipulées par des systèmes de calcul puissants. Quelque soit le modèle de perte de sol choisi, les facteurs décrivant le processus devraient être les mêmes; on peut les diviser en deux catégories :

- des facteurs de premier ordre qui sont des facteurs physiques décrivant le relief, l'occupation du sol et les différents types d'aménagement;
- des facteurs de second ordre qui sont issus de la combinaison des conditions climatiques et des caractéristiques physiques régissant ainsi le ruissellement et le comportement hydrologique du bassin versant.

La détermination des facteurs de premier ordre à l'échelle régionale a été de plus en plus raffinée par l'utilisation des images satellitaires ainsi que par les modèles numériques de terrain (MNT). Ces données numériques sont facilement intégrées, sous forme de niveaux d'information, à des SIG dans lesquels le territoire est divisé en mailles régulières. Quant aux facteurs de second ordre, ils n'ont pas connu la même évolution que les précédents. Ceci est dû principalement au fait que les modèles d'érosion développés jusqu'à présent et prenant en considération le ruissellement, ne peuvent tenir compte de façon satisfaisante de l'hétérogénéité des caractéristiques physiques du bassin versant et de la variabilité spatiale des données météorologiques. Ainsi, une détermination adéquate des facteurs d'érosion de second ordre suppose un modèle hydrologique distribué tout comme le modèle d'érosion. Les modèles qui considèrent la variabilité spatiale du bassin sont rares, exception faite des deux modèles récemment développés. Le premier modèle est ANSWERS

(*Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation*, BEASLEY and HUGGINS, 1982) et estime la répartition des sédiments transportés dans le temps et dans l'espace en utilisant des mailles régulières facilitant ainsi l'intégration des données géo-référencées et télédéteectées. Le second modèle est AGNPS (*Agricultural Non-Point Source*, YOUNG *et al.*, 1987) qui est intégré à un large projet d'érosion appelé WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, LAFLEN *et al.*, 1991) et qui vise à mettre au point une technologie généralisée de prédiction de l'érosion.

3. Spatialisation des facteurs du modèle d'érosion de la MUSLE

3.1. Site de l'étude

Le site choisi pour l'application de notre méthodologie est l'un des bassins versants de la rivière Eaton. Il est situé dans la province géologique des Appalaches qui est un relief majeur traversant tout le sud-est du Québec (Canada). Sa superficie approximative est de 192 km² et son relief est relativement accentué avec un réseau hydrographique dense (fig. 1).

3.2. Modèle d'érosion

Le principe de l'USLE est maintenu dans cette étude du fait de son adaptabilité aux données multisources, issues des images satellitaires et des bases de données numériques, et de la facilité d'intégrer ces données, sous forme de couches d'information, à un SIG.

La MUSLE (FOSTER *et al.*, 1973) est un modèle qui intègre le comportement hydrologique du bassin versant, permettant ainsi de spatialiser les facteurs de second ordre. La modification par rapport à l'USLE consiste à remplacer l'indice d'érosivité simple calculé d'une manière uniforme sur tout le territoire d'étude par un indice d'érosivité ayant des termes séparés pour le ruissellement et pour les précipitations. L'expression générale de la MUSLE est :

$$A_{or} = R_m K L S C P$$

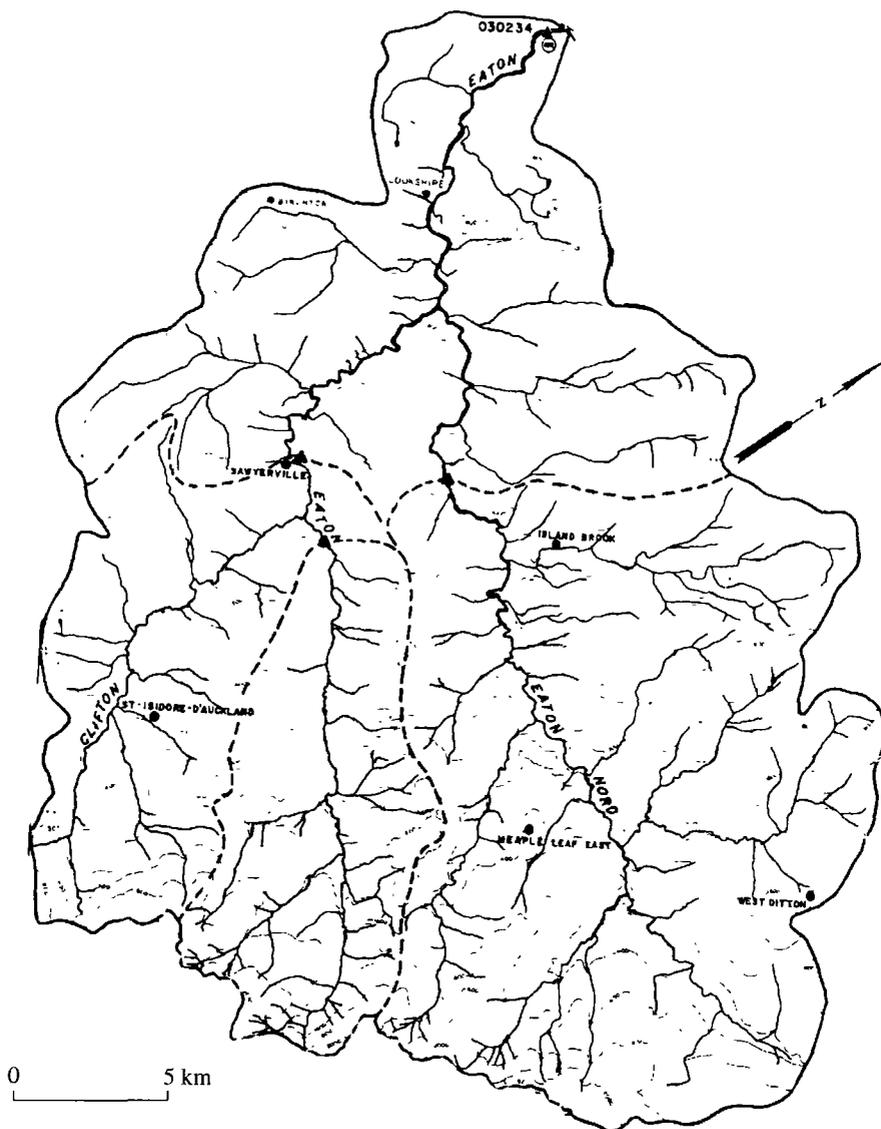
où A_{or} est la quantité de perte de sol durant l'orage, R_m est l'indice d'érosivité modifié, K est le facteur d'érodabilité des sols, LS est le facteur érosif topographique, C est le facteur relatif à la couverture du sol par la végétation et P le facteur des mesures anti-érosives (HESSION and SHANHOLTZ, 1988).

3.3. Spatialisation des facteurs de premier ordre

Les facteurs d'érosion de premier ordre sont reliés à la couverture du sol, à la composition et la structure du sol, et à la topographie du terrain.

3.3.1. Facteurs de l'occupation du sol

Le modèle utilisé pour l'estimation de l'érosion prend en considération l'effet de la couverture du sol par le facteur C , qui varie d'une classe d'occupation du sol à une autre, et le facteur P relatif aux pratiques anti-érosion.



Tiré de TREMBLAY, 1976

Figure 1. Localisation géographique de la rivière Eaton

On a utilisé une image du capteur TM du satellite Landsat-5 pour extraire de l'information relative aux différentes classes d'occupation du sol. L'image a été corrigée géométriquement et radiométriquement, et classifiée par voie supervisée au moyen du système de traitement d'images EASI/PACE de PCI. Les classes d'occupation de sol du bassin versant d'étude sont données sur le tableau 1 et illustrées par la figure 2-2 (voir cahier couleur).

3.3.2. Facteur d'érodabilité

La numérisation de la carte pédologique permet la création d'un niveau polygonal qu'on transforme en un niveau matriciel dans le SIG PAMAP; à chaque type de sol on associe l'indice d'érodabilité correspondant (tab. 2).

Tableau 1. Classes d'occupation du sol dans le bassin d'étude

Classe d'occupation du sol	facteur P	facteur C	Superficie (ha)	Superficie (%)
Eau	1,00	0,000	1 260,18	7,11%
Cultures	1,00	0,030	6 977,25	39,35%
Terrains en friche	1,00	1,000	380,97	2,15%
Forêt de feuillus	0,50	0,003	4 317,75	24,35%
Forêt de conifères	0,50	0,003	2 102,13	11,85%
Forêt mélangée	0,50	0,003	2 694,69	15,20%

Tableau 2. Types de sol dans le bassin d'étude

Type de sol	facteur K	Superficie (ha)	Superficie (%)
Rst: roches	0,00	548,46	3,01
M: sable fin de Milby	0,04	225,00	1,24
Ua: sol alluvionnaire non classé	0,06	162,99	0,90
Ca: terre franche de Calais	0,07	137,97	0,76
Gl: terre franche de Greensboro	0,09	11 449,44	62,87
Dcl: terre franche sablonneuse	0,21	5 672,16	31,15
Dg: terre franche graveleuse	0,31	14,13	0,08

3.3.3 Facteurs topographiques

Le modèle numérique d'altitude (MNA) relatif au bassin versant est généré à partir des courbes de niveau issues d'une carte topographique au 1: 250 000 et numérisée dans le système PAMAP. Le fichier des altitudes est créé en utilisant la méthode de la différence finie avec une résolution égale à 30 m (fig. 2-3, voir cahier couleur). La détermination des pentes θ et des orientations se fait automatiquement dans le SIG. La longueur de pente λ , qui est définie comme étant la distance d'un point du bassin versant à la source de ruissellement, est dérivée à partir des orientations moyennant un programme qui attribue à un pixel ayant la même orientation que le pixel précédent le rang de ce dernier plus un. Une illustration des longueurs de pente est donnée par la figure 2-4 (voir cahier couleur). L'expression du facteur érosif topographique est :

$$LS = (\lambda/22,15)^m (65,41 \sin^2(\theta) + 4,56 \sin(\theta) + 0,065)$$

où m est un coefficient de longueur de pente variant en fonction de la valeur de la pente.

3.4. Spatialisation de l'indice d'érosivité modifié

3.4.1. Expression de l'indice d'érosivité R_m

Pour un orage donné, l'expression de R_m , telle qu'elle a été suggérée par FOSTER *et al.* (1977), est :

$$R_m = 0,5 EI_{30} + 3,5 V_u \sigma_{pu}^{1/3}$$

où I_{30} est l'intensité maximale de la pluie enregistrée pendant 30 minutes de l'orage, et E est l'énergie engendrée par l'orage et ayant pour expression :

$$E = \sum_{k=1}^{k=p} (e_k \cdot \Delta(V_k))$$

où e_k est l'énergie engendrée par la quantité de pluie tombée durant le k ème pas de temps et $\Delta(V_k)$ est la hauteur de la pluie pour le k ème pas enregistré au moyen d'un pluviographe divisé en p parties. L'expression de l'énergie de la pluie est donnée par (FOSTER *et al.*, 1981) :

$$\begin{aligned} e_k &= 0,119 + 0,0873 \log_{10}(I_k) && \text{pour } I_k < 76 \text{ mm/h} \\ e_k &= 0,283 && \text{pour } I_k > 76 \text{ mm/h} \end{aligned}$$

où I_k est l'intensité de la pluie pendant le k ème pas exprimée en mm/h.

L'érosivité de ruissellement est fonction de V_u et de σ_{pu} , qui représentent respectivement le volume total de ruissellement exprimé en mm et le volume de ruissellement de pointe exprimé en mm/h. Ces deux paramètres hydrologiques sont déterminés d'une manière distribuée sur tout le bassin versant par le modèle HYDROTEL (version 2.1) (FORTIN *et al.*, 1991) qui calcule les lames de ruissellement disponibles au transfert d'une maille à l'autre.

3.4.2. Simulation de l'écoulement avec HYDROTEL

HYDROTEL appartient à la nouvelle génération des modèles hydrologiques distribués qui simulent et prédisent l'évolution du cycle de l'eau tout en optimisant l'utilisation des données de la télédétection et des MNT. Deux logiciels complémentaires à HYDROTEL permettent de traiter les données de base en vue d'extraire de l'information nécessaire à la simulation hydrologique : ce sont les logiciels IMATEL et PHYSITEL (version 2.0). La structure spatiale d'HYDROTEL est donnée par la figure 5.

IMATEL effectue le traitement d'images acquises par télédétection et peut être remplacé par n'importe quel autre logiciel de traitement d'images pourvu que les résultats de traitement soient compatibles avec HYDROTEL. PHYSITEL sert à la structuration des données physiques du bassin versant et ce en préparant la banque de données topographiques du territoire nécessaire au modèle selon les dimensions des mailles choisies pour un bassin en particulier. PHYSITEL est ainsi comparable à n'importe quel autre SIG avec en plus la capacité d'effectuer des tâches spécifiques à une modélisation hydrologique.

Le MNA du bassin d'étude est traité par PHYSITEL en vue d'éliminer les extrêmes locaux qui constituent des singularités pouvant empêcher le processus de la simulation de

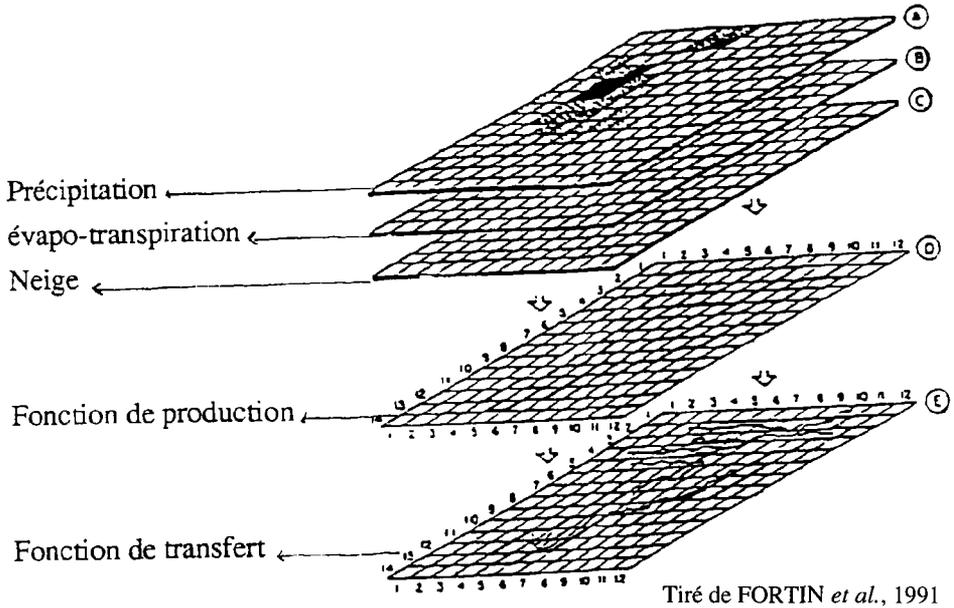


Figure 5. Structure spatiale du modèle HYDROTEL

l'écoulement. La détermination automatique du contour du bassin versant et du réseau de drainage est une opération qui est faite au moyen d'un algorithme récursif qui, connaissant la localisation de l'exutoire, utilise les orientations pour délimiter le bassin. Un traitement spécial des zones planes consiste à créer un écoulement artificiel pour qu'elles n'engendrent pas de rupture dans l'écoulement, de sorte qu'elles soient vidées vers la maille la plus basse qui se trouve en bordure. Le traitement du réseau de drainage permet d'aboutir à des ensembles homogènes constituant des petits sous-bassins ou des unités hydrologiques homogènes (UHH). On a choisi une résolution de 400 m pour le processus d'intégration.

L'image classifiée a été intégrée spatialement par PHYSITEL selon des grilles de 100 m de résolution. Elle a été traitée en vue de générer, à partir de son format matriciel, un fichier comportant le nombre de pixels relatifs à chacune des classes dans chacune des mailles, ce qui permet de déduire la superficie de chacune des classes dans la maille considérée.

La modélisation des divers processus du bilan hydrologique peut se faire à l'aide d'équations plus ou moins complexes et précises selon la disponibilité des données. Le caractère modulaire d'HYDROTEL permet de répartir la simulation hydrologique en un certain nombre d'étapes; pour chaque étape, on a plus d'un choix de méthode de calcul. De plus, dans chacun des modules, il est possible de choisir d'utiliser des paramètres d'optimisation selon les besoins et selon les résultats de la simulation.

On a choisi une période de simulation allant du 6 septembre au 3 octobre 1973 avec un pas de simulation de 24 heures. La résolution des mailles du bassin versant est choisie égale à 1 000 m. Le résultat de la simulation est donné par des quantités de ruissellement calculées à chaque pas de temps et dans chacune des mailles du bassin versant.

Le calcul du facteur d'érosivité liée au ruissellement nécessite la détermination du volume cumulé ruisselé sur chacune des mailles le long de la période de la simulation et du ruissellement de pointe.

4. Intégration des facteurs d'érosion au SIG

Chacun des facteurs d'érosion est représenté par un niveau d'information dans le SIG; le module de modélisation permet de calculer les pertes de sol selon le modèle de la MUSLE et pour la période de la simulation. Le facteur d'érosivité des précipitations (ΣEI_{30}) a été calculé à partir des données des pluviomètres et des pluviographes situés dans deux stations météorologiques du bassin versant. Pour le sous-bassin traversé par un affluent, la rivière Clifton, la valeur de l'érosivité des précipitations calculée à partir des données de la station de Saint-Isidore-d'Auckland est de 135 MJ·mm/ha·h et, pour celui traversé par la rivière Eaton, elle est calculée à partir des données de la station de Sawyerville et elle est de 93 MJ·mm/ha·h. Les pertes de sol ainsi cartographiées sont illustrées sur la figure 2-6 (voir cahier couleur). Le tableau 3 résume le taux d'érosion prédit pour la période de la simulation.

Tableau 3. Pertes de sol selon le modèle de la MUSLE pour la période du 6 septembre au 3 octobre 1973 dans le bassin d'étude

Classes de sol érodé	Superficie (ha)	Superficie (%)
De 0 à 1 kg/ha	1625,76	9,95
De 1 à 10 kg/ha	1 190,43	7,29
De 10 à 100 kg/ha	5 778,27	35,38
De 100 à 1 000 kg/ha	5 249,52	32,14
Plus que 1 000 kg/ha	2 488,77	15,24

5. Discussion et conclusion

L'objectif principal de notre étude était de mettre au point une méthodologie de prédiction des pertes de sol basée conjointement sur un modèle hydrologique distribué et sur un modèle de perte de sol tout en optimisant l'utilisation des moyens de la télédétection, des MNT et des SIG. Ainsi, notre étude est à caractère plus méthodologique qu'expérimental, les résultats auxquels on a abouti ne sont qu'une illustration de notre démarche.

La méthodologie est ainsi mise au point et la base de données relative au bassin d'étude est formée. Il serait intéressant d'améliorer cette étude et ce en procédant aux opérations suivantes :

- introduire un volet expérimental qui servira de base pour la calibration et la validation de n'importe quel modèle de prédiction utilisé éventuellement dans l'étude;
- améliorer la simulation hydrologique avec les modèles HYDROTEL et PHYSITEL en raffinant la résolution dans la mesure du possible tout en prenant en considération la variabilité spatiale des paramètres hydrologiques;
- effectuer une étude comparative de prédiction de perte de sol et de transport de sédiments en utilisant l'un des modèles distribués qui tiennent compte du comportement hydrologique du bassin versant, tel que les modèles ANSWERS ou AGNPS;
- utiliser différents scénarios relatifs aux facteurs non standards, tel que les facteurs d'occupation du sol ou des pratiques culturales pour prédire l'impact de la variation combinée de ces facteurs sur la stabilité du bassin d'étude.

Cette étude de modélisation de l'érosion à l'échelle du bassin versant de la rivière Eaton peut avoir une multitude d'applications; en effet, la base de données construite est sujette à des manipulations faciles au sein du SIG. Il est possible de vérifier la validité de certaines lois, préétablies à l'échelle parcellaire, à l'échelle du bassin versant. On pourra, par exemple, déterminer l'importance relative de l'érosivité de la pluie responsable de l'érosion entre les rigoles et de l'érosivité du ruissellement responsable de l'érosion dans les rigoles. De même, avec la base de données disponible sur le bassin d'étude, il est possible d'utiliser des modèles de pollution diffuse faisant intervenir, entre autres, les concentrations en éléments chimiques dans les lames d'eau ruisselées suite à un orage.

6. Références

- BEASLEY, D. B. and HUGGINS, L. F. 1982. ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation. User's manual. EPA-90519-82-001, U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, 54 p.
- FORTIN, J.-P., VILLENEUVE, J.-P., BENOIT, J., BLANCHETTE, C., MONTMINY, M., PROULX, H., MOUSSA, R. and BOCQUILLON, C. 1991. HYDROTEL 2.1 User's guide. Scientific report, INRS-Eau, n° 286, 171 p.
- FOSTER, G. R., MEYER, L. D. and ONSTAD, C. A. 1973. Erosion equation derived from modelling principles. ASAE paper n° 73-2550, ASAE, St-Joseph, Michigan 49085.
- FOSTER, G. R., MEYER, L. D. and ONSTAD, C. A. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Transactions on the ASAE, vol. 20, n° 4, p. 683-687.
- FOSTER, G. R., MCCOOL, D. K., RENARD, K. G. and MOLDENHANER, N. C. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 36, n° 6, p. 355-359.
- HESSION, W. C. and SHANHOLTZ, V. O. 1988. A geographic information system for targeting non-point source agriculture pollution. Journal of Soil and Water Conservation, May-June 1988, p. 264-266.
- LAFLEN, J. M., LEONARD, J. L. and FOSTER, G. R. 1991. WEPP, a new generation of erosion prediction technology. Journal of Soil and Water Conservation, Jan.-Feb. 1991, p. 34-38.
- TREMBLAY, R. 1976. Bassin représentatif de la rivière Eaton : traits caractéristiques du régime d'écoulement 1966-1973. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service de l'hydrométrie (D.H.Q.-9), Québec, 69 p.
- YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D. and ANDERSON, W. P. 1987. AGNPS, agricultural non-point source pollution model: a new watershed analysis tool. Conservation resource 35, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 77 p.

3

Contribution de la télédétection à l'optimisation et à la maintenance d'un réseau d'assainissement des eaux : application à la ville d'Oran (Algérie)

YOUCEF MESSAR et NADIA MESSAR

Centre national des techniques spatiales (CNTS), Laboratoire de télédétection, B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie; téléphone : +213 (6) 37-22-17; télécopieur : +213 (6) 37-84-54

Résumé

La connaissance et la maintenance du fonctionnement d'un réseau d'assainissement des eaux nécessitent la prise en compte du coefficient de ruissellement. Cet article présente une méthode automatique de calcul de ce coefficient, sur les données HRV de SPOT de la ville d'Oran. Cette étude nécessite la délimitation des bassins versants, ainsi que la quantification des surfaces perméables et imperméables. À cet effet, deux classifications sont utilisées. Une étude comparative indique une marge d'erreur de 5,2 % par rapport aux résultats calculés sur la mosaïque de photographies aériennes. Par contre, elle est de 6,2 % par rapport à l'estimation du Service hydraulique d'Oran. Ces résultats montrent la fiabilité de l'outil télédétection dans le calcul de ce coefficient.

1. Introduction

En milieu urbain, les réseaux d'assainissement des eaux sont comparables à tous les autres ouvrages du patrimoine d'une ville. Comme tous les biens d'équipement, ces réseaux nécessitent des coûts d'investissements importants qui, d'ailleurs, peuvent atteindre ceux de la voirie. Par conséquent, les améliorations et les réparations périodiques sont indispensables.

La connaissance et la maintenance du fonctionnement de ces réseaux, ainsi que le calcul des nouveaux ouvrages nécessitent la prise en compte du coefficient de ruissellement.

Jusqu'à présent, ce coefficient est obtenu par procédé empirique, généralement par planimétrie sur photographies aériennes. C'est pourquoi, nous tenterons dans cet article un calcul de ce coefficient d'une manière automatique et ce, en utilisant l'imagerie HRV de SPOT.

2. Coefficient de ruissellement

En zone urbaine, le développement des surfaces imperméables est un descripteur significatif de ce milieu. En localisant ces surfaces, il devient possible de traduire la densification urbaine et, par conséquent, de déterminer la surface de la partie du bassin versant sur laquelle les eaux pluviales ruisselleront.

Le coefficient de ruissellement n'est autre qu'un rapport du volume d'eau retenu après ruissellement d'une surface donnée sur le volume tombé sur cette même surface.

Lorsque le bassin versant comporte des surfaces S_1, S_2, S_3, \dots , dont les coefficients de ruissellement sont C_1, C_2, C_3, \dots , le coefficient de ruissellement résultant est :

$$CR = \frac{\sum C_i \cdot S_i}{\sum S_i}$$

Il est aussi défini, en milieu urbain, comme le taux d'imperméabilité du bassin versant. Le bassin versant est défini comme une surface au sol déversant ses eaux de ruissellement vers un même point. D'où $CR = \text{surface imperméable} / \text{surface totale du bassin versant}$.

3. Méthode d'évaluation des débits maximaux

Toute étude d'un réseau d'assainissement des eaux nécessite, à l'étape initiale, la détermination des débits pluviaux et des eaux usées à évacuer. Le problème de l'évaluation des débits pluviaux dans les bassins versants a fait, depuis longtemps, l'objet de nombreuses études théoriques et, en ce qui concerne les usages des ingénieurs en hydrologie urbaine, on peut citer deux méthodes principales d'évaluation des débits pluviaux (BOURRIER, 1981).

La première méthode, la plus ancienne, est la méthode dite «rationnelle», dont la formule de base est très simple, mais elle devient beaucoup plus complexe à utiliser «manuellement» si on intègre tous les correctifs et si on procède à une décomposition analytique fine.

La deuxième, la plus utilisée, est nommée méthode superficielle de CAQUOT. Elle permet de calculer, en un certain nombre de points du système d'écoulement, des débits maxima pour un orage donné. Ces débits sont donnés par la formule suivante :

$$Q(F) = K^{1/u} \cdot P^{v/u} \cdot C^{1/u} \cdot A^{w/u}$$

où

$F =$ fréquence de dépassement (quantité d'eau déversée / t);

$t =$ durée de la pluie maximale périodique en min ($5 < t < 20$);

$K, u, v, w =$ constantes fonction de $a(F)$ et $b(F)$ sachant que :

$$i(t, F) = a(F) + t^{b(F)}$$

où

$i(t,F)$ = intensité maximale de la pluie de durée t et de fréquence de dépassement F ;

P = pente du bassin versant;

C = coefficient de ruissellement du bassin versant tel que :

$$C = A/A';$$

où

A = surface totale du bassin versant;

A' = surface artificialisée.

Les limites d'applications sont :

- le coefficient de ruissellement : $0,2 \leq CR \leq 1$;

- la surface totale : $A \leq 200$ ha.

4. Cartographie des surfaces perméables

4.1. Mise en évidence des surfaces perméables

En milieu urbain, nous considérons comme surfaces imperméables tous les espaces artificialisés (béton, toits, goudron, terrasses, etc.). À l'opposé de ces surfaces, nous retrouvons les surfaces perméables qui regroupent les espaces couverts de végétation, ainsi que les terrains nus.

Pour quantifier le coefficient de ruissellement dans chacun des bassins versants, il faut quantifier les surfaces perméables avec un maximum de précision.

Quelques études déjà réalisées en milieu urbain (CUSSOL *et al.*, 1987) ont montré la finesse de discrimination du rapport perméable/imperméable par l'indice de végétation (végétation/minéral) et de brillance (sols nus/artificialisé+végétation). Nous allons alors quantifier ces deux thèmes (végétation et sols nus), qui caractérisent les surfaces perméables sur l'image HRV de SPOT du 06-05-1986. Il faut noter que cette date se situe au début de la période de fin d'activité chlorophyllienne. L'idéal pour nos calculs aurait été d'avoir une image datant de fin mars.

Les documents disponibles pour ce travail sont :

- la carte topographique au 1 : 25 000 de la wilaya d'Oran;
- la mosaïque de photographies aériennes à l'échelle du 1 : 25 000;
- la scène HRV de SPOT datant du 06-05-1986.

4.2. Délimitation des bassins versants sur la carte topographique au 1: 25 000

La délimitation des bassins versants considérés comme des surfaces d'influence aux points caractéristiques a été réalisée en utilisant uniquement le critère topographique (CHENE, 1986). Les critères «limites de propriétés» et «bissectrice» n'ont pas été utilisés, vu la petitesse de l'échelle. Nous avons obtenu 22 bassins versants d'ordre 1, numérotés de 1 à 22 qui ont été reportés sur la mosaïque de photographies aériennes à la même échelle. Le fichier topographique «bassins versants» a été rastérisé pour pouvoir le superposer aux images classées et ce, pour réaliser un calcul statistique local au niveau de chaque bassin versant.

La superposition du fichier «bassins versants» à l'image satellitaire a été réalisée après calage de cette dernière à la carte topographique. La technique du plus proche voisin est

judicieusement choisie pour son caractère lequel n'altère pas la qualité radiométrique de l'image d'origine. Ce filtre interpolateur est aussi conservateur d'informations quantitatives dans la mesure où nous nous intéressons à quantifier les espaces en végétation ainsi que les terrains nus. La superposition a été réalisée avec 21 points d'appui répartis de manière uniforme sur la zone d'étude.

4.3. Mise en évidence des surfaces en végétation

Les deux thèmes, surfaces couvertes de végétation et autres, ont des signatures spectrales distinctes. Par seuillage sur l'histogramme de l'indice de végétation, nous obtenons une image mettant en relief les deux thèmes (DARTEYRE et DUBUCQ, 1988). Le seuil a été déterminé en utilisant la mosaïque de photographies aériennes ainsi que les vérités-terrains connues *a priori*.

Nous tenons à signaler que l'indice de végétation a été calculé après masquage de l'eau et des pixels mixtes qui ont parfois des réponses similaires à la végétation.

Pour estimer la précision et la validation des résultats obtenus, il nous est apparu nécessaire de vérifier la rigueur de la correspondance entre l'unité cartographique ainsi délimitée et son thème. Pour cela, nous nous sommes servis de la mosaïque et des renseignements de l'enquête sur le terrain. La technique de validation sur photographies aériennes consiste à étudier la correspondance sur une grille à maillage demi-centimétrique (par planimètre numérique).

Le tableau 1 illustre les résultats obtenus sur 5 bassins versants pris comme échantillons (10, 14, 16, 20 et 22).

Tableau 1. Quantification des surfaces en végétation sur les cinq bassins versants pris comme échantillons

Bassin versant	Image HRV de SPOT (surface en ha)	Photographies (surface en ha)	Décalage (%)
10	5,31	6,46	17,80
14	27,12	29,64	8,51
16	4,44	6,24	28,85
20	21,72	24,35	10,80
22	8,40	9,5	11,58

Nous constatons que les résultats sur la mosaïque sont légèrement (parfois nettement) supérieurs à ceux calculés sur l'image. Ceci nous paraît très logique pour les deux raisons suivantes :

- la date de prise de vue, en mars 1982 pour les photographies aériennes, correspond à une période de très forte activité chlorophyllienne, contrairement à celle de l'image HRV de SPOT (6 mai) où le végétal commence à perdre ses pigments de chlorophylle (période de dessèchement);

- certaines surfaces couvertes de végétation sur les photographies aériennes de mars 1982, sont devenues des zones d'habitations ou de chantiers en mai 1986. Par conséquent, il serait plus adéquat de travailler avec des documents pris à la même date.

4.4. Mise en évidence des terrains nus

Nous avons utilisé la même philosophie que les espaces couverts de végétation pour quantifier les terrains nus. Les zones «nuages» (en végétation) situées à l'ouest de la ville ont des réflectances identiques à celles des terrains nus. Nous avons procédé à leur masquage pour éviter les confusions.

Un sol nu est caractérisé principalement par sa rugosité et sa couleur (BILLINGSLEY, 1979). C'est ce qu'on essayera de mettre en évidence par l'indice de brillance :

$$\sqrt{XS2^2 + XS3^2}$$

Toutefois, cet indice ne présente guère d'intérêt pour de grandes étendues ayant une diversité de types de sol. Au contraire, notre zone d'étude contient de petites parcelles correspondant à un même type de sol. Le tableau 2 illustre la quantification des espaces nus sur l'image et sur la mosaïque.

Tableau 2. Quantification des terrains nus sur cinq bassins versants pris comme échantillons

Bassin versant	Image HRV de SPOT (surface en ha)	Photographie (surface en ha)	Décalage (%)
10	12,01	14,40	16,60
14	23,47	26,57	11,67
16	23,29	24,06	3,21
20	9,38	10,04	6,58
22	5,25	6,24	15,87

Nous remarquons que les valeurs calculées sur les photographies aériennes sont plus élevées que celles de l'image HRV de SPOT. Logiquement, elles seront moins élevées car la réponse spectrale du végétal est conditionnée par son état phénologique. Puisque le tapis végétal, constituant la majeure partie de la végétation, commence à se dessécher à partir de la fin du mois d'avril, sa réponse spectrale sera donc proche d'un terrain nu.

L'anomalie remarquée relève du fait, qu'en mars 1982, il y avait beaucoup de chantiers dans ces zones, ce qui a engendré une surévaluation des terrains nus.

5. Calcul automatique du coefficient de ruissellement

À partir des deux classifications obtenues (surfaces couvertes de végétation et terrains nus), nous procédons aux mesures des surfaces perméables sur un périmètre donné, dans notre cas, le bassin versant. Nous rappelons que le fichier «bassins versants» contient 22 périmètres qui sont les 22 bassins versants d'ordre 1 définis sur notre zone d'étude. L'image rastérisée «bassins versants» est superposée simultanément sur les deux images classées puis, pour chacune, nous avons quantifié les espaces recherchés (fig. 3-1, voir cahier couleur).

Pour le calcul du coefficient de ruissellement (CR), nous avons procédé à la quantification des pixels de «confusion» entre les classes «végétation» et «sol nu». Ces pixels sont en nombre très réduit ou sont parfois inexistants (tab. 3).

Tableau 3. Coefficients de ruissellements calculés sur l'image HRV de SPOT pour chacun des bassins versants

Bassin versant	Surface en végétation (ha)	Surface terrains nus (ha)	Surface totale (ha)	Pixels mixtes	Coefficient de ruissellement
1	56,99	74,32	237,56	635	0,47
2	4,61	6,22	77,63	0	0,86
3	3,92	3,35	68,48	4	0,89
4	2,71	3,41	50,31	0	0,88
5	3,16	3,79	55,31	0	0,87
6	6,53	4,59	48,02	0	0,77
7	3,78	2,53	23,90	4	0,74
8	7,93	28,36	109,79	13	0,67
9	4,16	30,01	86,24	8	0,60
10	5,31	12,01	84,25	4	0,79
11	0,77	1,80	25,93	0	0,90
12	22,82	37,43	257,73	20	0,77
13	10,74	8,84	136,42	4	0,86
14	27,12	23,47	153,92	345	0,69
15	1,26	4,46	26,46	0	0,78
16	4,44	23,29	72,79	59	0,63
17	17,69	107,95	115,58	348	0,38
18	26,50	92,28	298,79	195	0,61
19	42,03	66,18	236,35	72	0,55
20	21,72	9,38	92,63	4	0,66
21	22,43	15,81	80,46	12	0,53
22	8,40	5,25	41,16	0	0,67

5.1. Estimation de la marge d'erreur par rapport aux résultats obtenus par calcul sur mosaïque

La validation a été faite sur les 5 bassins versants pris comme échantillons (tab. 4). Nous remarquons que les résultats sont précis à 95 % en moyenne; ceci est dû essentiellement aux facteurs suivants :

- une superposition fiable du fichier rastérisé «bassins versants» sur l'image, ainsi que sur les photographies aériennes;
- de bonnes description et localisation des surfaces perméables sur l'image satellitaire.

Tableau 4. Comparaison des résultats de l'image HRV de SPOT avec ceux calculés sur les photographies aériennes

Bassin versant	Surface (ha)	Photographies aériennes	HRV de SPOT	Décalage (%)
10	surface totale	81,86	84,25	2,90
	surface artificialisée	61,00	66,97	9,00
	coefficient de ruissellement	0,75	0,79	4,00
14	surface totale	156,25	153,92	1,50
	surface artificialisée	100,04	106,78	6,32
	coefficient de ruissellement	0,64	0,69	5,00
16	surface totale	70,78	72,79	2,75
	surface artificialisée	40,48	45,65	11,33
	coefficient de ruissellement	0,57	0,63	6,00
20	surface totale	90,50	92,63	2,30
	surface artificialisée	56,11	61,57	8,87
	coefficient de ruissellement	0,62	0,66	4,00
22	surface totale	40,70	41,16	1,20
	surface artificialisée	24,36	27,51	11,45
	coefficient de ruissellement	0,61	0,67	7,00
Décalage moyen (%)		Surface totale	=	2,11
		Surface artificialisée	=	9,39
		Coefficient de ruissellement	=	5,20

5.2. Estimation de la marge d'erreur par rapport aux résultats obtenus par le Service hydraulique

Du Service hydraulique d'Oran, nous avons obtenu les estimations du coefficient de ruissellement sur les 22 bassins versants (SOGREAH, 1983) et nous rappelons que la marge d'erreur tolérable est de 10 %.

Si nous examinons les coefficients (tab. 5), dont la marge d'erreur est supérieure à 10 %, nous remarquons que les bassins versants 10 et 12 sont situés à la périphérie de la ville. Entre 1983 (date de l'étude de SOGREAH) et 1986 (date de prise de vue de l'image), plusieurs constructions ont eu lieu, éliminant ainsi des surfaces couvertes de végétation et des terrains nus.

6. Conclusion

La marge d'erreur introduite est de l'ordre de 5,2 % par rapport à la mesure faite par planimétrie sur les photographies aériennes. Elle est de 6,4 % par rapport à l'estimation de SOGREAH (1983). Ces résultats restent largement acceptables dans la mesure où la marge d'erreur tolérée est de 10 %.

Tableau 5. Comparaison des résultats obtenus sur l'image HRV de SPOT avec ceux de SOGREAH (1983)

Bassin versant	Coefficient de ruissellement			Décalage (%)	
	HRV de SPOT	SOGREAH	Photographies aériennes	HRV de SPOT/ photographies	HRV de SPOT/ SOGREAH
1	0,47	0,50			3
2	0,86	0,80			6
3	0,89	0,80			9
4	0,88	0,80			8
5	0,87	0,80			7
6	0,77	0,80			3
7	0,74	0,80			6
8	0,67	0,60			7
9	0,60	0,60			0
10	0,79	0,60	0,75	4	19
11	0,90	0,80			10
12	0,77	0,60			17
13	0,86	0,80			6
14	0,69	0,79	0,64	5	10
15	0,78	0,80			2
16	0,63	0,60	0,57	6	3
17	0,38	0,40			2
18	0,61	0,60			1
19	0,55	0,60			5
20	0,66	0,60	2,62	4	6
21	0,53	0,60			7
22	0,67	0,70	0,61	6	3

Pour le réseau déjà existant, cet outil sera d'une aide extrêmement efficace à sa gestion. Aussi, pour une étude d'installation de nouveaux réseaux d'assainissement, cet outil permettra de réaliser une chaîne de traitements automatiques pour le calcul des débits maximaux et ce, en intégrant un modèle numérique de terrain (MNT).

Généralement, les débits sont directement liés à la nature du substrat; en effet, qu'il s'agisse d'un sol argileux ou rocheux, les débits changent. Ainsi, une utilisation plus rationnelle consiste à introduire d'autres documents tels que la carte lithologique. Pour cela, nous avons envisagé l'intégration d'une banque de données urbaines dans un système d'information géographique, ce qui va permettre une automatisation plus complète et un suivi plus efficace des phénomènes évolutifs.

Enfin, l'apport de cette technique pourrait être d'une aide efficace pour l'évaluation des risques d'inondation (carte de sensibilité aux inondations), parce qu'il faut garder en tête l'idée que les conditions de l'occupation du sol dans les bassins versants ne sont pas très stables : l'érosion des sols se développe, des constructions nouvelles apparaissent et le coefficient de ruissellement change considérablement.

7. Références

- BILLINGSLEY, F. C. 1979. Theory on data processing and instrumentation. Principes physiques et mathématiques de la télédétection. CNES, École d'été de physique spatiale, Strasbourg, p. 293-297.
- BOURRIER, P. 1981. Les réseaux d'assainissement. Édition technique & documentation, Paris, 329 p.
- CHENE, J. M. 1986. Modèles de bassins versants pour la prévision hydrologique. Rapport des huitième et neuvième cours de formation FAO/UNDRO/OMM/ASE, RSC série 41, Rome, 275 p.
- CUSSOL, J., LEPRIEUR, C., PEDRON, C. et TOURNET, J. 1987. Intégration des données SPOT dans un système d'informations géocodées. SPOT 1, utilisation des images, bilan et résultats. CNES, Toulouse, p. 515-530.
- DARTEYRE, J.-P. et DUBUCQ, M. 1988. L'indice de végétation, l'indice de brillance. Groupement du développement de la télédétection aérospatiale, Toulouse, 20 p.
- SOGREAH. 1983. Société grenobloise d'études et applications hydrauliques. Réseau d'assainissement de l'agglomération d'Oran, Service hydraulique, Oran (Algérie).

4

Influence des failles actives sur les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay (nord du Viêt Nam)

TRINH PHAN-TRONG

*Institut de géologie, Centre national pour la recherche scientifique du Viêt Nam, Nghiado, Tuliem, Hanoi, Viêt Nam;
téléphone : +84 (4) 34-30-68; télécopieur : +84 (4) 35-24-83*

Résumé

La tectonique récente de la partie nord du Viêt Nam est très importante. Deux zones de failles principales sont affectées par des mouvements rapides : les zones de failles du fleuve Rouge (*song Hong*) et de Dien Bien Phu. On a construit deux grands réservoirs à côté de la zone de faille du fleuve Rouge : le lac de la rivière Chay (*song Chay*) et le lac de Hoabinh. Nous avons utilisé des techniques de télédétection en les combinant avec différentes méthodes de géologie, de géophysique et d'observations sur le terrain pour déterminer la cinématique des failles actives et pour estimer les risques géologiques (glissement de terrain, fracturation de terrain et de barrage, tremblement de terre, érosion à l'aval de barrage, etc.). Dans la région du lac de Hoabinh, une zone de failles normales actives de direction N-S, est mise en évidence. Cette zone de failles est responsable des sismicités induites produites dans la région. On estime que la magnitude maximale de tremblement de terre est de l'ordre de 6,2-6,7 sur l'échelle de Richter pour la faille située à la bordure est de la vallée de Hoabinh, 2 km à l'est du barrage. Le lac de la rivière Chay, appelé lac de Thac Ba, est localisé à côté d'une grande faille active, qui est une trace principale de la zone de failles du fleuve Rouge. La vitesse du mouvement de cette faille est de l'ordre de quelques mm/an. Le lac est situé dans une zone sismique importante : la magnitude maximale de tremblement de terre est de l'ordre de 8.



1. Introduction

La déformation récente de l'Asie suscite depuis quelques années un regain d'intérêt. Plusieurs équipes dans le monde ont une approche pluridisciplinaire de ce problème. Le modèle d'extrusion en deux phases (TAPPONNIER *et al.*, 1982, 1986) a ainsi vu une de ses prédictions majeures (extrusion de l'Indochine vers le SE au Tertiaire) vérifiée par l'étude de la zone de failles du fleuve Rouge (TAPPONNIER *et al.*, 1990; SCHARER *et al.*, 1990). Il ne fait aucun doute que la tectonique active du nord du Viêt Nam est aussi importante que celle observée dans le Yunnan de la Chine (ALLEN *et al.*, 1984; PHAN-TRONG *et al.*, 1991, 1993).

Deux zones de failles principales sont affectées par des mouvements rapides : la zone de failles du fleuve Rouge et la faille de Dien Bien Phu (fig. 1). Les réservoirs de la rivière Chay et de Hoabinh sont construits à côté de la zone de failles du fleuve Rouge.

Le lac de Hoabinh est localisé sur la rivière Noire (*song Da*), 75 km à l'ouest de Hanoi. Le volume d'eau du lac est de $9,45 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Le barrage de Hoabinh, d'une hauteur de 165 m, est le plus grand barrage de l'Asie du Sud-Est. Ce lac joue deux rôles principaux : le contrôle des inondations et la production d'électricité. La puissance totale de l'usine hydro-électrique est de 1 920 MW. Le lac, qui a une longueur de 200 km, de Hoabinh à Sonla, et une surface de 230 km², change profondément l'environnement de la région. Le remplissage du réservoir a commencé en 1988. Lorsque le niveau d'eau a atteint la cote de 66 m, une série de séismes de magnitude inférieure à 2,0 se sont produits au voisinage du lac. En mai 1989, un tremblement de terre de magnitude 4,9, avec une intensité de 6-7, a provoqué des dégâts sur les habitations de la région près du barrage (NGUYEN NGOC *et al.*, 1990; NGUYEN VAN et DUONG, 1990). Plusieurs fissures et glissements de terrain sont observés au voisinage du lac et le long des structures géologiques. L'érosion intense des bordures de la rivière Noire, à l'aval du barrage de Hoabinh, est liée aux changements brusques du niveau d'eau par le fonctionnement du système des tunnels. Elle pose un problème très important pour la région.

Le lac de Thac Ba résulte de la construction d'un barrage sur la rivière Chay. Le volume de ce lac est plus modeste que celui de Hoabinh. Ce barrage de 60 m de hauteur, avec une usine hydro-électrique d'une puissance de 180 kW, est malheureusement situé à côté d'une grande faille active passant sur la bordure SO du lac. La faille active de la rivière Chay est une trace principale de la zone de faille du fleuve Rouge. Le niveau d'eau du lac est de beaucoup inférieur à celui prévu.

À l'aide des images TM de Landsat, HRV de SPOT, SOYOUZ (russe) et des photographies aériennes et en y combinant les méthodes de géologie, de géophysique et des observations sur le terrain, on peut identifier en détail ce système de failles dans la région des réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay, mettre en évidence les failles actives et estimer ainsi les risques sismiques de même que l'influence de l'environnement géologique sur les réservoirs (fissurations, glissements de terrain, érosion à l'aval des barrages, etc.).

2. Matériel et méthode

Dans la région des réservoirs, on peut combiner les images TM de Landsat (résolution de 30 m), HRV de SPOT en mode multibande (résolution de 20 m), HRV de SPOT en mode panchromatique (résolution de 10 m), SOYOUZ (résolution de 6 à 8 m), les photographies aériennes stéréoscopiques (échelles 1: 33 000 et 1: 15 000), la carte géologique (1: 200 000)

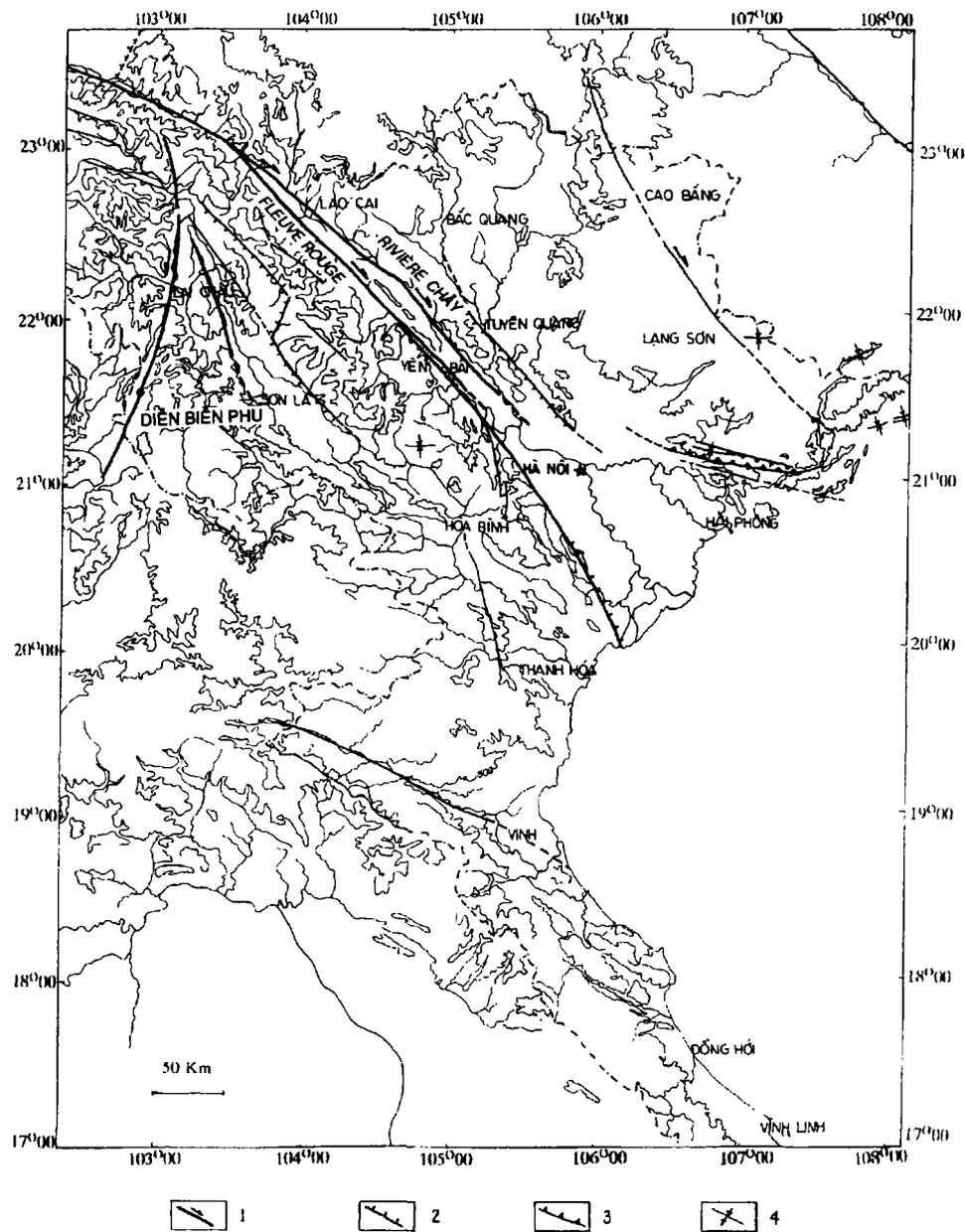


Figure 1. Le système de failles actives du nord du Viêt Nam; 1) faille décrochante, 2) faille normale, 3) faille inverse, 4) pli quaternaire

et la carte topographique (1: 50 000). La comparaison de différents types de données nous permet d'identifier les structures géologiques de la région (failles, plis, etc.). En particulier, à l'aide de la méthode mise au point par l'équipe de Tapponnier, à l'Institut de physique du globe de Paris, on peut distinguer non seulement les failles et les plis à partir de linéaments, mais aussi les failles anciennes et les failles actives. De plus, on peut identifier les types de failles actives (normales, décrochantes) et, dans certain cas, des failles inverses ou chevauchantes ainsi que le sens du mouvement. Cette technique se base principalement sur la comparaison des marqueurs géomorphologiques observés sur les images : réseaux hydrographiques, facettes triangulaires, terrasses, moraines, crêtes de montagne, cônes alluviaux, surfaces d'érosion ou sur la comparaison des marqueurs géologiques : structure «*pull-apart*» avec sédiments quaternaires, structure «*push-up*», etc. La mesure des déplacements des marqueurs coupés par des failles nous donne les rejets des failles actives. Si on connaît l'âge des marqueurs, on peut déterminer la vitesse de cette faille. Cette technique est utilisée par l'équipe de Tapponnier pour déterminer les rejets et les vitesses des principales failles actives d'Asie, d'Amérique du Sud et d'Afrique du Nord.

Les images TM de Landsat sont utilisées d'abord pour étudier une vaste région. Elles nous permettent de cartographier les structures géologiques générales. Les études sur les images TM et HRV sont concentrées ensuite sur les zones de failles pour préciser la largeur de faille, le type de faille et le sens du mouvement. Les images HRV à grande échelle sont utilisées pour observer les marqueurs géomorphologiques. Les photographies aériennes stéréoscopiques sont enfin utilisées le long de la trace de la faille active pour observer en détails les accidents et les terrasses.

Dans la région de Hoabinh, on peut observer les facettes triangulaires à partir de l'image HRV et des photographies aériennes. Ces observations sont confirmées sur le terrain. Le rejet vertical est précisé par des mesures géodésiques.

L'interprétation visuelle d'images joue un rôle très important. Elle est combinée avec le traitement numérique de l'image HRV. L'amélioration des contrastes est primordiale et simple. Elle permet d'augmenter le contraste des images afin de pouvoir discerner à l'oeil le maximum de détails. Deux approches sont utilisées : la première est l'étalement linéaire de l'histogramme (étirement), qui présente l'intérêt de conserver et d'améliorer les contrastes sur les zones de faible dimension, proches de la taille des pixels, ainsi que de conserver le contraste relatif entre les différentes zones. La deuxième est l'étalement dynamique (normalisation) qui permet d'augmenter le contraste dans des zones d'intensités fortement représentées et qui donne des images globalement plus contrastées. La combinaison de deux canaux, ainsi que des filtrages sont également utilisés. L'image est visualisée en détails à l'écran ou sortie sur un restituteur d'images VISIR.

3. Résultats

3.1. Géodynamique générale

Les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay sont construits dans la partie nord du Viêt Nam. Il est très important de connaître la tectonique active de cette région pour estimer les risques sismiques ainsi que l'influence de l'environnement géologique sur les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay. On ne peut pas limiter l'étude aux strictes régions voisines des lacs; on doit situer ces dernières dans le cadre géodynamique de l'Asie : la collision de l'Inde contre l'Asie avec le déplacement décrochant des systèmes de failles crustales.

Les images TM et HRV, les photographies aériennes et les cartes topographiques nous donnent un moyen très efficace pour étudier en détail les systèmes de failles actives.

Le déplacement du système de failles du fleuve Rouge a provoqué l'extrusion du sud de la Chine vers le SE au Miocène. Le sens du mouvement de cette faille a changé récemment au Pliocène-Quaternaire. La zone de failles du fleuve Rouge se prolonge, sur 700 km, du Tibet (Yunnan) à travers tout le nord du Viêt Nam jusqu'à la mer de Chine. Au nord du Viêt Nam, elle se divise en une zone plus complexe, avec deux traces principales : la trace de la vallée du fleuve Rouge et la faille de la rivière Chay. Elles se prolongent, respectivement, au SO et NE de la chaîne métamorphique Day Nui Con Voi. La trace de la vallée du fleuve Rouge se divise elle-même en deux failles principales : la faille NO et la faille SE de la vallée du fleuve Rouge.

À l'aide de l'image HRV (panchromatique et couleur composite) et des cartes topographiques détaillées, nous avons pu observer des décalages importants des réseaux hydrographiques le long de la zone de failles du fleuve Rouge. Les décalages des rivières sont systématiquement très nets. Plusieurs rivières et ruisseaux le long de la faille de la rivière Chay sont décalés en sens dextre avec un rejet de 250 m à 1000 m (valeur moyenne de 566 m). Le décalage dextre des ruisseaux varie de 200 à 600 m le long la faille NE de la vallée du fleuve Rouge et de 220 à 700 m (valeur moyenne de 313 m) le long de la faille SO de la vallée du fleuve Rouge. Le déplacement sénestre de la faille de Dien Bien Phu, une faille conjuguée avec la zone de faille du fleuve Rouge, est aussi mise en évidence avec le décalage des réseaux hydrographiques de 270 à 1500 m. Le réservoir de Thac Ba est localisé juste à côté de la faille de la rivière Chay, en passant la bordure SO du lac. Le barrage de Thac Ba est situé à seulement 1 km au NE de cette faille. Vers le delta du fleuve Rouge, la zone de faille se divise en plusieurs failles de composante normale-décrochante dextre. Une zone de failles normales de direction N-S apparaît dans la région du réservoir de Hoabinh.

3.2. Structure géologique

La structure géologique de la région de Hoabinh est très complexe. La région est déformée par plusieurs phases tectoniques importantes (NGUYEN TRONG *et al.*, 1991; PHAN TRONG *et al.*, 1991). Le réservoir de Hoabinh est situé à la frontière de deux grandes structures du NO du Viêt Nam. Dans la région s'étendant de Suoi Rut jusqu'à l'amont de la rivière Noire, on trouve un ensemble de failles parallèles, de direction NO-SE, qui sépare la zone de plissement de la rivière Noire au SO et le soulèvement de Fanxipan au NE.

À partir des images TM, HRV (fig. 2) et SOYOUZ, on peut identifier les systèmes de failles à différentes échelles. De Suoi Rut à Hoabinh, on peut observer la frontière de deux structures prenant la forme d'une faille courbe (fig. 3). Le soulèvement de Fanxipan est caractérisé par le système de failles et de plis courbes. La zone de Fanxipan est chevauchée vers le SE par de grands mouvements horizontaux. Ces mouvements provoquent la formation d'un ensemble de chevauchements courbes parallèles. Cet ensemble est entrecoupé par des failles plus jeunes de direction NO-SE. Dans la zone de plissement de la rivière Noire, on observe deux systèmes de failles : un réseau de failles de direction E-O, parallèle à la grande faille de Cho Bo-Suoi Rut et un autre réseau de failles de direction NO-SE. Le réseau de failles est à la fois de type normal et décrochant. Il faut remarquer que toutes les failles mentionnées ne sont plus actives. Elles existent comme des accidents géologiques ou des zones de faiblesse.



Figure 2. Image HRV de SPOT en mode panchromatique de la région de Hoabinh, 21 juin 1990; on peut observer un segment d'une faille normale active de direction N-S à l'est de la vallée de la rivière Noire (interprétation sur la figure 3)

À partir des images SOYOUZ, on peut distinguer l'âge relatif des systèmes de failles :

- a) le système de failles courbes dans la structure de Fanxipan est le plus ancien;
- b) la grande faille de Cho Bo - Suoi Rut et le système de failles de direction E-O sont plus jeunes que le système de failles courbes;
- c) les failles de direction NO-SE et les failles normales de direction N-S de Phu Tho-Hoabinh sont les plus jeunes. Le système de failles N-S est actuellement actif.

Le lac de la rivière Chay est localisé sur des roches métamorphiques et des schistes. À partir des images HRV (fig. 4), on observe les zones de cisaillements et les zones de foliations à grande échelle. La direction générale des foliations et des zones de cisaillement NO-SE est courbée localement sous forme sigmoïde. La bordure SO du lac de la rivière Chay est marquée par une faille active spectaculaire, soit une trace de la zone de faille du fleuve Rouge.

3.3. Failles actives et risques sismiques

L'analyse géomorphologique des images (TM, HRV, SOYOUZ et photographies aériennes) ainsi que l'observation sur le terrain permettent de mettre en évidence une trace de la zone de failles du fleuve Rouge tournant de direction N-S, en passant par la région de Hoabinh. La cinématique de mouvement le long de la zone de failles change principalement d'une

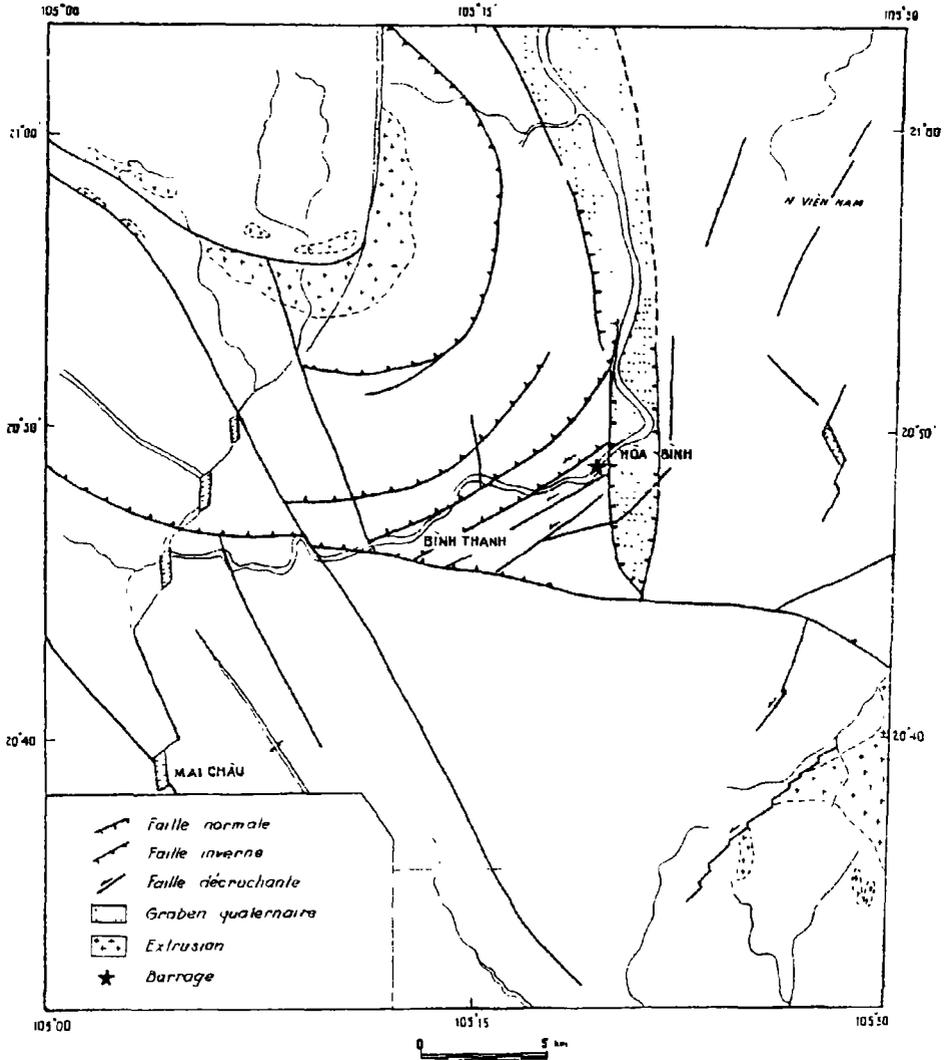


Figure 3. Structure géologique de la région de Hoabinh

faille décrochante dextre, entre Phu Tho et Ngoi Lat, à une zone de failles entre Ngoi Lat et Hoabinh. On distingue quatre failles dans la zone de failles de Phu Tho à Hoabinh :

a) une faille de direction NNO-SSE de Phu Tho à Ngoi Lat; le sens décrochant dextre de cette faille est mis en évidence par le décalage du réseau hydrographique;

b) une faille normale de direction N-S, à pendage vers l'est, entre Ngoi Lat et Xom My; la longueur de cette faille est de 15 km; elle montre des jeux normaux et est marquée par des facettes triangulaires bien visibles sur les images HRV et les photographies aériennes; on peut observer un escarpement de faille normale de 2 à 3 m de hauteur; on ne connaît pas



Figure 4. Image HRV de SPOT en mode multibande de la région de la rivière Chay, 16 septembre 1987 (interprétation sur la figure 5)

de sismicité historique sur cette faille alors qu'une activité holocène avec un escarpement frais est évidente;

c) une faille normale de direction N-S, à pendage vers l'ouest, de 12 km de longueur, est localisée vers l'est de la ville de Hoabinh; elle est marquée sur les photographies aériennes par des facettes triangulaires et des cônes alluviaux décalés; on observe sur le terrain un escarpement de 0,5 m et une couche de galets quaternaires décalée d'une hauteur de 20 m;

d) une autre faille normale, de direction N-S, à pendage vers l'est de 5 km de longueur est localisée vers l'ouest de la vallée de Hoabinh.

Ces deux dernières failles normales, de direction N-S, forment le graben de Hoabinh où s'accumulent des sédiments quaternaires. La faille normale, à l'ouest de Hoabinh, peut être interprétée comme une faille compatible avec la faille située à l'est de Hoabinh. Cette faille est le résultat de l'absorption de la déformation de surface provoquée par le déplacement de la faille de l'est de Hoabinh. Il faut noter que l'épaisseur de sédiments quaternaires dans le graben est très importante (le barrage de Hoabinh est installé sur une couche de galets de 70 m d'épaisseur). Jusqu'à présent, la faille Suoi Rut-Cho Bo est considérée comme une faille active. Cependant, nous ne trouvons aucun argument relativement à l'activité récente ou actuelle de cette faille.

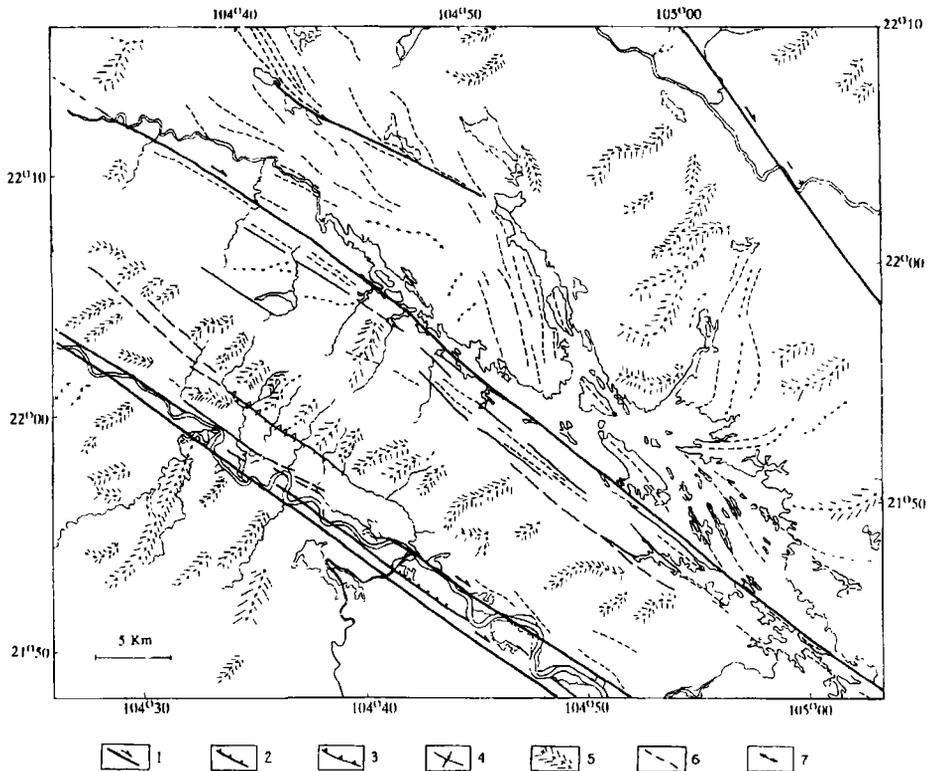


Figure 5. Structure géologique de la région de la rivière Chay, 1) faille décrochante, 2) faille normale, 3) faille inverse, 4) pli quaternaire, 5) crête de montagne, 6) foliation, 7) décalage de faille

Pour le réservoir de la rivière Chay, le plus grand accident de la structure géologique est aussi une grande faille active soit la faille de la rivière Chay (fig. 5). Nous avons mentionné cette faille dans le contexte géodynamique du Viêt Nam et de l'Asie du Sud-Est. Elle est le risque majeur pour ce réservoir. Il faut noter que les deux traces de failles du fleuve Rouge sont aussi un risque important pour le lac.

Si la géométrie d'une faille active est déterminée, on peut estimer la magnitude maximale de tremblement de terre produit par cette faille en calculant le moment sismique. Dans la région de Hoabinh, la faille normale entre Ngoi Lat et Xom My peut produire un tremblement de terre de magnitude entre 5,7 et 6,3. La faille normale à l'ouest de Hoabinh et donc près du barrage peut produire un tremblement de terre de l'ordre 5,2. Par sa longueur et sa vitesse de déplacement, la faille de la rivière Chay peut produire un grand tremblement de terre d'une magnitude de l'ordre 7,6-8,0.

3.4. Sismicité induite

Quelques 46 séismes de magnitude entre 2,0 et 4,0 ont été notés dans la région de Hoabinh depuis 1900. Lorsque le niveau d'eau du réservoir a atteint la cote de 86-87 m, une série

de séismes de magnitude inférieure à 2,0 se sont produits au voisinage du barrage. Le plus grand tremblement de terre, de magnitude 4,9, s'est produit en mai 1989. En général, la sismicité induite s'est produite dans une région activée par la déformation extensive et la hauteur du barrage de l'ordre 100 m avec le volume du lac supérieur à 10^9 m³. Le lac de Hoabinh satisfait cette condition. Il est raisonnable de lier le tremblement de terre de mai 1989 avec le fonctionnement de la faille de l'est de Hoabinh. Il est probable que plusieurs séismes induits seront produits à l'intersection entre la faille de Cho Bo et les deux failles actives du graben de Hoabinh. On peut estimer que les magnitudes de séismes induits ne peuvent être supérieures à la valeur maximale de 6,7 prévue pour la faille normale localisée vers l'est de Hoabinh.

3.5. Fissuration et glissement de terrain

Après le remplissage plusieurs fissures d'extension se sont produites au voisinage du réservoir. La longueur des fissures varie entre 10 et 300 m avec une largeur entre 1 et 20 cm. La zone de fissures se prolonge dans certains cas jusqu'à 1 km. On distingue trois types de fissures : 1) le premier est lié aux glissements de terrain; il se produit à côté du lac, dans la saison des pluies; 2) le deuxième est lié à la sismicité induite; plusieurs fissures apparaissent sur les maisons pendant le tremblement de terre de magnitude 4,9; 3) le troisième apparaît le long des failles.

L'apparition des fissures le long des failles indique que la région n'est pas en état d'équilibre. Certaines fissures sont observées dans le barrage. Elles sont probablement liées à des causes géotechniques. Quelques chercheurs supposent que les fissures dans le barrage sont liées aux failles actives, mais à partir d'images à différentes échelles, on peut supprimer cette cause. Les glissements de terrain sont observés à la bordure du lac. Plusieurs glissements de terrain sont anciens. Ils se développent à des altitudes différentes. Le plus grand glissement de terrain a de 800 à 1 000 m de long. Il se trouve principalement dans les sédiments continentaux (T3k) et sur le contact entre ces sédiments et les calcaires Anizi (T2a). Heureusement, on n'observe aucun important glissement de terrain à côté du barrage, car on reconnaît que les glissements de terrain de grand volume, produits pendant un grand tremblement de terre, sont très dangereux pour le barrage parce qu'ils provoquent des vagues gigantesques.

3.6. Fuite d'eau des réservoirs

La fuite de l'eau du réservoir de Hoabinh peut prendre deux formes différentes : la fuite par le barrage et la fuite par des failles. La fuite par le barrage est beaucoup plus importante que prévu. Les mesures au piézomètre montrent que cette fuite est probablement liée à une couche de galets (épaisseur de 70 m) sous le barrage et à un réseau de failles de chaque côté du barrage. Il est difficile d'estimer la fuite par les failles. Cependant, à partir de la structure géologique, on suppose que la fuite a probablement lieu le long de la faille de Cho Bo et dans la vallée de Mai Chau. Dans le barrage de la rivière Chay, le niveau d'eau du lac est de beaucoup inférieur à celui prévu. Un volume important d'eau est perdu par la fuite d'eau. Il est probable qu'un grand volume est perdu par la faille de la rivière Chay. Pour préciser la fuite d'eau, nous proposons des mesures par piézomètre le long de ces failles (failles de Cho Bo et de la rivière Chay).

3.7. Érosion à l'aval des barrages

Il n'y a pas de grand problème d'érosion à l'aval du réservoir de la rivière Chay parce que ses bordures sont dans les roches métamorphiques et le volume du lac est modeste. Cependant, l'érosion intense des bordures de la rivière Noire à l'aval du barrage de Hoabinh, causée par le changement brusque du niveau d'eau par le fonctionnement du système de tunnels, pose un problème très important. À l'aide des images prises à différentes périodes, on peut estimer l'intensité de l'érosion. C'est un travail à venir.

4. Discussion

Certains sismologues considèrent que la sismicité induite dans la région de Hoabinh est liée à l'activité de la faille de Cho Bo, de direction E-O (NGUYEN NGOC *et al.*, 1990; NGUYEN VAN et DUONG, 1990). Cependant, sur les images, on n'observe aucune évidence de déplacement actif de cette faille. Cette remarque est confirmée ensuite sur le terrain. La faille de Cho Bo est une grande faille ancienne mais elle n'est plus active aujourd'hui. Depuis 1900, certains séismes de magnitude 4,0 se sont produits dans la région de Hoabinh. Ils sont situés à l'intersection entre la faille de Cho Bo et la zone de failles de direction N-S. La grande incertitude de localisation sismique empêche de les lier à la zone de failles N-S du graben de Hoabinh. À partir de nos résultats, on peut confirmer que la sismicité induite est liée à la zone de failles actives, de direction N-S. La faille active ne coupe donc pas le barrage de Hoabinh : les fissures sur ce barrage sont donc liées localement aux causes géotechniques.

5. Conclusion

Les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay sont construits dans une région à la tectonique active importante de l'Asie du Sud-Est, à côté des deux grandes failles actives du fleuve Rouge et de la rivière Chay. Les magnitudes maximales des séismes dans la région des réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay sont respectivement de l'ordre 6,7 et 8,0. La fuite de l'eau des deux réservoirs et l'érosion à l'aval du barrage de Hoabinh sont deux grands problèmes et doivent être étudiées en détail dans l'avenir.

6. Remerciements

Je tiens à remercier Messieurs P. Tapponnier, R. Lacassin, P.H. Leloup, Winter, Phung Van et Y. Nguyen Trong pour les discussions que nous avons eues, l'UREF pour une bourse d'excellence qui m'a permis de faire un stage à l'Institut de physique du globe de Paris et à l'Institut national des sciences de l'Univers, et le Centre national de la recherche scientifique de France pour le financement du projet «Tectoscope».

7. Références

- ALLEN, C. R., GILLESPIE, A. R., HAN, Y., SIEH, K. E., ZHANG, B. and ZHU, C. 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China : Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. *Journal of the American Geological Society* , vol. 95, p. 686-700.
- NGUYEN NGOC, T., NGUYEN DINH, X. et NGUYEN THANH, T. 1990. Sismicités induites du lac réservoir de Hoabinh. *Sciences de la Terre, Hanoi*, vol. 12, ser. 4, p. 97-105 (en vietnamien).
- NGUYEN VAN, L. et DUONG, Q. H. 1990. Tremblement de terre de Hoabinh du 22 mai 1989. *Sciences de la Terre, Hanoi*, vol. 12, ser. 1, p. 13-16 (en vietnamien).
- NGUYEN TRONG, Y., PHAN-TRONG, T. and PHUNG, V. P. 1991. Stress field of Hoabinh region and its surrounding area. *Symposium of the second conference of Indochinese geology, Hanoi*, vol. 2, p. 338-395.
- PHAN-TRONG, T., NGUYEN TRONG, Y. and TAPPONNIER, P. 1991. Stress field and tectonics of North Vietnam. *Symposium of the second conference of Indochinese geology, Hanoi*, vol. 2, p. 403.
- PHAN-TRONG, T., LACASSIN, R., TAPPONNIER, P. and LELOUP, P. H. 1993. Evidence for active strike-slip movements in Northwestern Vietnam. *7th congress of the European Union of Geosciences, Strasbourg*.
- SCHARER, U., TAPPONNIER, P., LACASSIN, R., LELOUP, P. H., ZHONG, D. and JI, S. 1990. Intraplate tectonics in Asia : a precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China. *Earth and Planetary Sciences Letter*, vol. 97, p. 65-67.
- TAPPONNIER, P., PELZER, G., LE DAIN, Y. and ARMIJO, R. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia, New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, vol. 10, p. 611-616.
- TAPPONNIER, P., PELZER, G. and ARMIJO, R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. *From Coward, Collision tectonics, Geological Society*, n° 19, p. 115-157.
- TAPPONNIER, P., LACASSIN, R., LELOUP, P. H. and SCHARER, U. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt : Tertiary left-lateral shear between Indochina and south China. *Nature*, vol. 343, p. 431-437.

5

Intégration de la pente lors du processus de segmentation des images satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol : résultats préliminaires

JACYNTHE POULIOT ¹, KEITH THOMSON ¹, JEAN-JACQUES CHEVALLIER ¹, MARTINA CHUMOVA ¹ et MOHAMED RACHED BOUSSEMA ²

¹ *Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1K 7P4; téléphone : +1 (418) 656-7895; télécopieur : +1 (418) 656-7411*

² *École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie; téléphone : +216 (1) 514-700; télécopieur : +216 (1) 510-729*

Résumé

Ce projet de recherche et de développement vise principalement la combinaison spatiale des images satellitaires HRV de SPOT et TM de Landsat avec les informations de pente pour la cartographie de l'occupation du sol. On parle ici d'intégration numérique réelle des données images aux données vectorielles se déroulant en deux étapes, soit la segmentation de l'image et la classification de segments. La segmentation hiérarchique est une technique d'analyse exploitant à la fois la dimension spatiale et spectrale des informations. Un fichier des zones de pente est introduit sous forme numérique dans un système d'information géographique (SIG) et est utilisé comme nième canal, pour aider l'algorithme de segmentation à délimiter les entités spatialement homogènes. Les segments homogènes sont par la suite classifiés par l'intermédiaire d'un outil statistique non-conventionnel en télédétection, soit l'analyse discriminante. Les premiers résultats indiquent que la classification de segments, au lieu de pixels originaux de l'image, permet d'améliorer légèrement la précision des

résultats. Cette amélioration est notamment perçue dans les champs de grandes superficies. L'introduction de la pente permet d'améliorer la précision des classifications jusqu'à 25 % dans les zones accidentées. Cependant, cette même information sur la pente amène beaucoup de confusion dans des zones à faible relief.

1. Introduction

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de coopération internationale qui s'intitule «SIRS basé sur des données de télédétection pour la protection des eaux et des sols (Tunisie)» et qui implique le Centre de recherche en géomatique (CRG) de l'Université Laval, l'École nationale d'ingénieurs de Tunis (ÉNIT) et la Direction de la conservation des eaux et des sols (DCES) du ministère de l'Agriculture de Tunisie. La description du projet, ainsi que les objectifs globaux, sont décrits dans BOUSSEMA *et al.* (1992). Ce projet vise, entre autres, à mettre sur pied une méthodologie pour acquérir, gérer et tenir à jour les informations descriptives du territoire et à obtenir une meilleure connaissance des contraintes et des possibilités de l'intégration multisource (images satellitaires, photographies aériennes, cartes thématiques).

Suite à l'inventaire des données, l'analyse des besoins a clairement démontré la nécessité d'obtenir une information sur l'occupation du sol qui soit en même temps à jour et la plus exacte possible. Dans des projets comme celui-ci, on a souvent tendance à prendre pour acquis l'existence de cartes d'occupation du sol qui soient précises et à jour. On réalise rapidement que, dans les pays en voie de développement, cette information est déficiente ou même inexistante. La cartographie de l'occupation du sol est traditionnellement réalisée à l'aide de l'interprétation des photographies aériennes disponibles sur le secteur d'étude. Cependant, l'incertitude de la photo-interprétation et la subjectivité du produit résultant (liée à l'expérience du photo-interprète) viennent limiter grandement leur utilisation dans des projets d'application. Cette information sur le territoire joue néanmoins un rôle important dans les projets de conservation des eaux et des sols, tels que réalisés par la DCES. Par leur répétitivité et leur grand champ d'observation, les images satellitaires sont perçues comme des outils de choix pour la cartographie de l'occupation du sol.

Les techniques de classification des niveaux de gris des pixels sont habituellement employées pour former les classes d'occupation. Les résultats des classifications, basées sur les pixels, sont cependant largement dépendants du type de région, du type d'occupation, des dates d'acquisition des images et de la confusion amenée par les pixels mixtes (HILL and MEGIER, 1988; IOKA and MASATO, 1986). De plus, la classification traditionnelle se limite à l'unité spectrale des pixels. Il existe des alternatives, comme l'introduction de connaissance *a priori*, l'ajout de données contextuelles et les approches structurales. Les approches structurales, telles que la segmentation sont considérées quelquefois supérieures aux classifications car, en plus d'exploiter l'espace spectral, elles utilisent la forme comme caractéristique supplémentaire pour distinguer les classes d'objet (HILL and MEGIER, 1987). BÉNIÉ *et al.* (1987) ont utilisé un algorithme de segmentation hiérarchique sur les bandes du capteur Thematic Mapper (TM) de Landsat qui a permis d'améliorer les résultats de classification d'environ 15 %. AIT BELAID *et al.* (1992) ont employé le même algorithme de segmentation sur les bandes du capteur HRV de SPOT et un fichier numérique décrivant le cadastre, ce qui astreint les segments à la structure spatiale de cette couche cartographique. Ces résultats montrent une amélioration de la classification de l'ordre de 20 %.

Plusieurs variables environnementales influencent la signature spectrale des objets captés par le satellite (KARASKA *et al.*, 1986). Parmi ces variables, la pente est un facteur relativement important et déterminant dans des secteurs ayant un relief moyennement accidenté. L'intégration de l'information sur la pente, lors du processus de segmentation des images, peut aider l'algorithme à mieux discriminer les différentes classes d'occupation du sol.

2. Objectifs

L'objectif général de ce travail est donc de vérifier l'application de l'algorithme de segmentation hiérarchique sur un ensemble de données multisources pour la cartographie de l'occupation du sol dans un milieu semi-aride. L'intégration d'un fichier numérique, contenant le degré de pente, dans le processus de segmentation vise à améliorer les résultats de segmentation en imposant une structure spatiale reliée aux différentes classes de pente. L'utilisation de l'analyse discriminante pour la classification des segments homogènes aspire à produire un meilleur regroupement des classes que la classification traditionnelle des pixels. La sélection automatique des segments qui serviront pour la classification dirigée vise également à diminuer l'influence de l'interprète. La combinaison des données TM et HRV, l'introduction de données auxiliaires, comme la pente, et de connaissances *a priori* visent à maximiser l'utilisation des données satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol.

3. Méthodologie

3.1. Données

Le secteur d'étude correspond à la partie sud du bassin versant de l'oued Ettieur, situé dans le centre de la Tunisie. Le secteur couvre une superficie approximative de 20 km² et présente des altitudes variant entre 285 et 860 m. On retrouve cinq grandes classes d'occupation du sol soit : arboriculture, culture annuelle, parcours (pâturage), constructions isolées et lit de cours d'eau. Le site d'étude a fait l'objet d'une interprétation de photographies aériennes au 1: 20 000 datant de 1988. Cette photo-interprétation a été réalisée en stéréoscopie par K. Ziadi (ingénieur de la DCES) et selon leur système de classification des terres. Les photographies interprétées sont, par la suite, redressées et la photo-interprétation reproduite numériquement dans un SIG.

Le jeu des données est constitué de 3 bandes HRV datant du 26 février 1991, de 6 bandes TM datant du 6 juin 1987 et d'un fichier numérique dérivant les zones de pente extraites d'un modèle numérique de terrain (MNT). Quatre classes de pente ont été délimitées soit < 5 %, 5-10 %, 10-20 % et > 20 %. Ces classes ont été sélectionnées en conformité avec les standards utilisés par la DCES pour des travaux liés à l'érosion hydrique.

L'ensemble des traitements a été réalisé sur une station Intergraph avec le logiciel Tigris. Les logiciels de segmentation sont programmés en langage PPL (langage de développement de Tigris) et en langage C.

3.2. Correction géométrique

La correction géométrique des images HRV et TM a été réalisée au Centre canadien de télédétection avec le logiciel SRIT (Système de rectification des images de télédétection) (TOUTIN et LEMIEUX, 1991). Le SRIT est basé sur la modélisation précise des paramètres liés à la géométrie totale de prise de vue (orbite, capteur, terre). Le rééchantillonnage de l'image se fait à l'aide d'une altitude moyenne établie à partir de la carte topographique. Un levé de 23 points au GPS a été effectué en novembre 1992 dans le secteur d'étude. Ce levé a été effectué avec un récepteur PRONAV GPS 100 ayant une précision interne de l'ordre de 30 à 50 m. Huit points ont été sélectionnés pour l'ajustement du modèle mathématique. Les ortho-images résultantes ont été rééchantillonnées à 20 m et la précision des ortho-images, estimée par l'erreur moyenne quadratique, est de l'ordre de grandeur du pixel.

3.3. Correction radiométrique

Les images ont, par la suite, fait l'objet d'une normalisation radiométrique permettant de réduire les variations du signal reçu au capteur. Faute de données terrains, les corrections radiométriques appliquées ici ne tiennent pas compte des variations induites par l'atmosphère. La méthode habituellement employée pour corriger les différences induites par l'angle du soleil est de procéder au calcul de la réflectance effective mesurée au satellite (PILESJÖ, 1991; HILL and STURM, 1988; MARHAM and BARKER, 1986). Les niveaux de gris sont tout d'abord convertis en valeur de luminance spectrale par la formule suivante:

$$L_{\lambda} = A_{o\lambda} + A_{i\lambda} * NG_{\lambda}$$

où L_{λ} = luminance spectrale ($mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$);
 NG_{λ} = valeur de niveau de gris.

Les constantes $A_{o\lambda}$ et $A_{i\lambda}$ sont les paramètres de calibration obtenus dans les fichiers d'entête des images HRV et TM (MARHAM and BARKER, 1986). Les valeurs de luminance spectrale sont par la suite transformées en réflectance spectrale apparente mesurée au satellite par la formule suivante:

$$\rho_{\lambda} = (\pi * L_{\lambda} * d^2) / (E_{sun\lambda} * \cos \theta)$$

où ρ_{λ} = réflectance spectrale apparente mesurée au satellite;
 L_{λ} = luminance spectrale ($mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$);
 d^2 = distance terre-soleil en unité astronomique (= 1);
 $E_{sun\lambda}$ = flux solaire ($mW \cdot cm^{-2} \cdot mm^{-1}$);
 θ = angle zénithal du soleil en degré.

$E_{sun\lambda}$ est obtenu des tables de calibration distribuées par les agences de distribution des images satellitaires (MARHAM and BARKER, 1986; PILESJÖ, 1991).

3.4. Segmentation

L'algorithme de segmentation hiérarchique basé sur l'optimisation séquentielle développé par BEAULIEU et GOLDBERG (1989), a été utilisé pour les tests. Celui-ci a déjà fait l'objet d'applications dans des milieux agricoles au Maroc (AIT BELAID *et al.*, 1992) et au Canada (THOMSON *et al.*, 1990; THOMSON *et al.*, 1993). La segmentation permet de regrouper spatialement les pixels spectralement homogènes et de partager la scène en

segments. Le regroupement des segments est réalisé de façon itérative en regroupant les segments spatialement adjacents selon un critère de sélection. Ce critère correspond ici à la différence des moyennes des pixels adjacents au segment pondérée par le nombre de pixels contenus dans chaque segment (BEAULIEU and GOLDBERG, 1989; THOMSON *et al.*, 1993). Le processus itératif cesse lorsque l'utilisateur juge que l'image segmentée résultante représente le mieux sa région d'étude. Les différents attributs reliés aux segments sont conservés dans une table d'attributs qui est par la suite utilisée lors de la classification des segments. Parmi ces attributs, on retrouve : la moyenne et l'écart-type des niveaux de gris des pixels formant le segment, le nombre de pixels contenu dans le segment et le périmètre du segment.

3.5. Classification des segments par analyse discriminante

L'étape suivante consiste à regrouper les segments ayant des caractéristiques similaires en classes d'occupation. L'analyse discriminante, qui est une méthode paramétrique assumant une distribution normale, utilise des fonctions discriminantes basées sur la covariance des segments (KLECKA, 1980; THOMSON *et al.* 1993). La première étape de l'analyse consiste à déterminer le pouvoir discriminant des attributs, ou variables statistiques, calculés lors de la segmentation. Cette opération est réalisée par la détermination des valeurs propres associées aux variables discriminantes. Ces valeurs sont calculées à partir de segments dits «purs». Pour qu'un segment soit pur, 90 % des pixels le composant doivent appartenir à une seule et même classe d'occupation délimitée par la vérité-terrain et répondre à un critère de superficie minimale. Cette étape se réalise par la superposition spatiale du fichier de segmentation et de la vérité-terrain. L'identification des segments purs permet donc de délimiter automatiquement les sites d'entraînement qui serviront lors de la classification des segments. La combinaison linéaire des variables détermine par la suite une fonction discriminante servant à la classification des segments où la règle d'appartenance est basée sur la distance de Mahalanobis.

3.6. Classification traditionnelle des pixels

La classification supervisée par maximum de vraisemblance a également été calculée sur le site d'étude. Les sites d'entraînement ont été sélectionnés de manière à respecter le plus possible l'interprétation des photographies au 1: 20 000.

4. Résultats et interprétation

Actuellement, en raison d'une capacité limitée de mémoire de l'ordinateur, nous avons dû procéder à une première sélection de bandes pour les premiers tests de segmentation. Les bandes les moins corrélées, soit: HRV 1, HRV 2, TM2 et TM7, ont été sélectionnées pour débiter les traitements. Nous tenons également à prendre, pour les premiers tests, un nombre égal de bandes HRV et TM pour mieux évaluer la performance des deux capteurs. Il est évident que, pour des travaux en milieu semi-aride, d'autres combinaisons pourront être utilisées pour des analyses subséquentes.

La segmentation a d'abord été calculée sur les 4 bandes sélectionnées. Par la suite, la couche cartographique contenant les pentes a été additionnée aux 4 images satellitaires. La

classification des segments par analyse discriminante a de plus été réalisée en prenant respectivement en compte 10 et 7 variables discriminantes (tab. 1). Ce changement permet d'évaluer l'importance des variables discriminantes lors de la classification des segments. La classification par maximum de vraisemblance a également été calculée sur le même ensemble de données, soit les 4 bandes sélectionnées et la couche cartographique des pentes transformée, pour les besoins, en niveaux de gris de 1 à 4. La classification par maximum de vraisemblance a de plus été réalisée pour des seuils de décision correspondant à 3 et à 4 fois la déviation standard. Pour permettre une bonne comparaison entre les différents résultats obtenus, nous avons utilisé la matrice de confusion calculée entre la photo-interprétation, qui sert ici de vérité-terrain, et chaque segmentation et classification. Le tableau 2 nous présente le nombre de pixels et de champs pour chaque type d'occupation du sol retrouvé sur la photo-interprétation.

Tableau 1. Variables discriminantes utilisées pour la classification des segments

Nombre de variables	Utilisation pente	Variables discriminantes
10	Avec ou sans pente	Moyenne de HRV1, HRV2, TM2 et TM7 Écart-type de HRV1, HRV2, TM2 et TM7 Nombre de pixels Périmètre des segments
7	Sans pente	Moyenne de HRV1, HRV2 et TM2; Écart-type de HRV1, HRV2 et TM7; Périmètre des segments
7	Avec pente	Moyenne de HRV1, HRV2, TM2 et TM7 Écart-type de HRV1, HRV2 et TM2

Tableau 2. Nombre de pixels et de champs pour chaque type d'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Nombre de pixels	Nombre de champs
Parcours	20 542	8
Culture annuelle	8 778	14
Lit de cours d'eau	1 145	2
Constructions isolées	3 196	12
Arboriculture	1 764	15

Le tableau 3 présente le pourcentage de pixels bien classés, pour chaque type d'occupation, pour les différentes images segmentées et classées par analyse discriminante. Les résultats du tableau 3 montrent que l'introduction de la pente dans le processus de segmentation, améliore la segmentation d'environ 25 %, lorsque 10 variables étaient utilisées, et de 8 %, lorsque 7 variables seulement ont été employées. Il semble que l'apport de la bande cartographique des pentes soit d'une grande importance lorsque l'ensemble de variables est utilisé, mais que son impact diminue lorsque les meilleures variables discriminantes sont choisies. Ces variables ont été sélectionnées suivant le critère de Wilks, lequel permet

Tableau 3. Pourcentage de pixels bien classés par classification de segments pour chaque type d'occupation

Type d'occupation du sol	Pourcentage de pixels bien classés			
	Segmentation (10 [*])	Segmentation avec pente (10 [*])	Segmentation (7 [*])	Segmentation avec pente (7 [*])
Parcours	23	65	39	65
Culture annuelle	20	27	40	30
Lit de cours d'eau	3	9	37	20
Const. isolées	43	1	26	3
Arboriculture	11	23	30	15
Moyenne pondérée	21	46	35	43

* Nombre de variables discriminantes sélectionnées

de déterminer les variables les moins corrélées et de proposer à l'utilisateur les meilleures variables à employer. De plus, on remarque que l'apport de la pente est positif pour les parcours, l'arboriculture et les cultures annuelles, mais qu'il est négatif pour les lits de cours d'eau et les zones habitées. Ce résultat peut être expliqué par la faible dénivellation de terrain présente dans les lits de cours d'eau et dans les zones habitées. Les parcours sont, en fait, les régions les plus accidentées du secteur. La pente a également diminué la grande confusion notée entre les parcours et les zones habitées. La segmentation des lits de cours d'eau s'est révélée également peu intéressante en raison de la faible longueur des segments formant les lits.

Le tableau 4 montre le pourcentage de pixels bien classés, pour chaque type d'occupation, pour les différentes images classifiées par maximum de vraisemblance. L'analyse de ce tableau nous indique que l'introduction d'une image de pente n'influence pas de façon significative la précision des résultats de la classification par maximum de vraisemblance. La variation du seuil de décision (3 ou 4 fois la déviation standard) fait cependant varier la précision de la classification d'environ 7 %.

Tableau 4. Pourcentage de pixels bien classés par maximum de vraisemblance pour chaque type d'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Pourcentage de pixels bien classés		
	Maximum de vraisemblance (3 [*])	Maximum de vraisemblance et pente (3 [*])	Maximum de vraisemblance et pente (4 [*])
Parcours	27	30	38
Culture annuelle	26	27	29
Lit de cours d'eau	48	35	46
Const. isolées	34	23	26
Arboriculture	44	41	43
Moy. pondérée	29	30	36

* Seuil de classification par maximum de vraisemblance (ex: 3 x déviation standard)

La comparaison des tableaux 3 et 4 nous permet de voir que la classification des segments, au lieu de pixels, ne révèle pas d'amélioration marquante de la précision globale lorsque la segmentation implique seulement des images satellitaires. Cependant, lorsque la pente est introduite dans la segmentation, la précision globale est améliorée en moyenne de 13 %. Cette amélioration est cependant dépendante du type d'occupation. Par exemple, la segmentation raffine la précision de la classification d'environ 27 % pour les parcours, mais diminue la précision d'environ 26 % pour les lits de cours d'eau.

5. Conclusion

Les premiers résultats montrent que la classification de segments, à la place de la classification de pixels, amène une légère amélioration de la précision de la classification. L'étude a montré, qu'avant même de sélectionner une technique de classification pour l'occupation du sol, il est très important de bien connaître les structures spatiales des éléments étudiés. Pour des éléments ayant peu ou pas de forme spécifique, et pour les objets de petites tailles, la classification traditionnelle demeure un bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats. Par contre, la segmentation avec l'appui de la pente réagit très bien dans des secteurs accidentés et pour des champs de moyenne superficie. La segmentation a l'avantage principal d'être une procédure plus automatique que la classification et élimine de plus la classe nulle obtenue lors de la classification par maximum de vraisemblance. La précision globale des classifications présentées dans cet article est relativement faible. Cependant, les prochains traitements vont permettre de déterminer les meilleures combinaisons de bandes pour l'étude spécifique du bassin versant Ettieur. L'introduction de la pente servira seulement dans les zones moyennement accidentées et elle sera laissée de côté pour les zones de faible relief.

La sélection automatique de segments purs par rapport à la vérité-terrain permet de garder un meilleur contrôle spatial des classes. L'utilisation de la vérité-terrain lors de la sélection de segments purs peut cependant biaiser légèrement les résultats. La qualité de la vérité-terrain est donc d'une importance primordiale. Il serait intéressant de développer des techniques permettant de bien évaluer la qualité d'un tel produit.

Même si des corrections radiométriques ont été appliquées aux données images, des différences significatives ont été notées dans les régions d'ombre. Ces travaux ont démontré que, dans des projets d'application comme celui-ci, des corrections radiométriques relatives à l'angle d'ensoleillement sont nécessaires mais pas suffisantes et qu'il faille procéder à des corrections pour l'angle de prise de vue du satellite. Ces corrections peuvent être éventuellement réalisées par l'introduction des données d'orientation extraites d'un modèle numérique de terrain.

6. Remerciements

Le CRG et l'ÉNIT tiennent à remercier le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) pour son support financier. Le groupe de travail remercie tout spécialement Esther Bouliane pour son aide technique et scientifique pour toutes les questions touchant les algorithmes de segmentation et d'analyse discriminante.

7. Références

- AIT BELAID, M., BEAULIEU, J. M., EDWARDS, G., JATON, A. and THOMSON, K. P. B. 1992. Post-Segmentation Classification of Images Containing Small Agricultural Fields. *Geocarto International*, vol. 7, n° 3, p. 53-60.
- BEAULIEU, J. M. and GOLDBERG, M. 1989. Hierarchy in Picture Segmentation: A Stepwise Optimisation Approach. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, n° 2, p. 150-163.
- BÉNIÉ, G. B., THOMSON, K. P. B., GOLDBERG, M. et FILLION, M. 1987. Application de la segmentation d'images à l'agriculture: extraction de parcelles agricoles basée sur le contexte. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 1, p. 26-30.
- BOUSSEMA, M. R., RAÏS, S., KALLALA, A., CHEVALLIER, J.-J., THOMSON, K. P. B. et POULIOT, J. 1992. Système d'information à référence spatiale basé sur des données de télédétection pour la conservation des eaux et des sols (cas du bassin versant de l'Oued Merguellil en Tunisie). Actes de la Conférence canadienne sur les SIG, Ottawa, 24-26 mars, p. 868-876.
- HILL, J. and MEGIER, J. 1987. Cluster Based Segmentation of Multi-Temporal Thematic Mapper Data as Preparation of Region-Based Agricultural Land-Cover Analysis. *Proceedings of IGARSS'87, Ann Arbor, 18-21 May*, p. 91-96.
- HILL, J. and MEGIER, J. 1988. Regional Land Cover and Agricultural Area Statistics and Mapping in the Department Ardeche, France, by Use of Thematic Mapper Data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 10/11, p. 1573-1595.
- HILL J. and STURM, B. 1988. Radiometric Correction of Multi-temporal Thematic Mapper Data for the Use in Agricultural Land-Cover Classification and Vegetation Monitoring. *EARSeL Symposium, Italy, May*, p. 21-40.
- IOKA, M. and MASATO, K. 1986. Performance of Landsat-5 TM Data in Land Cover Classification. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 12, p. 1715-1728.
- KARASKA, M. A., WALSH, S. J. and BUTLER, D.R. 1986. Impact of Environmental variables on Spectral Signatures Acquired by the Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 12, p. 1653-1667.
- KLECKA, W. R. 1980. *Discriminant Analysis. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, 07-019, Beverley Hills and London. Sage Publications.*
- MARHAM, B. L. and BAKER J. L. 1986. Landsat MSS and TM Post-Classification Dynamic Ranges. Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures. *EOSAT, Landsat Technical Notes*, n° 1.
- PILESJÖ, P. 1991. Field Cover Estimation Using Landsat MSS, Landsat TM and SPOT Data - A Comparison in Semi-Arid Environments. *Proceedings of the Twenty Fourth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, vol. II, May, Rio de Janeiro, Brazil, p. 525-538.
- THOMSON, K. P. B., EDWARDS, G., LANDRY, R., CADIEUX S.-P., JATON, A. and GWYN, H. 1990. SAR Applications in Agriculture: Multiband Correlation and Segmentation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 16, n° 3, p. 47-54.
- THOMSON, K.P.B., EDWARDS, G., BOULIANE, E., JATON, A. and CADIEUX, S.-P. 1993. Image Segmentation for the Production of Thematic Maps: An Application Using Discriminant Analysis Classification. *Manuscrit, Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Québec*, 11 p.
- TOUTIN, Th. et LEMIEUX, J. P. 1991. Le système de rectification des images en télédétection. *Journal canadien de télédétection*, vol. 17, n° 4, p. 349-350.

6

Hydrologie et télédétection : utilisation d'un découpage géographique selon la végétation pour expliquer les écoulements annuels de petits bassins versants méditerranéens

CHRISTIAN PUECH, PASCAL VINE et URUYA WEESAKUL

Laboratoire commun de télédétection du Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et des forêts (CEMAGREF) et de l'École nationale du génie rural des eaux et des forêts (ENGREF), B.P. 5095, 34033 Montpellier cedex 1, France; téléphone : +33 67-04-63-00; télécopieur : +33 67-63-57-95

Résumé

Cette étude vise à utiliser la télédétection pour mieux connaître l'influence de la végétation sur les écoulements de petits bassins versants. Le site d'étude est le massif des Maures (Var, France), zone méditerranéenne, montagneuse et très boisée avec peu d'actions anthropiques. L'imagerie satellitaire haute résolution a été utilisée pour établir la carte des essences forestières. Le fort relief a imposé la création d'un modèle numérique de terrain (MNT) pour les étapes de corrections d'images, tant radiométriques (rectification des effets d'éclairement) que géométriques (rectification de la parallaxe). L'hypothèse hydrologique proposée est l'existence de zones hydrologiquement homogènes, définissant par additivité l'écoulement global de chaque bassin. Plusieurs découpages de l'espace ont été testés, le découpage en classes de végétation expliquant correctement les écoulements élémentaires annuels sur ce massif. L'intérêt de l'approche réside dans la possibilité d'utiliser ce type de découpage pour une meilleure prédiction des écoulements sur des bassins non jaugés, à travers les particularités que peut déterminer la télédétection.

1. Introduction et méthode proposée

Pour les hydrologues, la télédétection constitue une source d'information particulièrement importante. Elle leur permet en effet d'acquérir sur des bassins versants non jaugés, inaccessibles, possédant peu de données ou évoluant rapidement, des informations sur la variabilité spatiale de caractéristiques physiques. Dans le cadre de cette étude, nous nous proposons de contribuer au développement de méthodes permettant d'associer aux modèles hydrologiques des informations spatialisées issues en particulier des techniques de la télédétection (ABEDNEGO, 1989; FORTIN *et al.*, 1990).

Pour ce faire, nous proposons de mettre en oeuvre la méthode générale qui consiste à identifier un modèle hydrologique compatible avec les objectifs de l'étude, à sélectionner les données spatialisées qui correspondent à ce modèle, puis à créer un lien physique ou statistique entre le modèle et les données.

D'un point de vue pratique, notre étude a porté sur des bassins situés dans le sud de la France, en climat méditerranéen. La démarche a conduit à choisir une modélisation statistique de la relation pluie/débit au niveau annuel, une partition du bassin versant en zones dites homogènes au travers de données spatialisées et à déterminer pour chaque zone homogène les paramètres du modèle.

2. Site d'étude

Le bassin versant de recherches et d'expérimentations (BVRE) du Réal Collobrier (fig. 1) est situé dans le massif métamorphique des Maures (Var, France). Il est équipé d'un réseau de mesures hydroclimatologiques suivi par le CEMAGREF (Aix-en-Provence) depuis 1966 (LAVABRE, 1980). Ce réseau comporte en particulier 17 pluviographes et une station climatologique répartis sur une centaine de kilomètres carrés. Onze stations de mesures de débits sont également installées sur des bassins dont les superficies varient de 70 ha à 70 km² (fig. 2). Les chroniques de mesures représentent, pour certains bassins, jusqu'à 25 années d'enregistrement (tab. 1).

Sa situation géographique (bordure de mer) et son orographie (altitudes variant de 70 à 770 m) lui permettent de bénéficier d'une pluviométrie favorable (pluie annuelle moyenne de 1000 mm) et donc d'un climat de type méditerranéen humide, avec sécheresse estivale marquée (LAVABRE *et al.*, 1991). Ce massif est essentiellement composé d'essences forestières calcifuges (pins, chêne-liège, châtaignier, maquis) avec seulement 10 % de zones cultivées. Il a été peu soumis aux actions anthropiques.

3. Méthode

3.1. Le choix du modèle hydrologique

Une approche statistique ne concernant que le seul processus de production, au travers d'une transformation de la pluie en débit, a été choisie.

L'observation des séries hydrologiques (WEESAKUL, 1992) révèle que, pour les différents bassins versants, il existe une relation linéaire (fig. 3) entre le rapport écoulement

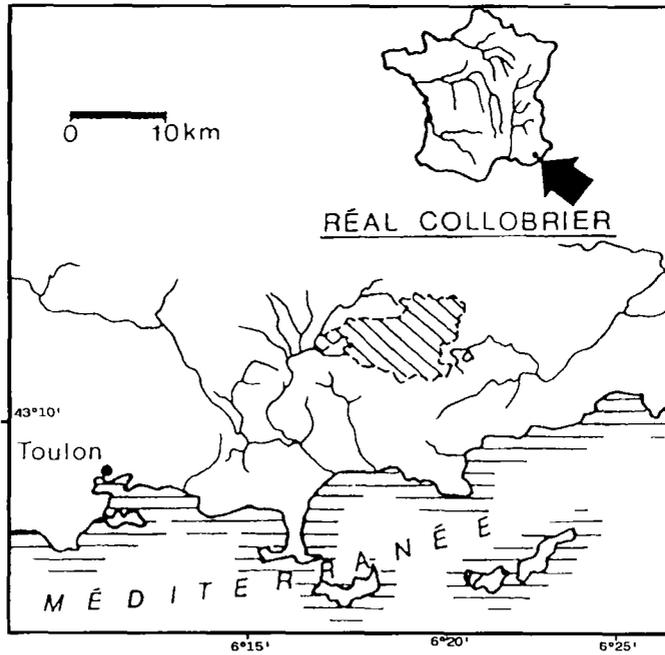


Figure 1. Le bassin du Réal Collobrier : situation

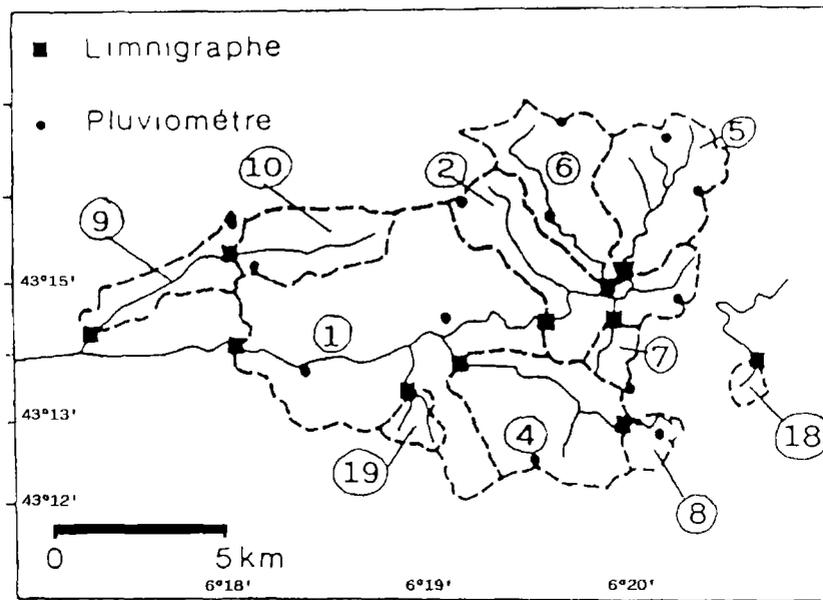


Figure 2. Implantation du réseau de limnigraphes; situation des sous-bassins de mesure

Tableau 1. Quelques caractéristiques des sous-bassins du Réal Collobrier

N°	Bassin versant	Superficie (km ²)	Début des données
1	Pont de Fer	70,6	1966
2	Collobrière	29,5	1972
4	La Malière	12,3	1965
5	Valescure	9,4	1967
6	Maurets	8,4	1968
7	Vaubarnier	1,5	1968
8	Rimbaud	1,4	1967
9	Davids	9,7	1966
10	Cogolin	5,5	1969
18	Boussicaut	0,7	1980
19	Meffrey	1,5	1985

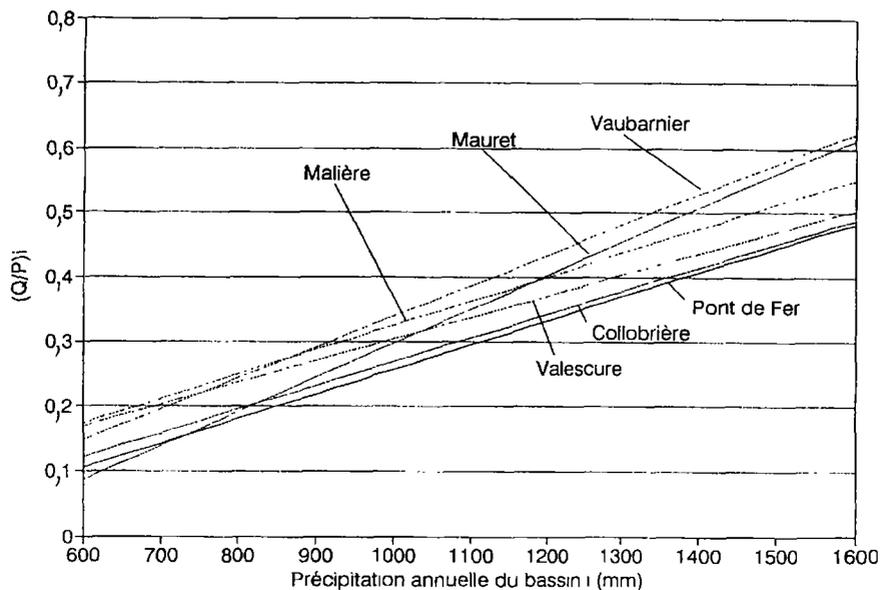


Figure 3. Liaison entre écoulement annuel et pluviométrie annuelle pour différents sous-bassins

annuel/pluie annuelle et la précipitation annuelle (les coefficients de corrélation r , calculées sur 10 à 13 années de mesures, varient de 0,77 à 0,93).

Par conséquent, on peut écrire :

$$K_i = (Q/P)_i = a_i \cdot P_i + b_i \quad (1)$$

- où
- i = numéro du bassin versant;
 - K_i = coefficient d'écoulement annuel du bassin i ;
 - Q_i = écoulement annuel du bassin i (mm);
 - P_i = précipitation annuelle du bassin i (mm);
 - a_i et b_i = coefficients pour le bassin i .

L'étude des variations des coefficients a_i et b_i , d'un bassin à l'autre, ne montre pas de liaison directe avec la superficie et la pluviométrie. Il semble par contre possible de lier l'origine de ces variations aux caractéristiques physiques des bassins. Nous avons testé l'utilisation d'informations spatialisées pour l'explication de ces variations. Pour ce faire, les hypothèses que nous formulons sont les suivantes :

- a) l'équation (1) est applicable aux surfaces partielles possédant des caractéristiques spatiales homogènes (zone homogène);
- b) les coefficients a_i et b_i sont identiques lorsqu'ils concernent une zone possédant les mêmes caractéristiques spatiales (même type de végétation, même pente, etc.);
- c) la pluie est suffisamment homogène sur le site d'étude pour considérer que les pluies annuelles de chaque bassin (P_i) peuvent être remplacées par la précipitation annuelle moyenne sur l'ensemble de la zone; l'équation (1) devient alors :

$$K_i = (Q/P)_i = a_i \cdot P + b_i \quad (2)$$

où P est la précipitation annuelle moyenne sur tout le bassin du Réal Collobrier (mm);

d) l'écoulement annuel total d'un bassin est la somme des écoulements élémentaires produits par chaque zone homogène proportionnellement à la surface de chacune dans le bassin (hypothèse de linéarité). Par conséquent :

$$(Q/P)_i = \sum_j (K_j \cdot S_j) \quad (3)$$

où S_j est le ratio entre la surface de la zone homogène j et la superficie totale du bassin i , et avec :

$$K_j = a_j \cdot P + b_j \quad (4)$$

3.2. La constitution des données spatialisées explicatives

Une base de données géographiques numériques contenant les principales variables susceptibles d'influencer les écoulements a été constituée. Elle est composée d'un modèle numérique de terrain (MNT), d'une cartographie géologique et d'une cartographie forestière.

Le MNT a été constitué au pas de 20 m à partir de la digitalisation des courbes de niveau au 1: 25 000. Le module de génération du MNT est basé sur un schéma d'interpolation selon la ligne de plus grande pente (PROY, 1986).

La cartographie géologique est issue de la numérisation de la carte géologique au 1: 50 000 de 1933 (mise à jour partielle en 1960) et nous a conduit à un découpage en trois zones.

La cartographie forestière (fig. 6-4, voir cahier couleur) a été réalisée à partir de deux images SPOT (KJ : 52-263; été 1986 et hiver 1989) pour identifier les essences forestières (WEESAKUL, 1992; PUECH, 1993).

Par suite du fort relief, le MNT a été intégré dans des étapes de corrections des images. Pour les corrections géométriques on a utilisé un logiciel (PUECH, 1992) basé sur le principe de rectification de parallaxe à partir d'une image SPOT de niveau 1B et d'une série de points d'amers. La précision de recalage de l'image est de l'ordre du pixel. Les corrections radiométriques (rectification des effets d'éclairement) ont été effectuées, canal par canal, sur l'image d'hiver à partir des algorithmes de rectification développés par YANG (1990) et YANG *et al.* (1991). Les résultats de ces rectifications montrent une atténuation très sensible de l'impression du relief sur les images et une baisse notable du coefficient de variation entre l'image brute et l'image rectifiée, respectivement de 11, 38 et 52 % sur les canaux XS1, XS2 et XS3.

Une segmentation selon les grandes unités géologiques a amélioré considérablement les précisions de classification. Trois classifications, par la méthode du maximum de vraisemblance sous hypothèse gaussienne, ont en effet été étudiées : la première en monodate basée sur la seule image d'été, la deuxième en monodate et par segmentation selon la géologie, et la troisième en bidate et par segmentation (tab. 2).

Tableau 2. Précision globale des trois classifications

Type de classification	Précision géographique (%)	
	Apprentissage	Contrôle
Monodate	69,3	67,3
Monodate + géologie	79,8	77,5
Bidate + géologie	85,1	78,3

Pour la classification retenue (bidate + géologie), le taux global de précision oscille entre 80 et 90 % pour les parcelles d'apprentissage, et entre 70 et 90 % pour les parcelles de contrôle, ce qui est très convenable (WEESAKUL, 1992).

Une comparaison complémentaire (WEESAKUL, 1992) a été faite par rapport à la cartographie existante de l'inventaire forestier national (IFN) au 1: 25 000 et obtenue par l'interprétation des photographies aériennes de 1983. Au niveau global, et après harmonisation des nomenclatures, on a obtenu des pourcentages de concordance (même classement pour les pixels de l'image et les pixels de la carte) qui atteignent 85 % en moyenne

3.3. Liaison entre le modèle et la cartographie des couverts forestiers

Chaque bassin versant est subdivisé en zones homogènes selon des critères de pente, de géologie et de végétation. Nous avons testé l'application de la méthode pour chacun de ces critères. Dans cet article, nous présentons la mise en oeuvre de cette méthode pour le seul critère «végétation».

En effet, les méthodes employées pour les deux autres critères sont similaires et fournissent des résultats moins satisfaisants que la végétation (fig. 5) (WEESAKUL,

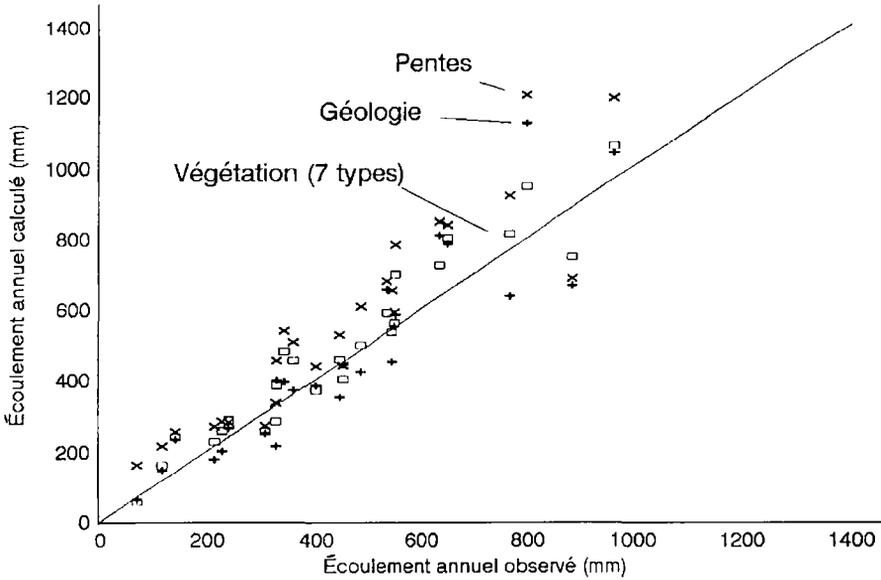


Figure 5. Comparaison de la méthode pour les trois critères : végétation, pente et géologie

1992).

Chaque bassin versant est découpé en zones homogènes à partir de la carte des couverts forestiers établis à l'aide de l'imagerie satellitaire. L'hypothèse testée est que ces zones possèdent également des caractéristiques hydrologiques homogènes.

L'équation (3) peut être écrite sous forme matricielle :

$$[(Q/P)_{i,m,l}] = [S_{i,j}]_{m,v} [K_j]_{v,l} \quad (5)$$

où i = numéro du bassin versant;

j = numéro du type de végétation;

$S_{i,j}$ = ratio surface végétation j /bassin versant i ;

m = nombre de bassins versants;

v = nombre de types de végétation;

K_j = coefficient d'écoulement annuel du type de végétation j (à déterminer).

Pour une année hydrologique donnée, le coefficient annuel d'écoulement de chaque type de végétation peut être déterminé par résolution du système d'équations (5). La détermination mathématique d'un jeu de K_j pour chaque année hydrologique correspond à la résolution d'un système linéaire de « m » équations (dans notre cas : $m = 9$ bassins versants) et « v » variables (dans notre cas : $v = 7$ types de végétation) sous contraintes. Il faut en effet que la solution satisfasse aux contraintes physiques suivantes : $0 \leq K_j \leq 1$.

Nous avons obtenu 13 jeux de K_j , un pour chaque année d'étude. Puis, pour chaque type de végétation, nous avons étudié les variations interannuelles de son K_j [équation (4)] en fonction des précipitations régionales annuelles moyennes (fig. 6).

4. Résultats et discussion

Sur la figure 6 apparaît une organisation hiérarchique entre les valeurs estimées de K_j . Par exemple, le type de végétation $j = 2$ (chênes+pins), qui est un mélange des types $j=1$ (chênes) et $j = 3$ (pins), présente des résultats numériques pour K_2 proches de la moyenne de K_1 et K_3 .

Au vu de ce résultat, nous avons considéré que chaque zone de mélange de type A+B pouvait être remplacée par une zone A et une zone B, couvrant la moitié de la superficie. Cette transformation permet de réduire le nombre de types de végétation «v» et ainsi d'augmenter le nombre de degrés de liberté pour résoudre l'équation (5). Nous avons refait l'ensemble des calculs avec $m = 9$ et $v = 5$, et obtenu des résultats cohérents avec les précédents (WEESAKUL, 1992).

Plusieurs validations ont été effectuées (WEESAKUL, 1992), la première, spatiale (fig. 7), sur d'autres bassins versants voisins n'ayant pas servi à la résolution du système d'équations (5), la deuxième, temporelle, sur les bassins d'apprentissage avec des dates d'observation non utilisées lors de la résolution. Les résultats obtenus sont apparus satisfaisants.

Ces résultats ont également été comparés à une approche statistique globale par régression multiple (WEESAKUL, 1992). Ils procurent de meilleurs résultats, particulièrement pour les bassins possédant des valeurs d'écoulement éloignées des estimations statistiques moyennes (fig. 8).

Ces résultats ne permettent pas encore d'indiquer, du point de vue des processus, le ou les facteurs réels qui se cachent derrière cette notion de «végétation» révélée par la télédétection satellitaire et qui contribuent à l'écoulement annuel (type de peuplements, type d'arbustes ou d'herbacées, type de sols, etc.).

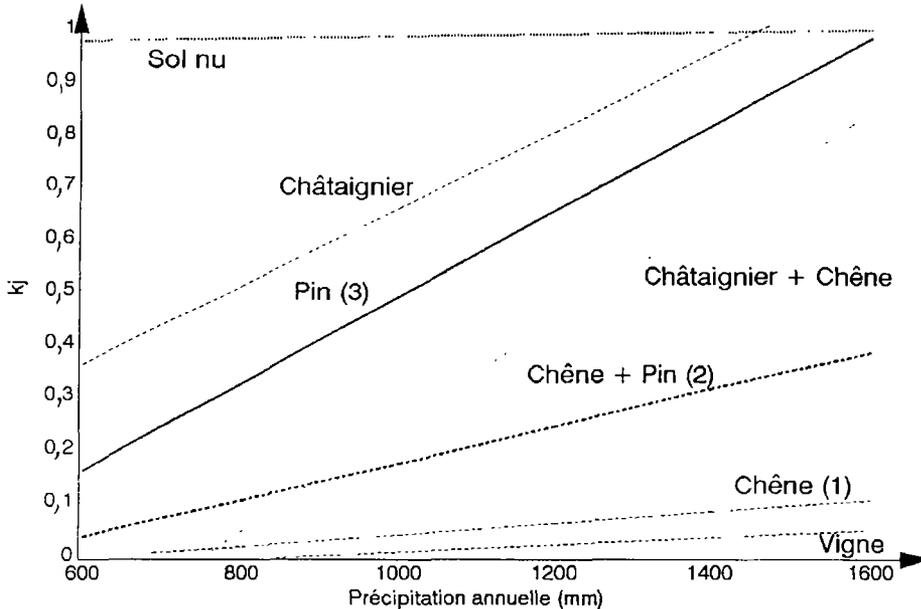


Figure 6. Variations interannuelles des K_j en fonction des précipitations régionales annuelles moyennes

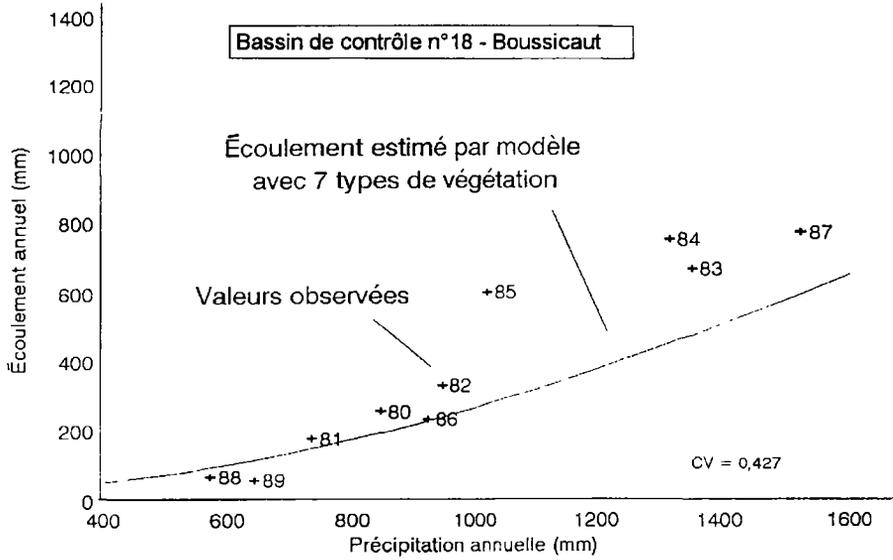


Figure 7. Validation spatiale des résultats obtenus

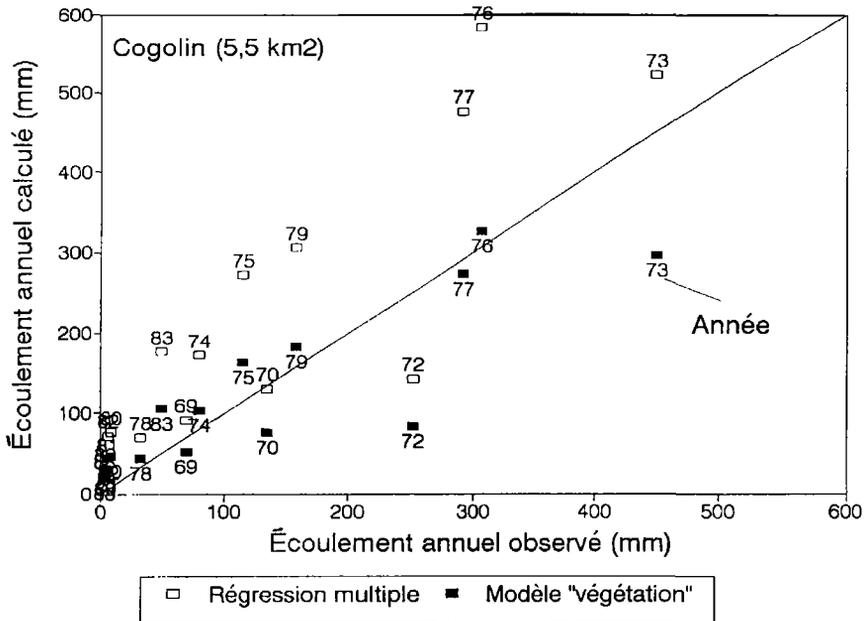


Figure 8. Comparaison des résultats obtenus par la méthode proposée et une approche statistique par régression multiple

Ces résultats ne doivent pas non plus cacher une limite importante à la méthode proposée. Il faut impérativement disposer d'un nombre de bassins versants jaugés plus important que le nombre de types de végétation ($m > v$) pour pouvoir résoudre l'équation (5). De plus, les bassins doivent se trouver dans une même région climatique et présenter une pluviométrie annuelle régionale moyenne homogène sur le site d'étude. Cette dernière contrainte pourrait être levée en choisissant P_i au lieu de P (voir introduction). Ceci réduirait le nombre de bassins versants nécessaires, mais imposerait alors de disposer d'une haute variabilité spatiale et temporelle de la pluie sur le site d'étude, ce qui, pour le niveau annuel, n'est pas le cas sur le bassin du Réal Collobrier.

Ce travail est une première étape d'un programme de recherche destiné à étudier les relations entre la végétation et les écoulements. Les premiers résultats sont prometteurs et ouvrent des perspectives intéressantes en termes de régionalisation. Des études complémentaires sont d'ores et déjà engagées pour tester la démarche sur d'autres sites, changer de pas de temps au sein des modèles hydrologiques utilisés, et cartographier de façon plus fine chacune des strates végétales de l'écosystème forestier afin de mieux comprendre leurs relations avec les écoulements.

5. Références

- ABEDNEGO, B. S. P. 1989. Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Thèse, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 259 p.
- FORTIN, J.-P., VILLENEUVE, J.-P., BOCQUILLON, C., LECONTE, R. and HARVEY, K. D. 1990. Hydrotel, a hydrological model designed to make use of remotely sensed and GIS data. Proceedings NHRI and CWRA Workshop, Saskatoon, 13-14 February 1990, p 177-185.
- LAVABRE, J. 1980. La pluviométrie du bassin expérimental du Réal Collobrier. «La météorologie», VI^e série, n^{os} 20-21 mars-juin 1980, p. 615-627.
- LAVABRE, J., SEMPERE TORRES, D. ET CERNESSON, F. 1991. Étude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. Hydrologie continentale, vol. 6, n^o2, p. 121-132.
- PROY, C. 1986. Intégration du relief au traitement d'images de télédétection. Thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, 173 p.
- PUECH, C. 1992. Logiciel de correction géométrique d'images en zone de relief. Rapport interne, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, Montpellier, 20 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, Université Joseph Fourier (Grenoble I), Grenoble, 217 p.
- WEESAKUL, U. 1992. Apports de la télédétection et de l'information géographique numérique à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens. Thèse, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 280 p.
- YANG, C. J. 1990. Corrections radiométriques des effets topographiques sur les images satellitaires. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 187 p.
- YANG, C. J., PUECH, C. et WEESAKUL, U. 1991. Correction radiométrique sur les données satellitaires en zone de relief : modélisation et application. in DUBOIS, J.-M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (éd.) Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Collection Universités francophones — Actualité scientifique, Éditions AUPELF/Presses de l'Université du Québec, p. 65-80.

PARTIE II

Eaux de surface et eaux souterraines

7

L'imagerie satellitaire pour l'étude des réservoirs : applications à la retenue du barrage Sidi Salem (Tunisie)

ABDALLAH BEN MAMMOU ¹ et MOHAMED CHEDLY RABIA ²

¹ *Université de Tunis II, Faculté des sciences de Tunis, Campus universitaire, 1060 Tunis, Tunisie;*
téléphone : +216 (1) 51-26-00; télécopieur : +216 (1) 88-54-04

² *Institut national de recherches scientifiques et techniques (INRST), B.P. 95, 2050 Hammam Lif, Tunisie;*
téléphone: +216 (1) 43-04-70, télécopieur: +216 (1) 43-09-17

Résumé

Le traitement micro-informatique de trois images HRV, correspondant aux saisons estivales (juin 1987, mai 1988 et juillet 1990) de trois années de sécheresse a permis l'étude de la répartition spatio-temporelle du phytoplancton dans les eaux et des macrophytes aquatiques. Les indices de végétation normalisés (XS3-XS2/XS3+XS2) sur les images HRV permettent de dégager une variation annuelle et spatiale de la concentration en phytoplancton, de préciser la période d'apparition des macrophytes aquatiques et de délimiter l'étendue de ces deux peuplements. L'étude de la dynamique des apports de crue dans la retenue a été entreprise sur une image TM de la saison pluvieuse (novembre 1991). Les eaux turbides ont été mises en évidence par le calcul de l'indice de transparence $[(TM2)^2/TM3]$. Un modèle de régression linéaire multiple a été calculé afin d'étudier et de cartographier la matière en suspension, la turbidité et la chlorophylle *a*. Les cartes obtenues traduisent parfaitement l'état du réservoir au moment de l'arrivée de deux crues.

1. Introduction

L'exploitation des données satellitaires pour l'étude de la qualité des eaux dans les lacs naturels et au niveau du littoral a fait l'objet de plusieurs travaux (MUNDAY and AFOLDI, 1979; LINDEL *et al.*, 1986; BEN MOUSSA, 1987). C'est afin d'assurer un suivi continu de la qualité des eaux de retenue des barrages de Tunisie exposées, d'une part, à la pollution par les apports liquides riches en éléments nutritifs et, d'autre part, à l'alluvionnement plus ou moins rapide par les apports solides, que nous avons testé l'apport des images satellitaires qui permettent une vision globale et répétitive des phénomènes à l'échelle de toute la retenue. Les aspects suivants ont été étudiés :

- l'évolution de la prolifération de la biomasse dans les plans d'eau au cours des trois années de sécheresse;
- la répartition spatio-temporelle des algues vertes dans la retenue;
- la propagation des eaux de crue et la dynamique de la sédimentation.

Pour cette première application, nous avons sélectionné la retenue du barrage Sidi Salem qui est d'un intérêt vital pour l'économie de la Tunisie. Depuis sa mise en eau (1982), des études multidisciplinaires ont été menées pour un suivi continu de la qualité des eaux au niveau des stations fixes préalablement choisies. Les aspects hydrochimiques font l'objet d'une surveillance minutieuse de la part du ministère de l'Agriculture (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1982-1992). L'aspect limnologique, notamment du point de vue trophique a été étudié par BOULOU (1986), SAADAoui (1986) et STERNIK (1990, 1991). Certains aspects de la limnologie, du phytoplancton, du zooplancton et du macrobenthos ont été étudiés en collaboration entre le ministère de l'Agriculture, la Direction générale à la pêche et la Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) (KÜMMERLIN, 1991; SOHLOBI et ZAOUALI, 1991; LOSSE *et al.*, 1991) sur un cycle d'une année hydrologique (1989-1990).

L'évolution de l'alluvionnement et la dynamique de la sédimentation dans la retenue ont été également étudiées par OUKHEY (1987, 1989, 1991) et BEN MAMMOU (1988).

2. Localisation géographique et caractéristiques de l'aménagement

Le barrage Sidi Salem, construit à 70 km en amont de la ville de Tunis sur l'oued Mejerda, principal cours d'eau de la Tunisie, contrôle un bassin versant qui couvre 18 250 km² (fig. 1). À la cote de retenue normale soit 110 m, nivellement général de la Tunisie (N.G.T.), la capacité est de 550 hm³ (1 hm³ = 10⁶ m³) et le lac s'étend sur 4 300 ha (MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, 1977). La longueur totale de la retenue est de 42 km. Le barrage assure la fonction de réservoir d'eau potable; il alimente 60 % de la population tunisienne (la capitale et les principales villes côtières du pays) et il permet d'irriguer 14 000 ha de terrain au niveau de la basse vallée de la Mejerda et au Cap-Bon. Le réservoir s'étend sur la Mejerda et sur les deux affluents situés sur sa rive gauche soit, d'amont en aval, l'oued Béjà et l'oued Ez Zerga. La retenue se subdivise en trois grands bassins : le bassin principal de la Mejerda et les deux bassins affluents, bassin de l'oued Béjà et bassin de l'oued ez Zerga (fig. 2).

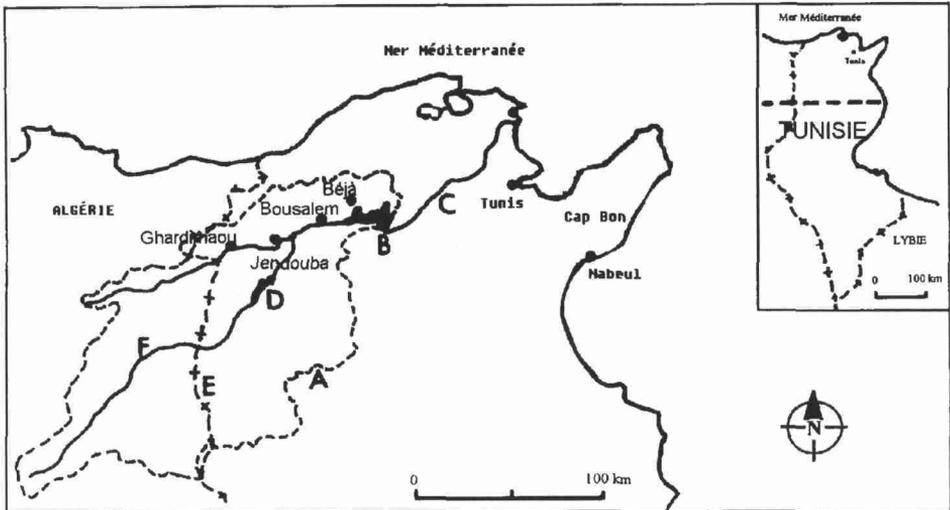


Figure 1. Carte de localisation du barrage Sidi Salem : a) limites du bassin versant; b) barrage; c) oued Mejerda; d) barrage Nebeur; e) frontière tuniso-algérienne; f) oued Mellègue

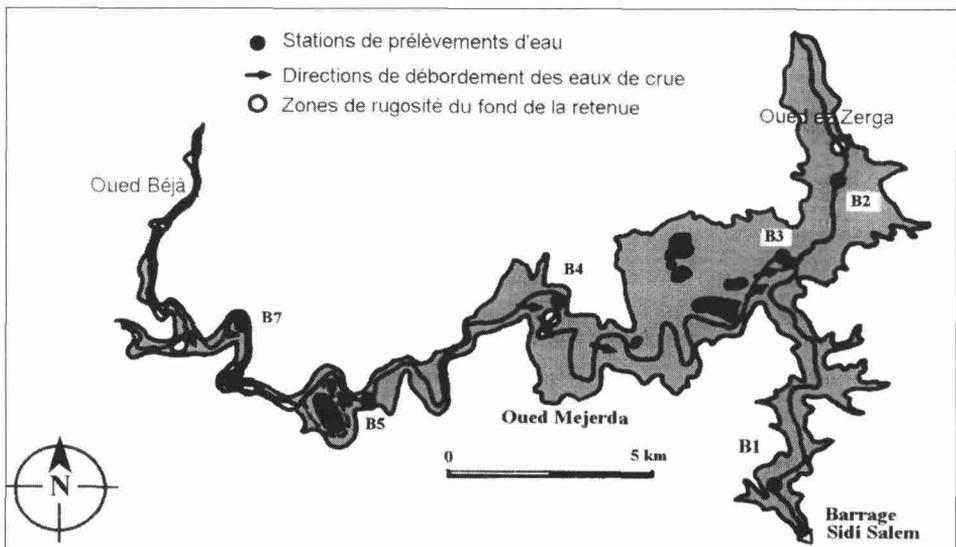


Figure 2. Carte de la retenue du barrage Sidi Salem à la cote 110 m N.G.T. et localisation des stations de mesures de la qualité des eaux

3. Méthode et matériel utilisés

3.1. Données climatologiques, hydrologiques et limnologiques

La retenue du barrage Sidi Salem est sous un climat méditerranéen sub-humide à hiver doux caractérisé par une pluviométrie moyenne de 400 à 600 mm et des températures moyennes minimales de janvier de 5 à 8 °C. En général, les pluies sont réparties inégalement sur trois saisons : l'automne, l'hiver et le printemps; et l'été est relativement sec. Les pluies du début de l'année hydrologique sont orageuses torrentielles et elles arrivent à la suite d'une longue période sèche provoquant un charriage important de sols dénudés. Les averses de l'hiver sont réparties dans le temps provoquant un ruissellement moins important. Les pluies du printemps sont parfois orageuses. La saison estivale est caractérisée par une élévation de la température et par l'arrivée dans la retenue des eaux boueuses provenant des «laches» du barrage Nebeur. En dehors de la période de crue, les apports de l'oued Mejerda et de l'oued Béjà sont constitués par les rejets urbains et industriels qui proviennent des principales villes situées dans le bassin versant. De même, cette pollution est due à l'utilisation d'énormes quantités d'engrais chimiques dans les grandes cultures.

Les années hydrologiques 1987-1988, 1988-1989 et 1989-1990 étaient déficitaires (tab. 1). Le cinquième des apports de l'année 1989-1990 a été constitué par des rejets urbains et industriels (STERNIK, 1991) ce qui a favorisé la prolifération de phytoplancton dominé par des espèces nanoplanctoniques essentiellement des Chlorophycées et des Diatomées (SOHLOBJI et ZAOUALI, 1990; LOSSE *et al.*, 1991). À la fin de ce cycle, tout le réservoir, à part quelques dépressions profondes, est une zone trophogène.

Tableau 1. Caractéristiques du réservoir de la retenue (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1982-1992)

Date	Cote (m)	Surface (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)
02-06-1987	108,59	3941,6	496,42
05-05-1988	102,90	2783,0	311,40
20-07-1990	96,78	1924,8	166,01
27-11-1991	109,00	4000,0	508,00

3.2. Données satellitaires et traitements utilisés

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé des images provenant des capteurs HRV de SPOT et TM de Landsat (tab. 2). Trois images HRV de période estivale (1987, 1988 et 1990) ont été choisies. L'image de 1990, ayant été acquise durant la période de l'étude limnologique, a été utilisée comme référence pour interpréter les résultats obtenus. Les scènes TM correspondent à la période pluvieuse de l'année 1991. Nous signalons que le canal thermique de TM n'a pas été utilisé dans cette étude.

Les données HRV ont été utilisées exclusivement pour l'étude de l'évolution de l'état trophique du lac au cours des années de sécheresse. Les données TM ont servi à dresser des cartes de répartition de la matière en suspension et de la turbidité liées aux crues du mois de novembre 1991.

Tableau 2. Caractéristiques des données satellitaires

Date	Nature	Caractéristiques saisonnières	Mesures dans la retenue
02-06-1987	HRV de SPOT (XS1, XS2, XS3)	Apports liquides minimum et début de prolifération de Chlorophycées	Dosages de la chlorophylle <i>a</i> , quantification de la M.E.S. et mesure de la turbidité
05-05-1988	HRV de SPOT (XS1, XS2, XS3)	Apports liquides minimum et début de prolifération de Chlorophycées	Dosages de la chlorophylle <i>a</i> , quantification de la M.E.S. et mesure de la turbidité
20-07-1990	HRV de SPOT (XS1, XS2, XS3)	Apports liquides minimum et maximum de prolifération de Chlorophycées	Dosages de la chlorophylle <i>a</i> , quantification de plancton, de la M.E.S. et mesure de la turbidité
27-11-1991	TM de Landsat (TM1, TM2, TM3, TM4)	Période de crues	Dosages de la chlorophylle <i>a</i> , quantification de la M.E.S. et mesure de la turbidité

En plus d'une correction géométrique suivie de rehaussement de contraste et le choix des meilleures compositions colorées, l'essentiel des traitements a concerné les opérations suivantes :

- le calcul des indices de transparence et de végétation sur les données HRV (XS);
- le calcul de l'indice de transparence sur les données TM;
- le calcul de modèle de régression linéaire multiple permettant la création de néocanaux TM qui traduisent certains paramètres de la qualité des eaux (matières en suspension, turbidité et chlorophylle *a*).

Ces opérations ont été réalisées à l'aide du logiciel de traitement d'images IDRISI installé sur PC. Les sorties graphiques ont été obtenues sur une imprimante couleur à jet d'encre.

4. Résultats et discussion

4.1. Variations spatio-temporelles de la densité des peuplements dans la retenue

L'étirement de contraste des différentes scènes des années 1987, 1988 et 1990, a permis de faire apparaître un zonage traduisant l'hétérogénéité de la masse d'eau. L'amélioration de ces résultats a été obtenue grâce à l'indice de végétation normalisé (XS3-XS2/XS2+XS3) suivi par un rehaussement de contraste.

Ces résultats permettent de subdiviser la retenue à la fin du cycle de sécheresse en trois zones :

- une zone littorale généralement occupée par des plantes vertes immergées;
- une zone limnétique sans végétation enracinée et caractérisée par une prolifération de phytoplancton;
- une zone profonde sans végétation ni phytoplancton.

Les cartes des indices de végétation des années 1987 et 1988 indiquent que la prolifération de phytoplancton n'était pas aussi importante et que l'indice de végétation n'a pas atteint son maximum (fig. 3a et 3b). Les valeurs les plus élevées de l'indice de végétation normalisé correspondent à l'année 1990 (fig. 3c). Nos observations sur le terrain concordent parfaitement avec les résultats obtenus. Toutefois, les taux de chlorophylle *a* les plus élevés correspondent plutôt au mois de mai 1988 et non pas au mois de juillet 1990 et ceci pour toutes les stations (tab. 3). Ceci est dû probablement à une mauvaise corrélation entre les données satellitaires et la chlorophylle *a*.

Les cartes d'indice de transparence des différentes dates montrent que les eaux de la retenue sont de moins en moins transparentes. Ceci est en parfait accord avec les résultats de mesures de la turbidité au niveau des cinq stations (tab. 3).

4.2. Évolution de l'alluvionnement de la retenue

4.2.1. Apport des images satellitaires

L'analyse des images TM, prises le 27 novembre 1991, a été faite à l'état brut, après étirement de contraste, par un calcul de rapport des deux scènes prises deux à deux [TM3/TM4] et [TM2/TM3] suivi d'une égalisation, par le calcul des indices de transparence [TM2²/TM3] et de végétation [(TM4-TM3)/(TM4+TM3)] suivi d'un étirement de contraste.

Le calcul de l'indice de transparence donne un meilleur résultat sur l'arrivée de deux crues bien individualisées au niveau de l'oued Mejerda, alors que la partie aval (bassins moyen et aval encore épargnés) présente une eau plus claire avec des traces de turbidité en face des petits affluents qui se déversent directement dans la retenue (fig. 4).

La carte de l'indice de végétation [(TM4-TM3)/(TM4+TM3)], suivie d'un étirement de contraste, montre également un zonage au niveau du plan d'eau qui correspond à une matière végétale dégradée et qui se superpose parfaitement aux zones turbides.

4.2.2. Développement d'un modèle de la qualité des eaux

Comme nous disposons de mesures de terrains de la même date que l'image TM, nous les avons corrélées avec la radiométrie des différents canaux. Une série de modèles de régression linéaire simple et multiple a été réalisée pour déterminer la meilleure relation entre le taux de matière en suspension, la turbidité, la concentration de la chlorophylle *a* de la tranche transparente (estimée à l'aide du disque Secchi) et la valeur radiométrique des canaux utilisées (tab. 4).

Les résultats de la régression linéaire multiple nous ont permis de proposer trois modèles mathématiques pour la prévision de la matière en suspension, de la turbidité et de la concentration en chlorophylle *a* en fonction de la radiométrie des quatre canaux utilisés.

Modèle de la matière en suspension :

$$Y_{MES} = -2,66 TM1 + 2,84 TM2 + 24,81 TM3 - 10,22 TM4 - 11,66$$

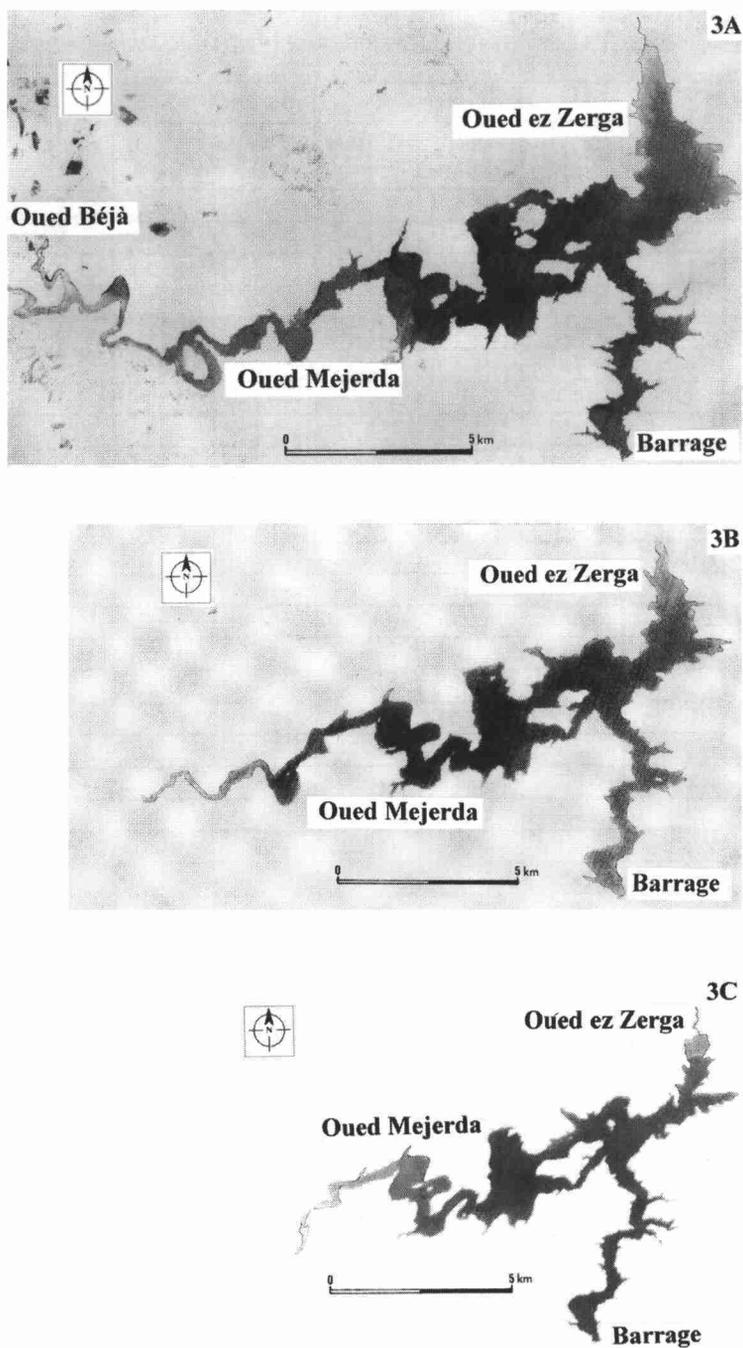


Figure 3. Évolution de l'indice de végétation des eaux de la retenue du barrage Sidi Salem : a) image du 02-06-1987; b) image du 05-05-1988; c) image du 20-07-1990

Tableau 3. Variations de la turbidité et de la chlorophylle *a* dans les eaux de la retenue du barrage Sidi Salem (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1982-1992)

Station	Juin 1987		Mai 1988		Juillet 1990		Novembre 1991	
	Turb. (NTU)	Chlor. <i>a</i> (µg/l)	Turb. (NTU)	Chlor. <i>a</i> (µg/l)	Turb. (NTU)	Chlor. <i>a</i> (µg/l)	Turb. (NTU)	Chlor. <i>a</i> (µg/l)
B1	3,5	4,4	6,4	11,0	10	10,0	6	7,0
	7,5	3,7	8,0	14,4		6,5	5	13,0
	7,0	6,4	8,8	12,2		7,2	3	8,8
	<0,1	2,4	8,8	21,3		9,3	5	9,4
	5,8	2,8	6,4	21,2		5,1		6,7
	<0,1	7,4	9,2	13,3		8,2	5	9,6
	15,3	14,0			43	16,0	5	9,0
					52	6,7	5	6,3
							7	7,9
B2							11	8,1
	7,3	13,0	0,8	17,2	23	11,0	12	12,0
	6,6	5,2	2,0	15,3		11,0	13	8,4
	2,1	7,0	3,6	19,9	28	7,4	8	7,8
	17,0	<0,1	17,2	20,0	27	9,7	12	6,0
	1,0	1,5			20	11,0		7,5
					48	10,0	8	7,3
							14	13,0
B3							30	10,0
	0,8	9,8	6,0	17,3	43	7,0	4	10,0
	1,0	6,4	10,0	15,0	12	6,6	3	6,0
	20,5	5,8	6,8	20,5	16	7,2	4	8,0
	5,0	11,0	11,2	24,1	21	3,1	5	8,6
	8,0	11,6	9,6	19,9	18	4,6		4,6
B4	12,0	<0,1			30	7,1	5	5,3
	2,5	8,0	10,8	17,3	28	6,2	3	7,0
	5,2	4,6	9,6	21,5	30	10,0	5	5,6
	6,0	8,6	15,2	15,3	21	4,8	6	6,4
	5,2	<0,1	12,0	20,7	52	6,7	5	5,6
	33,0	12,1					7	5,6
B5	16,0	<0,1					10	7,7
	12,0	8,7	18,4	18,5			8	8,3
	16,0	9,8	0,4	19,7			24	9,8
	6,0	11,0	2,0	17,9			13	8,3
	13,0	8,1					16	12,0
B7							97	17,0
	48,0	9,3						
	46,0	2,3						
	56,0	15,6						

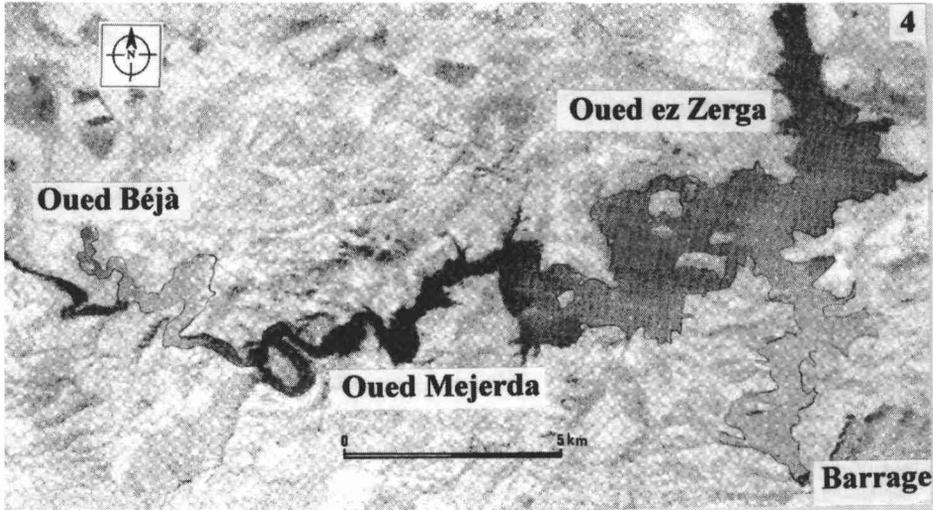


Figure 4. Indice de transparence des eaux de la retenue du barrage Sidi Salem le 27-11-1991

Tableau 4. Coefficient de corrélation de la qualité de l'eau et de la radiométrie

Modèle	Y	TM1	TM2	TM3	TM4
Régression linéaire simple	MES	0,79	0,84	0,98	0,58
	TURB.	0,42	0,63	0,81	0,93
	Chlo. <i>a</i>	0,26	0,34	0,78	0,57
Régression linéaire multiple	MES-TURB.	0,86	0,85	0,98	0,96
	MES-Chlo. <i>a</i>	0,95	0,95	0,99	0,63
	TURB-Chlo. <i>a</i>	0,44	0,69	0,85	0,97

Modèle de la turbidité :

$$Y_{\text{Turb.}} = -23,93 \text{ TM1} - 8,51 \text{ TM2} + 78,60 \text{ TM3} + 149,25 \text{ TM4} - 58,27$$

Modèle de la concentration en chlorophylle *a* :

$$Y_{\text{Chlo. } a} = -12,23 \text{ TM1} - 20,99 \text{ TM2} + 81,52 \text{ TM3} + 24,49 \text{ TM4} + 0,80$$

Les cartes de la matière en suspension (fig. 5) et de la turbidité (fig. 6) montrent une répartition spatiale des eaux turbides traduisant l'arrivée de deux crues par l'oued Mejerda ainsi que l'influence de la morphologie de la retenue et des zones à forte rugosité sur leur propagation. En effet les valeurs mesurées de part et d'autre de ces zones sont bien contrastées. Les valeurs obtenues par ces modèles concordent parfaitement avec le taux de la matière en suspension de toute la colonne d'eau ainsi que la turbidité totale. La carte de la concentration en chlorophylle *a* ne traduit pas la réalité du lac en raison du faible coefficient de corrélation avec la radiométrie des différents canaux.

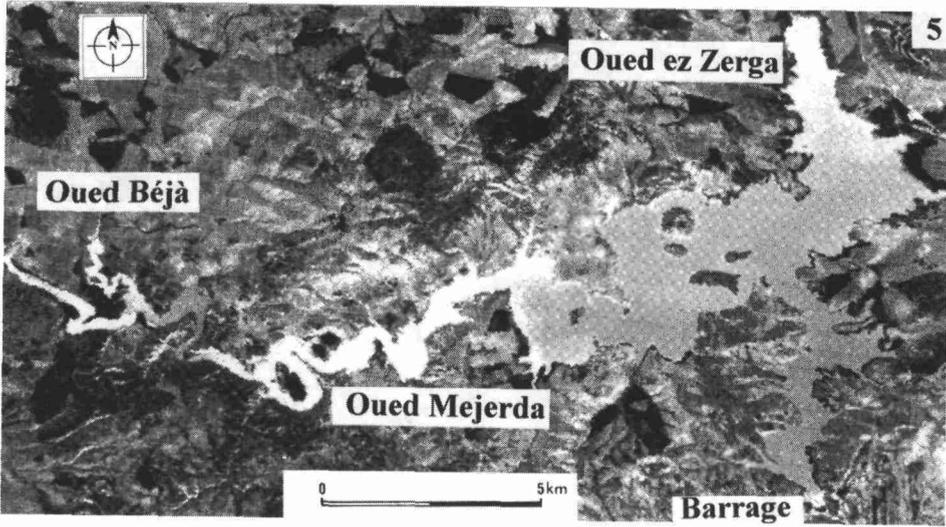


Figure 5. Carte de la matière en suspension dans la retenue du barrage Sidi Salem le 27-11-1991

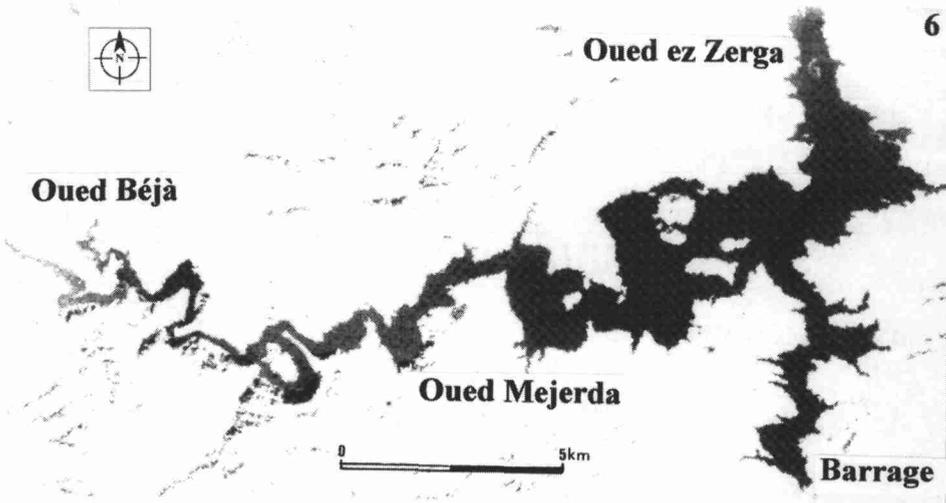


Figure 6. Carte de la turbidité des eaux de la retenue du barrage Sidi Salem le 27-11-1991

4.2.3. Interprétation

Les résultats des trois campagnes de mesure de l'alluvionnement de la retenue entreprises en 1987, 1989 et 1991 par la Direction générale des études et des travaux hydrauliques (OUKHAY, 1987, 1989, 1991) montrent que la partie amont du bassin de la Mejerda et les

zones de confluences avec les oueds Béjà et ez Zerga constituent des aires de dépôt préférentielles et qu'elles sont les plus envasées. D'autre part, il a été constaté que les méandres de la partie amont de la Mejerda et les ponts de l'ancienne voie ferrée ont favorisé le piégeage et la sédimentation de la charge solide (BEN MAMMOU, 1988). Ceci explique le faible taux de sédiments évacués lors des manoeuvres de soutirages entreprises durant la dernière décennie.

Les cartes de la matière en suspension et de la turbidité viennent confirmer les conclusions précédentes. En effet, les données des soutirages de dévasement de la retenue des mois de novembre et de décembre de l'année 1991 montrent que les deux crues ne sont pas parvenues aux ouvrages de dévasement.

Les profils en long du fond de la retenue traduisent l'évolution de l'alluvionnement par la formation de cônes de déjection sous-lacustres (fig. 7). Les années hydrologiques déficitaires ont entraîné une transgression de l'alluvionnement vers les parties en aval et la formation de plusieurs cônes sous-lacustres en-dehors des zones de remous et des aires de confluences. Elles ont favorisé également le développement de plantes aquatiques au niveau des alluvions émergées surtout dans la partie amont du bassin de l'oued ez Zerga. Ce développement de la végétation a été mis en évidence sur les images de l'indice de végétation normalisé de l'année 1990. Les plantes aquatiques ont constitué des pièges à sédiments lors des crues de l'automne 1990; ce stockage s'est traduit au niveau des profils en long par une régression des cônes sous-lacustres vers l'amont.

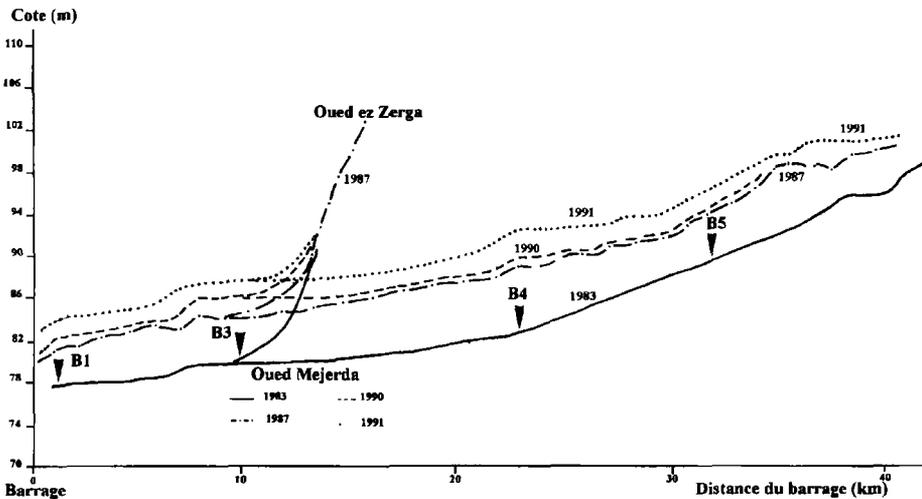


Figure 7. Évolution du profil en long du fond de la retenue du barrage Sidi Salem

5. Conclusions

Les résultats de cette étude montrent que l'évolution de l'activité chlorophyllienne dans les réservoirs d'eau peut être décelée par le calcul de l'indice de végétation normalisé sur des images SPOT. Toutefois, une recherche future s'impose pour corréler la chlorophylle *a* à la radiométrie. Ceci peut être envisagé par le choix judicieux de canaux et par la multiplication de station de dosage.

Les eaux turbides de crue dans les retenues des barrages apparaissent nettement par le calcul de l'indice de transparence sur des images TM. Le modèle de régression linéaire multiple utilisé donne de bons résultats pour la cartographie de la matière en suspension et la turbidité des eaux malgré le nombre limité des stations de mesures. Afin de préciser le modèle proposé, nous envisageons, dans une première étape, de le vérifier sur des images de dates différentes correspondant à des périodes de crues. Dans une seconde phase et dans le cas où le modèle ne se vérifie pas, nous envisageons de développer un nouveau modèle applicable au niveau des réservoirs d'eau artificiels en multipliant les stations de mesures.

6. Remerciements

Les auteurs remercient le Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale (LTSIRS) de l'École nationale d'ingénieurs de Tunis (ÉNIT) et le Centre national de télédétection (CNT) pour l'acquisition d'images ainsi que pour leur collaboration.

7. Références

- BEN MAMMOU, A. 1988. Envasement de la retenue de Sidi Salem. Premières journées tunisiennes de géologie appliquée, 31 mai-4 juin 1988, École nationale d'ingénieurs de Sfax, tome 2, p. 1-10.
- BEN MOUSSA, H. 1987. Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins. Archipel de Molène (Bretagne-France). Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 118 p.
- BOULOUD, A. 1986. Rapport sur une mission effectuée en Tunisie du 4 au 25 mai 1986. Projet RAB/80/011 eutrophisation. Division de contrôle de la qualité des eaux, Office national des eaux potables, Rabat, Maroc, 9 p.
- KÜMMERLIN, R. 1991. Rapport final du projet : «protection et exploitation du barrage Sidi Salem». Coopération technique tuniso-allemande, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 19 p.
- LINDELL, T., KARLSSON, B., ROSENGREN, M. and ALFOLDI, T. 1986. A further development of the chromaticity technique for satellite mapping of suspended sediment load. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, n° 9, p. 1521-1529.
- LOSSE, G.-F., NAU, W. et WINTER, M. 1991. Le développement de la pêche en eau douce dans le Nord de la Tunisie. Étude effectuée dans le cadre de la coopération technique tuniso-allemande, Commissariat général à la pêche, ministère de l'Agriculture. Éditée par Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1992, 418 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1982-1992. Résultats de mesures de la qualité des eaux de la retenue de Sidi Salem. Direction des études des travaux hydrauliques, Direction d'exploitation des barrages, Tunisie, tableaux mensuels.
- MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, 1977. Le barrage de Sidi Salem sur l'oued Mejerda. Direction des grands travaux hydrauliques, Revue tunisienne de l'équipement, n° 19, p. 73-83.
- MUNDAY, J. C. and ALFOLDI, T. 1979. Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement. Remote Sensing of Environment, 8, p. 160-183.

- OUKHEY, M. 1987. Barrage Sidi Salem, campagne de juin 1987. Rapport technique et résultats présentés au ministère de l'Agriculture, Direction générale des travaux hydrauliques, Service d'exploitation des barrages, Tunisie, 7 p.
- OUKHEY, M. 1989. Réserves d'eau dans la retenue du barrage Sidi Salem. Campagne de mesures du mois d'août 1989. Rapport technique et résultats présentés au ministère de l'Agriculture, Direction générale des travaux hydrauliques, Service d'exploitation des barrages, Tunisie, 15 p.
- OUKHEY, M. 1991. Mesure d'envasement du barrage Sidi Salem. Campagne du mois de mars 1991. Rapport technique et résultats présentés au ministère de l'Agriculture, Direction générale des travaux hydrauliques, Service d'exploitation des barrages, Tunisie, 9 p.
- SAADAOUI, M. 1986. Eutrophisation, Sidi Salem. Rapport final, projet RAB-80-011, ministère de l'Agriculture, Direction des ressources en eau (DRE), Tunisie, 51 p.
- SOHLOBJI, D. et ZAOUALI, J. 1991. Étude qualitative et quantitative du zooplancton dans les eaux du barrage Sidi Salem. Rapport technique, projet tuniso-allemand de pêche continentale, 50 p.
- STERNIK, K.-H. 1990. Annales limnologiques relatifs à la trophie et l'eutrophisation du barrage Sidi Salem 1989. Ministère de l'Agriculture, Tunisie, Direction générale des études des travaux hydrauliques-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Projet «protection et exploitation du barrage de Sidi Salem», 50 p.
- STERNIK, K.-H. 1991. Annales limnologiques relatifs à la trophie et l'eutrophisation du barrage Sidi Salem 1990. Ministère de l'Agriculture, Tunisie, Direction générale des études des travaux hydrauliques—Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Projet «protection et exploitation du barrage Sidi Salem», 43 p.

8

Méthode d'exploitation de l'imagerie radar aéroportée en zone de montagne pour les ressources en eau : applications en nivologie (exemple du site des Arcs, Savoie, France)

JEAN-PIERRE DEDIEU ¹, MICHEL FILY ² et FREDERIC LEONE ¹

¹ *Laboratoire de la montagne alpine (CNRS), 15, rue Maurice Gignoux, 38031 Grenoble cedex, France; téléphone : +33 76-51-41-15; télécopieur : +33 76-87-82-43*

² *Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (CNRS), 54, rue Molière, B.P. 96, 38042 Saint-Martin-d'Hères cedex, France; téléphone : +33 76-82-42-35; télécopieur : +33 76-82-42-01*

Résumé

Deux expérimentations RAAS ont été menées sur les Alpes françaises en période hivernale, à savoir décembre 1989 et avril 1990. L'objectif principal était de pouvoir étudier la réponse du manteau neigeux en zone de relief sous différentes conditions d'état de surface et de volume. Un objectif secondaire était d'obtenir une meilleure connaissance cartographique des écoulements de surface, des fracturations et des résurgences sur un site expérimental bien instrumenté et documenté (géologie et nivologie). Le versant des Arcs en Savoie a été retenu pour cette double application thématique. C'est l'instrument E-SAR aéroporté du DFVLR (Allemagne) qui a été utilisé en bande X pour les deux campagnes. En raison de l'absence d'étalonnage absolu et relatif du capteur, l'étude a essentiellement porté sur la méthodologie des pré-traitements géométriques et radiométriques nécessaires pour s'affranchir des contraintes dues au relief. L'application thématique a donc été essentiellement faite par photo-interprétation, quoique riche en résultats cartographiques. Une méthode simple a été développée pour obtenir une ortho-image à partir de la synthèse RAAS par calcul de l'angle d'incidence local en fonction de la position de l'avion et du relief, grâce à un modèle numérique de terrain. L'image finale corrigée radiométriquement

permet de localiser les zones humides et les différents états du manteau neigeux. La validation de ces informations s'est opérée par analyse des relevés nivologiques de terrain pendant les enregistrements, puis par campagne de sondages électromagnétiques après la fusion nivale et enfin par croisement des images RAAS avec d'autres données de télédétection (image panchromatique HRV de SPOT et photographies aériennes numérisées). Cette expérience démontre que les corrections géométriques et radiométriques sont indispensables en zone de relief.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, le Centre national d'études spatiales (CNES) étudie la possibilité de disposer, à l'horizon 2000, d'un radar spatial principalement conçu pour la fourniture de services opérationnels en complément des instruments optiques des satellites SPOT et des autres programmes internationaux (ERS-1, JERS-1, RADARSAT). Afin de pouvoir démontrer la faisabilité technique et l'intérêt économique d'un tel projet, un programme préparatoire a été mis en place, en 1989, pour différents domaines d'applications thématiques. Les travaux présentés dans cet article ont été menés durant la phase initiale du projet où l'approche était essentiellement photo-interprétative à partir des données acquises par un capteur aéroporté.

La connaissance de l'équivalent en eau d'un couvert neigeux est importante pour la prévision de la fusion nivale et la gestion des ressources en eau en zone de montagne (hydroélectricité, irrigation, besoins urbains et industriels) (HALL and MARTINEC, 1985). De même, la cartographie des zones enneigées est importante en climatologie, car l'albédo élevé de la neige modifie le transfert radiatif à la surface de la planète, (BARRY, 1985; BARRY, 1990). La détermination de la couverture neigeuse dépend surtout de son contenu en eau, de sa stratification, de sa hauteur et de sa densité (ROTT, 1990; SERGENT *et al.*, 1993). D'autre part, les variations et caractérisations de surface en termes de tailles de grains sont obtenues par les capteurs optiques (DOZIER, 1984 et 1989; BOURDELLES and FILY, 1993; ROTT and MARKL, 1989). Cependant, de fortes contraintes limitent l'utilisation du domaine spectral visible et infrarouge : absence de données en présence de couverture nuageuse et trop faible pénétration verticale dans le manteau neigeux (WARREN, 1982).

Les capteurs micro-ondes sont, au contraire, plus adaptés pour obtenir une information de volume en raison de leur pouvoir de pénétration dans la neige (MÄTZLER, 1987a; ULABY *et al.*, 1981, 1982, 1986). De plus, les propriétés diélectriques de l'eau libre et de la neige sont différentes pour les longueurs d'ondes centimétriques (MÄTZLER *et al.*, 1984). La neige sèche est détectée par radiométrie hyperfréquence (HALLIKAINEN and JOLMA, 1986; CHANG *et al.*, 1976; FOSTER *et al.*, 1984; KUNZI *et al.*, 1982; WANG *et al.*, 1992). La neige mouillée est détectée par radar, mais non le contraire (MÄTZLER et HUPPI, 1989). La différence de résolution entre ces deux instruments rend leur complémentarité difficile (ROTT *et al.*, 1985, 1988); MÄTZLER, 1987b). De nombreux auteurs ont étudié la propension des radars à antenne synthétique (RAAS) à obtenir des informations quantitatives sur la neige : hauteur, type, équivalent en eau (ROTT, 1984; ROTT *et al.*, 1985, 1988; SHI *et al.*, 1991; ULABY *et al.*, 1986; BERNIER et FORTIN, 1994).

Les programmes radar satellitaires internationaux (ERS-1, JERS-1, RADARSAT) offrent différentes fréquences et polarisations dans ce domaine thématique d'application. L'objectif de cet article est essentiellement de tenter de mieux résoudre les problèmes liés

à la topographie et aux effets du relief sur le signal, tant en géométrie qu'en radiométrie. L'interprétation nivologique et géologique de l'image radiométrique finale souligne l'importance de la rugosité (avalanches, pistes de ski) et de la nature des sols sous-jacents (humidité).

2. Sites et données acquises

2.1. Site d'étude et données de terrain

Le site des Arcs est localisé dans les Alpes françaises du nord, dans le massif de la Vanoise, au-dessus de la ville de Bourg-Saint-Maurice (fig. 1). La zone d'étude correspond au versant ouest de la station de ski des Arcs et l'altitude varie de 1 600 à 2 500 m, avec une pente moyenne comprise entre 10° et 30°, pour une superficie de 5 km sur 10 km. Il s'agit donc d'un versant d'orientation et de pente homogène, bien adapté pour une étude de faisabilité. De plus, ce site est bien documenté et instrumenté depuis 1986 par le Laboratoire CNRS de la montagne alpine (LAMA) : cartographie géologique, pédologique et végétale; de plus, deux stations de mesures météorologiques et un réseau de perches permettant le relevé des hauteurs de neige y sont implantés.

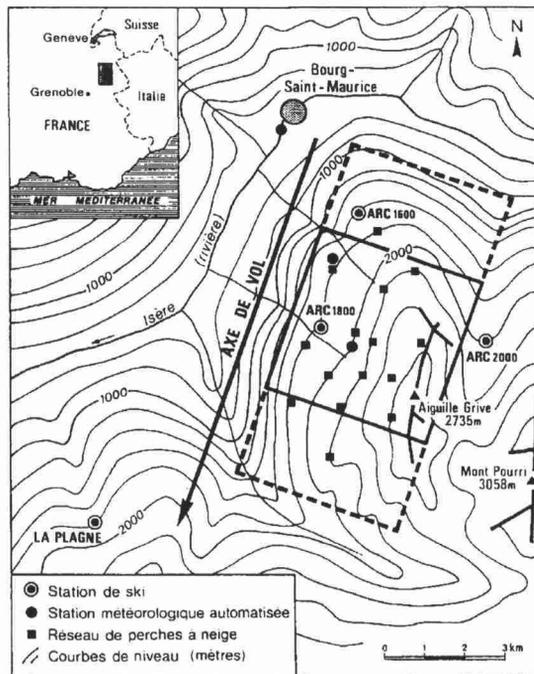


Figure 1. Localisation du site des Arcs (en tireté), des postes de mesures nivo-météorologiques et du secteur géographique étudié

2.2. Données RAAS

Notre souhait était de pouvoir disposer d'enregistrements en deux périodes totalement différentes : neige sèche en début de saison hivernale, neige humide en fin de saison. Les images ont donc été acquises en deux campagnes de mesures : le 3 décembre 1989 et le 28 avril 1990. Le capteur était le E-SAR du DFVLR (Allemagne) et les images ont été acquises en bande X (9,6 GHz), polarisation HH puis VV. L'angle d'incidence était en mode nadir (20° à 60°) pour le mois de décembre et compris entre 15° et 60° en avril. Dans les deux cas, la résolution spatiale était de 1 m le long de la trace et de 1,5 m en distance. Malheureusement, l'absence de calibration absolue et relative de l'instrument a limité toute tentative d'étalonnage des données RAAS, mais il s'avère désormais possible de se fonder sur les propriétés diélectriques des résineux (BERNIER et FORTIN, 1994). Les données de la synthèse ont été produites par le Centre national d'études spatiales (CNES).

Le 3 décembre 1989, le manteau neigeux était de très faible épaisseur (20 à 30 cm), discontinu et en neige sèche fraîche. La neige était à température négative lors du passage de l'avion (16 h TU), mais une erreur de pointage a fait dévier l'image pour n'obtenir que la partie inférieure du site d'étude où le manteau neigeux est presque inexistant (altitude < 2 000 m).

Le 28 avril 1990, le secteur d'étude était totalement enneigé, avec des hauteurs variant de 20 cm à 1 700 m d'altitude à 200 cm vers 2 500 m. À cette époque de l'année, la fusion nivale débute et la neige évolue très rapidement au cours de la journée (le cycle gel nocturne/fonte diurne était compris entre -3°C et $+4^\circ\text{C}$) : l'heure des enregistrements RAAS et des mesures simultanées au sol est donc primordiale. Le vol a eu lieu vers 8 h 30 TU en deux axes HH et VV. La zone d'étude a été parfaitement couverte et les images sont cette fois-ci d'excellente qualité, c'est pourquoi ce sont ces données qui ont été les plus étudiées en nivologie et géologie (fig. 2). Sur cet enregistrement brut de la synthèse en polarisation VV, on distingue déjà les pistes de ski alpin en blanc, avec le tracé rectiligne caractéristique des remontées mécaniques métalliques, les zones boisées de résineux grâce à leur texture granuleuse caractéristique. La zone sombre au bas de l'image (fig. 2) correspond au versant opposé à la crête sommitale et par conséquent «à l'ombre» de l'illumination radar.

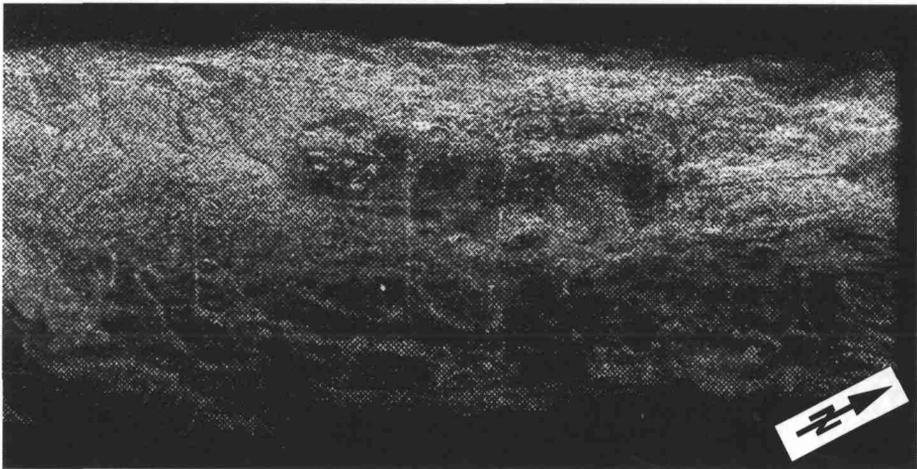


Figure 2. Image RAAS brute du 28 avril 1990 en polarisation VV

2.3. Données auxiliaires

2.3.1. Données de terrain

Durant chaque campagne, des mesures nivo-météorologiques simultanées ont été saisies par des équipes en différents points du secteur : température de l'air, pression et humidité, hauteur de neige et stratification, densité, permittivité diélectrique, teneur en eau liquide (TEL) et équivalent en eau du manteau. Le 3 décembre, les conditions étaient anticycloniques, en température négative de l'air et avec neige sèche. Le 28 avril, il est apparu que la neige était pratiquement sèche en altitude, mais avec une teneur en eau liquide en aval (2 %).

Au cours de l'été 1990, une campagne de conductivité électromagnétique a été menée sur le site hors-neige afin de valider les hypothèses de l'interprétation géologique des images d'avril.

2.3.2. Données numériques

Ces données sont :

- une image HRV de SPOT en mode panchromatique (0,51-0,73 μm) enregistrée au même jour que la mission RAAS de décembre, mais le matin à 10 h 30 TU; la résolution spatiale est de 10 m; par contre, il n'y a pas de donnée satellitaire optique disponible dans la période du 27 avril en raison d'une forte nébulosité;

- un jeu de photographies aériennes en mode panchromatique pris le 22 juillet 1990 au 1 : 20 000 par l'Institut géographique national (IGN), qui a été numérisé et mosaïqué en orthophotos pour posséder une vision du secteur hors-neige; la résolution spatiale obtenue est de 5 m;

- un modèle numérique de terrain (MNT) a été constitué avec une maille de 10 m à partir d'un plan du secteur au 1 : 10 000. L'utilité du modèle sera primordiale dans la phase des pré-traitements de géométrie et de radiométrie qui suivent.

3. Pré-traitements

L'ensemble des étapes de travail et des produits obtenus est contenu dans l'organigramme présenté en figure 3. Tous les traitements numériques ont été menés au Centre interuniversitaire de calcul de Grenoble (CICG).

3.1. Géométrie

Afin de pouvoir croiser à résolution spatiale et géométrie identiques des données numériques d'origines diverses (RAAS, HRV de SPOT, MNT, orthophotos), il s'avérait indispensable de pouvoir être parfaitement géoréférencé. En ce qui concerne l'optique, les techniques de correction utilisées sont fondées sur le rééchantillonnage des images à partir du MNT, de points d'appui cartographiques et d'interpolations polynomiales. Ces méthodes s'avèrent inopérantes sur images RAAS en raison des déformations dues à l'angle d'incidence et du relief. La taille du pixel va dépendre de l'angle d'incidence local (θ) qui est la différence entre l'angle d'incidence du capteur (β) depuis l'axe de vol de l'avion et la pente du terrain visé (α) (fig. 4).

Plusieurs auteurs présentent dans la littérature des algorithmes concernant les corrections géométriques de données RAAS (RAGGAM *et al.*, 1986; ROTT *et al.*, 1988; TOUTIN and

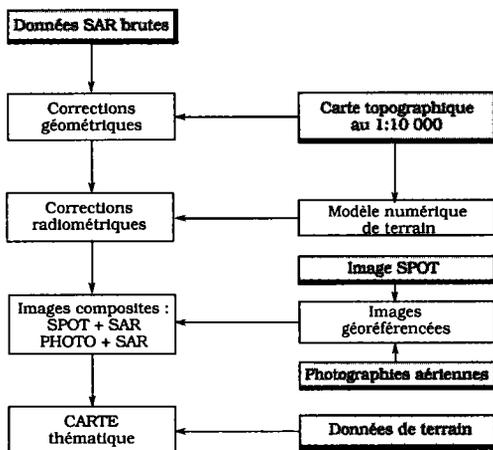


Figure 3. Organigramme de la méthodologie suivie et des résultats produits

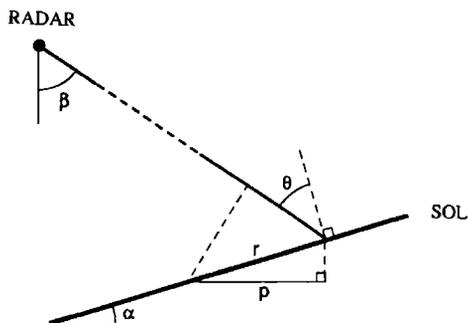


Figure 4. Variation de la taille du pixel en fonction de l'angle d'incidence et de la topographie locale

CARBONNEAU, 1992). Le problème est que, pour corriger géométriquement l'image en distance, et donc modifier la taille de certains pixels, il faut localiser chacun d'entre eux au préalable sur un MNT. Nous avons résolu ce problème en considérant, à juste titre, que le profil du versant visé perpendiculairement à l'axe de l'avion est uniforme tout au long de l'image. À partir du profil du terrain repéré en un lot de points et de la position de l'avion, il s'avère possible de générer une distorsion des pixels. Les données RAAS de décembre avaient déjà été corrigées géométriquement par le CNES, mais avec un algorithme considérant le terrain comme plan. Puisqu'une très faible partie du domaine d'étude est représentée dans ces enregistrements (et de surcroît ce sont des zones à faible déclivité), nous n'avons corrigé que les images brutes d'avril.

3.1.1. Le positionnement de l'avion

Le positionnement de l'avion peut être obtenu en X, Y, Z soit à partir des paramètres de vol (GPS : *Global Positioning System*), soit par calcul; et cette position est indispensable

pour calculer l'angle d'incidence local qui détermine la taille des pixels et, en partie, leur radiométrie. Dans notre cas, l'altitude de vol était de 3 927 m et le positionnement de l'axe donné par GPS.

3.1.2. Calcul de la taille des pixels et rééchantillonnage à 5 m

L'objectif est à présent d'effectuer une première rectification géométrique en tenant compte de la variation de la taille des pixels en fonction de l'angle d'incidence local. Cette correction est grossière, mais permet d'appliquer ensuite une méthode classique qui aurait été inapplicable à cause de la trop grande déformation de l'image originale. L'avantage de notre traitement, par rapport à celui qu'effectue normalement le CNES, est de tenir compte du relief. Le traitement repose sur le fait que le profil du versant sur lequel nous travaillons est relativement constant le long de l'axe de vol.

Dans un premier temps, neuf points ont été déterminés le long du versant et ils permettent de calculer son profil moyen. Connaissant ainsi la pente du terrain et la position de l'avion d'après le calcul précédent, la taille des pixels est calculée de la manière suivante (fig. 4) :

$$P_{\text{cor}} = r \cdot \cos(\alpha)$$

avec

$$r = e / \sin(\theta)$$

où P_{cor} = taille du pixel corrigé;

r = résolution au sol;

e = taille du pixel brut en distance;

α = angle de pente locale dans le plan du capteur;

θ = angle local d'incidence de la visée.

Les résultats graphiques sont donnés sur la figure 5. Les discontinuités de taille des pixels sont dues au fait qu'il y a des ruptures de pente au niveau de chaque point caractéristique. Pour comparaison, la même variation est proposée pour une altitude constante de 2 000 m et pour un terrain considéré comme plan (méthode du CNES pour l'image RAAS de décembre). On constate logiquement que c'est au plus proche du nadir que les tailles de pixel ont été les plus dilatées. L'image RAAS résultante est exposée à la figure 6a et l'on perçoit l'effet de dilatation des pixels par rapport à la compression initiale de la figure 2.

Une des particularités des images RAAS est la présence d'un bruit de fond, d'un scintillement nommé «*speckle*» en langue anglaise, qui rend difficile leur interprétation thématique. Une grande variété de techniques de filtrages est proposée dans la littérature et, après quelques tests, nous avons privilégié l'approche géométrique en utilisant un filtre non linéaire dérivé des filtres alternés séquentiels (SAFA et FLOUZAT, 1988). L'image résultante est donnée par la figure 6b, et l'on peut y constater la disparition de cet effet «sel et poivre» encore présent sur l'image 6a.

3.1.3. Réalisation d'une ortho-image RAAS

La correction géométrique à cette étape n'est encore qu'approximative en fonction des hypothèses effectuées sur la résolution en distance, l'altitude de l'avion et le profil du versant (fig. 6b), à savoir qu'il n'y a pas encore de rotation pour correction absolue par rapport au nord géographique, ni de correction relative interne des effets de distorsion du relief local.

L'image (fig. 6b) a donc été rééchantillonnée grâce à une correction géométrique classique par prise de points d'appui : 50 points ont été déterminés sur l'image et sur une

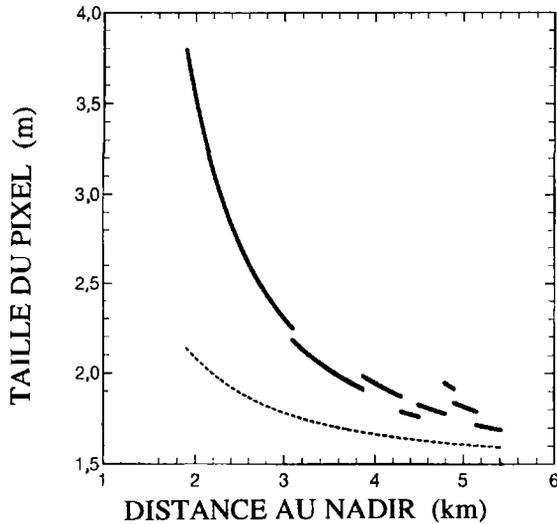


Figure 5. Calcul automatique de la taille des pixels selon un profil perpendiculaire à l'axe de vol avion (trait gras). Pour comparaison, la taille des pixels est proposée pour un terrain plat à 2 000 m (trait pointillé)

carte topographique au 1: 10 000. Un logiciel du CICG a ensuite été utilisé pour rééchantillonner les pixels dans le repère géographique cartésien Lambert II par interpolation en fonctions «B-Spline». La taille du pixel corrigé a été fixée à 5 x 5 m, car c'est une résolution suffisante comparée à celle des cartes topographiques dont nous disposons. L'image initiale était de 4 000 par 2 048 pixels avec une résolution au sol de l'ordre de 1 m. Après rééchantillonnage, l'image obtenue est de 800 par 700 pixels pour une résolution spatiale de 5 m, les parties hautes et basses ayant été supprimées car inutilisables. Le résultat de l'image géoréférencée est donné par la figure 7.

3.1.4. Contrôle de qualité de la correction géométrique par fonctions «B-Spline»

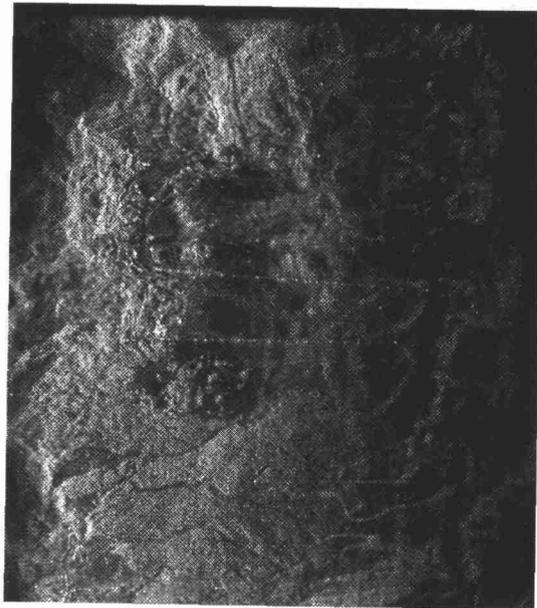
Le contrôle de qualité de la correction géométrique par fonctions «B-Spline» a été ensuite effectué grâce au MNT. Pour un lot de points de validation, la précision obtenue du positionnement en X et en Y est inférieure ou égale à 1 pixel, soit 5 m au sol pour la zone de l'image ayant été rectifiée géométriquement : les figures 8a et 8b exposent la bonne relation en X et en Y entre la position d'un point dans le MNT et dans l'image. À chaque pixel de repère ligne-colonne «i,j» dans l'image, peut désormais être associé un repère «x,y» dans le MNT. Cette étape était nécessaire pour effectuer ensuite les corrections de radiométrie dues aux effets de pente. Il est à noter cependant que, dans notre cas précis, la détermination de points caractéristiques sur l'image RAAS est grandement facilitée par la présence de toutes les infrastructures linéaires liées au ski alpin (remontées mécaniques).

3.2. Correction radiométrique

Disposant à présent d'une ortho-image, pour laquelle on peut associer fiablement un pixel à un point du terrain, il nous est possible de calculer un angle d'incidence local. La



(a)



(b)

Figure 6. Image RAAS d'avril 1990 : a) après correction de la taille des pixels; b) après atténuation de l'effet de scintillement

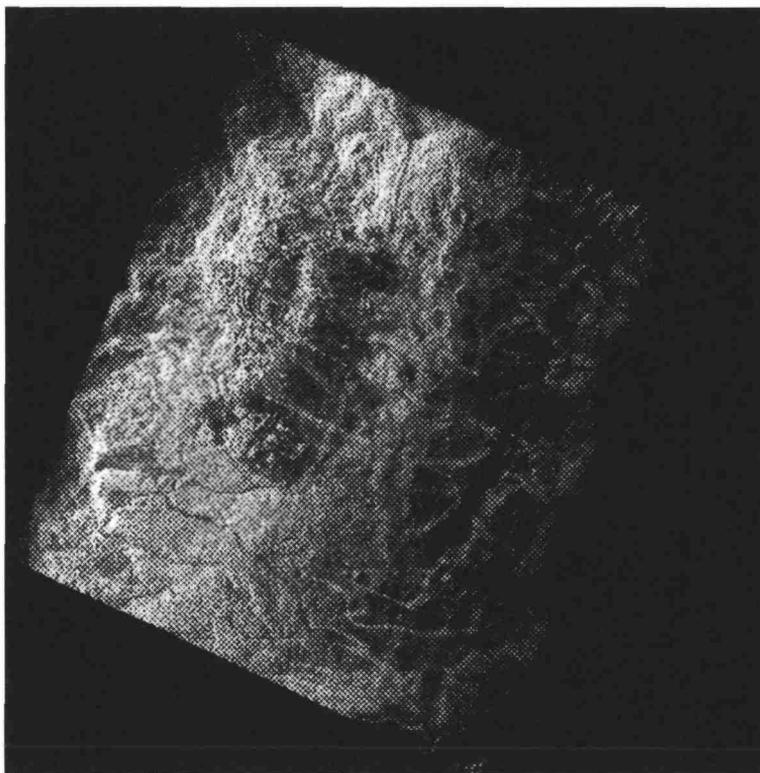


Figure 7. Image RAAS d'avril 1990 géolocalisée après corrections géométriques par fonctions «B-Spline»

radiométrie est corrigée à partir de cet angle d'incidence, en supposant qu'elle est proportionnelle à la taille de la surface éclairée :

$$R_{cor} = R_{mes} \cdot \sin(\theta)$$

où R_{cor} = rétrodiffusion corrigée;
 R_{mes} = rétrodiffusion mesurée;
 θ = angle d'incidence local.

Le calcul de l'angle d'incidence local nécessite les étapes suivantes :

- calcul de la position de l'avion correspondant à chaque pixel;
- calcul de la pente locale à partir du MNT;
- calcul de l'angle d'incidence local dans le plan défini par la normale au pixel et le vecteur avion-pixel.

Un transect de contrôle a été établi transversalement dans le fichier-image, perpendiculairement à l'axe de vol de l'avion. Le résultat statistique obtenu est donné par le graphique de la figure 9. On constate que le profil des valeurs rétrodiffusées après correction radiométrique est bien moins influencé par l'effet de pente et de distance au nadir que le profil initial avant correction. L'image RAAS obtenue (fig. 10) montre nettement la disparition de cette gradation des valeurs en niveaux de gris depuis la source d'illumination qui était présente sur les documents bruts et corrigés géométriquement. Le

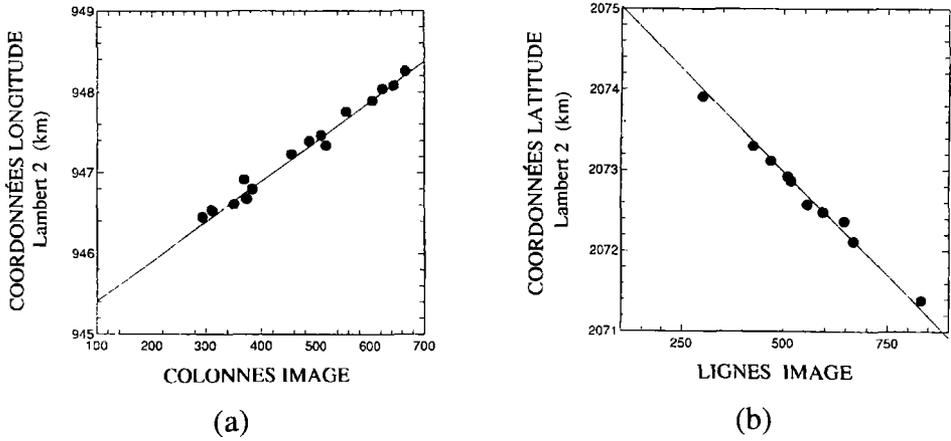


Figure 8. Régressions linéaires établies pour des points de contrôle entre l'image géoréférencée et le MNT : a) entre les coordonnées de longitude et les colonnes-image; b) entre les coordonnées de latitude et les lignes-image

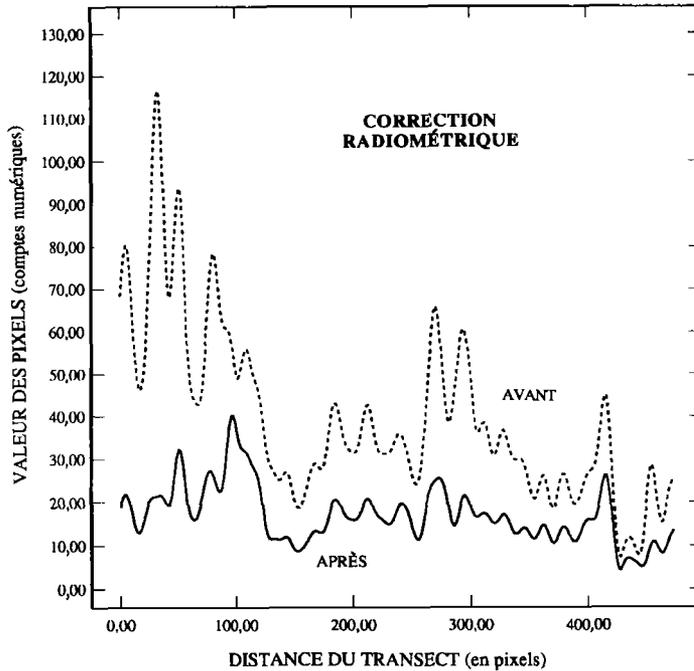


Figure 9. Valeurs des pixels avant et après corrections radiométriques pour un transect perpendiculaire à l'axe de vol avion

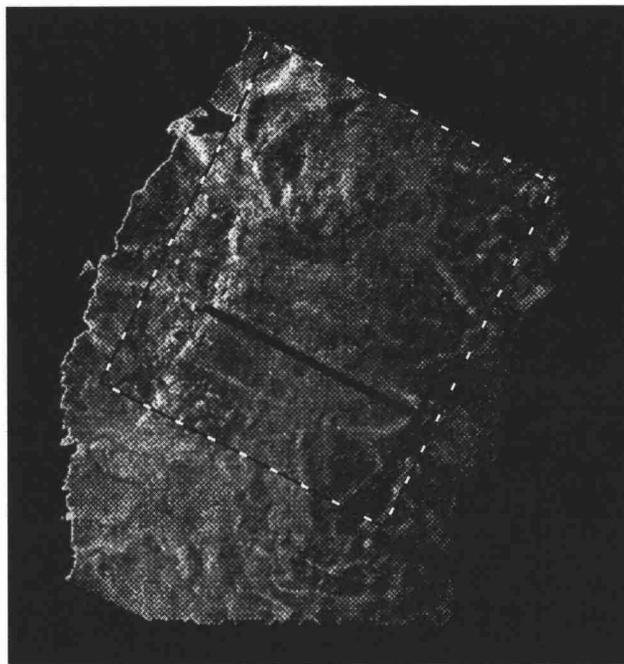


Figure 10. Image RAAS d'avril 1990 corrigée radiométriquement; les limites correspondent au modèle numérique de terrain; le transect correspond aux pixels de la figure 9

transect inscrit dans l'image est l'axe de pixels de contrôle mentionné à la figure 9. Les limites du cadre inscrit dans l'image sont les limites de la carte thématique d'interprétation exposée plus loin (fig. 13).

4. Traitements, analyses d'images et résultats

4.1. Nivologie

4.1.1. Images RAAS

Puisque le capteur n'était pas calibré, nous n'avons pu produire qu'un travail d'analyse relative fondée sur une approche de photo-interprétation (grâce à une excellente connaissance du terrain étudié). D'après la littérature, trois signatures doivent en principe se dégager : les zones hors-neige, les neiges sèches et les neiges humides (MÄTZLER and HUPPI, 1989; LUCAS and HARRISON, 1990). Dans le cas de nos deux campagnes aéroportées, les zones libres de neige ou boisées en résineux apparaissent bien avec un signal rétrodiffusé élevé, mais tel est aussi le cas des secteurs à forte rugosité (avalanches et moraines sous-jacentes) en avril.

En décembre, la neige sèche est transparente et c'est donc l'information du substrat qui a été saisie. En effet, quand la neige est sèche, la grande profondeur de pénétration du signal dans la neige fait que la rétrodiffusion est principalement liée à l'interface sol-neige

(STILES and ULABY, 1980). Par contre, pour l'image d'avril, en situation de neige humide (2 % de T.E.L.; teneur en eau liquide), la neige peut parfois devenir opaque et le signal rétrodiffusé provient alors uniquement de la surface supérieure de la neige au contact de l'air, avec cependant un coefficient de rétrodiffusion plus faible que pour un sol nu (STILES and ULABY, 1982). Concernant les pistes de ski alpin (fig. 10), leur position altitudinale les situe théoriquement en secteur de neige sèche, mais la rétrodiffusion observée est totalement différente. Une explication logique peut être avancée, car c'est vraisemblablement en raison du passage répété des skieurs et des engins de damage des pistes que l'on obtient une structure et une rugosité différentes de la neige en surface. C'est à l'action mécanique imposée aux grains de neige que l'on doit ce phénomène en contradiction avec la littérature théorique (MÄTZLER and HUPPI, 1989). Pour exemple, nous avons noté en avril une densité moyenne de 500-570 kg/m³ sur piste, alors qu'elle n'était que de 250-350 kg/m³ en zone naturelle.

Par contre, la signature du manteau neigeux dans tous ces autres secteurs est conforme avec la possibilité de pénétration du signal dans un manteau de 1 m d'épaisseur et faiblement humide donnée par STILES et ULABY (1980) pour la fréquence de 9,6 GHz (bande X). C'est pourquoi les zones à sols hydromorphes ressortent en sombre (faible rétrodiffusion) pour décembre et avril. Tel est le cas d'un vaste secteur à gauche de l'image (fig. 10) constitué en été d'un terrain de golf sur sols humides et riches en argiles. Sur la partie droite de l'image, des détails de la fracturation des terrains sous-jacents apparaissent nettement en teintes sombres; ce point sera interprété plus en avant dans le paragraphe dédié à la géologie. On remarquera enfin en haut de l'image (fig. 10) la présence en teintes claires du tracé de lit rocheux de torrent. Ce phénomène est perceptible sous 1 m de neige en avril en raison de la transparence de la neige et de la rétrodiffusion élevée des matériaux (rugosité).

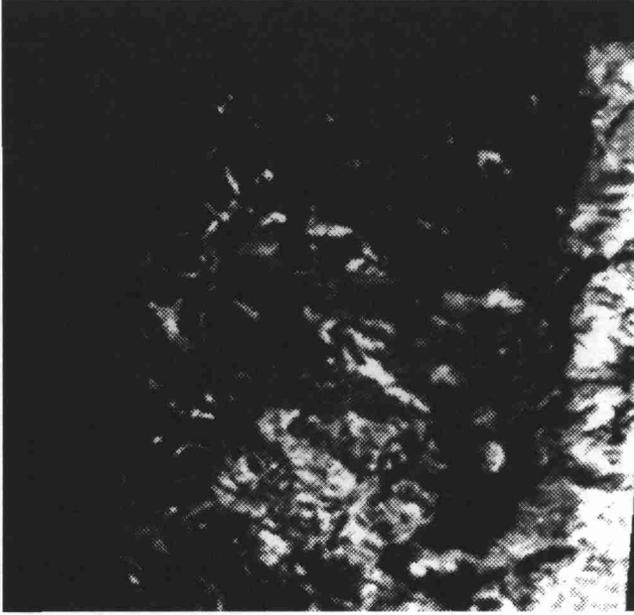
On remarquera enfin que la confrontation à la fois en décembre et en avril entre les deux polarisations HH et VV n'a pas apporté de différence significative entre les deux modes pour la détermination des types de neige ou bien la localisation des zones humides sous-jacentes.

4.1.2. Comparaison avec les données optiques

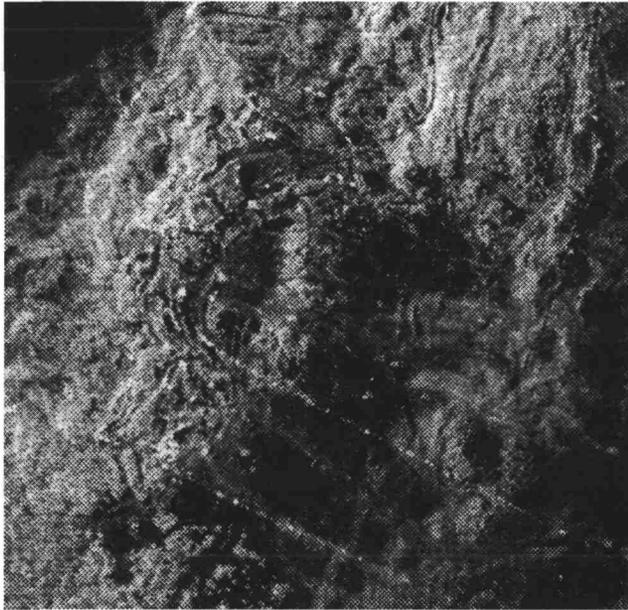
Les hypothèses évoquées ci-dessus ont été validées par le croisement numérique des données RAAS avec les données du visible.

Tout d'abord, la superposition entre l'image RAAS de décembre et l'image panchromatique HRV de SPOT du même jour montre que la neige présente sur SPOT est totalement «transparente» pour le radar qui, par contre, détecte parfaitement les zones humides précitées, alors que HRV ne discerne rien. La figure 11a montre l'enregistrement de l'instrument HRV, où domine la brillance de la neige, et la figure 11b expose la rétrodiffusion des sols, puisque la neige est transparente pour le RAAS. Par contre, les informations du bâti et des voies de communications offertes par HRV ne sont pas présentes sur l'image RAAS. Les deux instruments sont donc tout à fait complémentaires.

En un second temps, et en préparation de l'interprétation géologique, nous avons utilisé des ortho-photographies aériennes en mode panchromatique prises sur ce même secteur, en saison d'été 1990 et en situation hors-neige (fig. 12). Les zones humides confirmées par les campagnes simultanées de mesures pédologiques et électromagnétiques de terrain n'apparaissent toujours pas, alors qu'elles sont bien identifiées sur les deux images RAAS de décembre (neige sèche transparente) et d'avril (neige humide). L'ensemble de ces informations a été cartographié et présenté à la figure 13.



(a)



(b)

Figure 11. Images du 3 décembre 1989 : a) image panchromatique HRV de SPOT; b) image RAAS

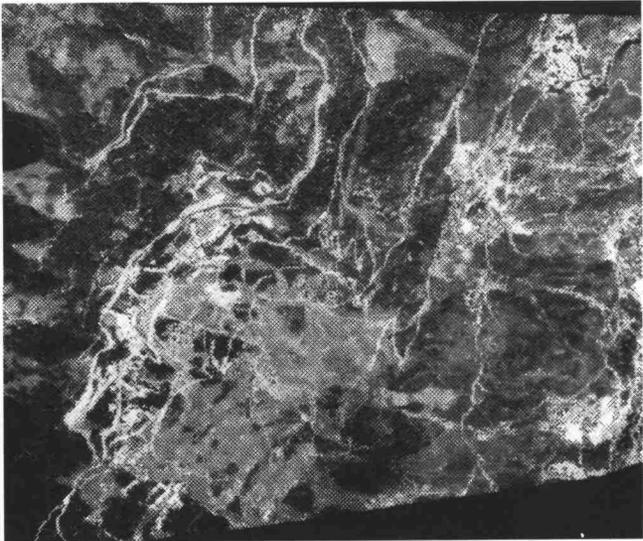


Figure 12. Ortho-photographie panchromatique de juillet 1990 sur le site des Arcs

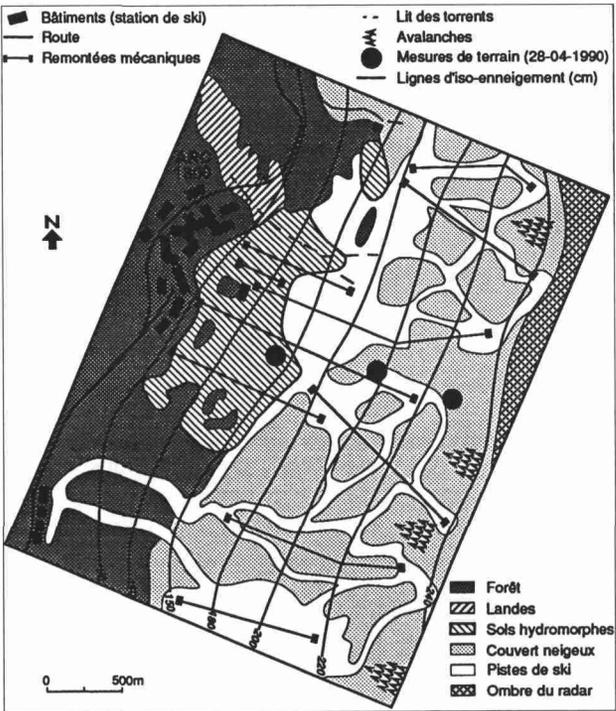


Figure 13. Carte thématique des Arcs correspondant à l'analyse des figures 9 et 12

4.2. Hydrogéologie

Les travaux d'interprétation ont été menés dans le cadre d'un magistère (LEONE, 1991) et offrent les résultats qui suivent.

4.2.1. Interprétation

Nous avons croisé l'image RAAS d'avril (fig. 10) avec la mission aérienne panchromatique (fig. 12). Les informations lithologiques obtenues montrent que les terrains de couverture ou de substratum rocheux restent difficiles à distinguer dans les deux documents et que l'effet du relief est encore sensible dans le signal RAAS rétrodiffusé (partie gauche de l'image présentée en figure 10). Tel n'est pas le cas dans d'autres fréquences comme la bande L (1,3 GHz), très utile en géologie, mais peu adaptée à la nivologie.

Par contre, l'image RAAS d'avril est d'un très grand intérêt pour l'approche hydrologique : écoulements superficiels, sources et zones de pertes en fracturation se localisent aisément comme si le couvert neigeux apparaissait transparent. Déjà identifiées dans l'analyse nivologique, les zones humides sur terrains meubles à forte teneur en eau (plus de 40 % d'humidité) ressortent en sombre en raison du faible pouvoir de rétrodiffusion de ces surfaces.

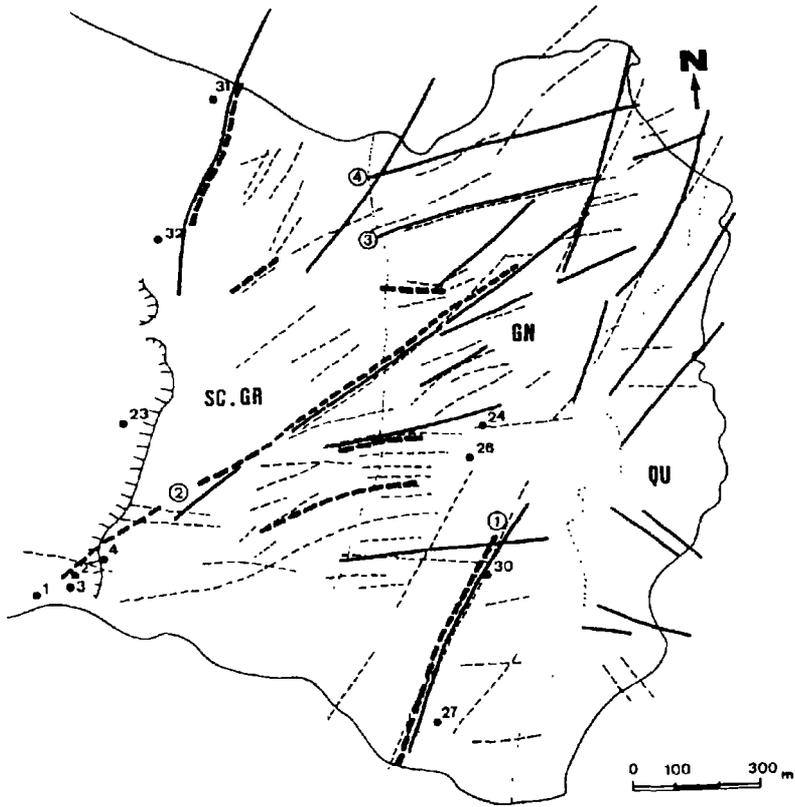
4.2.2. Validation

Les informations structurales ont été validées par consultation des cartographies existantes et, bien qu'il n'existe pas de relation explicite constatée aux Arcs entre la nature des objets étudiés et l'intensité du signal rétrodiffusé, l'imagerie RAAS offre des éléments nouveaux que seules des campagnes en prospection électromagnétique inductive ont confirmé. Dès la fin de la fusion nivale, des mesures de conductivité des sols ont été menées, par transects, sur le site avec un appareil canadien de prospection (GEONIC EM31) et restituées sous forme de profils de conductivité. Plusieurs anomalies positives (présence d'humidité) ont été notées au long des points considérés comme tel à l'issue de l'interprétation de l'image RAAS d'avril. Il s'agissait de sites non répertoriés jusqu'à présent. Leur report sur support cartographique montre des linéaments et des fractures de direction N 15° dominante, bien visibles sur l'image RAAS (fig. 10; à droite). L'ensemble de ces résultats a été porté en une carte de synthèse structurale (fig. 14).

5. Conclusions

De cette étude radar préliminaire, nous pouvons tirer les conclusions qui suivent :

- les corrections géométriques et radiométriques sont indispensables en zone de relief à cause des effets induits par la topographie; nous avons proposé un schéma simple pour des secteurs homogènes;
- le RAAS ne donne pas d'information sur de faibles épaisseurs de neige sèche, mais permet, contrairement aux instruments optiques, de détecter les zones humides ou des fractures du terrain (faible pouvoir de rétrodiffusion), d'où son intérêt primordial en géologie;
- la signature des zones enneigées apparaît comme un mélange complexe d'effets du sol sous-jacent (sols humides herbeux, moraines), d'effets de volume et, enfin, d'effets de surface (pistes de ski et avalanches).



Légende:

-  : linéament radar
-  : linéament photographique
-  : discontinuité électromagnétique
-  : escarpement (cicatrice d'arrachement)
-  : limites des grandes unités lithologiques de la zone Briançonnaise externe:
 SC & GR: schistes et grès du houiller
 GN: gneiss du Sappey
 QU: quartzites du Trias
-  : source

Figure 14. Synthèse cartographique de données radar, photographiques et électromagnétiques

Une seule signature ne peut donc être donnée pour la neige et seule la comparaison avec une image hors-neige enregistrée dans des configurations instrumentales identiques permettra de lever les ambiguïtés. Cela implique donc de réaliser les étapes futures :

- une image RAAS ratio entre été hors-neige et hiver pour observer la part réelle des substrats dans l'information hivernale (permittivité diélectrique);

- une calibration nécessaire du capteur en absolu et en relatif pour tenter de calculer par algorithme une mise en correspondance des coefficients de rétrodiffusion avec des paramètres mesurés du couvert neigeux : l'équivalent en eau et l'humidité volumique.

Tel est l'objectif du programme actuellement en cours sur ce même site entre les laboratoires cités en référence avec la collaboration de l'INRS-Eau à Québec et le Centre d'études spatiales du rayonnement (CESR) à Toulouse.

6. Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du CNES et du soutien logistique de la station de ski des Arcs (STAR).

7. Références

- BARRY, R.G. 1985. The cryosphere and climate change. Detecting the Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide, DOE/ER-0235, ed. MacCracken, M. C. and Luther, F. M., U.S. Dept. of Energy, Washington, DC, p. 109-148.
- BARRY, R.G. 1990. Observationnal evidence of changes in global snow and ice cover. *in* Observed climate variations and change: contributions in support of section 7 of the 1990 IPCC scientific assessment, D.E Parker editor, 150 p.
- BERNIER, M. et FORTIN, J.-P. 1994. Suivi de couvert nival par le satellite ERS1 : résultats préliminaires obtenus dans l'est du Québec. *Journal canadien de télédétection*, vol. 20, n° 4, p. 138-149.
- BOURDELLES, B. and FILY, M. 1993. Snow grain size determination from Landsat imagery over Terre-Adelie, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 17, p. 86-92.
- CHANG, T.C., GLOERSEN, P., SCHMUGGE, T., WILHEIT, T.T. and ZWALLY, J. 1976. Microwave emission from snow and glacier ice. *Journal of Glaciology*, vol. 16, n° 74, p. 23-39.
- DOZIER, J. 1984. Snow reflectance from Landsat 4 Thematic Mapper. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 17, p. 1213-1221.
- DOZIER, J. 1989. Spectral signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, p. 9-22.
- FOSTER, J.L., HALL, D.K. and CHANG, A.T.C. 1984. An overview on passive microwave snow research and results. *Review of Geophysics and Space Physics*, 22, p. 196-208.
- HALL, D.K. and MARTINEC, J. 1985. Remote sensing of ice and snow. Ed. Chapman and Hall, London, 189 p.
- HALLIKAINEN, M.T. and JOLMA, P.A. 1986. Retrieval of the water equivalent of snow cover in Finland by satellite microwave radiometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-24, n° 6, p. 855-862.

- KUNZI, K.F., PATIL, S. and ROTT, H. 1982. Snow-cover parameters retrieved from Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-20, n° 4, p. 452-467.
- LEONE, F. 1991. Télédétection par hyperfréquences et prospection électromagnétique, le cas du versant expérimental des Arcs, Savoie, France. Magistère «Sciences de la Terre», Université Grenoble 1, 100 p.
- LUCAS, R. and HARRISON, A. 1990. Snow observation by satellite: a Review. *Remote Sensing Reviews*, vol. 4, n° 2, p. 285-348.
- MÄTZLER, C., AEBISHER, H. and SCHANDA, E. 1984. Microwave dielectric properties of surface snow. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. GE-9, n° 5, p. 366-371.
- MÄTZLER, C. and HUPPI, R. 1989. Review of signature studies for microwave remote sensing of snowpacks. *Advance Space Research*, vol. 9, n° 1, p. 253-265.
- MÄTZLER, C. 1987a. Microwave sensors for measuring avalanche-critical snow parameters, *Avalanche Formation, Movement and Effects*. IAHS Publ. n° 162.
- MÄTZLER, C. 1987b. Applications of the interaction of the microwaves with the natural snow cover, *Remote Sensing Reviews*, vol. 2, n° 2, p. 259-387.
- RAGGAM, J., STROBL, D. and TRIEBNIG, G. 1986. The rectification of SAR Image Data using a Digital Elevation Model and Image Simulation Techniques. DIBAG report, 28, Institute for Image Processing and Computer Graphics, Graz, Austria, 75 p.
- ROTT, H. 1990. Snow and land ice in the climate system: research problems and possibilities of remote sensing. *Remote sensing and the earth's environment*, Proceedings of Summer School held at Alpbach, Austria, 1989, ESA SP-301, p. 61-75.
- ROTT, H. and MARKL, G. 1989. Improved snow and glacier monitoring by the Landsat Thematic Mapper. ESA SP-1102, p. 3-12.
- ROTT, H., DOMIK, G., MÄTZLER, C., MILLER, H. and LENHART, K.G. 1985. Study on use and characteristics of SAR for land snow and ice applications. ESA Report CR(P) 2168, 117 p.
- ROTT, H., C. MATZLER, D. STROBL, S. BRUZZI, and K.G. LENHART 1988. Study on SAR land applications for snow and glacier monitoring. ESA Report CR, 6618/85/F/FL (SC), 185 p.
- ROTT, H. 1984. The analysis of backscattering properties from SAR data of mountain regions. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. GE-9, n° 5, p. 347-355.
- SAFA, F. et FLOUZAT, G. 1988. Exemple de filtrage morphologique du speckle dans les images radar. *Revue Photo-interprétation*, n° 88-5, Éd. Technip, Paris, 6 p.
- SERAGENT, C., POUATCH, E. and SUDUL, M. 1993. Experimental investigation of optical properties for various types of snow. *Annals of Glaciology*, 17, p. 281-287.
- SHI, J.C., DOZIER, J., ROTT, H. and DAVIS, R.E. 1991. Snow and glacier mapping in Alpine regions with polarimetric SAR. *Proceedings IGARSS '91*, Helsinki, p. 2311-2314.
- STILES, W.H. and ULABY, F.T. 1980. The active and passive microwave response to snow parameters, 1. Wetness. *Journal of Geophysical Research*, 85 (C2), p. 1037-1044.
- STILES, W.H., and ULABY, F.T. 1982. Dielectric properties of snow. *CRREL Special Report*, vol. 82, n° 18, p. 91-103.
- TOUTIN, T. and CARBONNEAU, Y. 1992. An integrated method to rectify Airborne Radar imagery using DEM, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, n° 4, p. 417-422.
- ULABY, F.T., MOORE, R.K. and FUNG, A.K. 1981, 1982, 1986. *Microwave remote sensing* (in three volumes), ed. by D.S. Simonett, The Artech House Remote Sensing Library, 1200 p.

- WANG, J.R., CHANG, A.T.C. and SHARMA, A.K. 1992. On the estimation of snow depth from microwave radiometric measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 4, p. 785-791.
- WARREN, S.G. 1982. Optical properties of snow. *Review of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, n° 1, p. 67-89.

9

Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface au Burkina Faso

YAZON GNOUMOU ¹, MICHEL YERGEAU ², GOZE BERTIN BÉNIÉ ²,
KARIM TRAORÉ ¹, HÉDIA CHAKROUN ², KALIFA GOITA ² et
ABDOULRASMANE TAO ¹

¹ *Direction de l'inventaire des ressources hydrauliques, Projet Bilan d'eau, ministère de l'Eau, 03 B.P. 7025, Ouagadougou 03, Burkina Faso;*
téléphone : +226 31-15-50; télécopieur : +226 31-15-50

² *Centre d'applications et de recherches en télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada;*
téléphone : +1 (819) 821-7180; télécopieur : +1 (819) 821-7944

Résumé

La sécurité alimentaire des Burkinabè s'appuie en partie sur la contribution de la petite et moyenne irrigation. Les infrastructures liées à ce type d'irrigation (petits barrages, retenues d'eau, etc.) doivent être surveillées à un coût raisonnable. Un guide méthodologique opérationnel à faible coût a été élaboré pour la gestion des eaux de surface au Burkina Faso. Le guide comprend une cartographie des plans d'eau et une analyse des coûts. Le travail a été réalisé à l'aide d'un appareil d'analyse analogique des données de télédétection. Les plans d'eau ont été cartographiés selon trois types d'inventaire : 1) un inventaire national; 2) un inventaire inter-annuel; et 3) un inventaire intra-annuel. Deux fichiers de suivi ont été construits. L'opération coûte environ 136 FCFA/km².

1. Introduction

Le Burkina Faso (274 200 km²) appartient à un écosystème tropical qui est caractérisé par un climat de type sahélo-soudanien. Les précipitations sont comprises entre les isohyètes 300 mm au nord et 1 000 mm au sud. Les précipitations sont fortement variables sur presque tout le territoire; les totaux pluviométriques sont alors faussement représentatifs de l'eau disponible.

La topographie du Burkina Faso est peu marquée avec des altitudes moyennes inférieures à 400 m. La quasi-absence de relief ralentit considérablement l'écoulement naturel des eaux. Cependant, le réseau hydrographique y est relativement important. Tous les cours d'eau ont un régime tropical, avec des débits variant de faibles à nuls en saison sèche, et des hautes eaux pendant l'hivernage. Quelques digues érigées sur les cours d'eau aident à retenir les eaux à des fins d'approvisionnement en eau ou d'irrigation et à des fins énergétiques.

2. Historique de la surveillance des ressources en eau de surface

2.1. Inventaire

Le Burkina Faso comptait 286 ouvrages de retenues d'eau en 1966, 241 en 1973, 315 en 1983, 533 en 1985. Un nouvel inventaire des points d'eau et ouvrages hydrauliques a été mené par l'Office national des barrages et des aménagements hydro-agricoles (ONBAH) en 1986-1987 (ONBAH, 1987; PIQUEMAL, 1988; PIQUEMAL, 1991). Des missions de reconnaissance sur le terrain ont couvert la totalité du pays. Un fichier informatisé des plans d'eau par province et par bassin versant a été créé. Ces missions ont permis de localiser avec précision 719 ouvrages.

Un rapport (PROJET BILAN D'EAU, 1991) faisant état des connaissances sur les eaux superficielles au Burkina Faso mentionne 1 050 plans d'eau; les caractéristiques du réseau hydrographique et de ces plans d'eau ont été emmagasinées dans une banque de données qui est reliée à un système d'information géographique.

2.2. Utilisation de la télédétection

Des travaux antérieurs (PRÉVOST, 1984; PARNOT et DAMASCO, 1984; YERGEAU *et al.*, 1991) ont déjà effectué la démarche d'inventaire en utilisant les images MSS de Landsat. DIÉBATÉ (1989) a quant à lui évalué la performance des données de la génération des satellites Landsat et SPOT. Mais, d'après l'ONBAH (YERGEAU, 1989), le coût d'acquisition des images à haute résolution spatiale freine l'utilisation à grande échelle de la télédétection dans la gestion des ressources en eau au Burkina Faso.

3. Le guide méthodologique

La maîtrise des ressources en eau dans un pays sahélien est essentielle. Devant la rareté de ces ressources et leur grande fluctuation dans le temps, la mise au point de techniques de

gestion des eaux s'avère nécessaire pour une utilisation rationnelle. Cette gestion comprend la surveillance des infrastructures à un coût raisonnable. Un des principaux handicaps à la mise au point d'une surveillance efficace est la disponibilité des informations permettant de localiser les plans d'eau et de connaître leur comportement dans le temps. Le préalable à une gestion efficace doit donc être l'élaboration de documents permettant de lever ce handicap.

En milieu tempéré, l'une des applications simples et efficaces des données Landsat réside dans l'évaluation de la morphométrie des plans d'eau (ROCHON, 1977; BÉNIÉ, 1982). Dans un milieu sahélien ou semi-aride, l'alternance des saisons sèches et humides engendre un remplissage rapide des réservoirs durant la saison des pluies et une baisse graduelle du niveau d'eau durant la saison sèche. Vers la fin de l'hivernage, la périphérie des réservoirs est colonisée par une végétation aquatique qui masque une partie du plan d'eau. De plus, la forme évasée des réservoirs (rapport surface/volume très élevé) implique qu'une ceinture de sols humides est conservée autour des plans d'eau au fur et à mesure de la baisse graduelle du niveau des eaux. Ces deux états de surface engendrent une erreur d'estimation de la superficie en eau (PRÉVOST et ROCHON, 1984).

Des documents à des échelles d'une précision suffisante pour les actions de gestion des ressources en eau peuvent cependant être élaborés. Dans le cadre de la cartographie opérationnelle des ressources en eau du Burkina Faso, un guide méthodologique (BÉNIÉ *et al.*, 1993) a été élaboré à l'aide d'une méthode analogique utilisant des données TM et MSS de Landsat.

3.1. Objectif

Le guide a pour objectif de présenter une méthodologie utilisant des données de télédétection pour :

- effectuer un inventaire national des plans d'eau à l'échelle du 1: 200 000;
- assurer le suivi intra-annuel et inter-annuel de ces plans d'eau à l'échelle du 1: 50 000;
- fournir une analyse comparée des coûts associés à l'exploitation des données satellitaires par les méthodes analogique et numérique.

3.2. Démarche opérationnelle

L'inventaire et la surveillance des ressources en eau de surface au Burkina Faso peuvent être réalisés au moyen des données de télédétection. La fiabilité des images satellitaires a été démontrée par DIÉBATÉ (1989) dans son étude d'opportunité technique; il en résulte que le nombre de plans d'eau interprétés et identifiés sur une image TM de Landsat représente 90 % du nombre total des plans d'eau de la zone. Le pourcentage de fiabilité est lié principalement à la résolution spatiale des capteurs (76 % pour MSS). Il est donc préférable d'utiliser des images ayant la meilleure résolution spatiale étant donné la dynamique des plans d'eau.

Les données de télédétection sont interprétées à l'aide d'un appareil d'analyse analogique. Les plans d'eau sont cartographiés par interprétation visuelle des images TM et MSS de Landsat selon les cinq étapes suivantes : 1) la planification du projet; 2) l'acquisition des données; 3) la construction d'une base cartographique permanente; 4) la photo-interprétation; 5) la cartographie et l'édition. Chacune de ces étapes est décrite dans les points qui suivent.

3.2.1. Planification du projet

La planification du projet comprend elle-même les trois étapes suivantes :

- planification stratégique (analyse des besoins, etc.);
- planification structurelle (budget, locaux, personnel, équipements, logiciels);
- planification opérationnelle (élaboration d'un plan détaillé).

3.2.2. Acquisition des données

L'acquisition des données comprend quatre étapes :

- inventaire des images disponibles;
- inventaire de la documentation existante;
- choix des images : les images satellitaires sont acquises sous format film. Les supports utilisés sont des films transparents négatif ou positif. Il est possible d'acquérir des images multibandes ou monochromes. Il est important que les images comprennent une bande spectrale dans le proche infrarouge; les surfaces en eau absorbent la totalité de ce type de rayonnement;

- achat des images sur support film : les images acquises sous format film peuvent être utilisées directement par un photo-interprète avec certaines précautions surtout d'ordre géométrique. Les images TM de Landsat offrent le meilleur rapport coût/bénéfice pour ce genre d'inventaire. L'inventaire national des plans d'eau au Burkina Faso nécessite d'acquérir 13 images Landsat (BÉNIÉ *et al.*, 1993). Le suivi inter-annuel des plans d'eau peut être réalisé en 1993 avec un maximum potentiel de 22 scènes Landsat (soit de 1972 à 1993). Pour des fins de démonstration, six scènes [209-51 (1972-1975-1978); 194-51 (1984-1986-1990)] ont été utilisées pour ce type de suivi (BÉNIÉ *et al.*, 1993).

Le suivi intra-annuel des plans d'eau peut être réalisé avec trois scènes Landsat par saison sèche. Chaque campagne de surveillance représente donc un total de 39 scènes pour couvrir tout le territoire burkinabè. Pour des fins de démonstration, neuf scènes ont été utilisées pour faire le suivi des 37 plans d'eau situés dans l'image Landsat 209-51 durant la saison sèche 1975-1976 (BÉNIÉ *et al.*, 1993).

3.2.3. Construction d'une base cartographique permanente

Les données images sont cartographiées sur un support géométriquement acceptable : 34 cartes topographiques à l'échelle du 1 : 200 000 ont été utilisées. Afin de conserver cette base géométrique, les plans d'eau ayant fait l'objet d'un suivi ont été cartographiés sur un agrandissement d'une carte topographique par procédé photographique à l'échelle du 1 : 50 000.

3.2.4. Photo-interprétation

La méthode utilisée est basée sur une démarche de photo-interprétation à l'aide d'un analyseur analogique d'imagerie. L'outil utilisé est un instrument de bureau, le PROCOM-2. C'est un instrument d'agrandissement par projection qui permet de photo-interpréter et de reproduire directement sur carte les informations issues des images satellitaires. La photo-interprétation comprend cinq étapes :

- élaboration d'une clé d'interprétation : en utilisant une démarche d'interprétation visuelle, l'interprète doit se construire une clé d'interprétation (PRÉVOST, 1984); l'eau peut en effet être confondue avec une butte cuirassée latéritique ou avec un brûlis récent;

la superficie d'un plan d'eau peut être également sous-estimée par la présence de végétation aquatique ou surestimée par la présence de sols humides qui ceinturent les plans d'eau durant la période de décrue; une clé d'interprétation peut être enrichie au fur et à mesure de l'expérience d'un photo-interprète; une clé d'interprétation non exhaustive est présentée au tableau 1;

- choix des lentilles : le PROCOM-2 offre un choix de lentilles à focale variable qui permettent de projeter un transparent à l'échelle originale du 1: 1 000 000 à des échelles variant entre le 1: 14 000 et le 1: 330 000;

- insérer et projeter une image analogique : les images analogiques sur support film sont insérées dans le porte-données et sont projetées sur une table à dessin;

- superposer l'image avec la base cartographique : l'information sur les ressources en eau est interprétée avec un minimum d'erreurs géométriques en utilisant la base cartographique élaborée au point 3.2.3.;

- interprétation thématique de l'image : la carte topographique permet également de réduire les risques de confusion avec des thèmes différents.

Tableau 1. Clé d'interprétation non exhaustive

Description	Interprétation
Général	La superficie détectable d'un plan d'eau est en relation avec la résolution spatiale du capteur utilisé (inventaire national et surveillance)
Général	La superficie d'un plan d'eau décroît durant une saison sèche
Général	La superficie maximale d'un plan d'eau varie; la variation est souvent liée au régime pluviométrique à la fin de l'hivernage
Général	La superficie d'un plan d'eau en fin d'hivernage peut apparemment continuer d'augmenter durant les mois suivants au fur et à mesure que la végétation aquatique s'assèche ou flétrit; la superficie d'un plan d'eau calculée en fin d'hivernage n'est donc pas nécessairement sa superficie maximale
Général	Un plan d'eau peut être plus ou moins visible en octobre et visible en décembre
Général	De nouveaux plans d'eau peuvent être repérés dans une série diachronique d'images
Forme triangulaire localisée dans l'axe du réseau hydrographique	Probablement un plan d'eau
Surface ayant une signature très foncée et une superficie invariable dans le temps	Probablement pas un plan d'eau
Surface ayant une signature très foncée uniquement durant les mois de janvier et les mois suivants	Probablement pas un plan d'eau

3.2.5. Cartographie et édition

La cartographie s'effectue en ajustant continuellement les données images à la base cartographique et en traçant l'information au fur et à mesure des ajustements.

Les opérations d'édition se résument à remettre l'information cartographiée à l'atelier de dessin et à construire les fichiers de suivi. Les données sont obtenues à l'aide d'un planimètre.

4. Résultats

4.1. Inventaire national

L'inventaire national des ressources en eau de surface au Burkina Faso a été réalisé au moyen des données TM et MSS selon une méthode analogique. Les données interprétées sont éditées à l'échelle du 1: 200 000 d'après le format de 34 cartes topographiques couvrant l'ensemble du territoire burkinabè. Sur la figure 1, on présente un extrait du feuillet Pissila de la carte des ressources en eaux de surface. Six plans d'eau y figurent dont ceux de Dakiri, Mani, Tougouri et Yalogo.

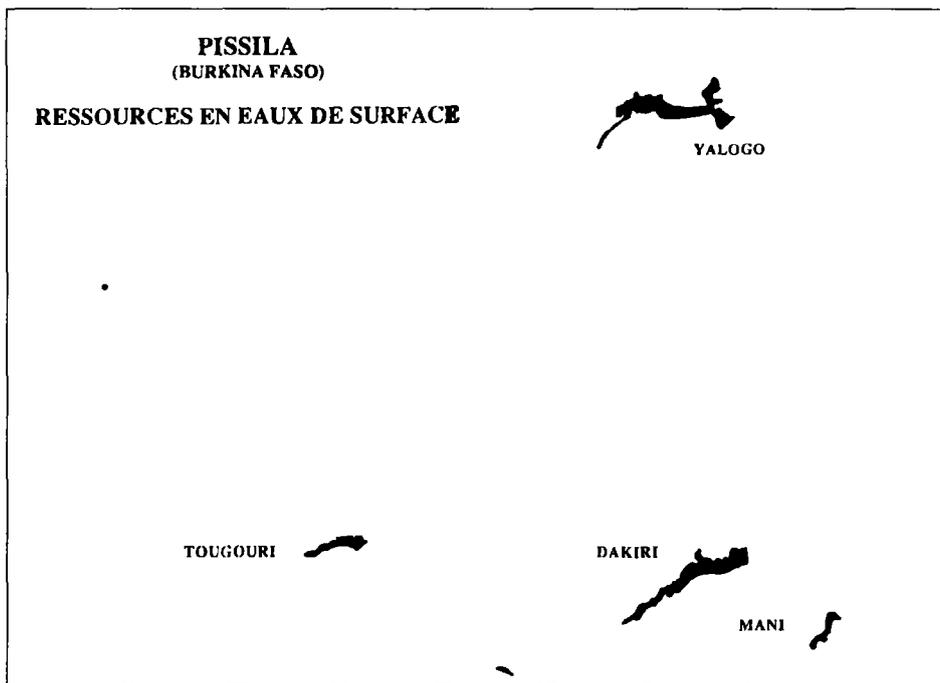


Figure 1. Extrait du feuillet Pissila de la carte des ressources en eau de surface au 1: 200 000

4.2. Surveillance des plans d'eau

4.2.1. Suivi inter-annuel

Le suivi inter-annuel permet de surveiller la configuration de chacun des plans d'eau sur plusieurs années. Cette surveillance permettra de calculer rapidement, en fonction de la hauteur d'eau à la fin de la saison des pluies, une approximation du volume d'eau disponible pour l'irrigation et donc, en fonction des cultures envisagées, la superficie irrigable en contre-saison. Cette surveillance permet également à l'équipe d'entretien de réagir plus rapidement en cas de bris. Les données sont éditées à l'échelle du 1: 50 000. Trois cartes de suivi inter-annuel ont été construites : Yalogo, Tougouri, ainsi que Dakiri/Mani. Sur la figure 2, on présente un extrait du feuillet Dakiri/Mani de la carte du suivi inter-annuel des ressources en eaux de surface. Avec le plan d'eau de Dakiri, on illustre trois niveaux de remplissage en 1972, 1978 et 1984.

Un fichier de suivi inter-annuel comprenant une section graphique et une section statistique a été construit. La section graphique rassemble une fiche annuelle pour chacun des plans d'eau. La section statistique est en fait une banque de données sur la superficie de chacun des plans d'eau calculée à la fin de chacun des hivernages (tab. 2).

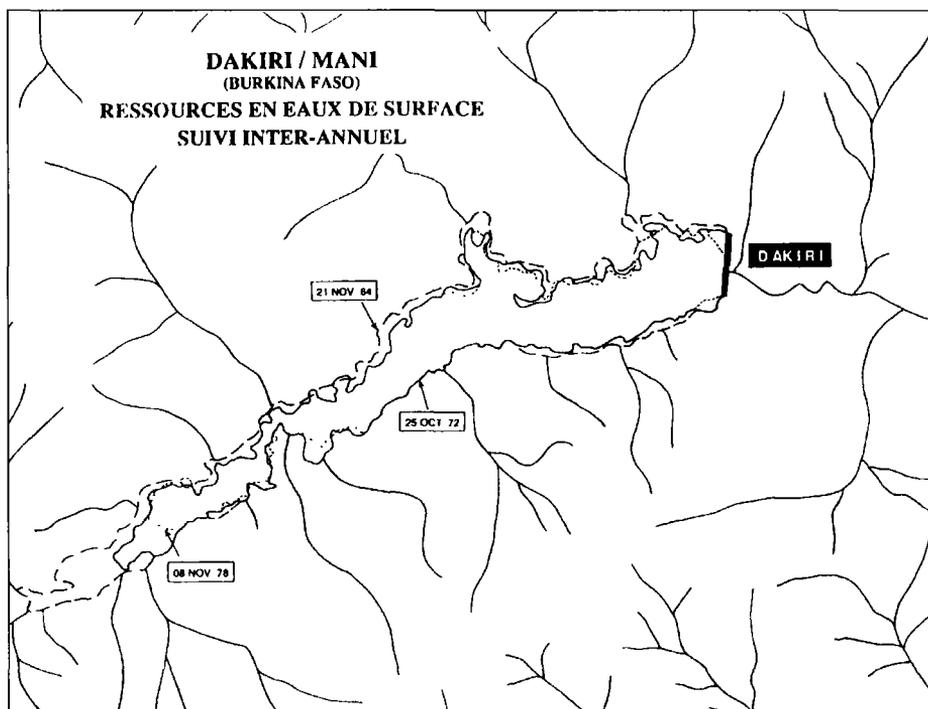


Figure 2. Extrait du feuillet Dakiri/Mani de la carte du suivi inter-annuel des ressources en eau de surface 1: 50 000

Tableau 2. Fichier de suivi inter-annuel de quelques retenues d'eau

		Superficie (km ²)					
Image		MSS Landsat	MSS Landsat	MSS Landsat	TM Landsat	TM Landsat	TM Landsat
Date		25-10	10-10	08-11	21-11	18-11	29-10
Année		1972	1975	1978	1984	1986	1990
N°	Nom						
2	Yalogo	10,1		10,6	11,0		10,8
3	Bourzango					1,4	
5	Tougiri	1,5	1,9	2,2			2,6
6	Dakiri	8,2	8,8	7,3	11,4		8,7
7	Bam	8,5	*28,4			10,1	
9	Mani	1,5	1,4	1,4	2,4		1,8
12	Dem	7,0	7,5	6,0		6,2	
28	Loumbilia	14,5	18,2	14,2		10,9	
29	Pabré	1,0	1,4	1,2		0,8	
32	Ouagadougou	3,0	**3,0	2,8		1,7	

* 12-12-1975

** 08-11-1975

4.2.2. Suivi intra-annuel

Le suivi intra-annuel permet de connaître la dynamique de chacun des plans d'eau à l'intérieur d'une saison sèche. Cette surveillance devient un outil de gestion des points d'eau pour établir un bilan hydrologique des réservoirs et certaines normes en aménagement du territoire comme le déplacement des transhumants et de leur cheptel, etc.

Les données interprétées sont éditées à l'échelle du 1: 50 000. Trois cartes de suivi intra-annuel ont été construites : Yalogo, Tougouri ainsi que Dakiri/Mani. Sur la figure 3, on présente un extrait du feuillet Dakiri/Mani de la carte du suivi intra-annuel des ressources en eaux de surface. L'évolution du plan d'eau de Dakiri durant la saison sèche 1975-1976 est illustrée.

Un fichier de suivi intra-annuel a également été construit. La section statistique est une banque de données sur l'évolution de la superficie des plans d'eau calculée de la fin de chacun des hivernages à la fin de la saison sèche (tab. 3).

5. Analyse des coûts

Pour ce genre de projet à petite échelle (1: 200 000), les frais relatifs aux travaux de terrain sont indépendants de la technique utilisée. L'analyse des coûts associés à l'exploitation des données satellitaires portera donc sur : l'acquisition des données, l'équipement pour le traitement des données, l'interprétation des données et la production cartographique.

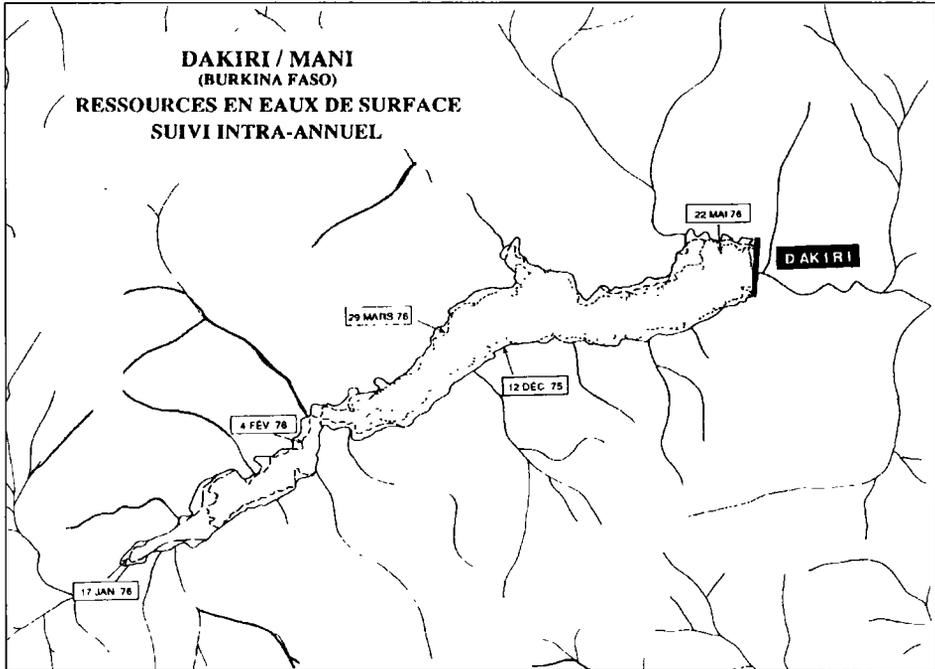


Figure 3. Extrait du feuillet Dakiri/Mani de la carte du suivi intra-annuel des ressources en eau de surface 1: 50 000

Les trois types d'inventaire (national, suivi inter-annuel, suivi intra-annuel) nécessitent l'acquisition annuelle de 39 images multibandes TM de Landsat en format film transparent dont le coût est évalué à environ 35,23 M FCFA.

L'achat d'un équipement de type PROCOM-2 représente 6,25 M FCFA. Les coûts récurrents annuels liés à l'opération d'un tel équipement (entretien et amortissement) sont évalués à 687 500 FCFA.

La construction d'une base cartographique qui couvre une image est évaluée à 12 500 FCFA (3 000 FCFA/carte).

En tenant compte de l'ensemble des coûts de production et des coûts récurrents d'opération, le coût total annuel (en 1993) pour couvrir l'ensemble du Burkina Faso avec la méthode analogique est évalué à environ 37,32 M FCFA, soit 136 FCFA/km² (BÉNIÉ *et al.*, 1993).

6. Discussion

En général, la délimitation d'un plan d'eau s'effectue sans difficulté majeure dans la mesure où le contraste avec l'environnement est suffisant. Cette délimitation est plus facile si le photo-interprète utilise des images multibandes. L'utilisation d'une seule bande spectrale entraîne une certaine imprécision. Un des problèmes importants consiste en la superposition approximative des plans d'eau vu que les images acquises n'ont pas subi de corrections géométriques.

Tableau 3. Fichier de suivi intra-annuel de quelques retenues d'eau

Date	Superficie (km ²)									Ratio* SFSS/SFSP (%)
	10-10	08 -11	12-12	17-01	04-02	22-02	29-03	16-04	22-05	
Année	1975	1975	1975	1976	1976	1976	1976	1976	1976	
Nom										
Yalogo		14,7		11,5		8,4	6,7	5,1	3,4	23,3%
Bourzango					5,1	3,7				
Tougouri	1,9	2,2	2,9	2,9	2,2	1,7	1,3	1,0	0,8	28,2%
Dakiri	8,8	8,5	7,7	7,2	6,4	4,9	4,6	3,9	3,6	41,3%
Bam			28,4		20,0	16,1	13,6	11,5		40,4%
Mani	1,4	1,7	1,7	2,0	2,0	1,4	1,0		0,5	27,4%
Dem	7,5	6,5	6,6	5,4	5,2	4,5	4,2	3,8	3,1	41,7%
Loumbila	18,2	15,6	14,3	12,7	11,7	11,6	10,2	9,5	8,7	55,4%
Pabré	1,4	1,3	1,3	1,1	1,0	0,9	0,6	0,6		39,1%
Ouaga.		3,0	3,0	3,0	2,7	1,9	1,6			? (53,1%)

* SFSS = superficie à la fin de la saison sèche
SFSP = superficie à la fin de la saison des pluies

** Les retenues ont perdu la moitié de leur superficie vers les mois de mars ou d'avril

Une analyse économique entre une approche analogique et une approche numérique montre que l'écart budgétaire provient essentiellement des coûts d'acquisition des images.

7. Conclusion

Les plans d'eau ont été recensés selon un inventaire national cartographié au 1: 200 000 avec des données de la fin de la saison des pluies (1986 à 1992). Les ressources en eau de surface ont été inventoriées et cartographiées sur 34 feuillets couvrant tout le territoire burkinabè. La cartographie a été effectuée sur un support film transparent superposable à une carte topographique. Ce dernier document ainsi que la banque de données de la Direction de l'inventaire des ressources hydrauliques peuvent donc être facilement mis à jour régulièrement au fur et à mesure que de nouvelles images sont acquises.

Les plans d'eau ont aussi été cartographiés selon deux types de suivi : 1) un suivi inter-annuel durant la saison sèche 1975-1976 cartographié au 1: 50 000; 2) un suivi intra-annuel cartographié au 1: 50 000 avec des données datant de la fin de la saison des pluies de 1972, 1978, 1984, 1986 et 1990. L'analyse des coûts associés à l'exploitation des données satellitaires analogiques dans le cadre de la cartographie opérationnelle des plans d'eau au Burkina Faso permet d'évaluer l'opération à environ 136 FCFA/km².

8. Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de coopération culturelle et technique (ACCT) pour son soutien financier.

9. Références

- BÉNIÉ, G. B. 1982. Étude de quelques applications de la télédétection spatiale à la gestion des eaux au Québec. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Sainte-Foy, 126 p.
- BÉNIÉ, G. B., YERGEAU, M. et GNOUMOU, Y. 1993. Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface en milieu sahélien : application au Burkina Faso. Guide méthodologique. Direction de l'inventaire des ressources hydrauliques, ministère de l'Eau (Ouagadougou), CARTEL, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 52 p.
- DIÉBATÉ, B. 1989. Étude d'opportunité technique et économique de l'utilisation de la télédétection : contribution à l'inventaire et au suivi des plans d'eau au Burkina Faso. Mémoire de fin de cycle d'études supérieures en télédétection appliquée, Centre régional de télédétection, Ouagadougou, 28 p.
- ONBAH (Office national des barrages et des aménagements hydro-agricoles) 1987. Inventaire et reconnaissance générale de l'état des barrages et retenues d'eau au Burkina Faso. Ministère de l'Eau, Ouagadougou.
- PARNOT, J. et DAMASCO, D. 1984. Suivi des variations de surface de quelques retenues d'eau en Haute-Volta à partir de l'imagerie Landsat. Centre régional de télédétection, Ouagadougou, 18 p.
- PIQUEMAL, D. 1991. Inventaire et bilan des retenues d'eau au Burkina Faso. Cahiers d'Outre-Mer, vol. 44, n° 175, p. 259-280.
- PIQUEMAL, D. 1988. Inventaire et bilan des retenues d'eau au Burkina Faso. Mémoire de maîtrise, Laboratoire de géographie, Université d'Avignon, 315 p.
- PRÉVOST, C. 1984. Application de la télédétection par satellite à l'inventaire des ressources en eau au Sahel. Mémoire de maîtrise, n° 184-84, Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Québec, 194 p.
- PRÉVOST, C. et ROCHON, G. 1984. Application de la télédétection par satellite à l'inventaire des ressources en eau au Sahel. Actes du séminaire régional africain sur les statistiques des ressources naturelles et de l'environnement (Abidjan), Institut national de la statistique et des études économiques, Paris, p. 259-274.
- PROJET BILAN D'EAU 1991. Inventaire des barrages et retenues d'eau au Burkina Faso. Étude du bilan d'eau au Burkina Faso. Note explicative sur les 6 feuilles au 1: 500 000 du réseau hydrographique. Direction de l'inventaire des ressources hydrauliques, ministère de l'Eau, Ouagadougou, 208 p.
- ROCHON, G. 1977. Un système automatisé d'analyse des caractéristiques des lacs par satellite. Quatrième symposium canadien de télédétection, Québec, p. 313-325.
- YERGEAU, M. (réd.), 1989. Compte rendu du séminaire régional sur «La télédétection au service de la gestion des ressources naturelles - planification des micro-réalisations». CARTEL, Université de Sherbrooke, Agence de coopération culturelle et technique, Niamey, 117 p.
- YERGEAU, M., BÉNIÉ, G. B., BONN, F. et PRÉVOST, C. 1991. Satellite et gestion de l'eau au Sahel. Sécheresse, vol. 2, n° 1, p. 48-60.

10

Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin : cas d'Odienné, Côte-d'Ivoire

ISSIAKA SAVANÉ ¹, GOZE BERTIN BÉNIÉ ², Q. HUGH J. GWYN ² et JEAN BIÉMI ³

¹ *Département de géologie appliquée et télédétection, Institut d'écologie tropicale, 08 B.P. 109, Abidjan 08, Côte-d'Ivoire; téléphone : +225 25-56-90*

² *Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1; téléphone : +1 (819) 821-7180; télécopieur : +1 (819) 821-7944*

³ *Département des sciences de la terre, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire; téléphone : +225 44-49-27; télécopieur : +225 44-04-12*

Résumé

Le nord de la Côte-d'Ivoire, comme toutes les régions sub-sahéliennes, est régulièrement soumis à l'épineux problème d'approvisionnement en eau potable pendant les saisons sèches. Les formations géologiques en place sont représentées essentiellement par des roches éruptives et métamorphiques. Dans de telles formations, l'eau provient des couches altérées ou des fractures. Les eaux souterraines ne peuvent pas être directement observées ou mesurées à partir de la surface. Par conséquent, il faut partir d'un certain nombre d'indices et de l'application d'une série de techniques indirectes, dont la télédétection et la géophysique, pour y parvenir. Cet article présente l'objectif, la méthodologie et les résultats préliminaires d'un projet de recherche de nappes d'eau souterraine par l'intégration de résultats de géophysique et d'interprétation de photographies aériennes et d'images de télédétection à l'intérieur d'un système d'information géographique. La finalité du projet

est d'offrir une méthodologie fiable, facile et peu coûteuse aux utilisateurs et aux techniciens pour réaliser l'approvisionnement en eau potable des populations rurales. La réalisation de l'étude s'appuie sur des données aérospatiales prises au-dessus de la région d'Odiénné (Côte-d'Ivoire).

1. Introduction

La croissance de la population et le développement agricole futur dans la région du nord de la Côte-d'Ivoire exigeront très certainement des quantités d'eau de plus en plus importantes en dehors des ressources en eau de surface. Les puits types de ces régions ne produisent au plus que 0,5 à 1,0 m³/h. Comme conséquence, la plupart des réserves d'eau utilisées par les municipalités et les industries proviennent des sources d'eau relativement petites.

Malheureusement, dans ces régions de socle, plusieurs puits se sont taris ou ont des débits extrêmement faibles. Des difficultés proviennent du fait que les propriétés de l'aquifère et le débit des socles cristallins dépendent du nombre, de la profondeur, de la dimension et du degré d'interconnexion des fractures (SUMMERS, 1972). Dans ces dernières années, de nombreux auteurs ont proposé que pour localiser des sites convenables de puits, il est d'abord nécessaire d'utiliser la photographie aérienne ou les images satellitaires pour distinguer les fractures superficielles des fractures profondes dans le substratum rocheux.

Ensuite, si les puits sont creusés sur les fractures profondes, ou mieux encore, sur l'intersection de deux ou plusieurs fractures, un grand débit d'eau souterraine est plus probable (LATTMAN and PARIZEK, 1964; SETZER, 1966; SIDDIQUI and PARIZEK, 1971; PARIZEK, 1976a; PARIZEK, 1976b). La cartographie des fractures est recommandée dans le socle parce que l'eau souterraine se trouve dans les structures secondaires où les vides sont développés par l'action tectonique et l'altération. Les parties massives de la roche ne peuvent pas contenir de l'eau en l'absence d'ouvertures secondaires parce que la porosité et la perméabilité primaire de la plupart des roches cristallines sont extrêmement faibles. L'objectif de cette étude est de voir si les données topographiques pour un site de puits peuvent apporter de la précision à la prédiction de débit obtenu par les seules variables de fracture.

Pour atteindre ces objectifs, nous allons présenter succinctement l'approche géomorphologique en hydrogéologie, ensuite l'apport de la cartographie des fractures et enfin nous réexaminerons les données *in situ* relatives aux puits obtenues par GÉOMINES (1992) lors des campagnes d'hydraulique villageoise, pour voir si les différences constatées dans le débit correspondant aux positions topographiques concordent quand elles sont analysées par les tests statistiques significatifs.

2. Méthodologie

Pour comprendre les conditions hydrogéologiques d'une zone, il est essentiel d'étudier l'existence des traits géomorphologiques parce que les différents paysages possèdent différentes caractéristiques hydrogéologiques. Le relief, les fractures, les linéaments et les réseaux de drainage ont été déterminés à partir d'images satellitaires et de photographies

aériennes à l'échelle du 1: 50 000; plus de 200 photographies ont été nécessaires pour couvrir la zone. Ces photographies en noir et blanc nous ont permis, d'une part, de procéder à l'inventaire des réseaux de plusieurs sites clés et, d'autre part, de réaliser leur analyse statistique afin de déterminer les directions principales des fractures.

La première étape de l'étude est la détermination des linéaments et fractures de la zone. La concentration des réseaux de fractures indique les zones de faiblesse de subsurface (DOERINGSFELD and IVEY, 1964). Les grandes directions des fractures sont déterminées par les rosaces. Dans le but d'étudier les effets de la lithologie du substratum rocheux sur la productivité du puits, les positions de 380 puits ont été marquées sur une carte géologique à l'échelle du 1: 200 000 de la région et le substratum rocheux près de chaque puits a été déterminé. Sur les 380 puits, seuls 27 ont été sélectionnés en raison de la fiabilité de leurs données pour examiner les relations possibles entre la productivité et les caractéristiques de fracture. Ces 27 puits, répartis à travers la région, pénètrent environ 9 types de roche; la majorité de ces puits sont localisés dans le granite. Après la vérification des emplacements des 27 puits sur le terrain, ils ont été reportés sur une carte topographique au 1: 200 000. Les caractéristiques de fracture de substratum près de chaque puits sont ensuite déterminées en cartographiant les traces de fracture dans une zone circulaire de diamètre de 3 km approximativement centrée sur chaque puits. Les traces de fracture sont supposées être les manifestations de surface des zones de fracture du substratum rocheux (LATTMAN and NICKELSON, 1958; PARIZEK, 1976a). Cinq propriétés de trace de fracture ont été mesurées dans les zones circulaires autour des 27 puits. Ce sont : le nombre de traces de fractures (Ntf), le nombre d'intersections de traces de fracture (Nintf), la distance à la trace de fracture la plus proche (Distf), la distance à l'intersection de traces de fracture la plus proche (Distin) et la longueur de la trace de fracture la plus proche (Lontf).

Le nombre de traces de fracture et le nombre d'intersections de traces de fracture sont des mesures de la perméabilité secondaire moyenne de l'aquifère de roche cristalline et donc de la grandeur de l'écoulement d'eau souterraine autour du puits (BROOK, 1988). Si ces variables augmentent, les productivités dans l'ensemble de la région pourraient augmenter. La distance entre un puits et l'intersection des traces de fracture la plus proche est une mesure de la proximité du puits à des zones localisées possibles d'aquifères de plus grande perméabilité. Les puits sur ou près de telles zones auraient des productivités plus élevées. Ces variables ont fait l'objet d'une analyse statistique pour voir leur impact sur la productivité des puits de la région.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse des directions de fracturation

Les directions de fractures et de linéaments sont divisées en classes de 5° et leurs fréquences ont été étudiées. Les principales classes et directions de linéaments et de fractures observés sont groupées dans des directions préférentielles autour du compas. Plusieurs histogrammes représentant les différents secteurs ont été réalisés; ces histogrammes constituent la résultante de toutes les données de linéaments et de fractures concernant un secteur. Plusieurs sites ont fait l'objet de cette étude (tab. 1).

Le schéma représentant la fréquence des fractures d'une grande proportion du secteur (fig. 1) montre une grande diversité de directions d'importance différente. En effet, deux grandes tendances de direction se dégagent à première vue : ce sont les orientations NE avec

Tableau 1. Résultats des analyses statistiques sur les fractures du département d'Odienné

Site	Densité de fracture	Longueur des fractures (km)	Orientation des fractures	Direction moyenne des fractures (azimuth)	Longueur de la résultante
1	moyen	1 à 4	NE-SO E-O SSE-NNO	087,6°	90,0
2	moyen	1 à 3	NNE-SSO E-O SE-NO	087,3°	95,4
3	moyen	1 à 3,5	NE-SO E-O SE-NO	087,0°	85,8
4	faible	1 à 4	NE-SO ESE-ONO	088,6°	72,3
5	moyen	1 à 5	NE-SO E-O SE-NO	088,6°	71,6
6	moyen	1,5 à 5	NE-SO SE-NO	086,3°	74,1
7	moyen	1 à 5	NNE-SSO NE-SO SE-NO	084,9°	81,0
8	moyen	1,5 à 4,5	NE-SO SE-NO	088,1°	53,0
9	moyen	1 à 5	NE-SO SE-NO	088,5°	72,6
10	moyen	1 à 5,5	NE-SO NNE-SSO	083,5°	80,1
11	moyen	2 à 4,5	NNE-SSO NE-SO SE-NO	089,4°	83,8
12	moyen	1,5 à 3	NE-SO SE-NO	086,3°	67,6

la direction N45°E et NO avec la direction N30°O. De nombreuses fractures apparaissent entre N20°E et N75°E montrant une certaine dispersion autour de l'axe N45°E qui serait considéré comme la direction moyenne. Ceci correspond à la direction régionale de compression. Les directions de fractures NE seraient des fractures de tension; d'autre part, les fractures de direction NO étant perpendiculaires à la direction de compression, viendraient des plans de cisaillement. Un grand nombre de fractures de direction NO, N20°E et N20°O est à noter. Elles appartiennent à d'autres systèmes de fractures de tension. La direction N-S et ses dispersions sont représentées par plusieurs fractures parallèles aux contraintes de compression. D'autre part, les fractures de direction E-O ou N75°E reposeraient dans les plans de cisaillement orthogonaux à la direction de déformation.

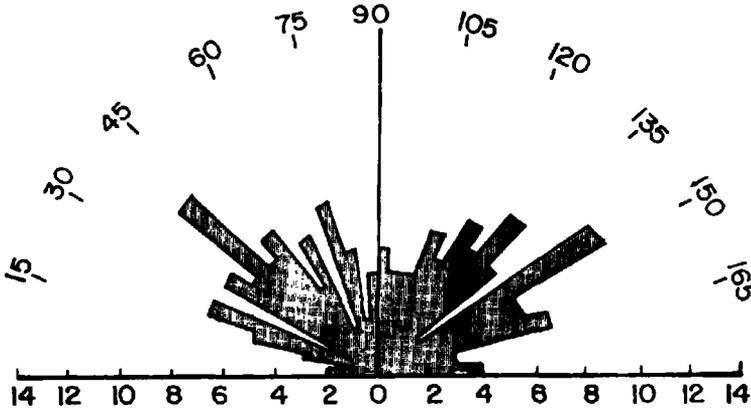


Figure 1. Fréquence des fractures d'une grande proportion du secteur d'étude

En conclusion, l'interprétation des images satellitaires et des photographies aériennes a permis de déterminer les grandes directions de fractures. L'analyse statistique et les informations géologiques disponibles montrent que la direction NE, ou plus précisément l'orientation N40°E, correspond à la direction du Birrimien, et est considérée comme celle de la déformation de tension. Quand ces fractures ne sont pas remplies de dykes, elles seraient plus ou moins ouvertes. D'autre part, les fractures d'orientation NO, orthogonales aux contraintes de compression, sont étanches.

Les fractures de direction N-S et ses dispersions sont assez nombreuses dans la région. La superposition de différentes phases tectoniques se traduit par l'existence d'une intense fracturation. Certains accidents s'observent sur des longueurs atteignant plusieurs centaines de kilomètres. Cette direction N-S appartiendrait à la contrainte de compression des séries précambriennes; les fractures ayant cette direction sont considérées comme des fractures de tension, donc propices pour les investigations des eaux souterraines. D'autre part, les directions E-O, étant perpendiculaires à la contrainte de compression, reposeraient dans les plans de cisaillement.

L'étude des linéaments et des fractures présente certaines limites dans leur interprétation. En effet, les fractures relevées sur les documents aériens sont avant tout des alignements morpho-structuraux, terme à la fois général et précis, car il traduit les accidents d'origine structurale qui ont une incidence sur la morphologie. L'analyse des photographies aériennes repose essentiellement sur l'observation géomorphologique.

3.2. Productivité des forages en fonction de la position géomorphologique et des fractures

3.2.1. Quantification de l'influence de la position morphologique

La position géomorphologique du village (en crête, sur un versant, dans un bas-fond), l'importance du bassin versant amont, la présence de cours d'eau, les possibilités d'existence d'une nappe de sous écoulement, etc., constituent des facteurs déterminants dans la quantification de l'influence de la position géomorphologique. En première

approximation, si on admet la superposition des bassins versants hydrologiques et hydrogéologiques, il est possible de limiter l'aire de drainage d'une fracture, les directions d'écoulement dans le réseau de fracturation et d'estimer l'aire d'alimentation d'un point d'eau.

Trois descripteurs géomorphologiques peuvent être retenus : la position du village dans un bas-fond, sur un interfluve et à mi-pente. Les résultats obtenus dans les différents cas sont consignés sur le tableau 2. Sur la figure 2, on montre l'influence de la position morphologique du village compte tenu de ces descripteurs géomorphologiques.

Ces résultats montrent que la position géomorphologique ne semble pas jouer sur le débit des ouvrages. On remarque que les débits compris entre 1,0 et 2,5 m³/h sont les plus élevés dans l'interfluve et dans la mi-pente. Dans le bas-fond, cette classe demeure élevée même si elle arrive après la classe 0-0,5. La dispersion observée dans le pourcentage peut être liée à la différence assez grande dans le nombre des ouvrages.

Tableau 2. Pourcentage d'ouvrages en fonction de la position géomorphologique

Classe de débits (m ³ /h)	Bas-fond (nb = 55)	Interfluve (nb = 20)	Mi-pente (nb = 84)
0-0	20	5	8
0-0,5	24	15	13
0,5-1	18	5	21
1,0-2,5	22	50	44
2,5-5,0	9	15	8
> 5,0	7	10	6

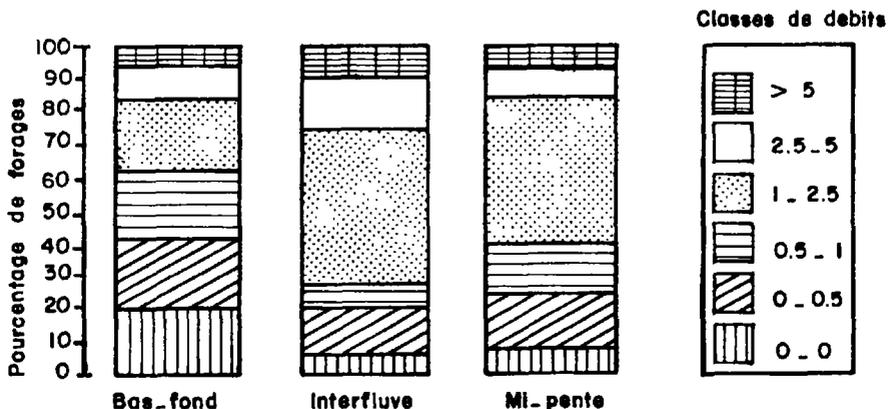


Figure 2. Distribution en pourcentage par classes des débits (m³/h) suivant la position géomorphologique des forages

3.2.2. Analyse de la variance des variables topographiques

Pour déterminer si les différences constatées dans le débit moyen du puits dans les différentes classes topographiques sont significatives statistiquement, une analyse de variance a été menée. Cette étude montre que les moyennes sont différentes de façon significative à 0,05 de niveau de confiance. L'analyse statistique des données de débit de puits a révélé que, bien que les débits moyens dans les différentes classes topographiques puissent être différents, ces différences ne sont pas toujours significatives statistiquement parce que de grandes variations sont indiquées à l'intérieur des classes par le coefficient de variation (tab. 3, 4, 5).

Tableau 3. Débits des puits en fonction de la position géomorphologique

	Bas-fond	Interfluve	Mi-pente
Nombre de puits	55	20	84
Intervalle de débit (m ³ /h)	0 - 20	0 - 15	0 - 12
Débit moyen (m ³ /h)	1,7	2,6	2,2
Écart-type	1,1	1,0	1,3
Coefficient de variation (%)	68,2	40,4	56,9
Profondeur moyenne (m)	28	37	43

Tableau 4. Débits des puits en fonction de la position géomorphologique dans le granite

	Bas-fond	Interfluve	Mi-pente
Nombre de puits	36	13	62
Débit moyen (m ³ /h)	1,5	2,7	1,9
Écart-type	0,9	1,9	1,3
Coefficient de variation (%)	64,9	69,3	69,0
Profondeur moyenne (m)	24	31	35

Tableau 5. Débits des puits en fonction de la position géomorphologique dans le gneiss

	Bas-fond	Interfluve	Mi-pente
Nombre de puits	13	0	16
Débit moyen (m ³ /h)	1,5	0	1,8
Écart-type	0,9		0,8
Coefficient de variation (%)	0,6	0	0,5
Profondeur moyenne (m)	26	0	37

3.3. Les facteurs de position affectant la profondeur du puits

Afin de déterminer si la position du puits (en termes de proximité par rapport aux fractures du substratum) influence la profondeur, les relations possibles entre la profondeur et les variables de fractures qui sont Distin, Dstl, Ntf, Nintf, Lontf, ont été examinées (tab. 6). L'étape d'analyse de régression linéaire multiple avec la profondeur comme variable indépendante a montré la relation suivante :

$$\text{profondeur} = 49,5739 - 0,0991 (\text{Distin})$$

Cette relation significative à 0,0001 de niveau de confiance, explique 12,18 % de la variabilité de la profondeur. Aucune autre variable n'est significative à 0,15 de niveau de confiance. Ce modèle indique que la profondeur dépend de l'emplacement du puits. Les puits plus profonds sont situés à une distance très grande d'une intersection de fractures. La conclusion évidente qu'on tire de cette relation est que, chaque fois qu'on creuse un puits à proximité d'une intersection de fractures, on peut s'attendre à avoir un puits peu profond produisant la quantité d'eau désirée.

D'autre part, un puits foré à une certaine distance de l'intersection de fracture ne produit pas rapidement un approvisionnement suffisant et, par conséquent, il a une profondeur de plus en plus grande en fonction du besoin de l'utilisateur. Ce résultat est important parce qu'il indique que plusieurs des relations rapportées entre les mesures de la production du puits par mètre et la profondeur sont trompeuses. Ces relations ne peuvent pas être considérées comme des estimations quantitatives précises de l'effet de la profondeur sur la production du puits, ceci parce que la variable profondeur du puits (fortement corrélée avec Distin) incorpore les influences à la fois de l'emplacement (exemple Distin) et la profondeur sur la productivité du puits. Il est clair, à partir de ce résultat, que tout modèle de prédiction de la productivité doit inclure les effets à la fois de la profondeur et de l'emplacement du puits.

3.4. La prédiction de la productivité en utilisant la profondeur du puits et les caractéristiques de traces de fractures

Une exploitation graduelle des analyses de régression linéaire a été entreprise avec la productivité (Prod) comme variable dépendante et Distin, Distf, Ntf, Nintf, Lontf et Prof comme variables indépendantes. Les productivités des puits ont été transformées en logarithme népérien pour avoir des relations plus étroites entre les variables dépendantes et indépendantes linéarisables.

Deux modèles ont été développés. Dans le premier modèle la variable profondeur a été introduite la première. Ceci donne la relation suivante :

$$\log (\text{Prod}) = 3,4918 - 0,0219 (\text{Prof}) - 0,0020 (\text{Distin})$$

Cette relation explique 15,88 % de la variabilité dans la productivité et Distin un supplément de 1,88 %. Dans le second modèle, l'importance a été accordée à la variable de l'emplacement Distin en l'introduisant en premier; ce modèle donne la relation suivante :

$$\log (\text{Prod}) = 3,4918 - 0,0020 (\text{Distin}) - 0,0219 (\text{Prof})$$

Ce mode explique la même variabilité dans la productivité que le premier modèle. Les relations négatives dans ces modèles entre la productivité et la profondeur d'une part et

Tableau 6. Données des 27 puits soumis aux différentes études de fractures

Site	Débit (m ³ /h)	Débit spéc. (m ³ /h/m)	Produc. (m ³ /h/m)	Ntf (nb/km ²)	Nintf (nb/km ²)	Distf (m)	Distin (m)	Lontf (km)	Prof. (m)
1	1,8	0,180	4,0	5,095	7,64	100	100	3,20	54,7
2	0,0	0,000	0,0	3,397	3,96	50	75	4,65	20,0
3	1,8	0,183	2,7	4,953	8,07	75	100	3,25	80,0
4	2,2	0,415	33,2	2,830	2,41	75	100	2,65	14,6
5	0,4	0,056	3,2	3,397	3,82	50	100	1,95	18,0
6	2,2	0,392	24,5	1,273	1,13	100	200	1,10	18,0
7	4,0	1,481	22,8	1,415	0,99	75	100	1,90	68,0
8	0,0	0,000	0,0	2,689	4,25	50	75	2,65	65,9
9	4,6	0,356	11,1	2,890	3,96	50	75	2,70	73,6
10	2,7	0,241	7,0	3,255	3,82	25	50	2,60	61,4
11	0,4	0,137	7,9	2,689	5,66	50	75	3,45	19,9
12	0,5	0,250	15,6	1,415	1,84	150	400	2,20	17,3
13	0,6	0,428	28,2	2,972	6,23	50	75	4,00	18,6
14	2,9	0,483	38,6	5,661	9,06	75	100	2,15	14,8
15	0,0	0,000	0,0	1,840	2,12	100	300	2,35	24,0
16	1,5	0,600	42,8	2,123	2,55	75	100	3,25	15,5
17	0,8	0,421	28,0	2,264	2,26	50	75	3,25	18,4
18	8,0	0,500	9,2	1,698	2,12	50	75	3,30	66,3
19	1,3	0,188	9,4	0,990	1,27	50	75	2,40	55,7
20	1,1	0,125	6,2	1,698	0,84	50	75	2,55	80,1
21	1,8	0,327	18,3	1,840	0,85	100	150	2,10	21,2
22	2,2	0,628	34,5	1,556	1,56	75	300	3,10	22,7
23	1,3	0,288	19,2	3,255	1,84	75	100	4,05	17,1
24	15,6	0,975	43,2	1,840	1,84	100	50	3,35	25,8
25	3,3	0,942	21,9	3,680	4,25	50	75	3,80	60,0
26	5,7	0,266	5,7	2,972	3,11	50	75	1,70	51,8
27	17,6	1,760	97,7	0,990	0,28	300	110	1,65	19,5

entre la productivité et Distin d'autre part, montrent que dans les roches cristallines, l'eau se tient dans les fractures et que le nombre des fractures ouvertes diminue avec la profondeur et avec la distance de la zone de fracture. Bien que les deux modèles assurent un fort degré d'explication de la variabilité dans la productivité du puits, aucun des deux n'assure une estimation précise de l'effet individuel de l'un ou l'autre (Prof ou Distin) sur la productivité du puits.

En conclusion, les résultats présentés ici montrent que la productivité du puits peut être aussi liée à la situation topographique dans le socle mais que, pour la détermination des sites de grands débits, la méthode de la cartographie des fractures présente beaucoup plus de possibilités. Nous continuons nos recherches dans ce sens afin de proposer les meilleurs sites d'implantation de puits pour les prochaines campagnes d'hydraulique villageoise.

4. 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.

5. Références

- BROOK, G. A. 1988. Hydrological factors influencing well productivity in the crystalline rock regions of Georgia Southeastern. *Geology*, vol. 29, p. 65-81.
- DOERINGSFELD, W. W. and IVEY, B. 1964. Use of photogeology and geomorphic criteria to locate surface structures. *Mountain Geologist*, vol. 11, p. 183-195.
- GÉOMINES 1992. Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. ACIDI, cahier n° 4, 24 p., 1 carte.
- LATTMAN, L. H. and NICKELSON, R. P. 1958. Photogeologic fracture trace mapping in the Appalachian plateau. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 42, n° 9, p. 2238-2245.
- LATTMAN, L. H. and PARIZEK, R. R. 1964. Relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rock. *Journal of Hydrology*, vol. 2, p. 73-91.
- PARIZEK, R. R. 1976a. On the nature and significance of fracture traces and lineaments in carbonate and other terranes. *Karst Hydrology and Water Resources*, vol. 1 : Karst hydrology (ed. V. Yevjevich), Water resources publications, Fort Collins, Colorado, p. 47-100.
- PARIZEK, R. R. 1976b. Lineaments and ground water. *Memurtry, G.T. and Petersen, G.W. (eds), Interdisciplinary application and interpretation of EREP data within the Surquehanna River bassin. SKYLAB EREP Investigation # 475, NASA contract n° 9, 134076, ORSER SSEL*, vol. 4, p. 59-86.
- SETZER, J. 1966. Hydrologic significance of tectonic fractures detectable on air photos. *Ground Water*, vol. 4, p. 23-29.
- SIDDIQUI, S. H. and PARIZEK, R. R. 1971. Hydrogeologic factors influencing well yields in folded and faulted carbonate rocks. *Water Resources Research*. vol. 7, p. 1295-1312.
- SUMMERS, W. K. 1972. Specific capacities of wells in crystalline rocks. *Ground Water*, vol. 10, n° 16, p. 37-47.

11

Systèmes d'information géographique, télédétection et gestion des ressources en eau : des outils pertinents pour une problématique de taille

MARIE-HÉLÈNE DE SÈDE, RÉGIS CALOZ, ROLAND PRÉLAZ-DROUX,
CHRISTOPHE CLARAMUNT et LAURENCE VIDALE

*École polytechnique fédérale de Lausanne, Département de génie rural,
CH-1015 Lausanne, Suisse;
téléphone : +41 (21) 693-3752; télécopieur : +41 (21) 693-3739*

Résumé

La complexité du fonctionnement de nos sociétés implique la mise en place d'approches globales tant sur le plan des tâches de gestion que de planification. La gestion des ressources hydriques n'échappe pas à cette nouvelle exigence, garante, espérons le, d'une exploitation rationnelle et pérenne. Il existe aujourd'hui de nombreux outils, tant méthodologiques que techniques, permettant d'appréhender la complexité du réel dans toutes ses dimensions. La systémique, notamment, offre concepts et méthodes pour une appréhension globale des milieux. La modélisation permet ensuite une formalisation de cette vision intégrée. De surcroît, l'approche «objet», proche du raisonnement humain, reproduit davantage encore cette perception que nous avons des choses. Sur un plan plus technique, la télédétection, les systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) et les systèmes de gestion de base de données (SGBD) ouvrent de nouvelles perspectives dans les domaines de la gestion et de la planification des ressources. Le projet GERMINAL, s'appuyant sur une représentation systémique du territoire et intégrant les fonctionnalités de logiciels de traitements d'informations spatiales matricielles (satellites notamment) et vectorielles, permet d'exploiter cette vision globale du milieu, offrant ainsi de nouvelles perspectives de gestion et de planification intégrée. Dans cette étude, on propose une structuration hiérarchique des données assurant la cohérence et la capacité d'échange

indispensable aux acteurs de la gestion du territoire. L'intégration des modes matriciel et vectoriel est mise en pratique, offrant des possibilités d'exploitation communes de données d'origines diverses et variées. Enfin, les recherches engagées mettent en évidence l'intérêt d'une qualification des données quant à leur précision et à leur fiabilité.

1. Introduction

Le monde dans lequel nous vivons, le milieu qui nous supporte nous paraissent chaque jour plus complexes et, par là même, plus fragiles. Les équilibres naturels, économiques ou sociaux semblent partout être ébranlés. Et malheureusement les paramètres conditionnant ces mêmes équilibres se multiplient à l'infini, emportés par un courant de mondialisation, fruit du progrès mais également, dans bien des cas, cause de fragilité et de misère.

Cette situation est tout à fait applicable au domaine de l'eau. C'est pourquoi la gestion et l'exploitation des ressources hydriques doivent se faire en prenant en compte l'ensemble des facteurs tant physiques que socio-économiques conditionnant leur pérennité.

Les problèmes engendrés par une exploitation souvent irraisonnée, menée à court terme, des ressources naturelles ont motivé l'apparition puis le développement de concepts et de méthodologies aptes à répondre à ces nouvelles données. Parallèlement, les progrès dans les domaines de l'acquisition et du traitement des données, la multiplication des données numériques ainsi que l'augmentation des capacités de stockage et de traitements de ces dernières, ouvrent aujourd'hui de nouveaux horizons aux planificateurs et aux aménagistes.

Ainsi, l'essor de la télédétection, la diffusion de plus en plus large des systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) ainsi que la multiplication des systèmes de gestion de bases de données (SGBD) offrent, par une combinaison appropriée de leurs potentiels d'analyse, de traitement et de gestion, des possibilités nouvelles quant à la mise en place de programmes de gestion environnementale globale et raisonnée des ressources.

Le projet GERMINAL (gestion de l'espace rural au moyen de systèmes d'information appliqués aux équilibres naturels et à leur altération) s'inscrit dans ce courant. Son objectif est une meilleure intégration des outils (SIRS, SGBD) et des données (cartographiques, satellitaires, statistiques, etc.) pour une meilleure compréhension des problèmes touchant à la gestion du territoire et de ses ressources, tous deux supports du développement socio-économique régional.

2. La nécessité d'une approche globale de la gestion des ressources hydriques

Les ressources hydriques, comme nous l'avons signalé, s'inscrivent dans le cadre plus général décrit précédemment et leur perception, elle aussi, a évolué. Il fut un temps où les problèmes de gestion et d'exploitation des ressources hydriques se traduisaient essentiellement par des termes tels que maîtrise des eaux, corrections, dérivations, retenues, etc. Ce vocabulaire, issu de l'ingénierie demeure d'actualité. Cependant, il doit aujourd'hui s'accompagner de nouveaux termes, tels que environnement, équilibres, conservation, préservation. Cette mutation nous semble à présent naturelle. Pourtant, il faut bien avouer que cette conscientisation de la nécessité d'une approche globale s'est faite au

prix d'erreurs considérables qui, souvent malheureusement, ont coûté et coûtent encore fort cher tant à la société qu'à l'environnement. Les médias nous font part de la désolation qui règne autour de ce qui fut la mer d'Aral en Russie. Ce cas est éloquent de par son ampleur. Mais il n'est point nécessaire d'aller si loin pour constater de semblables catastrophes.

Les enseignements que nous avons tirés de ces dérèglements provoqués par une mauvaise exploitation de nos ressources sont simples. Il faut penser globalement nos rapports avec le milieu. L'ampleur de nos exigences et des impacts de nos activités sur le milieu devient telle qu'il n'est plus permis de raisonner en vase clos. Or, penser globalement implique analyser et comprendre le monde qui nous entoure et les rapports que nous entretenons avec lui.

Cette nouvelle approche, ces relations que nous voulons à présent entretenir avec le milieu rendent les processus d'aménagement et de planification des ressources de plus en plus complexes. Fort heureusement, des concepts nouveaux et des outils adaptés nous permettent aujourd'hui d'appréhender cette réalité.

3. Repères conceptuels, méthodologiques et technologiques pour une prise en compte globale du milieu

3.1. Concepts pour une perception plus réaliste du milieu

3.1.1 La systémique

L'analyse par les systèmes offre un ensemble de concepts et de méthodologies adapté aux exigences d'une planification prenant en compte la dimension globale du milieu. C'est une approche logique et systématique où hypothèses, objectifs et critères sont clairement définis et fixés à l'avance (WALLISER, 1977). En imposant un cadre de réflexion et une méthodologie claire, en considérant d'emblée le milieu comme un tout composé d'éléments en interaction constante, elle permet de répondre aux exigences d'une vision globale.

Un système peut être défini comme un ensemble de composantes structurées, constituant un tout organique. La nature du système considéré peut être appréhendée par une bonne définition des objectifs, des composantes, de l'environnement et des flux qui caractérisent ce dernier. Cette approche permet donc une meilleure compréhension de la dynamique du milieu et de ses caractéristiques intrinsèques.

3.1.2. La modélisation

La systémique impose un cadre de réflexion et une méthodologie claire, permettant ainsi une meilleure compréhension du système décrit. La modélisation va nous permettre de formaliser les connaissances acquises lors de l'étape systémique. Par l'intermédiaire du modèle, reproduisant, de manière simplifiée les caractéristiques du système, il sera ainsi possible non seulement d'appréhender une réalité complexe mais surtout de travailler avec cette réalité et de la prendre en compte dans toute démarche de gestion et de planification de la ressource.

La modélisation est une étape fondamentale et indispensable à toute tentative de gestion globale des ressources. Elle constitue la base du développement de tout système d'information (SI) dont la vocation s'oriente vers l'exploitation, la gestion et la préservation de systèmes,

qu'il s'agisse de systèmes dits naturels ou humains (tels qu'une entreprise par exemple). D'après BURROUGH (1986), la qualité et l'efficacité des SI dépendent étroitement du soin apporté dès le départ aux analyses conceptuelles et à la modélisation effectuées à partir de la problématique posée.

3.1.3. La notion d'objet

Le raisonnement humain s'appuie sur la notion d'objet. Lorsque nous planifions ou aménageons, nos bases de références se traduisent en termes de cours d'eau, de lacs, d'objets ou plutôt d'entités du monde réel auxquels sont rattachés par la suite un ensemble de caractéristiques et d'attributs. Les modèles que nous concevons se composent d'objets en interaction. Cette notion d'objet est intrinsèque au raisonnement humain. Mais elle n'est pas adaptée aux différents outils utilisés généralement pour résoudre les problèmes que nous pose la gestion des ressources naturelles. Les données accumulées sur le territoire (concentration de polluants dans un lac, valeurs d'évapotranspiration d'une surface, etc.) se rapportent aux objets sans les identifier. Cette distorsion entre nos bases de réflexion et la nature même des données avec lesquelles nous travaillons tend cependant à s'atténuer par le développement de recherches importantes dans les domaines de la modélisation et de la gestion orientées objet ainsi que par l'apparition d'outils intégrant ces concepts.

3.2. Des outils adaptés aux exigences d'une approche plus réaliste

Les différents concepts présentés précédemment de façon fort succincte trouvent aujourd'hui une application à travers la conception d'outils adaptés, permettant leur mise en pratique. Ainsi, les développements effectués dans le domaine des SIRS et des SGBD ouvrent de nouvelles perspectives.

3.2.1. Pertinence des SIRS pour la gestion et la planification du milieu

La technologie des SIRS est née au début des années 60, motivée par les progrès enregistrés dans les domaines de la cartographie et de la photogrammétrie. Le Canada a été le premier état à se doter d'un SIRS, le CGIS (*Canadian Geographic Information System*) (TERENCE, 1987). Depuis, les applications basées à l'origine sur de simples superpositions de données spatiales se sont orientées vers des opérations nettement plus complexes de gestion et d'analyse menées avec un objectif de planification et d'aide à la décision.

Aujourd'hui, les SIRS apparaissent comme de réels outils, contribuant à la compréhension du monde réel pour une meilleure maîtrise de la planification de son développement. Ils doivent donc permettre d'intégrer des données diverses se rapportant au milieu, quelles que soient leur structure et leur nature. Comme le soulignent MILNE *et al.* (1993), «les systèmes d'information géographique s'appuient sur la plus large base d'information concevable. Ces systèmes traitent du monde réel et non de quelque modèle commercial abstrait tels que ceux utilisés pour conceptualiser les bases de données commerciales».

La conception de SI nécessite une approche globale, systémique où une grande importance doit être donnée à la standardisation des composantes (BÉDARD, 1987). Il est donc évident que le SIRS, défini comme «un ensemble de procédures pour stocker et manipuler des données référencées géographiquement» (ARONOFF, 1989) doit s'appuyer, dans un contexte spécifique (tel que la gestion des ressources hydriques), sur des préalables empruntés à la systémique et à la modélisation. Les étapes de la mise en place d'un SIRS peuvent être décrites tel que l'illustre le schéma de la figure 1 (CLARAMUNT, 1991). Les

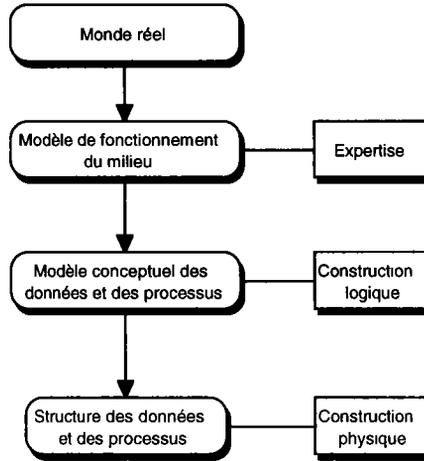


Figure 1. Étapes de modélisation : du monde réel à la structuration des données

données et les processus à modéliser doivent correspondre le plus étroitement possible à la réalité objective. À ce niveau, deux possibilités s'offrent au concepteur de SIRS.

La première est une modélisation orientée vers les applications dont le modèle conceptuel est défini à partir de l'application envisagée. C'est une méthode qui offre une réponse satisfaisante dans la mesure où l'objectif du système est bien défini. Elle est cependant limitée à l'application en question et ne permet pas une migration aisée vers d'autres objectifs.

La seconde est une modélisation orientée vers le concept d'objet, beaucoup plus complexe, faisant abstraction de l'application avale. Cette approche s'appuie donc sur l'analyse et la compréhension du milieu support de l'application, mettant en évidence la nature des données, des processus et des mécanismes qui régissent le fonctionnement du milieu étudié.

Une fois que le modèle conceptuel est défini, il est nécessaire de structurer les données et les processus identifiés. Cette étape permet l'implantation physique du modèle conceptuel dans le corps informatique du SIRS (CLARAMUNT, 1991). Ainsi, seront définis les fichiers qui contiennent les informations, les attributs rattachés à ces informations, les chemins d'accès permettant d'obtenir les informations, en bref, tout ce qui contribuera à faire du système un réel outil de gestion et d'analyse.

3.2.2. SIRS et télédétection

Quelle peut-être la place de la télédétection dans un tel contexte au sein d'un SIRS ? La télédétection apparaît comme une mine extraordinaire de données sur le milieu. L'information fournie par cette technologie présente de multiples avantages, offrant une vision synoptique du territoire. Pourtant son exploitation demeure complexe.

Les données de télédétection ont longtemps été considérées comme une entrée aux SIRS. Cependant, comme le soulignent DAVIS et SIMONETT (1991), télédétection et SIRS représentent deux mondes séparés, complémentaires mais très différents. Cet état de fait s'explique par des développements indépendants, répondant à des objectifs divers. Les données satellitaires, au départ du moins, ont été acquises avec des objectifs précis, orientés

vers des analyses scientifiques (études sur l'albédo, l'évapotranspiration, évaluation des taux d'humidité des sols, reconnaissance de lignes de fracture en géologie, etc.). Les exemples sont nombreux. Les SIRS quant à eux, se sont orientés, de par leur nature, vers des problématiques de gestion et de planification, intégrant des données disparates dans un souci de synthèse, pour une compréhension accrue du milieu dans sa globalité.

Aujourd'hui, télédétection et SIRS s'inscrivent dans une structure plus large, celle de l'analyse spatiale, le problème n'étant plus d'évaluer la précision d'une classification mais plutôt d'intégrer et d'analyser conjointement des données géographiques diverses variant dans leur structure («raster» ou «vecteur»), leur date d'acquisition, leur résolution et leur niveau de prétraitement et d'interprétation humaine.

Ainsi, les données satellitaires viennent alimenter les SIRS pour décrire les variables des modèles, pour enrichir d'autres sources d'information, pour palier à des lacunes cartographiques (BLASER, 1992), etc. Cette intégration ne se fait pas simplement et met en lumière de nombreux problèmes dont la nature n'est pas triviale. À titre d'exemple, citons les problèmes d'échelle entre les différentes sources, la propagation des erreurs, les problèmes de format, les méthodologies de mixage de données «raster» et «vecteur» sans compter la problématique liée à la compréhension même des résultats de cette intégration, générant des informations hybrides issues de la combinaison télédétection et SIRS.

4. Le projet GERMINAL

4.1. Descriptif du projet

Le Département de génie rural (DGR), soutenu par la Direction de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a démarré, en novembre 1990, un projet de recherche interdisciplinaire nommé GERMINAL. Son objectif est de développer les concepts et les méthodologies nécessaires à l'élaboration d'un système d'information environnementale à référence spatiale (SIERS) orienté vers l'aide à la décision en matière de gestion, d'aménagement et de planification du territoire. Dans le SIERS GERMINAL, on intègre ainsi des principes de gestion globale et dynamique du milieu rural et exploite les fonctions de gestion, de traitement et d'analyse spatiale offertes par les logiciels de SIRS. Pour y parvenir, les développements doivent :

- modéliser le fonctionnement du milieu rural afin de favoriser une pratique globale de l'aménagement;
- faciliter la mise à jour des banques de données utilisées par les utilisateurs et permettre la conservation de la trace historique des décisions et de leurs effets;
- intégrer de façon cohérente les données de nature disparate et issues de sources diverses;
- fournir aux utilisateurs les références nécessaires pour juger de la validité et de la pertinence des données intégrées dans le système en fonction de leurs besoins spécifiques.

Les développements méthodologiques ont été effectués dans un environnement logiciel qui prend en compte les spécificités de GERMINAL, ainsi que le contexte suisse. Cet environnement logiciel se caractérise par l'association de SIG de type «vecteur» et de type «raster», ce qui maximise la diversité des traitements en offrant les meilleures performances en matière de gestion et d'interrogation des données d'une part (fonctions privilégiées des SIG-vecteur), et en matière d'analyse spatiale d'autre part (fonctions privilégiées des SIG-raster). Il se compose actuellement de trois logiciels principaux : VISION comme SIG-vecteur, ORACLE comme SGBD et SPANS comme SIG-raster.

Le projet GERMINAL aborde donc l'ensemble des problématiques liées à la mise en place de SIRS soit la modélisation des données, l'intégration raster-vecteur et l'intégration logicielle. Sans prétendre offrir de solutions «miracles», il propose, en s'appuyant sur des concepts systémiques et une intégration d'outils appropriés, des ébauches de solutions pertinentes dans une optique de gestion intégrée des ressources.

4.2. La représentation systémique et la modélisation du territoire

4.2.1. Démarche et méthodologie

L'analyse conceptuelle et la modélisation constituent, comme nous l'avons vu, la base du développement de tout SI. La phase conceptuelle a donc pris une place très importante parmi les préoccupations de GERMINAL. La démarche retenue est présentée à la figure 2. Elle se compose de deux parties principales : la connaissance du milieu rural et les besoins en matière d'aménagement et de planification.

Comme le soulignent PRÉLAZ-DROUX *et al.* (1993), l'approfondissement de la connaissance du milieu rural est basé sur une analyse systémique, dont les objectifs sont d'aboutir à la détermination des entités composant le milieu, ainsi que des relations et des flux qui y sont associés. Cette approche systémique a débouché sur la confection d'une représentation systémique du territoire (RST). L'architecture de la base de données, élaborée selon une méthode orientée «objet», fait directement référence à cette approche systémique et aux concepts développés au sein de la RST.

La deuxième partie de l'analyse conceptuelle consiste en l'intégration du SIERS, vu comme outil d'aide à la décision, au sein du contexte d'aménagement et de planification. Pour ce faire, une étude méthodologique centrée sur les besoins des utilisateurs potentiels a permis une première ébauche d'indices de qualité pour décrire les réactions du milieu à des actions spécifiques de développement, et d'opérateurs environnementaux intervenant dans la formalisation des scénarios et des variantes d'aménagement.

Le SIERS GERMINAL est composé de quatre éléments principaux : 1) une base de données formée d'objets auxquels sont rattachés les attributs spatiaux ou non spatiaux; 2) une base d'information avec des «données dérivées», telles que les indices de qualité par exemple; 3) des outils de gestion; 4) des outils d'analyse qui permettent l'obtention de nouvelles informations (les données dérivées) à partir des données de base.

4.2.2 Les quatre dimensions de la représentation systémique du territoire (RST)

La RST donne une reproduction du milieu rural en ce sens qu'elle contient, d'une part, l'ensemble des entités retenues pour la description du territoire, auquel se rattache, d'autre part, les processus qui sont à la base du fonctionnement du milieu. L'ensemble forme une représentation simplifiée de la réalité du milieu rural et permet de simuler son fonctionnement, ses réactions à des actions spécifiques et son évolution au cours du temps.

Le modèle ainsi défini possède quatre dimensions qui sont propres au milieu lui-même. Tout d'abord, la dimension structurelle concerne l'ensemble des composantes constitutives du milieu. Elle définit en quelque sorte le «squelette» du système. La dimension fonctionnelle couvre les processus qui gouvernent le fonctionnement du milieu. La dimension spatiale fait référence aux différents niveaux de perception du territoire concerné, alors que la dimension temporelle prend en compte l'évolution du milieu et garde en mémoire ses réactions à des actions spécifiques d'aménagement ou de développement.

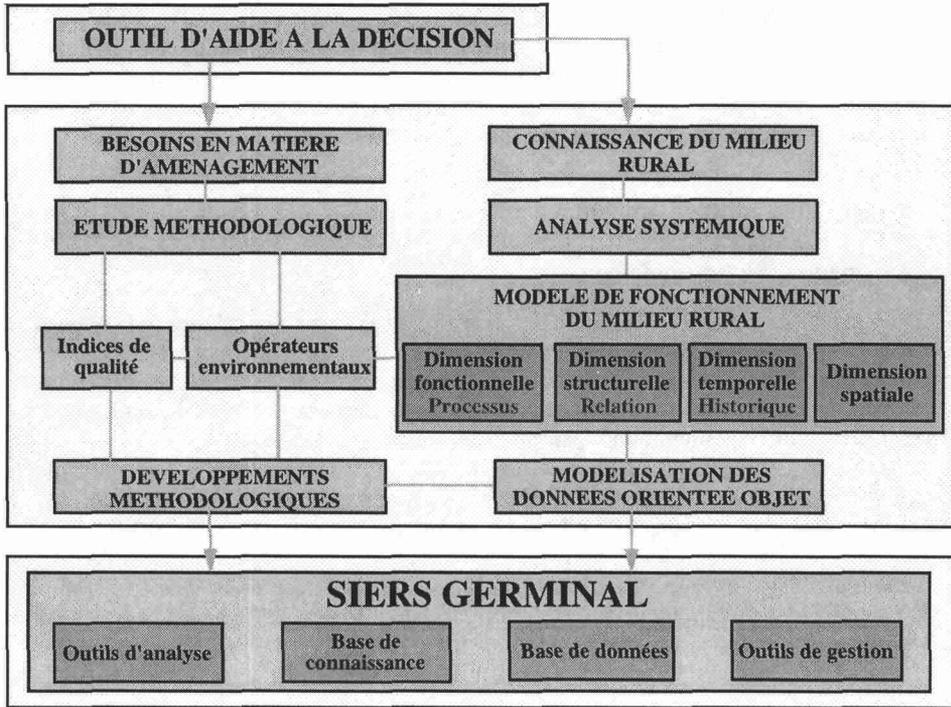


Figure 2. Approche méthodologique du projet GERMINAL

4.2.3. La RST et la notion d'objet

La RST, dans ses quatre dimensions, est basée sur la notion d'objet. Un objet peut être défini comme «une entité du monde réel qui ne peut pas être subdivisée en entités de même nature». L'objet est en fait une entité fonctionnelle du territoire, en ce sens qu'il correspond à une composante conceptuelle sur laquelle le thématicien base sa réflexion. L'enjeu de la modélisation effectuée est de fournir au thématicien, par le biais du SIERS, un outil qui lui permet non seulement de réfléchir à partir de la notion d'objet, mais également de travailler directement sur ces objets. Le niveau de désagrégation retenu pour la définition des objets fait référence aux contextes spécifiques de l'aménagement, de la planification et du développement régional. Voyons maintenant comment cette notion d'objet se concrétise dans les différentes dimensions d'une RST.

La dimension structurelle définit l'ensemble des entités constitutives du milieu, soit, de manière imagée, le «squelette» du territoire. La RST décrit ainsi le territoire selon six niveaux d'approche qui correspondent à des niveaux de perception et d'analyse utilisés par les thématiciens, soit les trois domaines génériques qui correspondent nommément aux composantes du milieu, aux infrastructures et aux activités économiques, ainsi qu'aux secteurs (exploitation des ressources, composantes du milieu naturel ou anthropique par exemple). Ces secteurs sont eux-mêmes divisés en «activités et éléments» (agriculture, sol, eau, etc.) Ces derniers éléments se composent de «modes» (production végétale, réseau hydrographique, etc.) auxquels sont rattachés les «classes d'objets» (cultures maraîchères, rivière, etc.). Finalement, toutes les entités du territoire sont décrites au travers d'objets spécifiques (parcelle, tronçon de route ou de canal, biotope, etc.).

La dimension temporelle est introduite par l'intégration de plusieurs versions d'un même objet. Chacune des versions d'un objet est décrite par ses attributs (section, débit et taux de pollution pour un tronçon de rivière ou surface et types d'associations végétales pour un biotope, etc.). Ainsi, une version d'un objet est définie comme «la plus petite entité pour laquelle les attributs clefs sont constants dans l'espace et le temps». Les attributs clefs sont ceux qui sont les plus pertinents pour une application spécifique. La figure 3 montre un exemple de la structuration hiérarchique intégrant la dimension temporelle.

4.2.4. L'organisation résiliable au sein d'une RST

Le territoire ne peut être réduit à une simple addition de composantes. Ces différents éléments sont en fait fortement interdépendants. Cela se traduit par des relations complexes qui sont le résultat de processus naturels ou physiques. Ce tissu complexe de relations s'organise et se structure en réseaux. La notion de réseau tente ainsi de décrire l'ensemble des relations entre les éléments appartenant à un même territoire.

L'articulation et la combinaison des différents réseaux constitutifs d'un milieu forment l'organisation résiliable de ce milieu. Ses caractéristiques, ses propriétés, son fonctionnement et donc, finalement, ses capacités de développement et d'adaptation (qui définissent son évolution dans le temps) peuvent ainsi être appréhendés au travers de cette organisation résiliable, soit de la nature et de l'intensité des relations intra- et inter-résiliaires. La dimension fonctionnelle d'une RST, basée sur cette notion d'organisation résiliable, peut être schématisée simplement sur la figure 3 par des liens horizontaux entre les objets ou les versions.

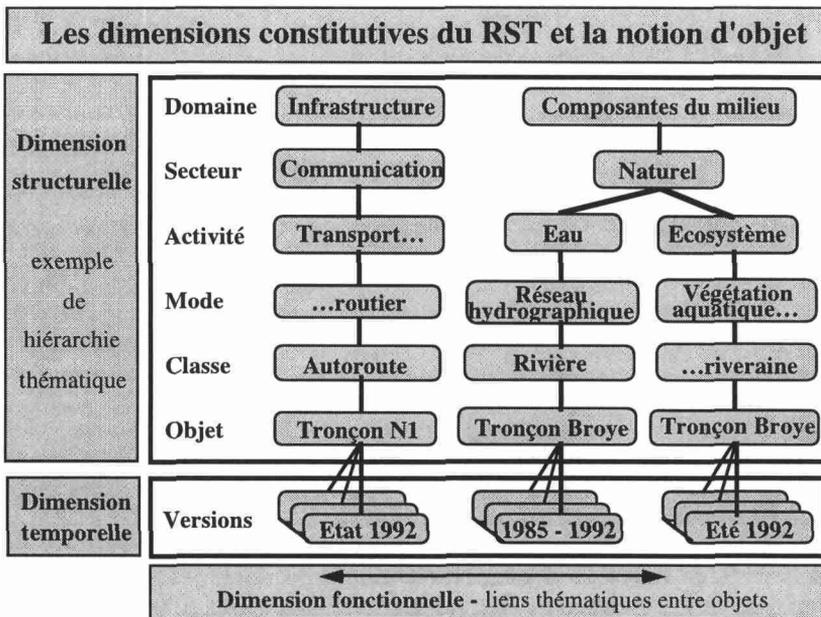


Figure 3. Les dimensions constitutives d'une RST et la notion d'objet

4.2.5. L'aspect fédérateur d'une RST : exemple hydrologique

Cette démarche de modélisation peut paraître centralisatrice. Comme nous allons le démontrer, elle est en fait, par essence même, fédératrice. Concrètement, cet aspect fédérateur est garanti au sein d'une RST par la détermination même des objets. En effet, les objets doivent être choisis et documentés de telle sorte que chacun retrouve les entités fonctionnelles et les données avec lesquelles il a l'habitude de réfléchir et de travailler. La figure 3 illustre bien ce concept. En effet, au sein des composantes du milieu, on retrouve deux objets qui décrivent une même réalité, mais de manière différente, le tronçon de rivière vu du point de vue hydraulique et du point de vue écologique. Ces deux types différents d'objets, qui se superposent ou se touchent, décrivent une même réalité, mais selon des visions différentes. S'il y a duplication des objets, il n'y a pas redondance des données. Le respect du concept de globalité est assuré par les liens qui unissent les objets : le biotope est directement relié au tronçon qui le supporte par un lien fonctionnel qui est également décrit dans la base de données.

La RST permet ainsi une représentation globale et cohérente du territoire qui soit basée sur les visions de chaque partenaire. Il devient alors possible d'effectuer les développements nécessaires pour faire évoluer le SIERS d'un système de stockage et de consultation vers un véritable système d'aide à l'étude des projets et à la prise de décision (PRÉLAZ-DROUX *et al.*, 1993).

4.3. L'intégration vecteur-raster

Comme nous l'avons souligné, le potentiel offert par les SIRS intégrant des données de type matriciel (raster) et de type vectoriel est énorme. Comme le souligne CLARAMUNT (1991), les avantages fournis par le couplage de leurs fonctionnalités respectives, orientées vers le traitement et la gestion des données pour les premiers et vers l'analyse spatiale pour les seconds, ne sont plus à démontrer.

Ainsi, selon les procédures suivies :

- le SIG vecteur alimente les analyses du SIG raster en fournissant les données de base nécessaires à ces analyses, l'analyste dispose donc d'un potentiel de données à traiter; c'est la nature de la simulation qui détermine les données utiles à analyser;

- les résultats d'analyses du SIG raster sont le cas échéant intégrés dans le SIG vecteur qui en assure la gestion; la base de données géographiques s'enrichit donc des nouvelles informations résultantes de ces traitements;

- le SIG raster permet enfin l'intégration d'images satellitaires analysées (interprétées, classifiées et géoréférencées) par les techniques de traitement d'image; de fait, il devient ainsi possible d'enrichir considérablement la base de données cartographiques disponibles par l'intégration d'images raster en fond de plan ou par une mise à jour établie à partir d'images satellitaires (BLASER, 1992); ces échanges de données se font par l'intermédiaire de transferts de fichiers d'un système à l'autre, ce qui implique, de fait, des problèmes de format; actuellement, le niveau de compréhension du format utilisé limite les échanges à leur dimension graphique (CLARAMUNT *et al.*, 1993); l'amélioration de ces techniques d'échange est une priorité dans le cadre du projet;

- le SIG vecteur VISION exporte des données vectorielles vers le SIG raster SPANS; pour permettre leur analyse, ces données sont ensuite rastérisées avec les contraintes de précisions requises; cette rastérisation autorise toutes les analyses numériques disponibles dans SPANS (ex. : calcul des pentes et des illuminations à partir d'un fichier altimétrique);

- les résultats d'analyse de SPANS peuvent être ensuite exportés vers VISION de deux

façons; sous une forme raster, l'image sera intégrée dans VISION en fond de plan cartographique documentaire; sous une forme vecteur, elle devient alors une couche d'information vectorielle contribuant ainsi à l'alimentation de la base de données ORACLE de VISION.

Le bilan de cette intégration est relativement clair. En permettant une analyse conjointe et un couplage de données vectorielles et matricielles, transmettant des informations de nature extrêmement différente, le système offre de nouvelles perspectives tant du côté de la gestion et du traitement des données que de leur analyse. Il répond particulièrement aux exigences nouvelles que posent les problématiques de gestion et de planification des ressources et de l'environnement.

4.4. La qualification des données ou le concept de méta-information

La combinaison appropriée des fonctionnalités des SIRS vectoriels, développées sur les bases de SGBD performants, contribue grandement, par le spectre d'informations prises en compte, à la conception de réels systèmes d'aide à la décision dans le domaine de l'environnement. Cependant, cette diversité des données, tant sur le plan de leur mode d'acquisition que de leur format ou de leur échelle, devient difficilement gérable. Comme le soulignent VIDALE *et al.* (1993), de plus en plus aujourd'hui, le besoin se fait sentir de développer, en parallèle, des outils de documentation de cette masse de données. En effet, la crédibilité et la fiabilité des résultats de toute analyse sont conditionnées par la nature et la qualité des informations de base. Il apparaît donc fondamental de pouvoir disposer de ce type d'information (la méta-information) sur les données.

Dans le cadre du projet GERMINAL, une application de méta-information implantée au sein du SGBD ORACLE (gestionnaire des données du système VISION) permet aux utilisateurs d'obtenir toute une gamme de renseignements quantitatifs et qualitatifs sur les données qu'ils exploitent. Ces informations sont associées aux données sous forme de tables indirectes (fig. 4). Leur accès se fait par l'intermédiaire d'un interface utilisateur offrant le menu présenté sur la figure 5.

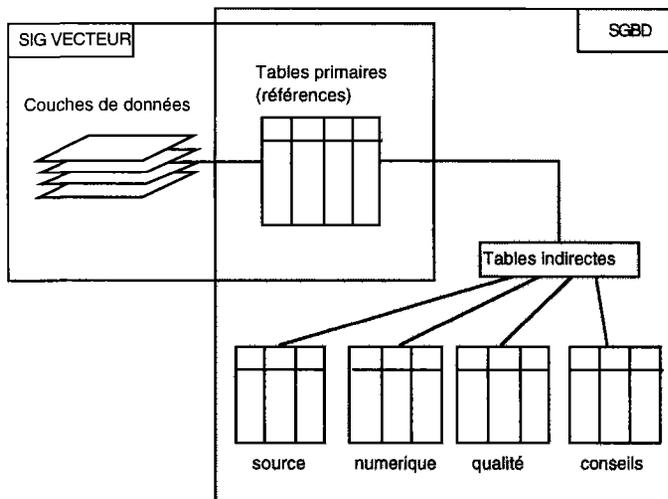


Figure 4. La structure de l'application au sein du SIRS GERMINAL

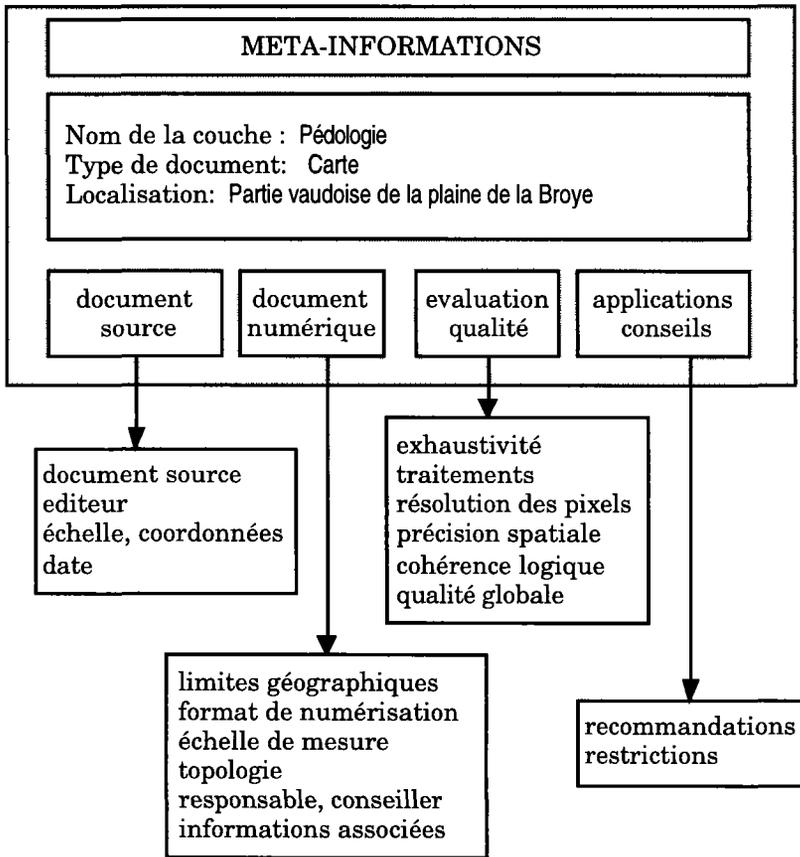


Figure 5. Organisation des menus de l'interface utilisateur de l'application

Le développement de cette application de méta-information est actuellement en mesure de qualifier les données et de guider l'utilisateur dans les choix de traitements qu'il envisage d'effectuer. L'étape suivante, comme le soulignent VIDALE *et al.* (1993) sera d'évaluer la qualité des informations dérivées de la combinaison des données (propagation des erreurs notamment), étape nécessaire pour une compréhension accrue de la nature même de ces données hybrides générées par l'utilisation de SIRS.

5. Conclusion

La conception et le développement d'un SIRS apte à répondre aux défis que posent aujourd'hui la gestion et la planification des ressources impliquent, au départ, d'importants travaux conceptuels et méthodologiques dans les domaines de la modélisation des données et de l'analyse des besoins. Ces recherches doivent être menées en faisant abstraction de tout choix technologique aval.

Dans le domaine de la gestion et de l'exploitation des ressources hydriques, les contraintes ne sont pas différentes. Les ressources en eau, au même titre que d'autres éléments du milieu font partie de ce que nous appelons «territoire». C'est donc sur les bases de la même représentation systémique du territoire (RST) que les données se rapportant à l'hydrologie sont intégrées au sein de la base de données du SIRS.

Les informations issues de la télédétection font partie intégrante de cet ensemble d'informations spatiales et non spatiales (statistiques notamment) qui vient alimenter les SIRS. Leur intégration implique cependant la résolution d'un certain nombre de problèmes générés par la structure raster des images, les capacités de stockage qu'elle implique, leur résolution et leur niveau d'interprétation.

Aujourd'hui, les applications alliant télédétection et SIRS bien qu'encore fortement axées sur de simples intégrations d'images en fond de plan venant enrichir visuellement les données, s'orientent de plus en plus vers la création de données hybrides mixage savant de données de cartographie de synthèse et d'images satellitaires. Ces données, dont l'interprétation est loin d'être aisée, valorisent les efforts faits tant du côté de la télédétection que des SIRS, marquant un pas de plus vers la prise en compte globale des composantes du milieu et des informations qui s'y rattachent. C'est à ce prix que nous pourrions prétendre à une véritable gestion intégrée des ressources.

6. Références

- ARONOFF, S. 1989. *Geographic Information Systems : A Management Perspective*. WDL Publications, Ottawa, 294 p.
- BÉDARD Y. 1987. Les différents types de systèmes d'information à référence spatiale. Actes du congrès conjoint Carto-Québec/Association canadienne de la cartographie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 6-8 mai 1987, p. 73-88.
- BLASER, T. 1992. Apports de la télédétection à la conception et à la mise à jour des plans d'aménagement. Thèse de doctorat, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, 204 p.
- BURROUGH, P. A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford Sciences Publications, Monograph on Soils Survey, n° 12, 194 p.
- CLARAMUNT, C., DE SÈDE, M.-H., PRÉLAZ-DROUX, R. and VIDALE, L. 1993. Integration of heterogeneous GIS for environmental management planning and management. Proceedings, Far East Workshop on Geographic Information Systems FEGIS, World scientific publications, Singapour, p. 404-415
- CLARAMUNT, C. 1991. Du monde réel aux systèmes d'information géographique. GERMINEWS, n° 2, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, p. 5-7.
- DAVIS F, W. and SIMONETT, D. S. 1991. GIS and Remote Sensing. *Geographical Information Systems*, vol. 1 : Principles, Ed. by David J. Maguire, Michael F. Goodchild and David W. Rhind, p. 191-213.
- MILNE, P., MILTON, S. and SMITH, J. L. 1993. Geographical Objected Oriented Database; a Case Study. *International Journal of GIS*, vol. 7, n° 1, p. 39-55.
- PRÉLAZ-DROUX, R., DE SÈDE, M. H., CLARAMUNT, C. VIDALE, L. et CALOZ, R. 1993. Un SIT pour la gestion intégrée du territoire et pour l'aide à la décision : la conception de l'EPFL et de l'Etat de Vaud. Journées d'études des 9 et 10 septembre 1993; Mise en oeuvre et exploitation des systèmes d'information à référence spatiale. École polytechnique fédérale de

Zurich, Institut de géodésie et de photogrammétrie, Rapport IGP, n° 229 f, p. 18.21.1-18.21.10.

TERENCE, R. S. 1987. Requirements and principles for implementation and construction of a large scale geographical information system. *International Journal of GIS*, vol. 1, n° 1, p. 13-31.

VIDALE, L., CLARAMUNT, C. DE SÈDE, M. H. et PRÉLAZ-DROUX, R. 1993. Environmental analysis and GIS : the importance of meta-information. *Actes AM/FM Geographic Information Systems. European Conference IX*, 13-15 October 1993, Strasbourg, p. 283-286.

WALLISER, B. 1977. *Systèmes et modèles : introduction critique à l'analyse des systèmes*. Éditions du Seuil, Paris, 248 p.

12

Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration de matières en suspension : exemple du fleuve Sénégal

LUC SÉGUI

*Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), B.P. 1386, Dakar, Sénégal;
téléphone : +221 32-34-76; télécopieur : +221 32-43-07; télex : 51468 SG*

Résumé

Comme le Niger, autre grand fleuve d'Afrique de l'Ouest, le fleuve Sénégal présente un lit majeur de grande extension dans sa partie médiane. À la crue, des défluent alimentent des successions de cuvettes qui sont ensuite cultivées lors du retrait des eaux. Dans le cadre global d'étude de ces dépressions, l'objectif de ce travail était la caractérisation spectrale des eaux de crues. Notre démarche s'est appuyée sur des données radiométriques de terrain pour définir un modèle dont les paramètres ont été ensuite étalonnés en laboratoire. Sur des transects, dans deux mares de turbidité contrastée, nous avons mesuré la profondeur et les réflectances dans les bandes spectrales de HRV de SPOT. Pour chaque profil, la concentration de matières en suspension était déterminée. Les couples de points profondeur-réflectance s'organisent en courbe exponentielle dont la paramétrisation (ordonnée à l'origine, coefficient de forme et asymptote) se déduit de la réflectance du fond et de l'importance des matières en suspension. Pour couvrir une plus grande gamme de turbidité qu'en milieu naturel, nous avons établi un dispositif expérimental en laboratoire. Les résultats des mesures sont en accord avec le modèle retenu. En conclusion, pour les turbidités rencontrées, la radiométrie est trop vite limitée par la teinte des matières en suspension pour être utilisée comme outil bathymétrique. Par contre, moyennant un étalonnage, l'utilisation du radiomètre comme turbidimètre est possible.

1. Introduction

Comme le Niger, le fleuve Sénégal présente, dans son cours médian, un lit majeur de grande extension. La faiblesse immémoriale des précipitations (moins de 250 mm annuellement) dans cette zone entre la Mauritanie et le Sénégal a toujours limité les cultures pluviales et favorisé les cultures traditionnelles de décrue. Les cultures potagères occupaient les berges du lit mineur tandis que la culture du sorgho s'effectuait dans les cuvettes de décantation du lit majeur. La mise en valeur de la vallée a débuté par la construction de périmètres rizicoles fonctionnant par submersion contrôlée à la crue. Devant l'accentuation de la sécheresse depuis une vingtaine d'années, le fleuve a été régularisé par la construction d'un barrage réservoir au Mali, à l'amont, et d'un barrage anti-sel, à l'embouchure. L'eau prélevée par pompage alimente de grands périmètres irrigués (jusqu'à 1 000 ha) situés dans l'ancienne plaine d'inondation où de nombreuses dépressions restent encore cultivées en sorgho de décrue. Dans le cadre d'un développement durable de l'agriculture irriguée dans cette région, notre programme d'étude vise notamment à évaluer les contraintes physiques d'aménagement du milieu. Ceci passe par la connaissance des dépressions inondées annuellement malgré la régularisation du fleuve. Il est nécessaire de localiser et de délimiter les mares, et de connaître leur bathymétrie pour toute modélisation de leur fonctionnement hydrologique. Les premiers travaux ont justifié l'usage de la télédétection spatiale comme outil pratique et précis de cartographie des mares, même de faible extension (SÉGUIIS et DUBÉE, 1992). La classification d'une première image suggérait la possibilité de relier la luminance à la bathymétrie (SÉGUIIS *et al.*, 1991). Pour confirmer cette hypothèse, une étude radiométrique de terrain a été entreprise pendant les crues de 1991 et 1992. Elle s'est poursuivie en laboratoire afin de valider et préciser la modélisation ébauchée sur le terrain. Cet article présente les principaux résultats de ces travaux.

2. Travaux de terrain

2.1. Site d'étude et protocole de terrain

La zone étudiée forme une cuvette située sur la rive gauche du lit majeur du Doué (bras du Sénégal), dans la partie la plus septentrionale du cours du fleuve, à proximité de la ville de Podor (fig. 1). Endiguée dans les années 70, la cuvette d'une superficie d'environ 200 km² a été partiellement aménagée en casiers rizicoles (1 000 ha) alimentés par pompage dans le Doué. Deux pertuis permettent l'accès de l'eau du fleuve aux dépressions naturelles cultivées à la décrue. Certains de ces points bas servent aussi de réceptacles aux eaux de drainage du périmètre. Ces eaux, de par leur séjour dans les rizières, ont une charge solide plus faible que les eaux de crues. À leur niveau maximal de remplissage, les mares ont moins de 1,5 m de profondeur. L'étude a porté sur deux mares, l'une alimentée principalement par les collatures du périmètre (la mare de Pont Gari), l'autre par un effluent du Sénégal, le N' Galenka (la mare de Figo).

Des transects ont été effectués de la terre ferme au centre des mares. Le radiomètre utilisé était un réflectancemètre de marque CIMEL CE 310 (GUYOT *et al.*, 1984). L'appareil est constitué de deux têtes, une tête d'éclairage destinée à viser le ciel et une tête de luminance destinée à viser le sol. Les têtes sont fixées sur une potence à environ 2,80 m du sol. L'angle d'ouverture étant de 12°, la surface visée est d'un quart de mètre

carré. Les canaux de mesures sont ceux de SPOT (0,50-0,59 μm [R1], 0,61-0,68 μm [R2], 0,79-0,89 μm [R3]).

Les mesures sur les plans d'eau sont faites lorsque le soleil est autour du zénith et les journées sans vent, afin d'éviter en partie la réflexion spéculaire. À chaque point de mesure, nous visions en avant de notre avancée dans la mare afin d'empêcher la remise en suspension de la vase à notre passage. La concentration de matières en suspension a été déterminée, pour chaque profil, par un prélèvement d'eau.

Nous avons également effectué des mesures sur la frange de sol humide bordant les mares. Nous présentons en premier lieu ces résultats.

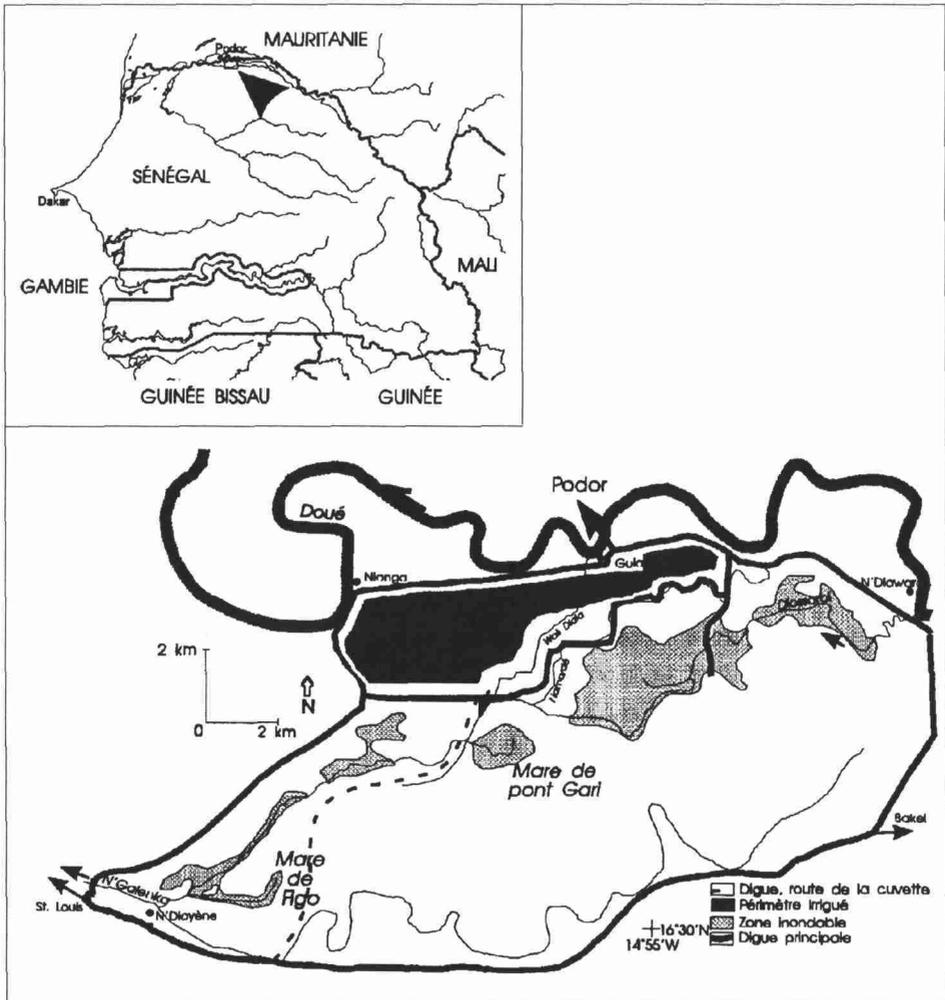


Figure 1. La cuvette de Nianga

2.2. Caractérisation de la transition sol sec – eau franche

Les sols des dépressions sont des vertisols modaux, sols très argileux à caractères vertiques accentués. Lors de leur dessiccation, des fentes de retrait de plus en plus larges et profondes se développent. On note un passage progressif entre les sols saturés en eau, à rugosité nulle et à brillance faible de bordure de mare, aux sols secs fortement rugueux et plus clairs. Sur la figure 2, on regroupe des réflectances mesurées dans cette zone de transition. De manière classique, l'absorption augmente avec la teneur en eau. Mais, les réflectances ne permettent pas de bien distinguer les sols humides saturés en eau, des sols déjà recouverts par une mince tranche d'eau. La distinction est possible sur le graphique des rapports de réflectance (fig. 3). $R3/R2$ n'est supérieur à $R2/R1$ que dans la frange de sol humide. Ce résultat établi à la mare de Pont Gari a été retrouvé à la mare de Figo.

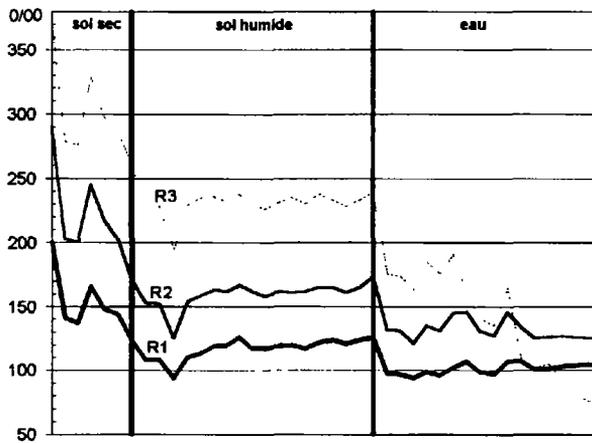


Figure 2. Réflectances des bordures de mare

2.3. Réflectance et bathymétrie

Dans de nombreuses études de télédétection (LEMOALLE, 1978; PUECH, 1992), la courbe bathymétrique est tracée indirectement à partir de couples de coordonnées : surface en eau, planimétrée sur l'image satellitaire, et altitude du plan d'eau. Du fait des difficultés de programmation d'images et de son coût, la courbe est souvent définie sur un très petit nombre de points.

Plus finement, l'étude des variations spatiales de réflectance du plan d'eau doit renseigner sur la profondeur d'eau. En effet, le signal radiométrique résulte d'une intégration depuis la surface jusqu'à une certaine profondeur d'eau déterminée par la seule limite de pénétration de la lumière. Dans les zones peu profondes et peu turbides, la profondeur de pénétration excède la profondeur du fond. Le signal radiométrique détient donc des informations sur la colonne d'eau traversée (épaisseur et composition) et sur la nature du fond.

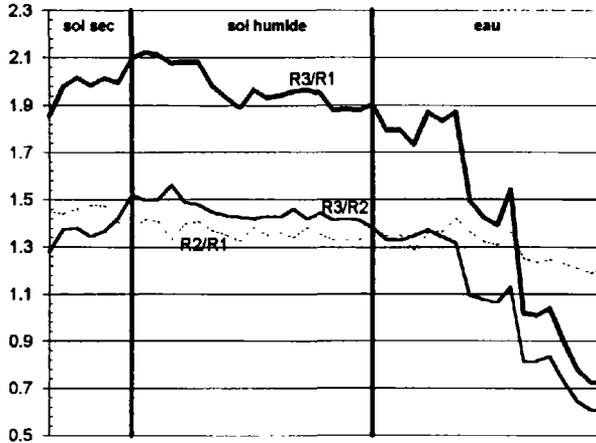


Figure 3. Rapports de réflectances des bordures de mare

Les interactions entre réflectance R et profondeur z , pour un canal λ , sont décrites par l'équation suivante :

$$R_{\lambda} = R_{r\lambda} + K_{\lambda} \exp(-g C_{\lambda} z) \quad (1)$$

(SPITZER and DIRKS, 1986; LE GOUIC, 1987)

avec

$R_{r\lambda}$ réflectance de l'eau profonde;

K_{λ} réflectance du sol humide saturé R_0 moins la réflectance du fond;

g facteur géométrique déterminant la longueur du trajet dans l'eau;

C_{λ} coefficient d'atténuation de l'eau pour le canal λ [m^{-1}].

Le soleil étant au zénith et le radiomètre à la verticale, la longueur du trajet dans l'eau de la lumière est de $2z$ ($g = 2$).

Cette équation a été vérifiée et utilisée de manière opérationnelle en milieu marin à partir des comptes numériques HRV de SPOT (LOUBERSAC *et al.*, 1991) ou MSS de Landsat (IBRAHIM and CRACKNELL, 1990). En radiométrie de terrain, dans l'estuaire de la Casamance, PAGÈS *et al.* (1988) ont obtenu de meilleurs ajustements en reliant R et $\text{Log}(z)$.

La figure 4 présente les couples de points (R, z) obtenus sur deux transects aux mares de Pont Gari et de Figo pour les trois canaux HRV de SPOT. À la mare de Pont Gari, on vérifie que l'atténuation de la réflectance va de pair avec la profondeur et que la limite de pénétration de la lumière diminue lorsque la longueur d'onde augmente. À la mare de Figo, l'eau davantage chargée a une réflectance ($R_{r\lambda}$) plus importante que le sol humide ($z = 0$). Il y a donc aussi atténuation de la lumière réfléchi par le fond lorsque la profondeur augmente.

Bien que la dispersion soit parfois importante, les points mesurés s'ajustent bien sur la formule théorique. Les paramètres calculés par optimisation (méthode de Rosenbrock) (SERVAT and DEZETTER, 1988) sont regroupés sur le tableau 1. Si les paramètres ont un sens physique :

-lorsque la lame d'eau est nulle, la somme ($R_{r\lambda} + K_{\lambda}$) doit être égale à la réflectance du sol nu humide au voisinage de l'eau;

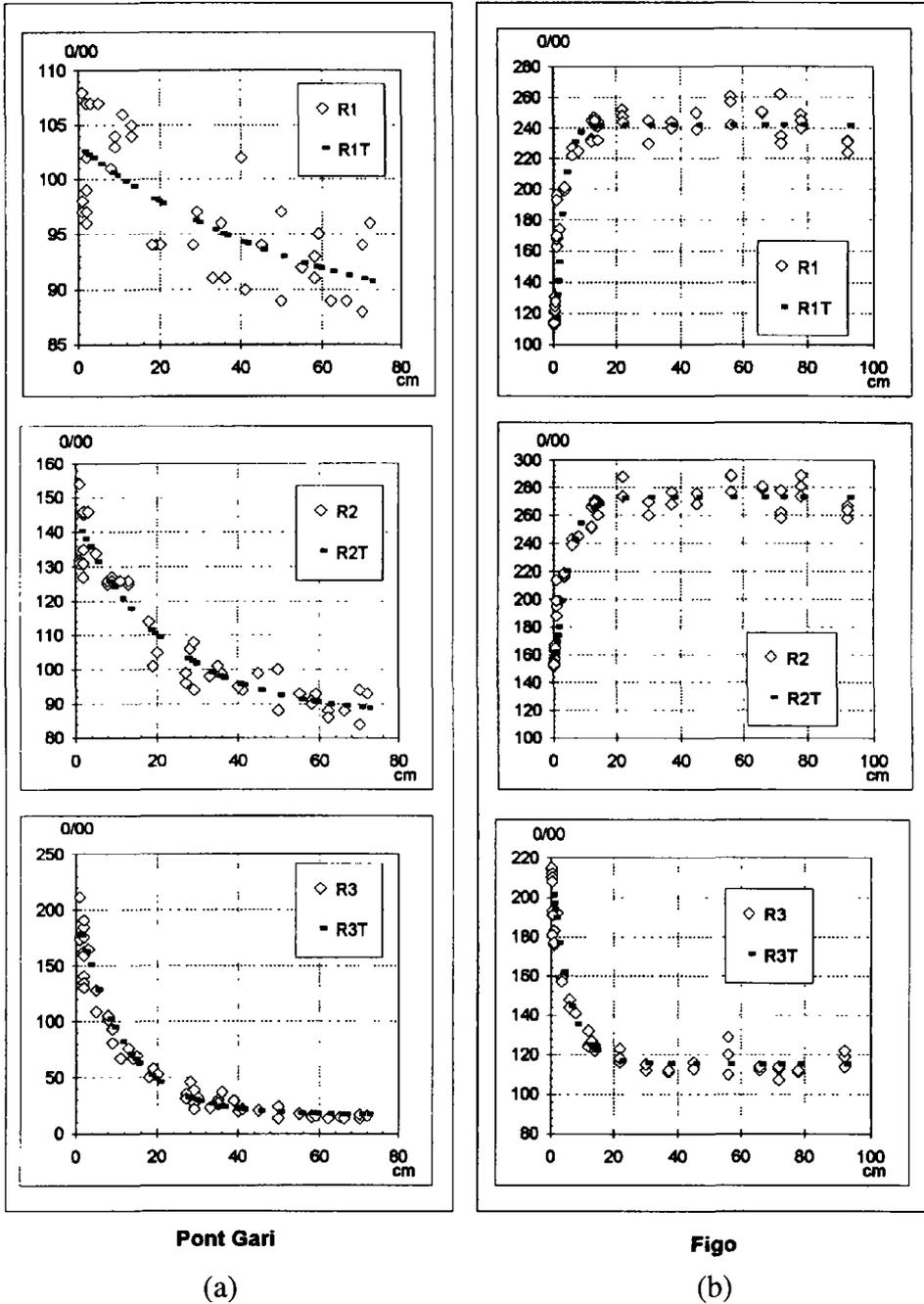


Figure 4. Effets de la profondeur sur la réflectance : a) mare du Pont Gari; b) mare de Figo

Tableau 1. Paramètres d'ajustement de l'équation reliant la réflectance à la profondeur

Canal	Pont Gari			Figo		
	Rf	K	C	Rf	K	C
1	86,5	16,4	0,94	242,0	-135,9	21,2
2	86,6	56,4	2,26	273,2	-116,5	11,3
3	17,4	175,2	4,53	115,4	89,5	9,3

- la profondeur de disparition du disque de Secchi doit être du même ordre que l'inverse du coefficient d'atténuation C_λ pour les canaux dans le visible (1 et 2).

D'après la figure 2, les réflectances du sol humide saturé sont respectivement de 0,120, 0,160 et 0,235 à Pont Gari pour les canaux 1, 2 et 3. Les sommes ($R_{\rho} + K_\lambda$) correspondantes sont légèrement plus faibles (0,103, 0,143 et 0,193). Ceci peut provenir de la difficulté d'observer une surface homogène de 60 cm de diamètre où la tranche d'eau est inférieure au centimètre.

La deuxième hypothèse a été vérifiée. Le disque de Secchi à Pont Gari disparaissait pour une profondeur de 0,30 à 0,40 m, soit un coefficient d'atténuation de 3 m^{-1} environ, comparable aux valeurs obtenues par optimisation dans le visible.

Les rapports de canaux permettent de s'affranchir des réflexions parasites. Sur la figure 5, nous avons reporté les rapports de réflectance en fonction de la profondeur pour les mêmes profils qu'à la figure 4. La dispersion est notablement réduite. Le rapport R2/R1 est le plus sensible à la profondeur à la mare de Pont Gari. Au contraire, des artefacts indéterminés sur le terrain ont altéré ce rapport à la mare de Figo. L'équation (1) s'ajuste sur les nuages de points; toutefois, les paramètres optimisés (tab. 2) n'ont plus de signification physique.

Il ressort de ces graphiques que :

- dans le cas d'une turbidité faible, le signal radiométrique renseigne sur la bathymétrie jusqu'à une profondeur maximale de 1 m;

- la signature spectrale de ces eaux est très dépendante de la concentration en éléments en suspension à travers le coefficient d'atténuation (C_λ) et la réflectance de l'eau profonde (R_{ρ}).

Sur la figure 6, on montre les relations réflectance de l'eau profonde – concentration. Dans la gamme d'échantillonnage, les relations sont linéaires et égales à :

$$R1 = 0,56 C + 92, 23 \quad r^2 = 0,92$$

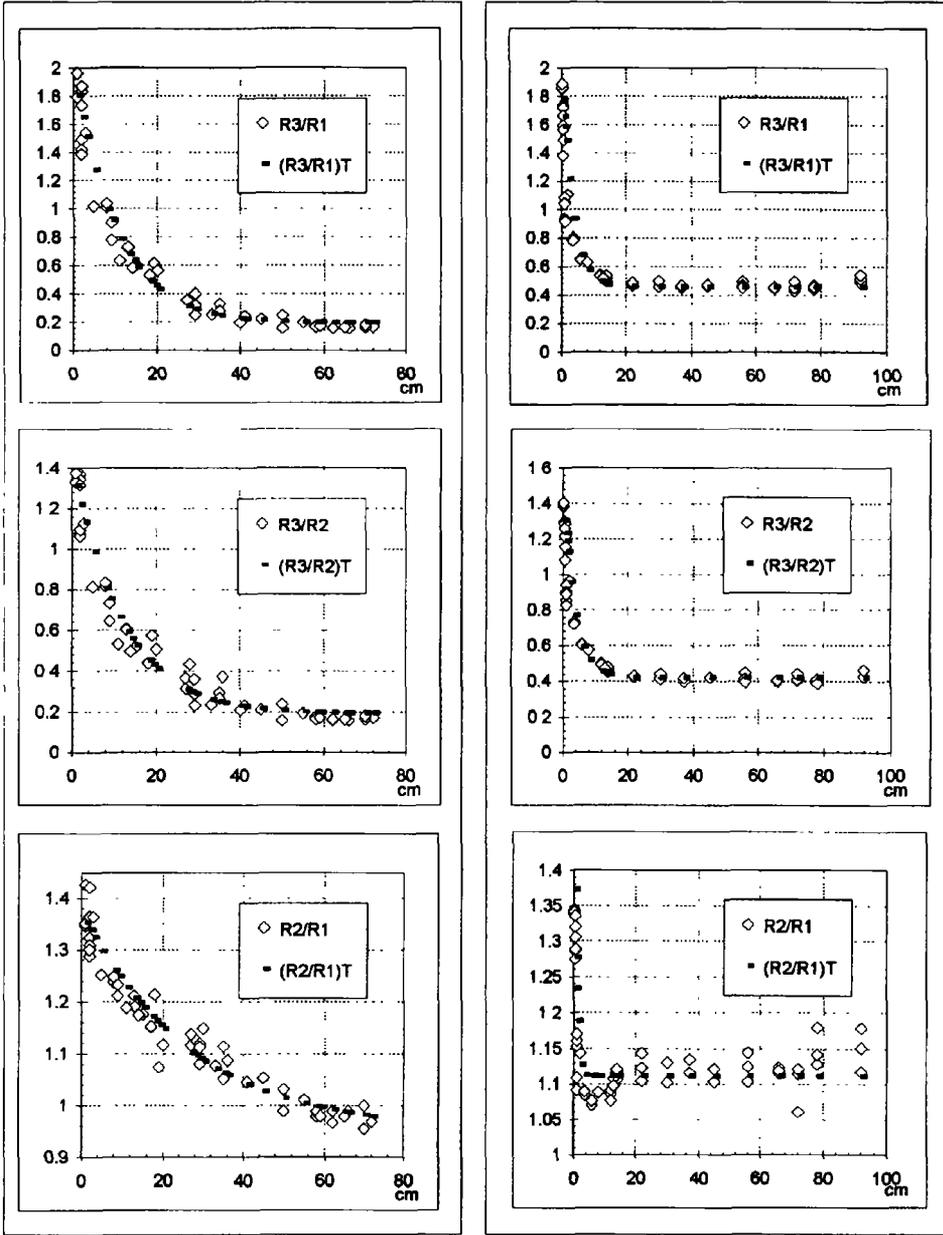
$$R2 = 0,70 C + 78,07 \quad r^2 = 0,96$$

$$R3 = 0,46 C - 10,55 \quad r^2 = 0,95$$

pour C en mg/l.

Tableau 2. Paramètres d'ajustement des courbes rapport de réflectances – profondeur

Canal	Pont Gari			Figo		
	Rf	K	C	Rf	K	C
R3/R1	0,194	1,785	5,0	0,460	1,405	15,5
R3/R2	0,191	1,223	4,3	0,420	0,936	14,0
R2/R1	0,951	0,417	1,9	1,111	0,356	76,2



Pont Gari

Figo

(a)

(b)

Figure 5. Effets de la profondeur sur les rapports de réflectances : a) mare du Pont Gari; b) mare de Figo

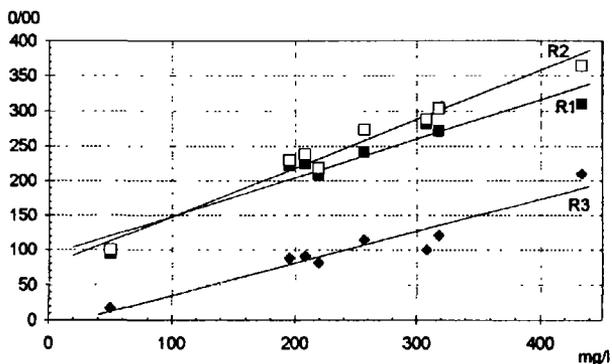


Figure 6. Réflectance de l'eau profonde et concentration

Le coefficient d'atténuation augmente avec la concentration (fig. 7). Cependant, comme il est déterminé dans les premiers centimètres d'eau avant que le signal ne sature, il est très sensible aux erreurs sur la profondeur et ceci d'autant plus que la concentration est importante.

Pour étalonner les paramètres de l'équation 1, les seules données de terrain ne suffisent pas car, au cours de l'hivernage, la concentration de sédiments en suspension évolue peu dans ces mares. L'étude de terrain a été poursuivie par une expérimentation en laboratoire.

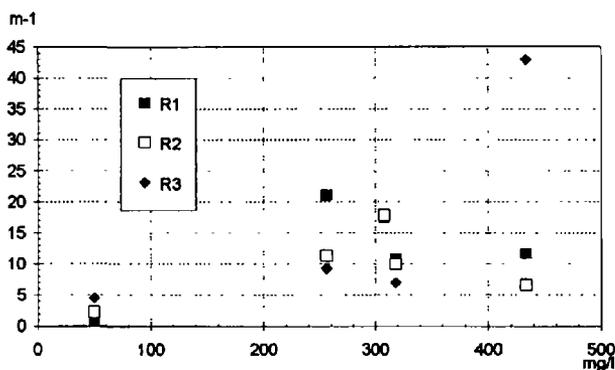


Figure 7. Coefficient d'atténuation et concentration

3. Expérimentation de laboratoire

3.1. Dispositif

Dans un site dégagé, le radiomètre est centré à 1 m au-dessus d'un fût rempli d'eau. Le fût peint avec une peinture noire anti-reflet mesure intérieurement 0,875 m de hauteur et 0,565 m de diamètre (volume de 219 l). Une pompe en circuit fermé assure un brassage rapide de l'eau entre deux orifices situés à la base et au sommet du fût. Après un premier

essai, nous avons remplacé l'eau de ville, où était présent un produit flocculant, par de l'eau déminéralisée. Un disque lesté coulisse dans le fût permettant de faire des mesures pour différentes tranches d'eau.

3.2. Protocoles et résultats

Deux séries de mesures ont été réalisées. Par la première, on visait à déterminer la relation concentration – réflectance en eau profonde sur une large gamme de concentration (30 à 2 500 mg/l) et par la seconde, on visait à calibrer la relation coefficient d'atténuation – concentration pour des valeurs de concentration plausibles dans le fleuve Sénégal (50 à 500 mg/l).

Un échantillon de terre superficielle argilo-limoneuse de la mare de Figo a permis d'obtenir les différentes concentrations. La granulométrie révèle 64,0 % d'argile et 18,1 % de limon fin. Il était important de travailler avec une fraction terreuse provenant d'un fond de cuvette car de nombreux auteurs ont démontré les modifications radiométriques de l'eau en fonction de la granulométrie pour une même concentration (HOLYER, 1978; BHARGAVA and MARIAM, 1991). Dans des flacons, des solutions terreuses ont été préparées de telle sorte que, versées successivement dans le fût, les concentrations s'étalent entre les gammes citées précédemment. On observe une légère diminution de la concentration théorique souhaitée (définie à la préparation du flacon), à la concentration contrôlée dans le fût après versement de la solution terreuse (fig. 8). Malgré le brassage, il y a probablement un début de sédimentation dans le fût des éléments les plus grossiers. Des erreurs de dilution sont également toujours envisageables.

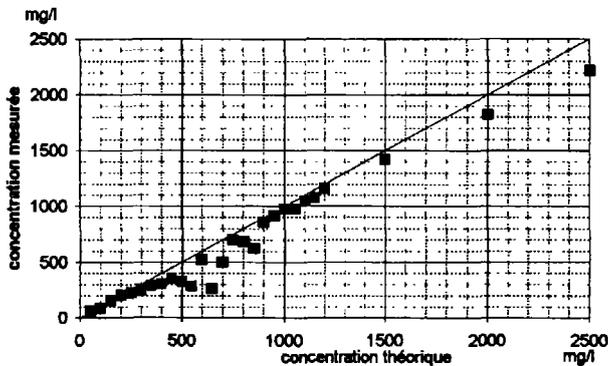


Figure 8. Concentration théorique souhaitée et concentration mesurée dans le fût

3.2.1. Concentration et réflectance de l'eau profonde

Sur les figures 9a, 9b et 9c, on constate que la relation entre concentration et réflectance est biunivoque jusqu'à 2,5 g/l dans le proche infrarouge. Dans le visible, il y a une saturation de la réflectance à partir de 400 mg/l (R1) et 600 mg/l (R2). Pour comparaison, la profondeur de disparition du disque de Secchi détermine la concentration jusqu'à des valeurs inférieures à 400 mg/l (fig. 9d). Ces résultats sont en accord avec des recherches antérieures (CURRAN and NOVO, 1988; RITCHIE and SCHIEBE, 1986; HARRINGTON *et al.*, 1992).

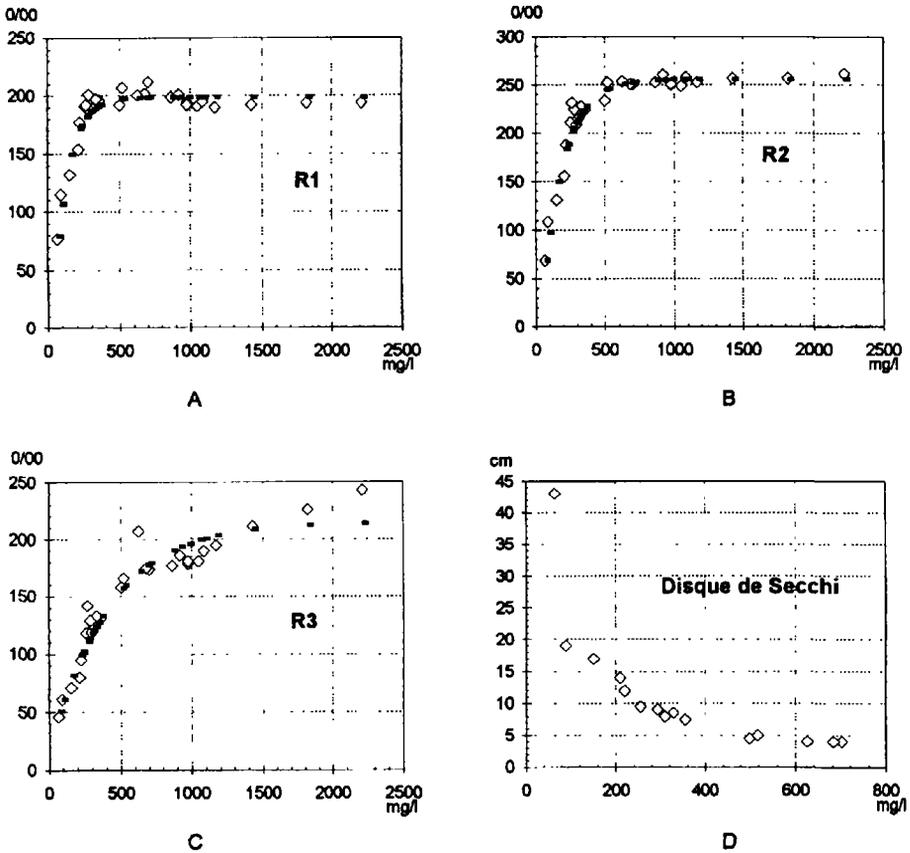


Figure 9. Nuages de points et meilleurs ajustements pour la relation entre la réflectance et la concentration (a, b, c); Effet de la concentration sur la profondeur de disparition du disque de Secchi (d)

Des relations du type :

$$R_{\lambda} = A_1 - B_1 \exp(-1/S_{\lambda} \cdot \text{Concentration})$$

ont été ajustées sur les nuages de points. L'ajustement est inadéquat pour les concentrations les plus élevées dans le proche infrarouge (fig. 9c). Un terme proportionnel à la concentration devrait être ajouté au modèle pour des concentrations supérieures à 1 400 mg/l.

Les paramètres d'ajustement sont réunis sur le tableau 3. Il est normal de trouver des valeurs voisines pour A_{λ} et B_{λ} car, sous réserve d'absence de réflexion parasite dans le fût, l'eau sans matière en suspension a des réflectances très faibles. HARRINGTON *et al.* (1992) ont procédé aux mêmes types d'ajustement entre concentration et réflectance exoatmosphérique MSS de Landsat. Nos valeurs de S_{λ} sont très semblables (tab. 4). Par contre, la comparaison entre les relations obtenues sur le terrain et celles au fût (fig. 10) n'est pas très bonne. La principale raison pourrait être une différence de nature entre les éléments en suspension dans les eaux de crue et le sédiment prélevé à la surface de la cuvette et remis en suspension dans le fût.

Tableau 3. Paramètres d'ajustement des relations concentration-réflectance de l'eau profonde

Canal	A	B	S
1	198,4	232,5	97,0
2	255,8	285,7	152,0
3	214,7	191,2	416,0

Tableau 4. Comparaison des valeurs du paramètre S (HARRINGTON *et al.*, 1992) déterminé en laboratoire et sur des images MSS de Landsat

Longueur d'onde (nm)	S (fût)	S (Harrington <i>et al.</i> , 1992)	Longueur d'onde (nm)
500-590	97	91	500-600
615-680	152	130	600-700
790-890	416	267	700-800

3.2.2. Coefficient d'atténuation et concentration

Un disque mobile de diamètre légèrement inférieur à celui du fût permet de simuler différentes épaisseurs de tranche d'eau entre 2 et 90 cm environ pour des concentrations analogues à celles rencontrées sur le fleuve (de 38 à 416 mg/l). Pour chaque concentration, des relations du type de l'équation (1) ont été déterminées. Les coefficients d'atténuation C_{λ} diminuent avec les longueurs d'onde et augmentent avec la concentration. Pour 100 mg/l, ils s'étalent entre 4 et 6 m^{-1} environ. Pour 400 mg/l, ils sont compris entre 12,5 et 16,0 m^{-1} (fig. 11). Ces valeurs sont légèrement plus faibles que celles trouvées dans la littérature (GALLEGOS *et al.*, 1990). Les coefficients d'atténuation déduits des mesures de terrain sont du même ordre de grandeur, mais leur dispersion autour des valeurs obtenues sur le fût est importante.

4. Conclusion

Au moyen d'un radiomètre portatif, l'effet de l'épaisseur de la tranche d'eau sur la réflectance a été modélisé par une équation semi-logarithmique à trois paramètres :

- la réflectance du sol saturé en bordure de mare;
- la réflectance de l'eau profonde (d'épaisseur supérieure à la limite de pénétration de la lumière);
- le coefficient d'atténuation.

Le premier paramètre est déterminable par un simple examen des rapports de réflectance. On peut penser pouvoir l'acquérir par télédétection. Les deux derniers paramètres sont dépendants de la concentration de sédiments en suspension. Dans la gamme de concentrations mesurées (50 à 400 mg/l), la liaison entre concentration et réflectance de l'eau profonde est linéaire. La liaison concentration – coefficient d'atténuation est moins précise.

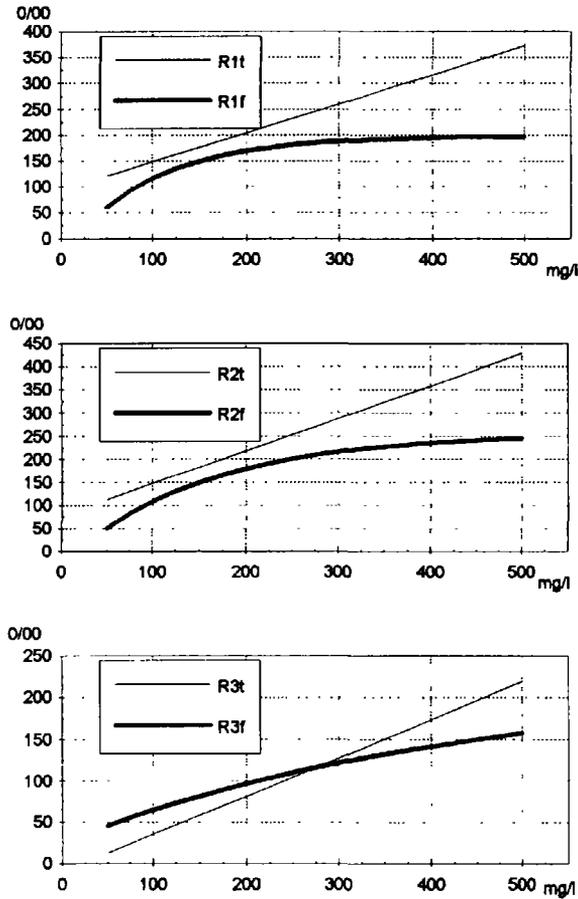


Figure 10. Effet de la concentration sur la réflectance de l'eau profonde (mesures sur le terrain [t] et dans le fût [f])

Pour préciser et étalonner ces relations, des mesures radiométriques ont été menées sur une colonne d'eau à concentration et à épaisseur variables. Sur une série étendue de concentrations (30 à 2 500 mg/l), on constate que la relation entre concentration de sédiments en suspension et réflectance des eaux profondes est semi-logarithmique. Les liaisons entre concentration et coefficient d'atténuation pour les différentes longueurs d'ondes sont linéaires, pour des concentrations variant entre 50 et 500 mg/l. Cependant, cette expérimentation n'a pas donné complète satisfaction car les valeurs des paramètres obtenus sur le terrain sont très dispersées, voire différentes des mesures au fût. Ceci peut provenir d'une différence de nature entre les éléments en suspension dans les eaux de crue et les sédiments remis en suspension dans la colonne d'eau du fût. En l'état actuel, il nous semble hasardeux d'utiliser les relations de l'expérimentation comme étalonnage des mesures de terrain.

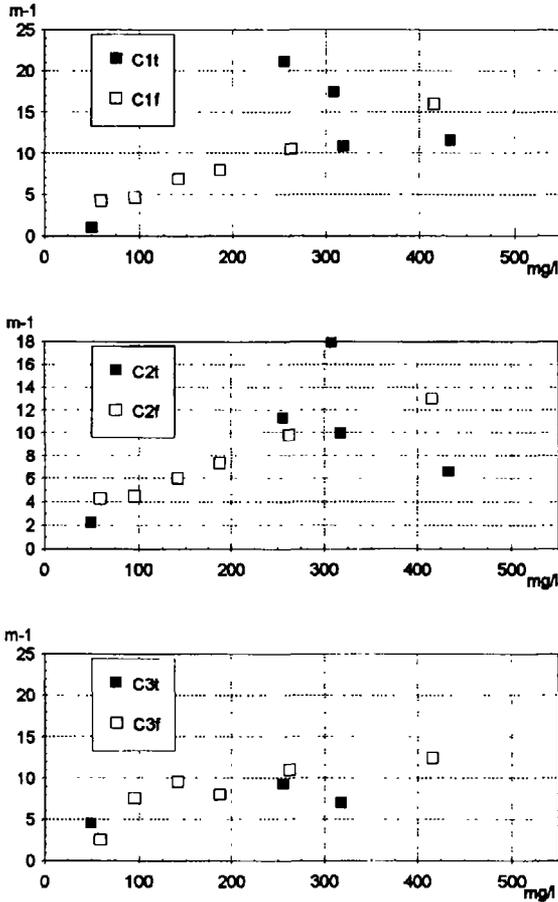


Figure 11. Effet de la concentration sur le coefficient d'atténuation (mesures sur le terrain [t] et dans le fût [f])

Pour les concentrations rencontrées sur le fleuve (50 à 500 mg/l), le signal radiométrique sature pour des profondeurs fréquemment inférieures à 0,75 m. Ce qui limite l'utilisation bathymétrique de la radiométrie. Par contre, la qualité des relations de terrain entre réflectance des eaux profondes et concentration de sédiments en suspension rend possible une évaluation rapide des concentrations sur le terrain. L'appareil à concevoir serait un radiomètre dont une tête viserait l'eau et l'autre une surface de référence de réflectance connue afin de s'affranchir des variations d'éclairement. Sa principale contrainte d'utilisation serait la même nature des éléments en suspension d'un point de mesure à l'autre. Ce critère est satisfait dans le lit majeur du Sénégal où le milieu est homogène et l'hydrodynamique faible. Au-delà, ces relations de terrain réflexion – concentration seront la base d'une cartographie par télédétection des sédiments en suspension.

5. Références

- BHARGAVA, D. S. and MARIAM, D. W. 1991. Effects of suspended particle size and concentration on reflectance measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n° 5, p. 519-529.
- CURRAN, P. J. and NOVO, E. M. M. 1988. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance : a review. *Journal of Coastal Research*, vol. 4, n° 3, p. 351-368.
- GALLEGOS, C. L., CORRELL, D. and PIERCE, J. W. 1990. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. *Limnology and Oceanography*, vol. 35, n° 7, p. 1486-1502.
- GUYOT, G., HANOCQ, J. F., BUIS, J. P. et SAINT, G. 1984. Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, France, septembre 1983, Éditeur INRA, p. 233-242.
- HARRINGTON, J. A., SCHIEBE, F. R. and NIX, J. F. 1992. Remote sensing of lake Chicot, Arkansas : monitoring suspended sediments, turbidity and Secchi depth with Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, n° 39, p. 15-27.
- HOLYER, R. J. 1978. Towards universal suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 7, p. 323-338.
- IBRAHIM, M. and CRACKNELL, A. P. 1990. Bathymetry using Landsat MSS data of Penang Island in Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, n° 4, p. 557-559.
- LE GOUIC, M. 1987. Utilisation de Spot en Hydrographie. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987, Cepadues-Éditions, Toulouse, p. 1063-1068.
- LEMOALLE, J. 1978. Application des images Landsat à la courbe bathymétrique du lac Tchad. *Cahier ORSTOM, série Hydrobiologie*, vol. XII, n° 1, p. 83-87.
- LOUBERSAC, L., BURBAN, P.-Y., LEMAIRE, O., VARET, H. and CHENON, F. 1991. Integrated study of Aitutaki's Lagoon (Cook Islands) using SPOT satellite data and *in situ* measurements : bathymetric modelling. *Geocarto International*, vol. 2, p. 31-37.
- PAGÈS, J., CITEAU, J. et DEMARCK, H. 1988. Bathymétrie par imagerie SPOT sur la Casamance (Sénégal), résultats préliminaires. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Aussois, France, janvier 1988, ESA, p. 387-392.
- PUECH, C. 1992. Télédétection et milieux sahéliens. Rapport du Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF/ENGREF, Montpellier, France, 18 p. (plus figures).
- RITCHIE, J. C. and SCHIEBE, F. R. 1986. Monitoring suspended sediments with remote sensing techniques. *in Hydrologic Applications of Space Technology*, Éditions I.A.H.S, n° 160, p. 233-243.
- SÉGUI, L. et DUBÉE, G. 1992. Cuvette de Nianga, hivernage 1991, rapport hydrologique. ORSTOM, Dakar, 42 p. (plus annexes).
- SÉGUI, L., CHEVILLOTTE, H., GASCUEL, C., BOIVIN, P. et BRAUDEAU, E. 1991. Contribution de l'imagerie satellitaire à l'optimisation des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Sénégal. *in* DUBOIS, J.M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (éd.). *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Actes des Journées scientifiques de Montréal, 1991, Éditions AUPELF et les Presses de l'Université du Québec, p. 129-137.
- SERVAT, E. and DEZETTER, A. 1988. SIMPLE et ROSEN : deux méthodes d'optimisation non linéaire, théorie et pratique. Notice OVNIh du laboratoire d'hydrologie, n° 1, ORSTOM, Montpellier, 36 p.

SPITZER, D. and DIRKS, R. W. J. 1986. Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. Remote sensing for resources development and environmental management, Enschede, août 1986, International Photogrammetry and Remote Sensing, 26/7, n° 2, p.775-777.

PARTIE III

Humidité des sols

13

Utilisation de la radiothermométrie IR pour une meilleure gestion des ressources en eau d'irrigation au Maroc

KAMAL BELABBES¹ et BERNARD ITIER²

¹ *Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Département de l'équipement et de l'hydraulique, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc;*
téléphone : +212 (7) 77-17-58; télécopieur : +212 (7) 77-58-38;
télex : AGROVET 36089 M

² *Institut national de la recherche agronomique, Station de bioclimatologie-télédéttection, 78850 Thiverval-Grignon, France;*
téléphone : +33 (1) 30-81-55-55; télécopieur: +33 (1) 30-81-55-63

Résumé

Des mesures radiothermométriques de terrain ont été réalisées durant les deux campagnes agricoles de 1990-1991 et 1991-1992 sur des couverts de blé dans deux contextes semi-arides marocains. L'étude a permis, dans un premier temps, d'établir les droites caractéristiques pour le calcul du CWSI (*Crop Water Stress Index*) du couvert de blé après la phase de tallage. Les droites obtenues se sont avérées différentes de celles établies dans d'autres contextes (USA) et, qu'en première approximation, elles sont comparables entre les deux contextes pédoclimatiques marocains. Lors d'une deuxième phase, une gestion des arrosages a été effectuée sur la base de trois seuils de stress hydrique : faible (CWSI = 0,3), moyen (CWSI = 0,5) et fort (CWSI = 0,7). Une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation a été obtenue pour le régime CWSI = 0,5. Par ailleurs, les résultats ont permis de confirmer la validité du modèle simplifié d'estimation de l'ETR à partir de la température de surface et de le calibrer sous les conditions semi-arides marocaines. Ces résultats laissent entrevoir de grandes possibilités d'application de la radiothermométrie de terrain dans l'amélioration de la gestion des ressources en eau allouées à l'irrigation dans le contexte marocain.

1. Introduction

Aujourd'hui, plus que par le passé, le monde de l'agriculture irriguée est conscient de la nécessité d'une gestion rationnelle et plus efficiente des ressources en eau allouées à l'irrigation. L'intérêt d'une telle gestion n'est plus à démontrer aussi bien sur le plan agricole que socio-économique et écologique. Toutefois, une utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation requiert le développement de techniques fiables et sensibles pour la détection du stress hydrique du couvert végétal. Actuellement, l'une des techniques les plus pertinentes dans cette rubrique est sans conteste la radiothermométrie infrarouge. La température de surface d'un couvert végétal est en effet un bon indicateur du degré de réduction de son évapotranspiration. Le développement des techniques de télédétection en général et de la radiothermométrie infrarouge, en particulier, aussi bien de terrain que par des capteurs aéroportés, a ouvert de nouvelles perspectives à l'utilisation de cette technique pour le suivi du bilan hydrique du sol et la détection du stress hydrique. Les débuts des années 80 ont vu le développement d'une technique pour la quantification du stress hydrique par le moyen d'un indice normalisé basé sur les températures radiatives de surface (JACKSON *et al.*, 1981; PINTER and REGINATO, 1982) qui a été appelé : *Crop Water Stress Index* (CWSI). Il a été défini par JACKSON *et al.*(1981) par :

$$CWSI = 1 - (ETR / ETM) \quad (1)$$

où ETR et ETM sont respectivement l'évapotranspiration réelle et évapotranspiration maximale. Une approche théorique a été développée en vue de son estimation. IDSO *et al.*(1981) ont expérimentalement développé une procédure pour sa quantification basée sur la différence entre la température de surface du couvert (Ts) et celle de l'air (Ta) ainsi que sur le déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) comme paramètres. Sur la figure 1, on représente l'illustration graphique du CWSI : pour le point B, correspondant à un écart de température (Ts-Ta) et à un degré de déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) donnés, le CWSI est égal au rapport des distances BC et AC. Les points A et B représentent, respectivement, l'état de stress hydrique maximum (ETR = 0) et minimum (ETR = ETM). Le CWSI peut encore s'écrire :

$$CWSI = [(Ts-Ta) - (Ts-Ta)_{min}] / [(Ts-Ta)_{max} - (Ts-Ta)_{min}] \quad (2)$$

La présente recherche, qui s'intègre dans une thématique du Département de l'équipement et de l'hydraulique de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (BELABBES, 1990; AJAJ, 1991; LYAMANI, 1992) a comme objectif de développer une méthodologie pour l'utilisation de la température de surface pour, d'une part, une gestion des arrosages par le critère CWSI (ITIER *et al.*, 1992) et, d'autre part, l'estimation de l'évapotranspiration réelle en vue de suivre le bilan hydrique du sol (JACKSON *et al.*, 1977; SEGUIN and ITIER, 1983). Des couverts de blé ont fait l'objet de mesures radiothermométriques de terrain durant les deux campagnes agricoles 1990-1991 et 1991-1992 et dans deux contextes semi-arides marocains : la Chaouia et les Doukkala.

Cette étude a été menée en collaboration avec l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) français (Station de bioclimatologie et télédétection de Thiverval-Grignon) et le Centre aridoculture de l'INRA marocain.

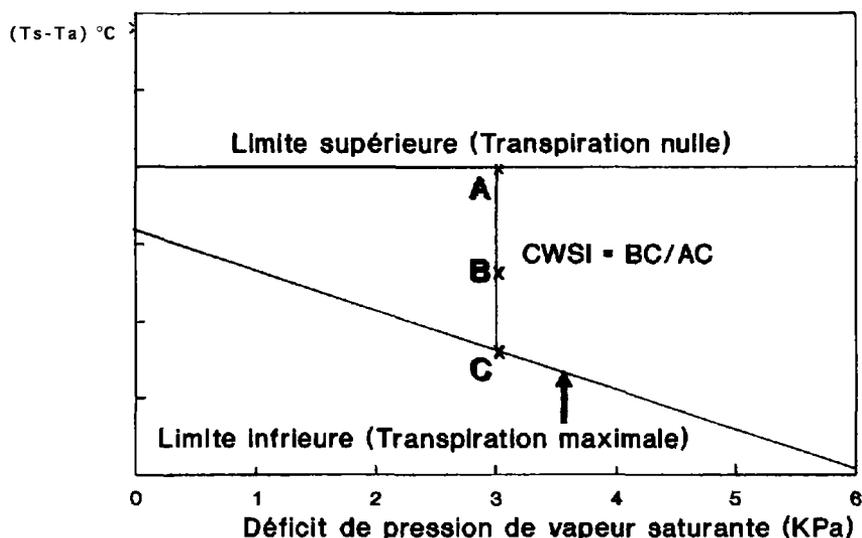


Figure 1. Représentation graphique du CWSI (*Crop Water Stress Index*)

2. Matériel et méthode

L'expérimentation s'est déroulée au cours des deux campagnes agricoles de 1990-1991 et de 1991-1992 sur des couverts de blé tendre, variété Merchouch 8, semés en ligne (30 cm d'interligne) avec une dose de semis de 1,5 quintaux/hectare.

La première campagne était conduite sur le site de la station expérimentale de l'INRA-Maroc à Sidi El Aydi dans la région de la Chaouia (33° N, 9°22' O). Le climat est de type semi-aride avec un régime pluviométrique très irrégulier en quantité et en distribution. La moyenne des précipitations est de 386 mm avec des extrêmes de 200 mm et de 750 mm. Le sol est profond, à texture argileuse (71 % d'argile, 22 % de limon et 7 % de sable) et peu humifère en surface. La parcelle expérimentale avait des dimensions de 189 m x 52 m, afin de minimiser les effets de l'advection sur les mesures microclimatiques et de température radiative de surface. Cinq emplacements à l'intérieur de la parcelle faisaient l'objet de mesures de température de surface et du bilan hydrique du sol (tubes d'accès de la sonde à neutron). Une placette de 5 m x 5 m était maintenue en confort hydrique (ETM) par des arrosages fréquents. Le mode d'irrigation est l'aspersion.

La deuxième année d'expérimentation s'est déroulée sur la station de l'INRA-Maroc à Khémis Ezmamra, dans la région des Doukkala (32°24' N, 8°30' O). Le climat est de type méditerranéen à tendance semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle est de 332 mm. Le sol est de type sableux limoneux (46 % de sable, 22 % de limon et 32 % d'argile). Quatre parcelles de dimensions 18 m x 18 m correspondaient à quatre régimes hydriques. Trois seuils de CWSI conditionnaient les arrosages de trois parcelles, soit 0,3 (faible), 0,5 (moyen) et 0,7 (fort), la 4^e étant maintenue en confort hydrique par des arrosages fréquents. L'irrigation est effectuée par aspersion.

La température radiative de surface des couverts était mesurée par un radiothermomètre portatif de type HORIBA IT-330. Les mesures débutaient au cours du stade phénologique de tallage et étaient réalisées tous les jours de beau temps aux environs du midi solaire, dos

au soleil et par un balayage de 180° du couvert par le radiothermomètre incliné à environ 30 % par rapport à l'horizontale. L'émissivité était prise égale à 1 sur l'appareil. Afin d'avoir une bonne représentativité de la mesure au niveau de la parcelle, huit répétitions étaient réalisées à chaque passage et sur les mêmes emplacements.

Le déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) est calculé à partir des températures sèche et humide d'un psychromètre à aspiration placé au niveau de la parcelle où s'effectue la mesure de la température radiative de surface. Les deux mesures sont conduites simultanément.

L'évapotranspiration réelle (ETR) a été estimée par bilan hydrique du sol à partir de mesures hebdomadaires par une sonde à neutrons de type CPN 503 sur un profil de 80 cm.

Une station météorologique automatique de type Campbell CR10 était installée au niveau des parcs météorologiques des stations pour une acquisition fine des données climatiques. Le rayonnement net (Rn) a été estimé à partir du rayonnement solaire (Rs) par un modèle linéaire développé sur blé tendre à Sidi El Aydi (Chaouia, Maroc) (BELABBES, 1992) et qui s'écrit, pour Rn et Rs exprimés en kJ/m²/jour :

$$Rn = 0,669 Rs - 550,416 \quad (r = 0,99) \quad (3)$$

Le rayonnement solaire Rs était mesuré par un pyranomètre de type Licor-LI200S monté sur la station météorologique automatique.

3. Résultats et discussion

3.1. Le CWSI : droites caractéristiques

Sur les figures 2 et 3, on présente les droites de stress minimales (parcelles à l'ETM ou après un arrosage ou pluie) respectivement pour le contexte de Khémis Ezmamra et celui de Sidi El Aydi. On peut observer la forte corrélation entre le différentiel (Ts-Ta) et le DPVS. Ceci confirme les résultats obtenus par d'autres chercheurs (IDSO *et al.*, 1981). En outre, et en première approximation, les deux droites sont comparables :

$$(Ts-Ta)_{min} = -1,88 DPVS + 1,6 \quad (r = 0,94) \quad (4)$$

$$(Ts-Ta)_{min} = -1,70 DPVS + 1,71 \quad (r = 0,92) \quad (5)$$

Cependant, ces droites caractéristiques de stress minimum sont différentes de celle proposée pour le blé par IDSO (1982) pour le contexte des USA, et qui s'écrit :

$$(Ts-Ta)_{min} = -2,11 DPVS + 2,88 \quad (r = 0,94) \quad (6)$$

Ceci n'est pas en accord avec ce que rapportait IDSO (1982) quant à l'universalité de ces droites caractéristiques de stress minimum et leur indépendance de la variabilité des conditions de l'environnement sauf pour la couverture nuageuse. Ceci nous conduit à recommander que ces droites soient déterminées pour chaque contexte climatique considéré.

Par ailleurs, les états de stress maximum des couverts de blé obtenus en fin de phases de dessèchement, ont mis en évidence la valeur 3,5 °C comme écart maximum du différentiel (Ts-Ta) et il est indépendant du déficit de pression saturante (DPVS). Cette valeur a constitué donc la droite de stress maximum pour le calcul du CWSI (fig.1).

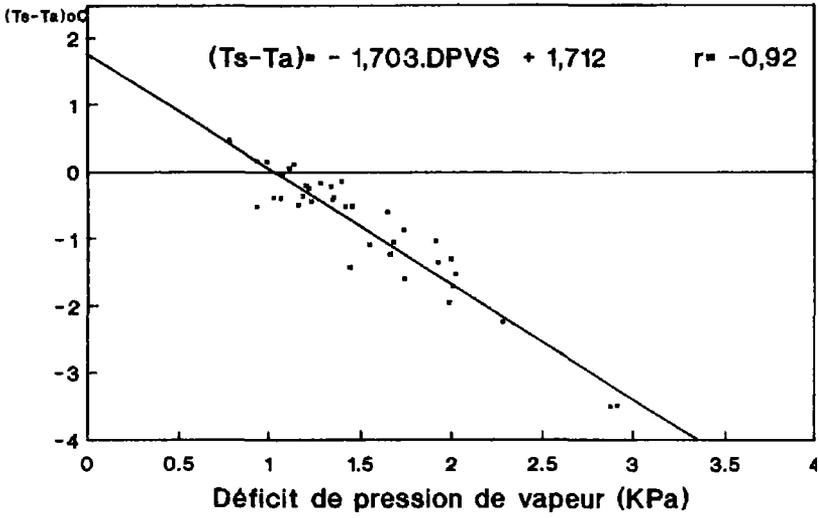


Figure 2. Droite reliant le différentiel $(T_s - T_a)$ au déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) en conditions de stress minimum : cas du couvert de blé tendre (Khémis Ezmamra, 1991-1992)

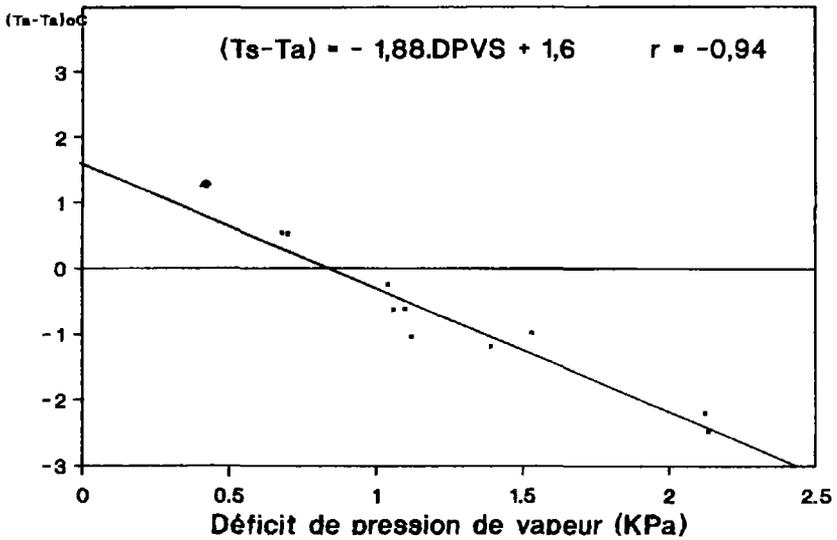


Figure 3. Droite reliant le différentiel $(T_s - T_a)$ au déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) en conditions de stress minimum : cas du couvert de blé tendre (Sidi El Aydi, 1990-1991)

3.2. CWSI : outil pour la gestion des arrosages ?

Au cours de la campagne de 1991-1992, la gestion des arrosages de complément du blé s'est faite sur la base de trois seuils de l'indice CWSI : faible (0,3), moyen (0,5) et fort (0,7). Le CWSI a été calculé suivant l'approche empirique (IDSO *et al.*, 1981; GARROT *et al.*, 1990) avec les droites caractéristiques établies lors de la première phase de l'étude. Sur les figures 4a, 4b et 4c, on illustre l'évolution du CWSI à partir de la phase de tallage du blé, respectivement pour les régimes CWSI 0,3, CWSI 0,5 et CWSI 0,7. Sur le graphique de la figure 5, on représente le cas de la parcelle conduite à l'ETM (confort hydrique) et où le CWSI a été maintenu en moyenne à 0,2. On peut relever, sur l'ensemble des figures 4a, 4b, 4c et 5, la grande sensibilité de cet indice au dessèchement du couvert et aux différents apports d'eau (arrosages ou pluie).

Sur le tableau 1, on présente le nombre d'arrosages, les volumes d'eau apportés en supplément à la pluie et les consommations en eau (ETR) à partir de la phase de tallage, pour les quatre régimes. On peut y relever la corrélation positive entre le degré de stress hydrique permis, d'une part, et les apports de complément et les consommations en eau, d'autre part. Le régime ETM a enregistré les apports d'eau et les consommations en eau les plus élevés alors que le régime CWSI 0,7 a conduit aux valeurs les plus faibles. L'évolution du stock d'eau dans le sol pour les quatre régimes hydriques, illustrée sur la figure 6, vient confirmer cette différenciation.

La relation entre les rendements et le CWSI peut être déduite du tableau 2 qui montre que les rendements (grain et paille) sont d'autant plus faibles que le seuil du CWSI pour le déclenchement des arrosages est élevé. Le régime ETM (CWSI = 0,2) a conduit au rendement en paille le plus élevé, au détriment du rendement grain. Ceci est parfaitement en accord avec ce qui est admis en matière de réponse des plantes à l'eau (DOORENBOS and KASSAM, 1979). La meilleure efficacité d'utilisation de l'eau, définie par le rapport entre le rendement en grain et la consommation en eau du couvert, a été obtenue pour le régime CWSI 0,5.

3.3. Un modèle pour l'estimation de l'ETR à partir de Ts

À partir de l'équation du bilan d'énergie, JACKSON *et al.*(1977) avaient proposé un modèle simplifié pour l'estimation de l'ETR d'un couvert végétal à partir de sa température radiative de surface qui s'écrit :

$$ETR = R_n - B (T_s - T_a) \quad (7)$$

où ETR et R_n sont respectivement l'évapotranspiration réelle journalière du couvert (en mm/jour) et le rayonnement net journalier. $T_s - T_a$ est le différentiel de température entre la surface et l'air mesuré au midi solaire, et B est un coefficient qui dépend du couvert végétal considéré et du contexte climatique. Pour le contexte de Phoenix (USA), JACKSON *et al.*(1977) rapportaient un coefficient B égal à 0,64. À partir d'une analyse théorique et d'expérimentation dans le sud de la France, SEGUIN et ITIER (1983) ont mis en évidence l'influence du vent, des conditions de stabilité thermique et de la rugosité de la surface sur le coefficient B et trouvaient un coefficient B = 0,25. Dans les conditions de nos essais à Khémis Ezmamra (Doukkala, Maroc), on a trouvé un coefficient B de l'ordre de 0,91. La relation obtenue est sous la forme :

$$ETR - R_n = -0,912 (T_s - T_a) - 2,5 \quad (r = 0,89) \quad (8)$$

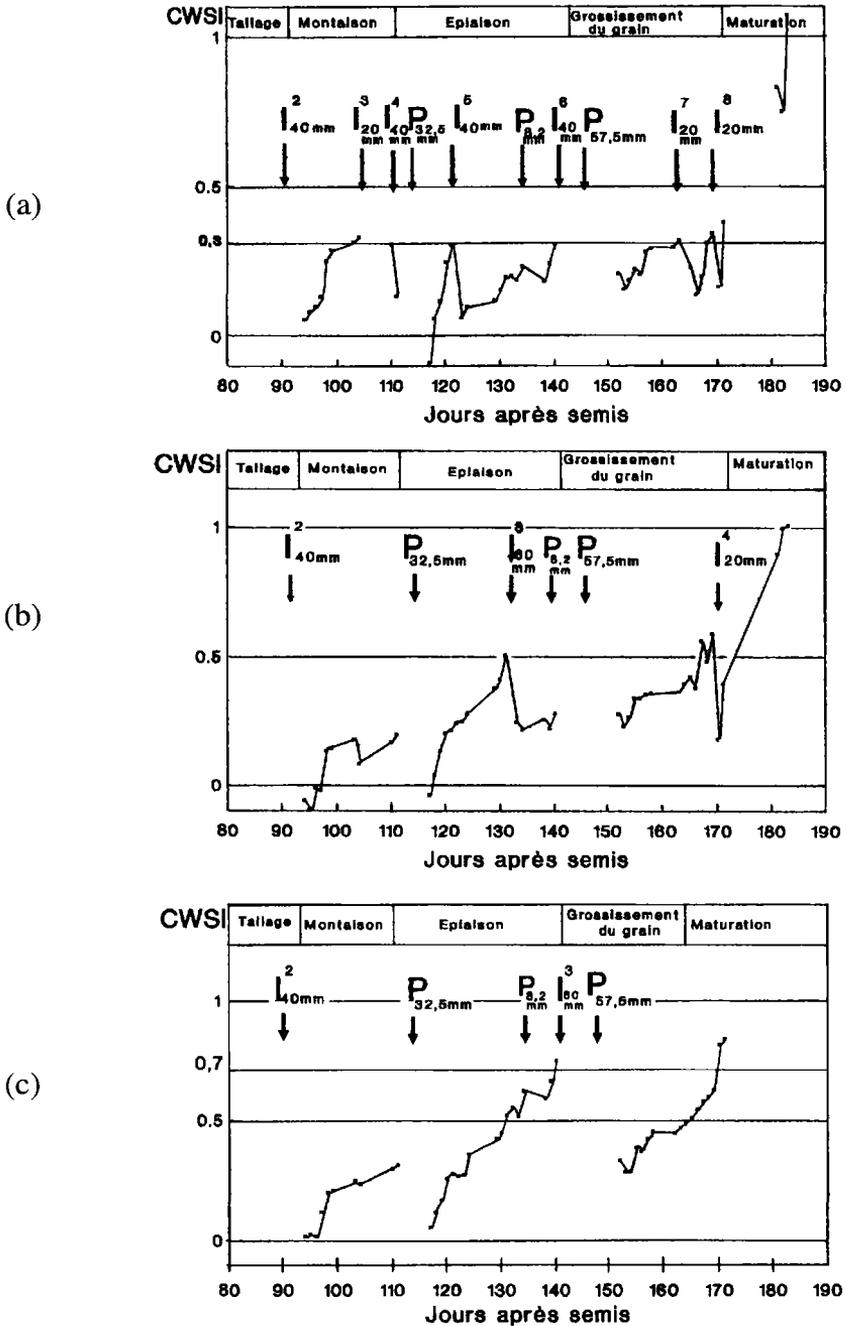


Figure 4. Évolution du CWSI au cours du développement du couvert blé tendre (Khémis Ezmamra, 1991-1992) : a) cas du régime hydrique CWSI = 0,3; b) cas du régime hydrique CWSI = 0,5 ; c) cas du régime hydrique CWSI = 0,7

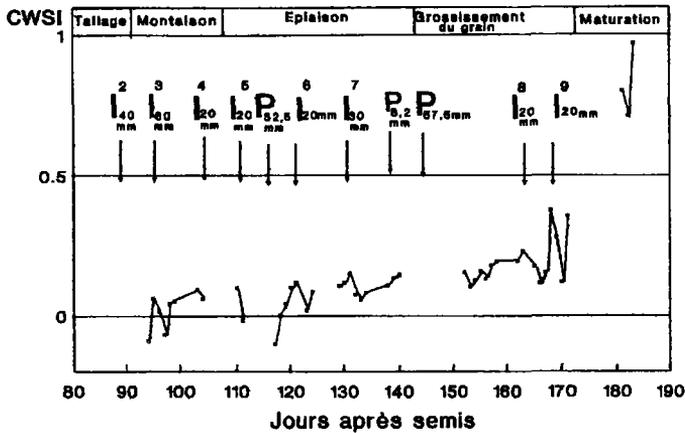


Figure 5. Évolution du CWSI au cours du développement du couvert blé tendre : cas du régime ETM (Khémis Ezmamra, 1991-1992)

Tableau 1. Les apports d'eau d'irrigation et les consommations en eau pour les quatre régimes hydriques : Khémis Ezmamra, 1991-1992

Régime hydrique	Nombre d'arrosages	Apport d'eau (mm)	Consommation en eau (mm)*
CSWI = 0,3	8	240	290,08
CSWI = 0,5	4	160	238,78
CSWI = 0,7	3	120	199,69
ETM	9	290	331,92

* Ces consommations en eau sont estimées par bilan hydrique à partir de la phase de tallage.

où ETR, Rn et (Ts-Ta) sont des valeurs moyennes sur la période séparant deux mesures du bilan hydrique du sol (4 à 7 jours). Ceci confirme la nécessité d'un calage de cette relation dans chaque contexte climatique.

Ce modèle a été sensiblement amélioré en faisant intervenir le déficit de pression de vapeur saturante (DPVS) et nous avons obtenu :

$$ETR - Rn = -0,912 (Ts-Ta) - 0,614 DPVS - 1,485 \quad (r = 0,93) \quad (9)$$

Cette bonne corrélation fait entrevoir de grandes possibilités pour le suivi du bilan hydrique à partir de simples mesures des températures de surface et de quelques paramètres climatiques.

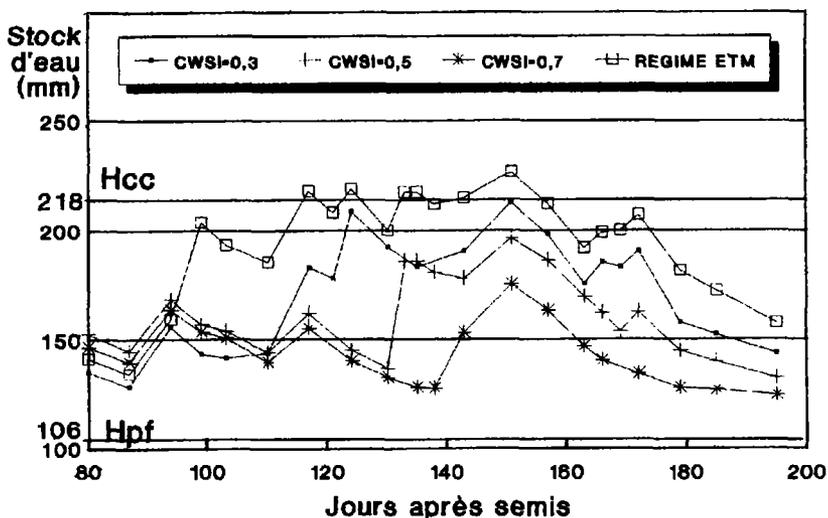


Figure 6. Évolution du stock d'eau dans le sol pour les différents régimes hydriques pour le couvert de blé tendre (Khémis Ezmamra, 1991-1992)

Tableau 2. Rendements et efficacité d'utilisation de l'eau pour les quatre régimes hydriques : Khémis Ezmamra, 1991-1992

Régime hydrique	Rendement grain (qx/ha)	Rendement paille (t/ha)	Efficacité utilisation (qx/ha·mm)*
CSWI = 0,3	43,85	8,59	0,15
CSWI = 0,5	39,85	7,20	0,17
CSWI = 0,7	32,53	6,08	0,16
ETM	40,35	9,18	0,12

* Représente le rapport rendement grain/consommation en eau. Les consommations en eau sont estimées par bilan hydrique du sol à partir de la phase de tallage.

4. Conclusions

Les résultats présentés confirment les possibilités offertes par la radiothermométrie IR pour l'appréciation du degré de stress hydrique d'un couvert de blé et la détermination des consommations en eau.

Les droites caractéristiques pour le calcul de l'indice thermique CWSI ont été déterminées pour deux contextes semi-arides marocains (la Chaouia et les Doukkala). Le CWSI s'avère un bon indicateur du stress hydrique qui peut être utilisé pour une gestion des apports d'eau de complément du blé.

L'étude a par ailleurs permis de calibrer le modèle simplifié pour l'estimation de l'ETR à partir de la température radiative de surface du couvert. Des corrélations hautement significatives ont été obtenues. Celles-ci ont été encore améliorées en prenant en compte le déficit de pression de vapeur saturante comme facteur climatique supplémentaire au rayonnement net et la température de surface.

5. Références

- AJAJ, M. 1991. Contribution à l'étude des températures radiatives de surface en tant que paramètre de gestion des apports de complément pour le blé. Mémoire de 3^e cycle Génie rural, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 110 p.
- BELABBES, K. 1990. Études des critères de stress hydrique basés sur la température radiative de surface pour une gestion de l'irrigation de complément du blé. Communication au Séminaire international sur les applications de la télédétection à la gestion et au contrôle des grands périmètres irrigués, Kénitra, 19-23 novembre 1990.
- BELABBES, K. 1992. Estimation du rayonnement net à partir de la mesure directe du rayonnement solaire. Communication à la première rencontre nationale des climatologues Marocains, Casablanca, 11-13 février, 1992.
- DOORENBOS, J. and KASSAM, A. H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33, Food and Agriculture Organization, Rome, 193 p.
- GARROT, D. J. Jr, RAY, T. D., LIVINGSTON, M., FANGMEIER, D. D. and HUSMAN S. M. 1990. Watermelon field irrigation management using the Crop Water Stress Index. Acta Horticulturae n° 278, p. 755-761.
- IDSO, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines : A key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meteorology, vol. 27, p. 59-70.
- IDSO, S. B., JACKSON, R. D., PINTER, P. J. Jr., REGINATO, R. J. and HATFIELD J. L. 1981. Normalising the stress degree day concept for environmental variability. Agricultural Meteorology, vol. 24, p. 45-55.
- ITIER, B., FLURA, D., BELABBES, K., KOSUTH, P., RANA, G. and FIGUEIREDO L. 1992. Relations between relative evapotranspiration and predawn leaf water potential in soybean grown in several locations. Irrigation Science, vol. 13, p. 109-114.
- JACKSON, R. D., REGINATO, R. J. and IDSO, S. B. 1977. Wheat canopy temperature : a practical tool for evaluating water requirements. Water Resources research, vol. 13, n° 3, p. 651-656.
- JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. and PINTER, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources research, vol. 17, p. 1133-1138.
- LYAMANI, M. 1992. Utilisation de la radiothermométrie IR pour la gestion des apports d'eau d'irrigation : cas de couverts du blé et de la betterave à sucre dans les Doukkala. Mémoire de 3^e cycle Génie rural, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 142 p.
- PINTER, P. J. Jr. and REGINATO, R. J. 1982. A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, vol. 25, n° 3, p. 1651-1655.
- SEGUIN, B. and ITIER, B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. International Journal of Remote Sensing, vol. 4, p. 371-383.

Cartographie de l'occupation du sol et des zones humides par télédétection dans la basse vallée de la Medjerda (Tunisie)

ABDELKADER EL GAROUANI ¹, MOHAMED ENNABLI ² et MOHAMED RACHED BOUSSEMA ¹

¹ *École nationale d'ingénieurs de Tunis, Laboratoire de télédétection et système d'information à référence spatiale, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie; téléphone : +216 (1) 514-700; télécopieur : +216 (1) 510-729; télex : 15 051*

² *Agence nationale de protection de l'environnement (ANPE), 12, avenue Khéreddine Pacha, B.P. 52, 1002 Tunis-Bélvédère, Tunisie; téléphone : +216 (1) 797-559; télécopieur : +216 (1) 789-844; télex : 17 190*

Résumé

L'exploitation des données HRV de SPOT et TM de Landsat a permis de discriminer la répartition des différentes classes d'occupation du sol et des zones humides dans la région de la basse vallée de la Medjerda. Les traitements numériques effectués ont permis d'obtenir une classification dirigée et la délimitation des zones humides par seuillage de l'image TM du 29 octobre 1989. À partir de la photo-interprétation d'une image HRV du 21 juin 1988, il a été possible d'établir une carte d'utilisation du sol et le calcul des surfaces des différentes classes thématiques mises en évidence. L'interprétation des photographies aériennes de 1985 au 1: 80 000 et les missions sur le terrain ont permis d'établir la réalité terrain à laquelle sont confrontés les résultats des traitements d'images et de la photo-interprétation. La précision globale du traitement est de l'ordre de 75,55 %. Les résultats de photo-interprétation ont été validés sur le terrain. L'image HRV a permis de reconnaître 21 principaux types d'occupation du sol. Les traitements automatiques ont permis d'identifier 10 classes thématiques. Enfin le seuillage sur l'histogramme de la bande TM5 discrimine les marécages et les garaets.

1. Introduction

Dans cette étude, nous utilisons l'imagerie satellitaire HRV et TM pour approcher le problème de l'évaluation et la cartographie de l'occupation des sols. Le premier objectif de la recherche est l'analyse des signatures spectrales des différentes entités rencontrées et l'évaluation des possibilités de discrimination entre les différentes entités par les techniques de traitement d'images et de la photo-interprétation. La région étudiée est une vaste plaine alluviale quaternaire caractérisée par la présence d'une nappe phréatique subaffleurante, ce qui entraîne une sensibilité élevée à la salinisation des sols. Elle est équipée par un système de drainage en vue de la mise en culture depuis plusieurs années. En effet, c'est dans le cadre d'un effort de réflexion sur les possibilités d'application de la télédétection en cartographie et pour le classement de l'occupation du sol que s'inscrit ce travail à travers un exemple de la région de la basse vallée de la Medjerda, située au nord de Tunis (fig. 1).

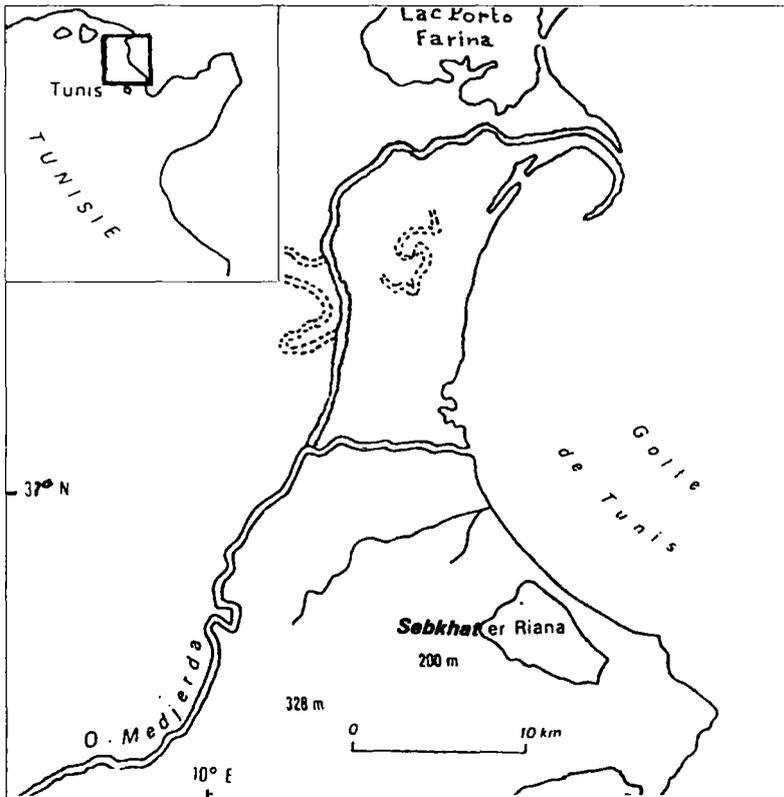


Figure 1. Situation géographique de la région d'étude

2. Matériel et méthode

La méthode consiste à combiner les phases de photo-interprétation, d'observation au sol et de traitement analogique et numérique des images satellitaires (fig. 2). Une image HRV du 21 juin 1988 à la fois sur support photographique au 1: 100 000 et restituée sur imprimante au 1: 50 000, et une image numérique TM du 29 octobre 1989 sont utilisées. Après report des limites des zones humides et des types d'occupation du sol sur calque, la numérisation puis la rastérisation des données saisies à l'aide du logiciel PC ARC/INFO permettent de constituer un document cartographique numérique. Les traitements numériques s'appuient sur une analyse factorielle en composantes principales des images satellitaires, une classification, un seuillage, puis un calcul automatique des surfaces des différentes classes d'occupation du sol et des zones humides. Cette analyse découle des traitements numériques à l'aide du logiciel de traitement d'images IDRISI sur micro-ordinateur équipé d'une carte graphique 32 bits. L'interprétation des photographies aériennes de 1985 au 1: 80 000 et des missions sur le terrain ont permis d'établir la réalité terrain à laquelle sont confrontés les résultats des traitements d'images et de la photo-interprétation.

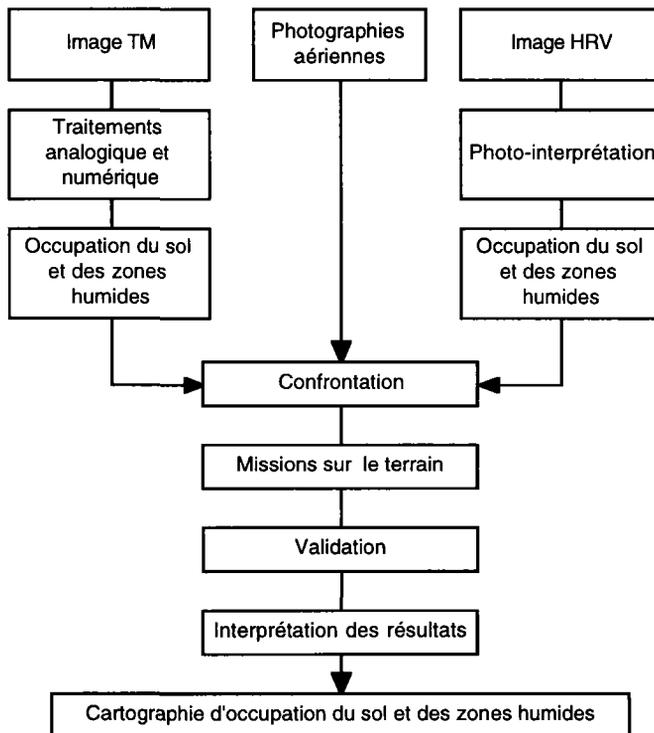


Figure 2. Démarche appliquée

3. Traitement des données TM

3.1. Traitements numériques

Une correction géométrique a été effectuée sur l'image TM pour la ramener au système de représentation cartographique LAMBERT. La méthode de déformation géométrique utilisée repose sur des points repères terrestres (points amers) pour lesquels on connaît les coordonnées dans l'image satellitaire à corriger et ceux dans le document de référence (image HRV corrigée).

Par la suite, plusieurs combinaisons de bandes spectrales et de types de rehaussements des images ont été effectuées pour augmenter le contraste et faciliter l'identification des classes d'occupation du sol. Finalement, la combinaison des bandes spectrales TM4, TM5, et TM3 a été retenue pour l'affichage et la visualisation des classes à l'écran (fig. 14-3, voir cahier couleur). Les traitements numériques sont basés sur la classification des images à partir des zones d'entraînement identifiées à l'aide des missions sur le terrain et d'études antérieures (BOUSSEMA, ROUI et BALAIS, 1988; BOUSSEMA, 1989), et le seuillage. L'opération de la classification consiste à regrouper des objets en fonction d'un ou de plusieurs caractères communs préalablement définis. Dans la classification dirigée, la nature des groupes d'objets est connue, par exemple : forêt, zone urbaine, culture, plan d'eau, etc. Le traitement consistera à reconnaître les pixels qui représentent une signature spectrale connue correspondant aux classes sélectionnées ou, aux classes thématiques. Dans le cas de la classification non dirigée, seules les caractéristiques spectrales des pixels sont connues sans référence à d'éventuelles classes thématiques. C'est après l'opération de classification que l'opérateur s'intéressera à relier les classes. À partir de la visualisation des composantes principales et des zones d'apprentissages numérisées, une classification dirigée par la méthode de distance minimale a été effectuée (fig. 14-4, voir cahier couleur).

Le seuillage est une technique qui permet d'extraire de l'image tous les pixels dont les valeurs radiométriques sont comprises entre deux seuils minimal et maximal (MOKADEM et DAUTREBANDE, 1992). Les zones humides présentent des valeurs radiométriques faibles dans le proche infrarouge (TM5) et le moyen infrarouge (TM7). Il s'agit essentiellement de plans d'eau et de zones marécageuses. Le seuillage appliqué au canal TM5 permet de distinguer deux classes en fonction de l'état de submersion (fig. 14-5, voir cahier couleur).

3.2. Analyse des signatures spectrales des différentes entités

Sur la figure 6, on donne la moyenne des valeurs radiométriques dans les canaux 1, 2, 3, 4, 5 et 7 de TM et ce pour les 10 composantes du paysage identifiées. On constate que la différenciation entre les classes est plus grande dans les canaux 2 et 4, ce qui permet une bonne discrimination. Par contre, dans les autres canaux, les signatures spectrales sont assez proches les unes des autres, ce qui rend assez difficile la classification des zones correspondantes.

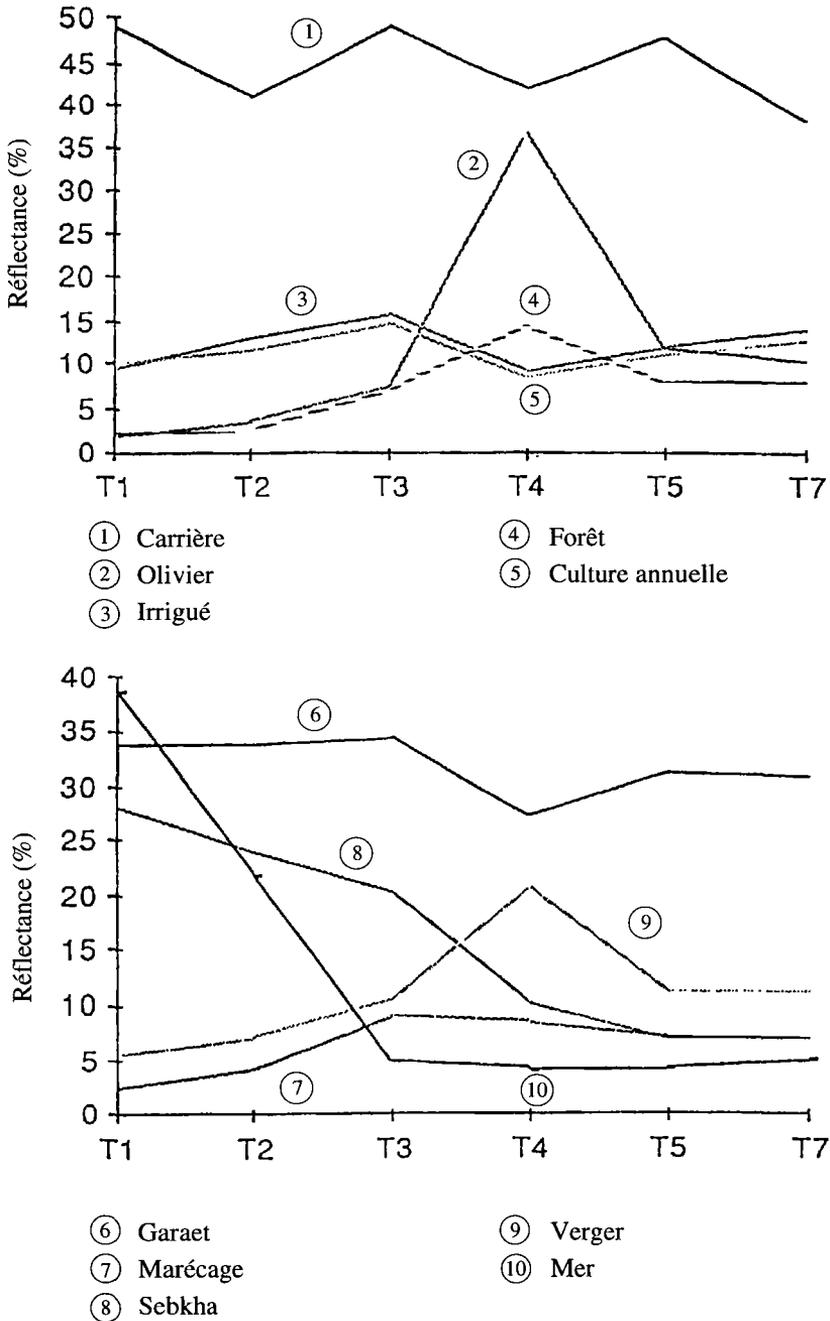


Figure 6. Comparaison des signatures spectrales des différentes entités : moyenne des valeurs radiométriques en fonction des canaux TM

4. Photo-interprétation de l'image HRV

Une image HRV (composition colorée) du 21 juin 1988 a été étudiée. L'image se situe dans le temps à la fin de la saison culturale. Dans les zones humides, les plans d'eau et les marais se réduisent sous l'action de l'évaporation. La récolte des cultures faisant place à des sols nus bien réfléchissants.

L'image utilisée a subi, par le fournisseur, les traitements nécessaires pour produire les images de la photo-interprétation, à savoir : le délignage, la suppression des artefacts, la correction géométrique, le rééchantillonnage, l'amélioration de l'image et la production de l'image au 1: 100 000. La photo-interprétation des images satellitaires est un processus de généralisation avec contrôle itératif (CCE, 1988). La généralisation consiste à :

- délimiter sur l'image «fausses-couleurs» une zone d'occupation du sol;
- identifier cette zone à un poste de la nomenclature (à l'aide soit de clés d'interprétation soit à l'aide des photographies aériennes);
- étendre cette délimitation-identification à l'ensemble des zones de l'image qui présente des caractéristiques voisines (teintes, structures et textures).

Le contrôle itératif consiste à vérifier en permanence les résultats de la généralisation à d'autres informations, par exemple aux photographies aériennes.

Le traitement consiste à délimiter les zones humides et les différentes occupations du sol en se basant sur la teinte, la forme et la taille des unités. Après report des limites des zones humides et des types d'occupation du sol sur calque, la numérisation puis la rasterisation des données saisies permettent de restituer un document cartographique numérique (fig. 14-7, voir cahier couleur). Les surfaces des différents types d'occupation du sol sont portées sur le tableau 1.

5. Résultats

L'évaluation des classifications est à la fois qualitative et quantitative. En effet, une estimation visuelle par comparaison du résultat obtenu à l'aide des photographies aériennes a été jugée suffisante. En plus, les résultats ont été confrontés aux données de terrain afin d'en déduire les pourcentages de reclassements de différentes entités dans leurs propres zones d'occupation. La matrice de confusion entre les thèmes observés sur le terrain et ceux des traitements d'images satellitaires est présentée sur le tableau 2. D'après cette matrice, la confusion est plus importante entre les garaets, les terres arables et les cultures irriguées, car une grande partie des garaets est sèche en été et se confond avec des sols nus. La précision globale du traitement est de l'ordre de 75,55 %. Les résultats de photo-interprétation ont été validés sur le terrain. L'image HRV a permis de reconnaître 21 principaux types d'occupation du sol. Les traitements automatiques ont permis d'identifier 10 classes thématiques. Enfin le seuillage sur l'histogramme de la bande TM5 discrimine les marécages et les garaets.

Tableau 1. Les surfaces des différentes classes thématiques identifiées par photo-interprétation sur l'image HRV du 21-06-1988

Occupation du sol	Surface (km ²)
Zones urbanisées	21,64
Zones industrielles	0,50
Carrières	1,75
Terres arables hors périmètre irrigué	153,12
Terres arables dans le périmètre irrigué	8,17
Terres arables dans les zones de drainage	60,20
Vergers	87,04
Cultures annuelles et permanentes	15,17
Agriculture et végétation naturelle	42,87
Territoire agro-forestier	1,12
Forêt	28,92
Végétation herbacée et/ou arbustive	5,95
Plages	2,69
Garaets	39,76
Sebkhas	36,79
Marécages	9,68
Marais maritimes	27,42
Eau usée	1,02
Lagunes littorales	12,20
Mer	268,74
Oliviers	23,18
TOTAL	847,93

6. Conclusion

L'étude entreprise vise à mettre en valeur les possibilités offertes par la télédétection en vue de la cartographie de l'utilisation du sol et des zones humides dont la représentation spatiale peut être utilisée comme indicateur de l'hydrologie de surface au niveau d'un bassin versant. L'utilisation de la carte d'occupation du sol facilite également le choix d'emplacements de nouvelles surfaces d'aménagement en vue d'une meilleure exploitation des terres et d'orienter les communautés rurales vers les activités qui leur conviennent.

Ces résultats ne sont qu'une première étape en vue de l'utilisation des données satellitaires. Ils nous ont permis d'établir une carte d'occupation du sol et d'en déduire la rugosité de surface. En se basant sur ces résultats, ces travaux se poursuivront par l'application des données AVHRR de NOAA pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle.

Tableau 2. Matrice de confusion sur les principales composantes de la zone étudiée pour la classification dirigée de l'image TM du 29 octobre 1989; en colonne, l'échantillonnage de terrain et en ligne, les résultats de traitement

	Mer	Gar.	Mar.	Sebk.	Verg.	Oliv.	Car.	For.	Irr.	Ar.	Total
Mer	534	0	0	0	0	0	0	0	0	0	534
Garaet	0	312	0	0	9	0	0	0	1	0	322
Marécage	0	0	162	0	0	2	0	43	10	27	244
Sebkha	0	11	3	126	6	0	0	0	10	1	157
Verger	0	0	0	0	122	0	0	12	0	0	134
Olivier	0	0	0	0	0	58	0	0	0	0	58
Carrière	0	0	0	0	5	8	62	4	0	0	79
Forêt	0	0	0	0	56	0	0	132	0	0	188
Irriguée	0	0	2	0	0	0	0	0	95	69	166
Arable	0	201	13	15	44	0	0	1	54	273	601
Total	534	524	180	141	242	68	62	192	170	370	1876

7. Références

- BOUSSEMA, M. R., ROUI, B. et BALAIS, J. L. 1988. Analyse par télédétection de l'hydrographie de la région de Tunis (Tunisie). Photo-interprétation, n° 88-6, p. 11-18.
- BOUSSEMA, M. R. 1989. Intégration de données multisources pour l'étude du système hydrographique du delta de la Médjerda et de la sebkhet er Riana. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 29-34.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES (CEE). 1988. Projet Corine Land Cover. Guide technique. Première partie. Direction générale de l'environnement, la sécurité nucléaire et la protection civile, Bruxelles, Belgique, 200 p.
- MOKADEM, A. et DAUTREBANDE S. 1992. Application de la télédétection à l'agrohydrologie. Cas d'étude sur la submersion et l'engorgement des sols. MARISY'92, Rabat, Maroc, p. 129-142.

15

Évaluation de la consommation d'eau d'un espace irrigué par interprétation d'images satellitaires : cas de la vallée du Taje (centre de l'Espagne)

JAVIER GARCÍA-ABAD, JOSÉ SANCHO et FERNANDO MORENO

*Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, C/ Colegios, 2,
28801 Alcalá de Henares, Espagne;*

téléphone : +34 (1) 885-44-29; télécopieur : +34 (1) 885-44-00

Résumé

Cet article fait une évaluation de l'analyse visuelle d'images, obtenues depuis des plateformes spatiales et associées à d'autres données géographiques, de l'impact des ressources hydriques sur le secteur agricole. On choisit une zone pilote dans la vallée du Taje (secteur d'Almoguera-Fuentidueña de Tajo), zone de transition évidente au climat semi-aride. L'irrigation est nécessaire là où les pluies ne sont pas suffisantes pour satisfaire les besoins des cultures. Là, où la ressource eau est plus accessible, tout près du Taje, on a installé une infrastructure d'irrigation au moyen de petits barrages et des aspersoirs modernes. En dernier lieu, on a fait une évaluation des besoins en eau pour l'irrigation, selon les différents espaces cultivés. Finalement, on estime la consommation absolue d'eau pour l'orge, la luzerne et le maïs respectivement à 32 dam³, 893 dam³ et 11 338 dam³.

1. Introduction

Comme il est bien connu, l'eau est une ressource précieuse et primée dans les pays semi-arides. Les rivages de la mer Méditerranée souffrent de la sécheresse à certaines périodes

de l'année, spécialement en été, où il n'est pas rare de voir celle-ci prolonger son action durant plusieurs années. La rareté et l'irrégularité des pluies sont des constantes. À cela s'ajoutent les hautes valeurs thermiques; cette condition favorise spécialement le développement végétatif des plantes à condition que celles-ci puissent satisfaire leurs besoins en consommation d'eau. L'irrigation se convertit ainsi en facteur clé du système agraire dans les espaces irrigués sur lesquels les rendements se multiplient par rapport aux terrains non irrigués.

Cependant, les pays de la Communauté européenne vivent aujourd'hui des moments d'incertitude. Paradoxalement, la surproduction d'aliments crée de graves problèmes : les directives qui émanent de la Politique agraire commune encouragent à faire des usages agraires du sol moins intensifs; les impacts sur l'environnement dont souffrent les espaces soumis à une forte pression, déconseillent le maintien de systèmes aussi agressifs. Dans le cas de l'Espagne, avec plus de trois millions d'hectares irrigués (17 % des terres labourées), un plan hydraulique à instaurer peut rendre possible l'augmentation des terrains irrigués de façon très importante. L'administration correcte d'un bien rare, comme l'eau, n'est pas facile à cause des multiples intérêts qu'il suscite, mais il est tout à fait nécessaire d'utiliser correctement les investissements et d'éviter ainsi l'augmentation des problèmes dans la campagne espagnole.

Nous avons évalué la consommation d'eau d'un espace irrigué à l'intérieur de l'Espagne. Sur les basses terrasses de la vallée du Taje, s'est développée une bordure de terrains irrigués qui accompagne le cours fluvial depuis son entrée dans la plaine du plateau central espagnol jusqu'à la frontière portugaise. À mi-parcours du Taje, entre Almodovar et Fuentidueña (provinces de Guadala-jara et Madrid), les terrains non irrigués et les terrains irrigués forment un paysage qui appartient à la plus fidèle tradition méditerranéenne (fig. 1).

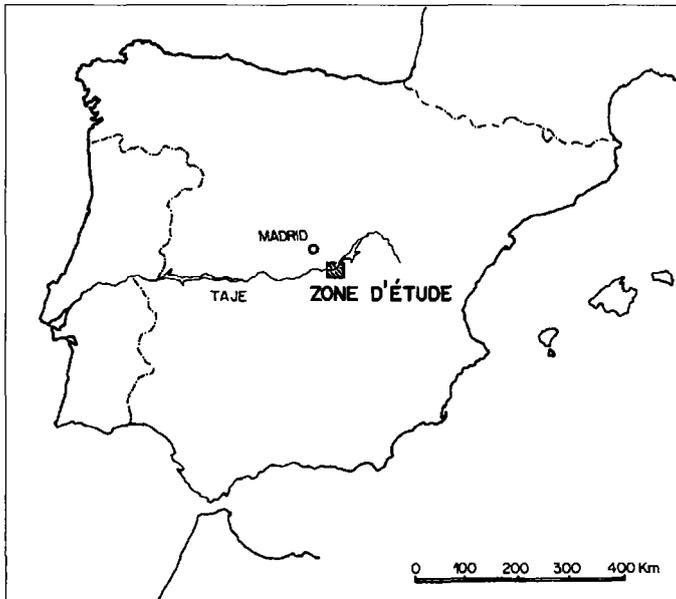


Figure 1. Carte de localisation

2. Méthodologie

L'évaluation des ressources hydrauliques consommées s'appuie sur une méthode indirecte : la reconnaissance des espaces irrigués à partir de la télédétection et de son utilisation spécifiquement par des espaces cultivés avec l'aide des travaux des champs.

La première démarche a consisté à cartographier l'occupation du sol à partir de renseignements fournis par les images satellitaires. Concrètement, tout a reposé sur les images corrigées géométriquement à l'échelle du 1: 100 000, obtenues par le satellite Landsat-5 à deux dates différentes, le 7 mai et le 4 août 1987. Le travail a été effectué au sein du projet CORINE Land Cover dans le cadre du Programme CORINE de la Communauté européenne (SANCHO, 1988-1989). Les objectifs de ce programme sont clairs : recueillir une information relative à l'environnement sur certains thèmes prioritaires, et organiser cette information depuis une gestion coordonnée au niveau de la Communauté européenne et garantir la cohérence et sa compatibilité avec les renseignements. L'un des aspects clés du point de vue méthodologique, c'est la légende de l'occupation du sol que l'on doit utiliser dans le procédé d'analyse d'images. Celle-ci doit réunir certaines conditions : tout l'espace doit être cartographié, les objectifs sur l'environnement satisfaits, la terminologie dépourvue d'ambiguïtés et les types d'occupation encadrés logiquement dans un organigramme.

La carte d'occupation du sol que nous présentons et sur laquelle apparaissent clairement les espaces irrigués susceptibles de faire l'objet d'analyse, a été obtenue du document final cartographique à l'échelle du 1: 100 000 qui a été élaboré dans le cadre du projet CORINE Land Cover. Dans ce cas-ci, quelques occupations ont souffert l'agrégation (zones résidentielles, vignobles et oliveraies, garrigues, landes et systèmes agro-forestiers, etc.). L'application des techniques de télédétection à la cartographie de l'occupation du sol a été positive mais il n'est pas inutile de rappeler quelques-unes des expériences.

En ce qui concerne le document de base (image TM et informations auxiliaires) :

- on exige une qualité excellente;
- la date d'obtention la plus adéquate est l'été, bien qu'il est souhaitable d'avoir une autre image de printemps;
- la documentation auxiliaire devient indispensable, notamment la photographie aérienne.

En ce qui concerne la légende :

- d'une manière générale, un haut degré d'exigence est nécessaire; au niveau de la Communauté il y a 44 rubriques différenciées et il faut en ajouter 20 de plus pour l'Espagne;
- bien qu'on ait toujours insisté sur le fait que la légende doive s'appuyer sur des critères d'occupation et non d'utilisation du sol, quelques nuances pouvant prêter à confusion persistent cependant dans ce domaine (systèmes agro-forestiers, landes et pâturages);
- parfois dans certaines occasions, au critère strict d'occupation, se sont superposés d'autres critères comme l'association végétale lande/garrigue ou la situation prairie/prairie supra-forestière;
- en marge des considérations générales dont il a été question le problème authentique réside dans les seuils de séparation entre des classes similaires, il faut aussi signaler la difficulté à identifier avec certitude certains types d'occupation;
- l'irrigation s'étend au-delà des périmètres avec une infrastructure permanente; dans notre cas, il y a lieu de signaler les aspersoirs qui peuvent rendre mobile l'espace susceptible de recevoir de l'eau.

3. Cadre naturel

La zone pilote choisie est un territoire qui se situe dans une zone de transition entre les climats sub-humides et semi-arides à l'intérieur de l'Espagne (GARCIA DE PEDRAZA, 1989). Cette zone se trouve sur la bordure méridionale d'Alcarria, région physiographique qui appartient à la cuvette sédimentaire de la Dépression du Taje. L'Alcarria est un plateau topographiquement élevé sur les parties les plus basses de cette cuvette, formées par des vallées étroites et encaissées (plaines fertiles) et d'autres parfois plus larges (vallée du Taje) avec des dénivellations qui oscillent entre 200 et 300 m.

Les principaux affleurements lithologiques (calcaire, gypses, anhydrites et marnes) contribuent à former un modelage karstique qui réduit considérablement l'écoulement superficiel des eaux de pluie (NICOD, 1976). Les ressources en eaux souterraines sont très pauvres à l'intérieur du plateau.

Les régosols et les cambisols sont prédominants, mais il est très habituel de rencontrer des luvisols, là où il reste encore des calcaires et des argiles mélangés, ainsi que des litosols dans des espaces marginaux et escarpés. C'est seulement dans le fond alluvial des plaines fertiles et de vallées que l'on peut trouver des fluvisols, sols de plus grand intérêt et de plus grand rendement agricole, qui occupent les espaces réduits des plaines d'inondation (JIMENO y GONZALEZ, 1987).

Les données climatiques de la vallée du Taje nous indiquent des conditions extrêmes dans son régime thermique, car la situation dans le centre de la péninsule Ibérique dote cette zone d'un indice important de continentalité (indice de Gorczynski = 20,4, selon GARCIA-ABAD, 1993). Nous présentons sur le tableau 1 les données climatiques de base des deux stations thermopluviométriques les plus proches de la zone d'étude : Salto de Zorita et Salto de Almoguera.

Quant aux précipitations, elles se trouvent autour des 400 mm. On observe une importante sécheresse estivale. À l'irrégularité saisonnière, il faut ajouter une variabilité interannuelle des précipitations de 25 %. Avec cela, l'évapotranspiration potentielle atteint des valeurs supérieures à 750 mm, ce qui implique un déficit d'eau annuel à Salto de Almoguera pour un climat déjà pratiquement semi-aride. L'indice d'aridité de Martonne (entre 16,7 et 18,1) situe la zone d'étude dans la zone de transition entre le désert et l'excès d'écoulement, avec des écoulements temporaires (HERAS, 1976), ce qui rend nécessaire l'arrosage artificiel pour les cultures agricoles. Tenant en compte tous ces facteurs, l'unique recours hydrique capable de pourvoir de façon adéquate aux besoins pour l'approvisionnement humain et agricole est l'apport en eau du fleuve Taje.

Pour le fleuve Taje, à la station de jaugeage de Salto de Almoguera, on a enregistré un débit moyen de 14,6 m³/s durant l'année hydrologique 1986-1987, ce qui suppose un apport total de 458,2 hm³. Vingt kilomètres en aval de la zone d'étude, une autre station, celle de Villarrubia de Santiago, a enregistré cette même année un débit moyen de 11,9 m³/s, ce qui suppose un apport total à ce point de 373,1 hm³ d'eau.

4. Occupation du sol

Les images nous montrent un espace clairement différencié entre les terrains non irrigués et les terrains irrigués. Ce contraste est plus accentué sur l'image d'août, époque où les cultures d'été requièrent un plus grand apport d'eau d'arrosage. Mais, avant cela, il y a lieu de distinguer les autres types d'occupation du sol, comme le reflète la légende de la carte

Tableau 1. Données climatiques de base (période 1971-1992)

Paramètres	Salto de Almoguera	Salto de Zorita
Température moyenne annuelle	13,5 °C	14,3 °C
Température moyenne mensuelle (juillet)	24,1 °C	24,7 °C
Température moyenne mensuelle (janvier)	4,4 °C	5,4 °C
Moyenne des températures moyennes maximales (annuel)	21,3 °C	22,0 °C
Moyenne des températures moyennes maximales (juillet)	33,9 °C	34,4 °C
Moyenne des températures moyennes minimales (annuel)	5,9 °C	6,6 °C
Moyenne des températures moyennes maximales (janvier)	-1,6 °C	-0,8 °C
Nombre de jours/an avec gelée	88,1	79,5
Précipitations moyennes annuelles	393 mm ± 100	439 mm ± 111
Précipitations (printemps)	28,7 %	29,3 %
Précipitations (été)	14,3 %	14,4 %
Précipitations (automne)	29,4 %	29,2 %
Précipitations (hiver)	27,6 %	27,1 %
Nombre de jours/an avec de la pluie	70	72
Évapotranspiration potentielle	760 mm	778 mm
Évapotranspiration réelle	393 mm	432 mm
Excédent d'eau	0 mm	7 mm

(fig. 2). D'abord, il existe un espace résidentiel face à un espace agricole. Dans ce cas, aux petits noyaux de population, il faut ajouter l'installation de résidences secondaires durant la décennie des années 70. Sa localisation, de préférence aux approches du fleuve Taje, répond clairement à la nécessité d'approvisionnement en eau, moins accessible et plus coûteuse à l'intérieur de l'Alcarria. Dans la légende originale du projet CORINE Land Cover, on distingue un tissu urbain continu, qui correspondrait à ces petits emplacements de population, et un tissu urbain discontinu relatif à l'urbanisation (tab. 2). Dans notre cas, dans le but de simplifier la légende, nous avons regroupé les deux catégories.

D'autre part, les espaces agricoles peuvent se différencier en espaces forestiers et agricoles. Dans la légende, apparaissent d'un côté des zones boisées qui regroupent les catégories originales du CORINE Land Cover (conifères et feuillus) : elles occupent une étendue très réduite à cause de l'intense utilisation pour l'agriculture et pour le bétail, imposée par l'homme, et seules de petites zones ont été repeuplées de pins. D'un autre côté, les zones de landes, dans leurs différentes strates arborescentes, arbustives et subarbustives, occupent de plus grandes extensions; leur utilisation actuelle est la chasse et, dans une moindre mesure, le pâturage. De nos jours, on observe une légère tendance à

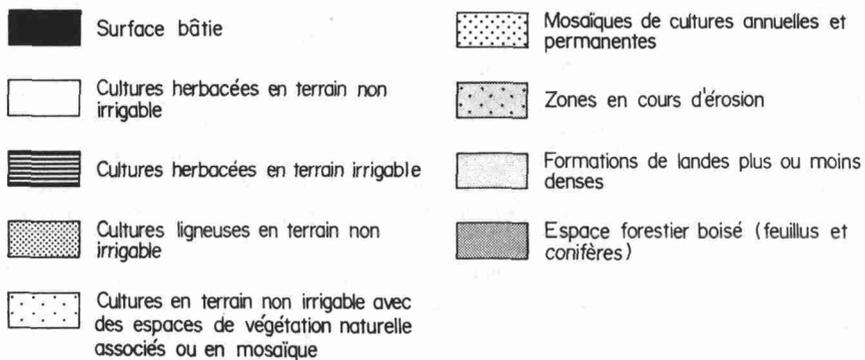
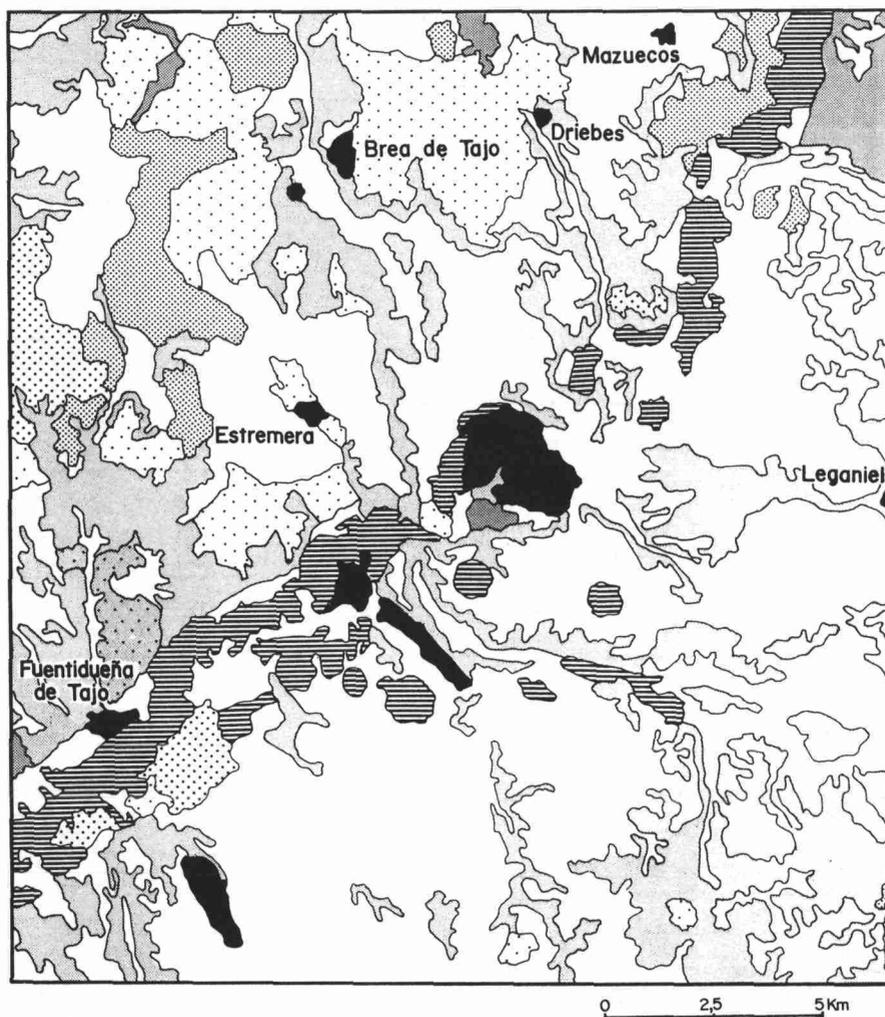


Figure 2. Croquis d'occupation du sol

Tableau 2. Nomenclature de la légende du projet CORINE Land Cover

NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3
1. Territoires artificialisés	1.1. Zones urbanisées 1.2. Zones industrielles, commerciales et réseaux de communication 1.3. Mines, décharges et chantiers 1.4. Espaces verts artificialisés, non agricoles	1.1.1. Tissu urbain continu 1.1.2. Tissu urbain discontinu 1.2.1. Zones industrielles ou commerciales 1.2.2. Réseau routier et ferroviaire, et espaces associés 1.2.3. Zones portuaires 1.2.4. Aéroports 1.3.1. Extraction de matériaux 1.3.2. Décharges 1.3.3. Chantiers 1.4.1. Espaces verts urbains 1.4.2. Équipements sportifs et de loisirs
2. Territoires agricoles	2.1. Terres arables 2.2. Cultures permanentes 2.3. Prairies 2.4. Zones agricoles hétérogènes	2.1.1. Terres arables hors périmètres d'irrigation 2.1.2. Périmètres irrigués en permanence 2.1.3. Rizières 2.2.1. Vignobles 2.2.2. Vergers et petits fruits 2.2.3. Oliveraies 2.3.1. Prairies 2.4.1. Cultures annuelles associées aux cultures permanentes 2.4.2. Systèmes culturaux et parcellaires complexes 2.4.3. Territoires principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation naturelle importante 2.4.4. Territoires agro-forestiers
3. Forêts et milieux semi-naturels	3.1. Forêts 3.2. Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée 3.3. Espaces ouverts sans ou avec peu de végétation	3.1.1. Forêts de feuillus 3.1.2. Forêts de conifères 3.1.3. Forêts mélangées 3.2.1. Pelouses et pâturages naturels 3.2.2. Landes et broussailles 3.2.3. Végétations sclérophyles 3.2.4. Forêts et végétation arbustive en mutation 3.3.1. Plages, dunes, sable 3.3.2. Roches nues 3.3.3. Végétation clairsemée 3.3.4. Zones incendiées 3.3.5. Glaciers et neiges éternelles
4. Zones humides	4.1. Zones humides intérieures 4.2. Zones humides maritimes	4.1.1. Marais intérieurs 4.1.2. Tourbières 4.2.1. Marais maritimes 4.2.2. Marais salants 4.2.3. Zones intertidales
5. Plans d'eau	5.1. Eaux continentales 5.2. Eaux maritimes	5.1.1. Cours et voies d'eau 5.1.2. Plans d'eau 5.2.1. Lagunes littorales 5.2.2. Estuaires 5.2.3. Mer et océan

la régénération progressive de ces zones de végétation du fait de la diminution du cours des dernières années de l'activité du bétail.

Finalement, dans la zone agricole, on observe l'opposition terrains irrigués–terrains non irrigués. Les cultures en terrains non irrigués, autant herbacées (céréales) que ligneuses (oliveraies et, dans une moindre proportion, les arbres fruitiers et les vignobles) se disposent sur le territoire de façon complexe. Parfois, elles se présentent de façon isolée et d'autres fois en mosaïque ou avec de petites zones de végétation naturelle ou, encore, associées à l'un ou l'autre type d'occupation. Dans l'un de ces cas, il apparaît un pâturage comme un système agroforestier, qui consiste en la coexistence sur le même espace de cultures herbacées et d'arbres isolés. L'utilisation d'autres données géographiques, principalement les photographies aériennes, nous a permis d'ébaucher le tableau suivant de l'évolution de l'occupation du sol au cours des trois dernières décades :

- l'oliveraie maintient, de façon approximative, les mêmes zones d'occupation, bien qu'au cours des dernières années, il existe une tendance à cesser de labourer certaines de ces terres;

- les vignobles ont toujours occupé de minuscules parcelles distribuées de façon aléatoire à travers les cultures pour l'auto-consommation;

- les cultures herbacées sur la rive du Taje se sont multipliées par deux au cours de ces trois décades; aux années 50 et 60, le type d'irrigation communément employé était le système à pied, facilité par une infrastructure de canaux et la construction des réservoirs d'Almoguera et d'Estremera. Postérieurement, l'introduction et la généralisation de nouveaux systèmes d'irrigation, où les pivots sont les techniques fondamentales, ont permis une augmentation remarquable de la surface irrigable.

Dans la légende définitive, on montre neuf catégories d'occupation du sol (fig. 2) où se sont regroupées les quinze catégories originales du projet CORINE. La correspondance entre les deux légendes est présentée au tableau 3.

5. La consommation d'eau des terrains irrigués

Une fois obtenue la carte d'occupation du sol, on aboutit à la planimétrie des espaces irrigués. Dans la zone d'étude, on localise 2 797 ha irrigués; presque tous reçoivent l'arrosage par aspersion; l'irrigation à pied est réduite aux petits potagers existants sur la plaine d'inondation. Nous avons réalisé, par conséquent, les calculs sur l'hypothèse de la dominance de plus de 95 % du système d'aspersoirs.

La dotation annuelle pour l'arrosage dans la zone d'étude, pour une précipitation moyenne annuelle de 400-450 mm, prend des valeurs maximales de 7 000 m³/ha pour la luzerne, de 6 000 m³/ha pour le maïs et 400 m³/ha pour l'orge. Le maïs est la culture dominante, couvrant approximativement 85 % de la zone irriguée. Il faut tenir compte que, dans plus de 90 % des cas, l'irrigation sur le terrain irrigable se fait par aspersion, une circonstance qui altère l'efficacité de la dépense hydrique jusqu'à la situer autour de 85 %, dix points de plus que s'il s'agissait de l'arrosage à pied. Nos calculs, pourtant, se basent sur l'hypothèse du système d'aspersion.

Cela vaut la peine de mener l'analyse au niveau mensuel pour remarquer les moments de demande maximale et effectuer ainsi les travaux de régulation adéquats. D'abord, nous avons calculé à partir de la méthode Blaney-Criddle (HERAS, 1976) l'évapotranspiration potentielle pour les cultures signalées (tab. 4). Sur le tableau 5, on présente les précipitations moyennes mensuelles.

Tableau 3. Correspondance entre les deux légendes : la légende définitive et la légende originale (projet CORINE Land Cover)

Légende définitive	Légende originale (CORINE Land Cover)
Surface bâtie	Tissu urbain continu
	Tissu urbain discontinu
Cultures herbacées en terrain non irrigable	Cultures herbacées en terrain non irrigable
Cultures herbacées en terrain irrigable	Cultures herbacées en terrain irrigable
Cultures ligneuses en terrain non irrigable	Oliveraie
	Vignoble
Cultures en terrain non irrigable avec des espaces de végétation naturelle associés ou en mosaïque	Cultures de terrain non irrigable en mosaïque avec une végétation naturelle
	Systèmes agro-forestiers
Mosaïques de cultures annuelles et permanentes	Mosaïques de cultures annuelles et permanentes
Zones en processus d'érosion	Zones en processus d'érosion
Formations de végétation sclérophyle	Formations de garriges denses ou moyennement denses
	Buisson subarbusier ou arbustier peu dense
	Lande boisé de transition
Espace forestier (feuillus et conifères)	Chêne vert et rouvre
	Conifères

Tableau 4. Évapotranspiration potentielle (mm)

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Luzerne	80	95	120	135	155	140	115	90	70	1 000
Mais				130	145	130	110	85		600
Orge	75								65	140

Tableau 5. Précipitations moyennes mensuelles (mm)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
(mm)	35	40	45	60	40	20	15	15	20	35	45	40	410

Durant la période automne-hiver-printemps, la réserve d'eau dans le sol se reconstitue, atteignant les 100 mm qui, à partir de mars, se réduiront par le déficit produit entre les besoins des cultures et les faibles précipitations. Les besoins nets à fournir par l'arrosage apparaissent au tableau 6.

La transformation de ces données en consommation absolue pour la zone d'étude a été réalisée en rapportant ces données à l'extension des zones d'irrigation (tab. 7).

Tableau 6. Besoins nets par arrosage (mm)

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Luzerne	50	115	140	125	95	55	25	555
Maïs		30	130	115	90	50		415
Orge							20	20

Tableau 7. Consommation absolue d'eau par arrosage (dam³)

	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Luzerne	79,8	184,8	225,4	201,6	152,6	88,2	50,4	893,2
Maïs		808,2	3 565,5	3 137,7	2 448,0	1 379,0		11 338,0
Orge							32,2	32,2

6. Conclusion

L'évaluation effectuée a le grand avantage de disposer d'une technologie, la télédétection, qui, avec la rapidité et la périodicité désirée, peut offrir des données très actualisées sur des aspects d'importance vitale dans les pays semi-arides comme la consommation d'eau par l'irrigation. En plus, le traitement numérique des images pourrait aider à maintenir à jour la couverture des plantes, des terrains irrigués et, par conséquent, la précision du bilan hydrique.

7. Références

- GARCIA DE PEDRAZA, L., 1989. Climas de transición al árido. Climas áridos, dominios áridos y semiáridos en España in Zonas Aridas en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, p. 45-63.
- GARCIA-ABAD, J. J. 1993. El interfluvio Tajo-Tajuña en el sector de Yebra, Mondéjar y Mancomunidad de Almodovar : un estudio del medio físico. Thèse de doctorat. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares. 3 tomos, 926 p.
- HERAS, R. 1976. Hidrología y recursos hidráulicos. Dirección General de Obras Hidráulicas, 2 tomos, Madrid, 1580 p.
- JIMENO, L. y GONZALEZ, R. (dir.), 1987. La fertilidad de los suelos de mayor interés agrícola de la provincia de Guadalajara. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Madrid, 290 p.
- NICOD, J., 1976. Karsts des gypses et des évaporites associées. Annales de géographie, 471, vol. 85, p. 513-554.
- SANCHO, J., 1988-1989. El proyecto CORINE LAND COVER. Boletín de la Real Sociedad Geográfica, tomo CXXIV-CXXV, Madrid, p. 261-268.

16

Caractérisation du comportement hydrique des sols dans un couloir fluvial à l'aide de données multidates TM de Landsat : vallée de la Garonne (France)

ÉTIENNE MULLER et MAGALI JAMES

*Centre d'écologie des ressources renouvelables (CERR), Unité propre de recherche n° 8211 du Centre national de la recherche scientifique (CNRS),
29, rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse cedex, France;
téléphone : +33 61-25-40-87; télécopieur : +33 61-55-05-55*

Résumé

L'objectif de cette étude était de voir si des données multidates TM permettaient de caractériser le comportement hydrique des sols dans le couloir fluvial garonnais. Treize images ont été utilisées dont huit de la même année. Les réponses spectrales des unités morpho-hydrogéologiques, déjà cartographiées au 1:25 000 avec des méthodes conventionnelles, se sont montrées toujours très proches sur les terrasses et dans la plaine alluviale, et n'ont pas pu être corrélées à l'humidité des sols mesurée simultanément à l'acquisition d'une image en 1992. Les essais de classifications sont restés peu satisfaisants dans l'ensemble. Cependant, entre les terrasses et la plaine d'inondation, et entre certains secteurs de la plaine, il existe des contrastes spectraux assez stables dans le temps. Une nouvelle typologie du couloir fluvial a alors été définie en s'appuyant sur quatre catégories de sols, où dominant un ou deux éléments texturaux et qui présentent des comportements hydriques très typés. Cette typologie a permis de classer le corridor fluvial et de révéler la structure qui existe dans le paysage, au niveau des sols. Les classifications ont été effectuées à partir d'images composites multidates obtenues par incrustation successive des pixels de sols nus avec un calage radiométrique des données.

1. Introduction

Les réponses spectrales des sols résultent d'interactions multiples entre des facteurs intrinsèques assez stables, comme les teneurs en argiles, limons, sables et matières organiques (HOVIS, 1966; HOFFER and JOHANNSEN, 1969; CONDIT, 1970; STONER and BAUMGARDNER, 1981), et d'autres plus variables, comme l'humidité (BOWERS and SMITH, 1972; LINDBERG and SNYDER, 1972; PROST *et al.*, 1983), la couleur (ESCADAFAL *et al.*, 1989), la structure et la rugosité de surface (COURAULT, 1989; BOISSARD *et al.*, 1989). L'extraction de chacun de ces paramètres est souvent difficile, en particulier l'humidité des sols dont la mesure sur le terrain ou en laboratoire peut prêter à confusion (FOODY, 1991). Il n'existe semble-t-il pas d'étude montrant l'existence de corrélations fiables entre les réponses spectrales des sols observées par satellite et leur humidité, ce qui rend assez difficile la cartographie de vallées fluviales par télédétection malgré des résultats intéressants obtenus avec des données SPOT (TRAUTMAN, 1991) et TM de Landsat (GARGUET-DUPORT et GIREL, 1993; VOGT and LENCO, 1993). Nous nous proposons donc de suivre ici une approche plus qualitative de l'humidité des sols dans le couloir fluvial garonnais.

La vallée de la Garonne, à l'aval de Toulouse et jusqu'à la confluence avec le Tarn, comprend une série de terrasses étagées d'âge quaternaire et une plaine d'inondation toujours active d'environ 3 km de large. Dans le couloir fluvial, les dépôts sont quasi-horizontaux avec une pente longitudinale de 0,08 % sur près de 50 km. Le signal n'est donc pas perturbé par des effets topographiques. Cette zone présente l'un des plus faibles taux de boisement de France et une forte emprise agricole avec un grand parcellaire, ce qui est favorable à une étude des sols par télédétection.

Notre objectif était de voir si les données TM permettaient de caractériser le comportement hydrique des sols dans ce paysage fluvial. Deux approches complémentaires ont été retenues. D'une part, nous avons voulu vérifier si les principales unités morpho-hydrogéologiques qui avaient été cartographiées au 1:25 000 par des méthodes conventionnelles (LAMBERT, 1988), présentaient des caractéristiques texturales, hydriques et spectrales homogènes susceptibles d'être identifiées dans les images. Ce premier travail portait sur six classes d'alluvions (trois sur les terrasses et trois dans la plaine d'inondation). D'autre part, nous avons cherché à identifier des structures spectrales stables dans le paysage, en espérant que de telles structures révéleraient des caractéristiques texturales et des comportements hydriques cohérents susceptibles d'être expliqués *a posteriori*. De la confrontation de ces deux approches, nous espérons pouvoir définir une typologie du couloir fluvial basée sur les caractéristiques hydriques des sols.

2. Méthode

2.1. Acquisition et traitement des données TM

La zone d'étude a été choisie dans la bande de recouvrement de deux traces d'images TM, afin de doubler les chances d'obtenir des images de bonne qualité. Quelques 13 images ont été analysées sur une période allant de 1985 à 1992, dont 8 images en 1987. Ces données ont été acquises sous forme de mini-scènes de 45 km x 45 km. Les 13 images ont été superposées géométriquement avec une précision moyenne proche du demi-pixel sur un système Multiscope. Pour une comparaison absolue des données issues de cette série

temporelle, il était nécessaire de normaliser les comptes numériques entre eux. L'efficacité de la transformation en réflectance dépend de la précision avec laquelle sont connus les coefficients de calibration absolue et les paramètres atmosphériques. En fait, ces coefficients ne sont connus qu'approximativement et les seuls paramètres atmosphériques disponibles étaient des visibilité horizontales évaluées dans les deux grands aéroports de la région. L'incertitude sur les données en réflectance était donc importante.

C'est pourquoi une méthode de calage radiométrique a été préférée (MULLER, 1993). Avec cette méthode, on considère que la moyenne et l'écart-type d'un ensemble varié d'objets radiométriquement invariants (ou considérés comme tels) restent stables dans le temps. Le calage consiste alors à ajuster les histogrammes des objets pseudo-invariants sur ceux d'une image choisie comme référence. Les données calées sont ensuite transformées en réflectance puis corrigées des effets atmosphériques avec le modèle 5S (TANRÉ *et al.*, 1986) en appliquant les coefficients de calibration (HILL and AIFADOUPOULOU, 1991) et les paramètres atmosphériques correspondant à l'image choisie comme référence (2 mai 1987). On dispose ainsi de données multidates exprimées soit en comptes numériques calés, soit en réflectances calées, ce qui évite les imprécisions de la calibration absolue seule.

2.2. Extraction des données spectrales sur les sols nus

Au cours de l'ère quaternaire, la Garonne mit en place des terrasses successives, étagées les unes par rapport aux autres, les plus anciennes étant les plus hautes, les plus récentes les plus basses. LAMBERT (1988) distingue, par ordre d'âge décroissant, 6 unités géomorphologiques, trois sur les terrasses (Pléistocène) et trois dans la plaine d'inondation (Holocène) :

- FW : terrasse Mindel;
- FX : terrasse Riss, subdivisée en FX1 (ancienne) et FX2 (plus récente);
- FY : terrasse Würm (non visible dans la zone d'étude);
- FZ1 : plaine d'inondation exceptionnelle (ou hauteure), $f < 0,01$;
- FZ2 : plaine d'inondation décennale (ou bassure), $f < 0,1$;
- FZ3 : plaine d'inondation saisonnière (ou lit majeur actif) avec une fréquence d'inondation, $f < 1$.

La période favorable pour observer les sols nus s'étend de novembre à juin sur les parcelles prévues pour recevoir les cultures de printemps qui dominent. Ces cultures sont semées en avril ou en mai et récoltées de septembre à novembre. Les cultures d'hiver sont semées en novembre et récoltées en juillet ou en août. Dans chacune des 6 unités de sols alluviaux, ont été tracées 62 parcelles d'entraînement de 3×3 pixels, soit l'équivalent de 50 hectares (sauf dans FZ3, où les boisements riverains dominent et où les sols nus sont donc peu fréquents; le nombre de parcelles a dû y être limité à 17). La sélection de ces parcelles a été faite après des seuillages sur les indices de végétation. Les images de juillet à septembre ont été analysées malgré l'absence de sols véritablement nus afin de vérifier si des différences entre les sols pouvaient s'exprimer par des différences dans les pratiques culturales ou dans le comportement de la végétation.

2.3. Réalisation de profils texturaux et hydriques

Des analyses de sols disponibles ont été dépouillées sur une soixantaine de sites. Des échantillons supplémentaires ont été prélevés (tous les 25 cm jusqu'à 1 m de profondeur)

sur 13 sites afin de mieux tenir compte des 6 unités morpho-hydrogéologiques précédemment définies. Comme il n'était pas possible de disposer de contrôles de terrain réalisés simultanément à ces images d'archives, nous avons admis que les sols devaient conserver des comportements hydriques cohérents d'une année à l'autre. Nous avons alors suivi leur comportement hydrique sur les 13 sites au cours d'une campagne de mesures de février à mai 1992. Sur chaque site, les humidités pondérales ont été mesurées tous les 10 jours à 5 niveaux de profondeur (0 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm), avec deux répétitions par sites (soit en tout 130 prélèvements à chaque date). Le 6 mai 1992, lors d'une prise d'image TM, ces mesures n'ont été effectuées qu'en surface, en portant le nombre d'échantillons à 5 par site au lieu de 2.

Les humidités pondérales ont été déterminées à partir d'échantillons de 400 à 500 g de sol, pesés humides (Ph) puis secs (Ps) après un passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 h. Les humidités pondérales (exprimées en % du poids de sol sec) ont été calculées par la formule :

$$H_p = 100 (Ph - Ps) / Ps$$

3. Résultats

3.1. Caractéristiques texturales et hydriques des unités morpho-hydrogéologiques

Sur les terrasses FX et FW dominant des sols lessivés hydromorphes, caractérisés par un horizon superficiel battant appauvri en argiles, fer, matière organique et calcaire, mais riche en limons : «les boubènes». Dans la plaine inondable, les sols sont moins évolués : sols bruns faiblement lessivés à texture d'argiles limono-sableuses en FZ1, sols bruns calcaires et sols sableux en FZ2 et FZ3. Au cours de la campagne de 1992, les humidités pondérales des 6 unités de sols sont restées très proches les unes des autres en surface et ont subi une évolution fortement liée aux précipitations (fig. 1). Par contre, à 25 cm de profondeur, les humidités restaient très stables dans le temps et ont permis de discriminer les différents types d'alluvions. Cette tendance a été confirmée à 50 cm et à 75 cm, mais non à 100 cm où existe une plus grande hétérogénéité dans les textures (JAMES, 1992). Entre deux pluies, par exemple entre le 14 et le 24 février 1992, on constate que le dessèchement n'affecte que l'horizon superficiel. Les humidités passent de 20-27 % à 8-15 %, tandis qu'en profondeur, les humidités ne sont pratiquement pas modifiées (fig. 2). Sur l'ensemble des sites, l'erreur résiduelle (précision) sur ces valeurs a varié, selon la date, de 1,6 à 3,4 % d'humidité en surface et de 1,6 à 4,2 % d'humidité à 25 cm de profondeur. Cette erreur est souvent plus forte que les écarts moyens observés entre deux unités de sol. L'humidité reste donc un paramètre peu précis et peu efficace pour discriminer correctement en surface les unités de sols entre elles. On constate cependant que les sols sableux (FZ2) sont souvent les plus secs et les sols argileux les plus humides (FZ1) tandis que les sols limoneux des terrasses ont des humidités intermédiaires.

3.2. Évolution des réponses spectrales des unités morpho-hydrogéologiques

Sur les images les sols ne sont perçus que par leur horizon superficiel. Les réponses spectrales des 6 unités sont toujours restées très proches les unes des autres tout au long de l'année (fig. 3). L'erreur résiduelle moyenne sur ces données, calculée à partir des 327 sites tests, est près de 10 en comptes numériques calés (CNC) dans les bandes du visible et près

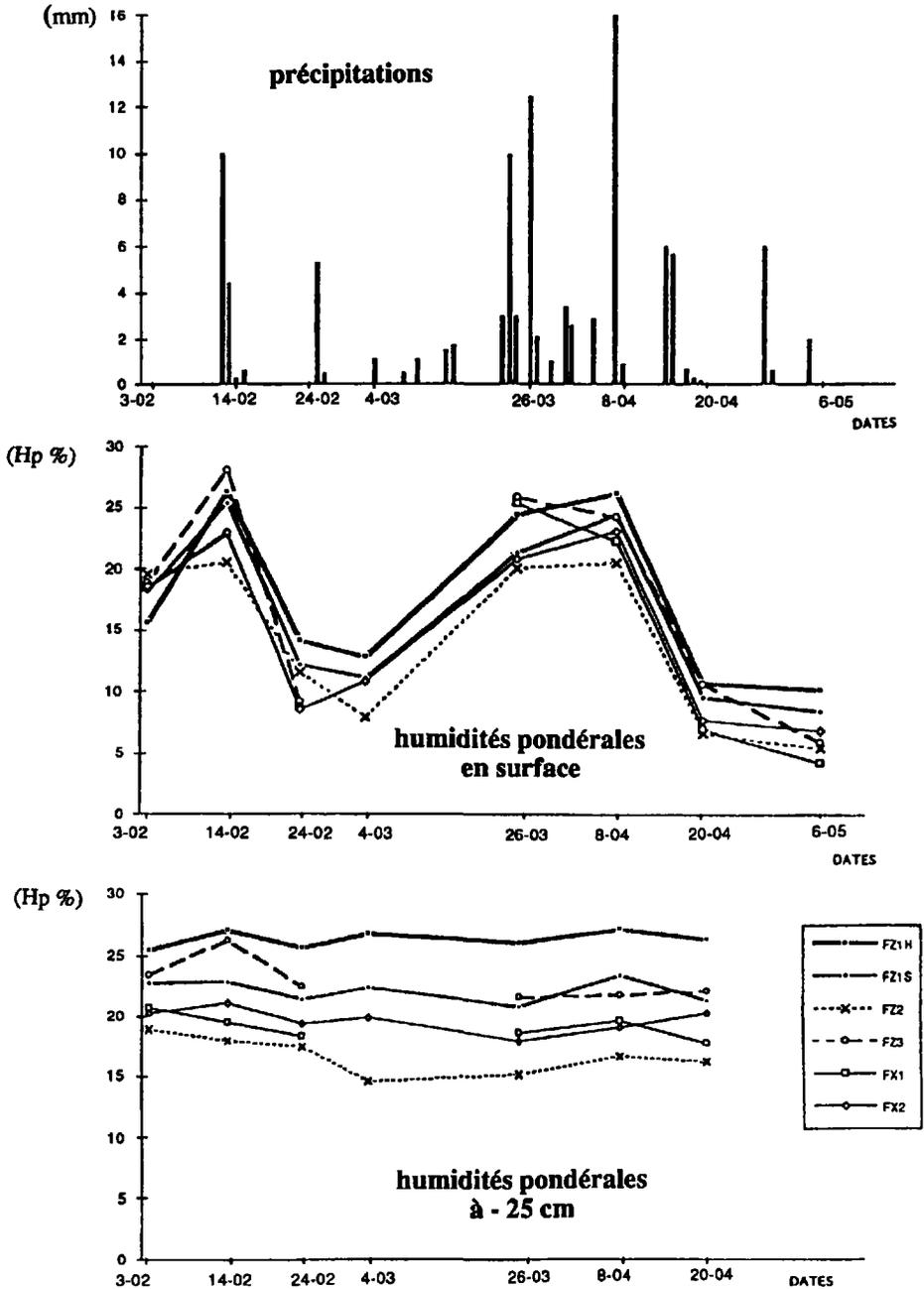


Figure 1. Évolution des humidités pondérales des principales unités morpho-hydrogéologiques entre février et mai 1992; la catégorie FZ1 a été subdivisée en FZ1 H (plus humide) et FZ1 S (plus sec); certaines mesures n'ont pas pu se faire le 4 mars

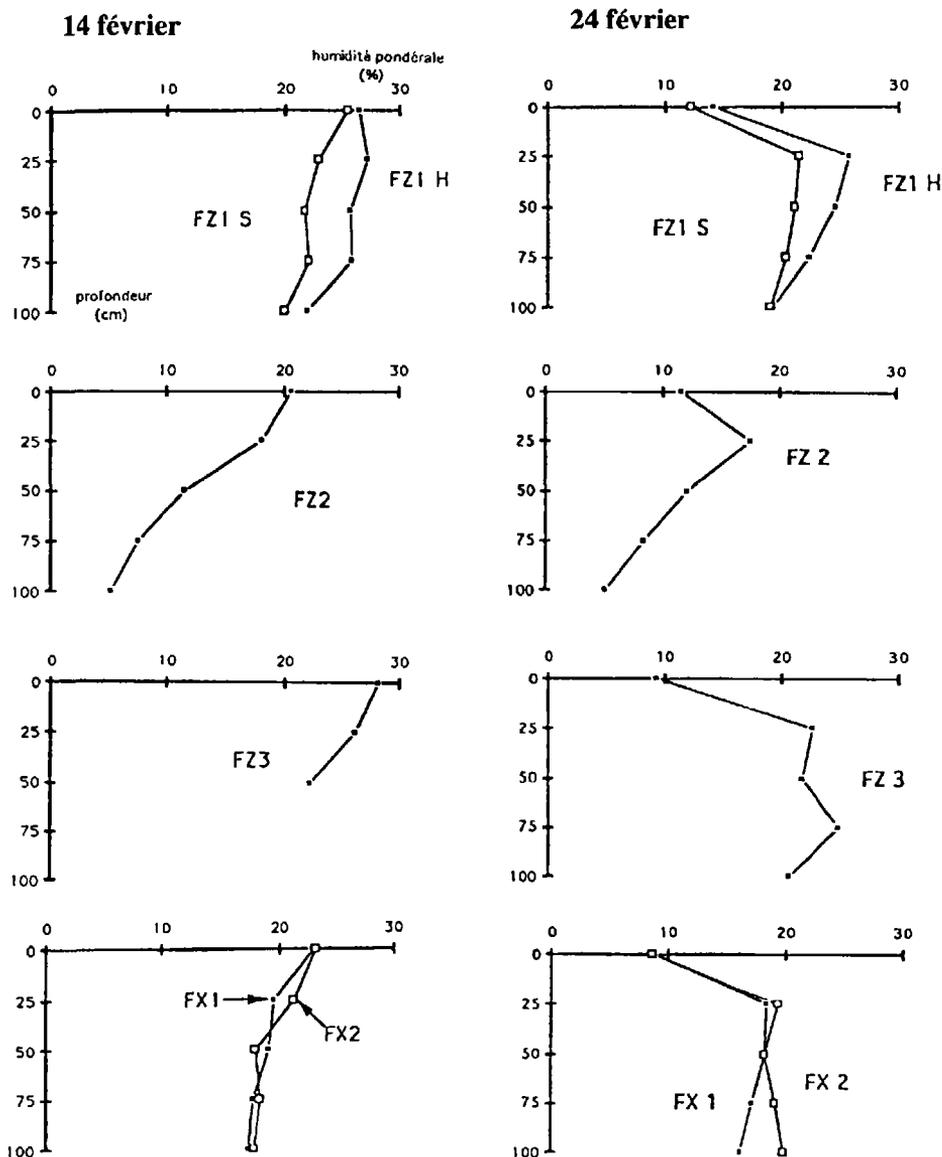


Figure 2. Évolution des profils hydriques des unités morpho-hydrogéologiques au cours d'une phase de dessèchement

de 25 CNC dans les bandes infrarouges. Des différences entre unités apparaissent mieux dans le domaine infrarouge que dans le domaine visible, mais les bandes TM5 et TM7, supposées sensibles à l'humidité, ne semblent pas renfermer d'information vraiment originale. On constate plutôt une grande redondance d'information d'une bande spectrale à l'autre, avec des coefficients de corrélation interbandes toujours supérieurs à 0,8 (sauf de juillet à octobre lorsque le végétation perturbe le signal des sols). Le 6 mai 1992, les

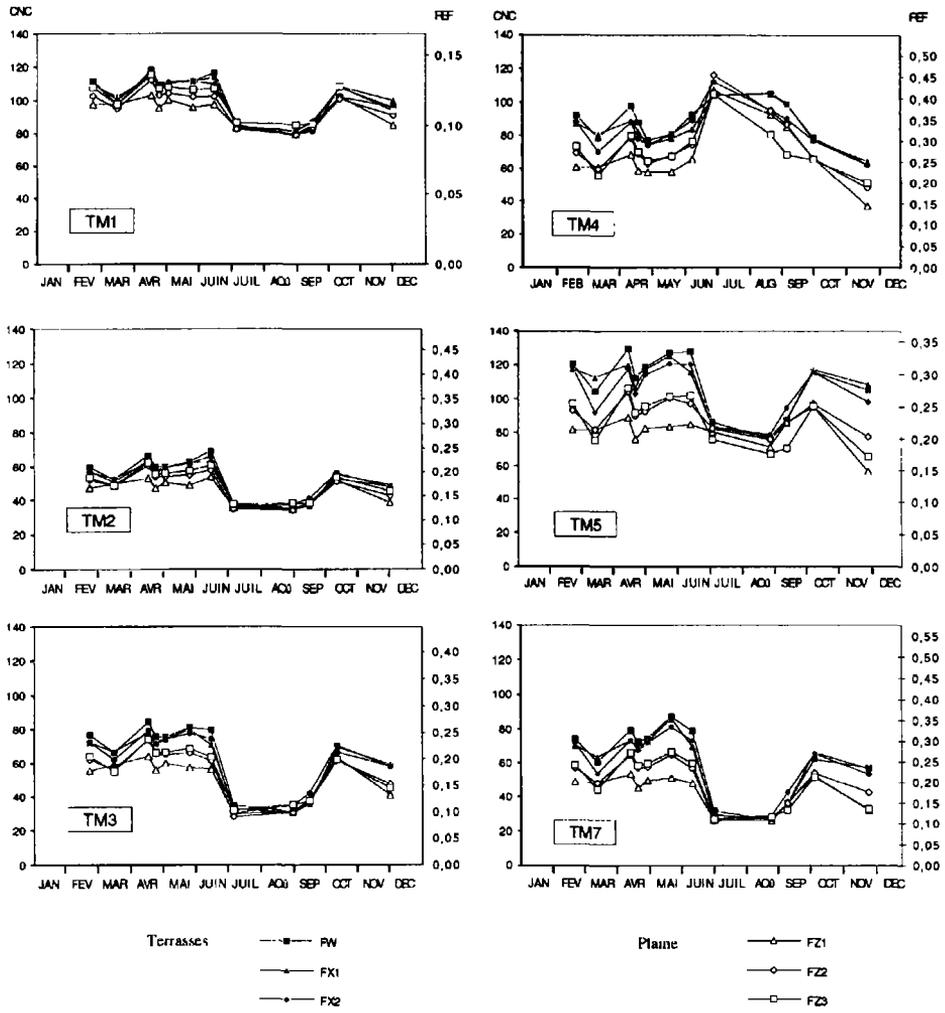


Figure 3. Évolution des valeurs radiométriques moyennes des unités de sols

humidités pondérales n'ont pas pu être corrélées de façon satisfaisante aux données spectrales (JAMES, 1992). Les sols de terrasses (FW, FX1 et FX2) ont des signatures spectrales très semblables et systématiquement supérieures à celles des sols de la plaine (FZ1, FZ2 et FZ3). La catégorie FZ1, pourtant la plus éloignée du fleuve et la moins fréquemment inondée, présente les radiométries les plus faibles. En juillet, la confusion entre les 6 unités est totale, les signatures spectrales étant typiques de la végétation en phase active de croissance (maïs, tournesol, sorgho).

L'efficacité individuelle des bandes spectrales pour discriminer les sols entre eux a été évaluée aux différentes périodes de l'année par des tests F de Fisher, en conservant le même degré de liberté (fig. 4). Les bandes TM5 et TM7 se révèlent les plus efficaces, surtout en mai, lorsque la structure des sols est fine et homogène en surface (préparation des semis).

L'efficacité globale des données, basée sur la combinaison de plusieurs bandes spectrales, ne peut être évaluée par une simple addition des valeurs F. Les données ont donc été soumises à des classifications dirigées. Trois combinaisons de bandes ont été comparées : TM2, TM3 et TM4 (équivalentes aux données actuelles XS de SPOT); TM2, TM3, TM4 et TM5 (équivalentes aux futures données HRVIR de SPOT 4) et enfin les 7 bandes TM. Dans chaque cas, des axes factoriels discriminants ont été calculés, par combinaison linéaire des bandes spectrales d'origine, et ont servi de nouveaux repères pour classer les données. Les résultats des classifications sont globalement insuffisants. On ne dépasse jamais 73 % de pixels bien classés même en combinant toutes les bandes (MULLER et JAMES, 1993). D'autres méthodes de classification (maximum de vraisemblance ou hypercubique) n'ont pas permis d'améliorer ces résultats et l'analyse des matrices de confusions révèle que les confusions apparaissaient essentiellement entre les sols de terrasses et entre les sols de la plaine alluviale.

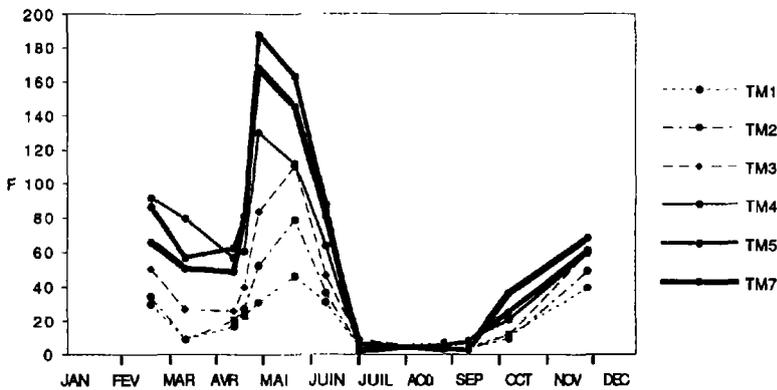


Figure 4. Comparaison de l'efficacité des différentes bandes spectrales pour discriminer les 6 unités de sols (tests F de Fisher calculés avec le même degré de liberté)

3.3. Mise en évidence de signatures spectrales stables dans le paysage

3.3.1. Stabilité du contraste entre les terrasses et la plaine alluviale

Les unités FX1 et FX2, qui correspondent aux premières terrasses, sont en contact direct avec la plaine alluviale et ont des valeurs radiométriques toujours très proches. Elles ont donc été regroupées en une nouvelle catégorie (FX), où domine une structure battante en surface. Les trois formations FZ1, FZ2 et FZ3 de la plaine alluviale, ont également été regroupées en une nouvelle catégorie (FZ), car leurs réponses spectrales sont le plus souvent semblables, comparées à celles des terrasses. Tout au long de l'année, on constate alors un écart radiométrique important entre ces deux groupes FX (terrasses) et FZ (plaine d'inondation), de l'ordre de 5 à 15 CNC dans les trois bandes visibles et de l'ordre de 15 à 30 CNC dans les bandes infrarouges. Les plus forts contrastes étant observés dans TM5 et TM7. De juillet à octobre, les contrastes sont très faibles car les cultures masquent les différences entre les sols. Le contraste spectral qui existe au niveau des sols, entre la plaine alluviale et les terrasses, peut donc être considéré comme une caractéristique stable du

paysage; il apparaît dans toutes les bandes spectrales. La meilleure période pour le cartographe se situe en mai-juin, la meilleure bande étant TM5 (fig. 5).

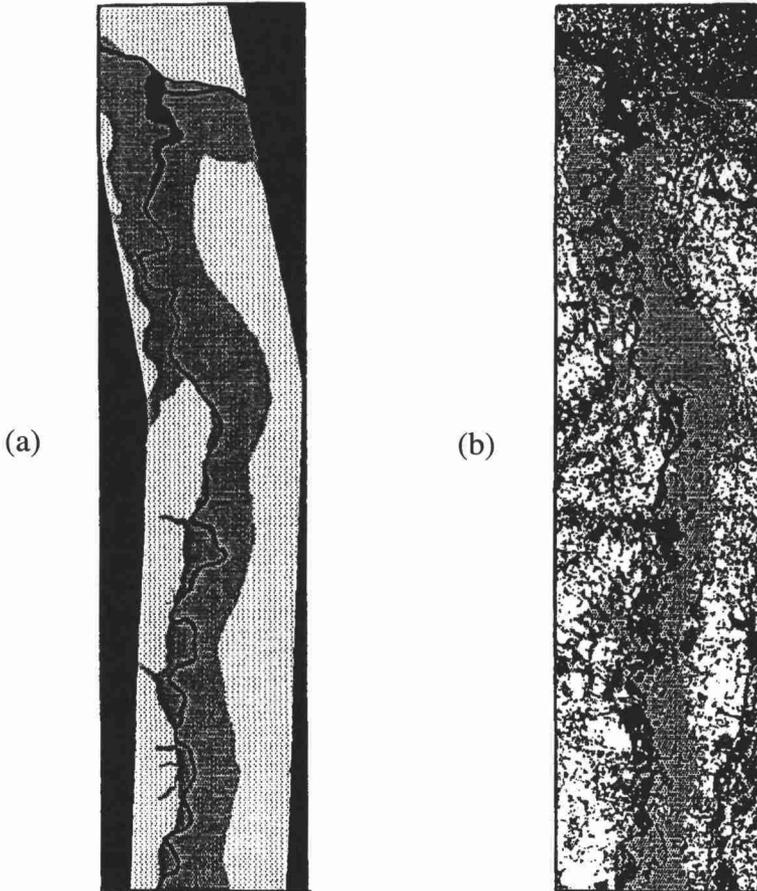


Figure 5. Mise en évidence du contraste spectral entre les terrasses et la plaine d'inondation: a) carte géomorphologique numérisée; b) une image classée; en gris : la plaine d'inondation; en blanc : les terrasses et collines; en noir : les zones non cartographiées ou non classées (eau, végétation)

3.3.2. Stabilité des contrastes dans la plaine alluviale

Dans la plaine alluviale, les signatures spectrales des sols présentent de plus forts contrastes que sur les terrasses, avec de fréquentes confusions entre les dépôts les plus récents FZ2 et FZ3. L'analyse visuelle des images confirme qu'il n'est pas toujours facile de trouver des limites très nettes ou continues entre ces deux catégories qui ont été définies par des critères statistiques et correspondent à des catégories «moyennes». La coïncidence entre une crue particulière et les crues moyennes est bonne lorsqu'il existe, dans le paysage, une matérialisation des limites (levées de terres, petites digues ou d'anciens chenaux qui forcent le passage des eaux). Dans la catégorie FZ2, on peut identifier visuellement des

secteurs très clairs correspondant à des sols très sableux. Ce sont souvent d'anciennes îles de la Garonne, aujourd'hui isolées du lit du fleuve par suite de sa stabilisation et de son enrochement.

Les sols de la catégorie FZ3, caractérisés par des inondations annuelles, sont particulièrement difficiles à analyser car ils sont surtout occupés par des boisements riverains (peupleraies ou saulaies). Leurs réponses spectrales restent très proches de celles de la catégorie FZ2 (inondations décennales).

La catégorie FZ1 (qui n'est inondée qu'une ou deux fois par siècle) présente, en moyenne, une signature spectrale plus faible que celles de FZ2 ou FZ3. Les limites avec FZ2 ne sont pas toujours perceptibles de façon nette ou continue. Par contre, l'analyse visuelle de FZ1 révèle, au pied des terrasses, l'existence des zones aux radiométries les plus basses. Ce contraste local est maximal dans TM5 et il atteint 10-15 CNC en mai-juin. Ces zones n'apparaissent sur aucune carte (ni sur la carte géologique au 1 : 50 000, ni sur la carte géomorphologique au 1 : 25 000). Elles sont toujours plus humides (3 à 5 % d'humidité en plus) et plus argileuses (jusqu'à 40 % d'argile) que le reste de la plaine.

4. Discussion

Ces observations sur les caractéristiques hydriques et spectrales des sols dans le couloir fluvial montrent qu'il existe une structure stable dans le paysage et qu'il est facile de la mettre en évidence en mai-juin lorsque l'hétérogénéité interne de chaque catégorie ne dépend pratiquement plus que des variations locales de facteurs intrinsèques, comme la texture, l'humidité et la couleur. Ceci nous amène à revenir sur les choix des unités de sols admis au début de ce travail et à proposer une nouvelle typologie basée sur les caractéristiques texturales et hydriques plutôt que sur les fréquences d'inondation. Quatre classes ont été retenues :

- L : alluvions à dominante limoneuse, lessivées et battantes, regroupant essentiellement les terrasses (FX1, FX2 et FW);
- SL : alluvions grossières sablo-limoneuses (elles dominent dans les catégories FZ2 et FZ3);
- AL : alluvions franches argilo-limoneuses (fréquentes dans FZ1);
- A : alluvions fines argileuses.

Ces quatre catégories de sols alluviaux ont pu être extraites des images par des classifications dirigées (fig. 16-6, voir cahier couleur), après avoir réalisé, pour chaque image, des masques de sols nus, puis une image composite multidate, en complétant progressivement les vides après un calage radiométrique des données. En combinant six dates, on peut ainsi cumuler les surfaces en sols nus sur plus de 75 % du corridor fluvial, contre 40-45 % avec une seule date. Les masques sur les sols nus sont facilement obtenus après conversion des compositions colorées (TM4-rouge, TM5-vert, TM3-bleu) en intensité, teinte et saturation. En effet, à chaque date, l'histogramme des fréquences des valeurs de teinte possède trois modes bien distincts : les sols nus (et le thème urbain), la végétation et l'eau. Un simple seuillage permet alors d'isoler les sols nus. Les masques obtenus sont en parfait accord avec des seuillages sur NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Cette méthode par seuillage sur les valeurs de teinte peut donc être considérée comme simple, rapide et robuste. Pour la réalisation d'une image multidate, il est préférable de respecter un ordre de priorité dans les dates; cet ordre de priorité étant choisi en fonction des tests de Fisher ou des tests de classification. Les résultats des classifications obtenus sont assez proches de la carte géomorphologique numérisée, avec

cependant d'importantes différences à la confluence avec le Tarn, où dominent des sols sablo-limoneux secs et au pied de certaines terrasses, où apparaissent des sols très argileux et humides.

5. Conclusion

Les résultats de cette étude confirment qu'il est difficile d'extraire, des images de télédétection spatiale, des données quantitatives, précises et fiables sur les teneurs en eau, argiles, limons ou sables des sols. Par contre, il est possible de mettre en évidence des sols aux caractéristiques texturales très typées (dominance de sables fins, dominance de limons ou dominance d'argile), car ceux-ci ont aussi des comportements hydriques spécifiques. Ces sols maintiennent pratiquement toute l'année des contrastes spectraux importants entre eux avec des signatures spectrales qui apparaissent de façon idéale en mai-juin dans la vallée de la Garonne. Ces signatures sont la résultante d'interactions entre la texture, la couleur et l'humidité des sols. Elles restent stables dans le temps si elles ne sont pas trop perturbées par des paramètres de surfaces (travail du sol, pluies localisées, présence de débris végétaux ou de jeunes pousses). Les contrastes disparaissent totalement lorsque la végétation domine.

Lorsque de tels sols coexistent dans un même paysage sur des surfaces homogènes, horizontales et suffisamment grandes, comme c'est le cas dans le couloir fluvial garonnais, on peut alors espérer les cartographier à partir d'images satellites HRV de SPOT ou TM de Landsat. Cette cartographie est facilitée par la création préalable d'images composites multitemporales avec un calage radiométrique sur des objets pseudo-invariants. L'utilisation de deux images choisies en mai (sur deux années différentes pour tenir compte de l'assolement cultures d'hiver-cultures de printemps) nous semble suffisante pour mettre en évidence les grandes catégories de sols dans la vallée, révélées par les interactions qui existent entre leur texture, leur humidité et leur couleur. L'utilisation d'un grand nombre d'images ne permet pas de mettre en évidence des catégories supplémentaires ou de mieux les discriminer. Elle permet simplement d'analyser de plus grandes surfaces en sols nus. Cette cartographie par télédétection des grandes unités de sols pourrait s'intégrer dans une base de données sur les sols (ZINCK and VALENZUELA, 1990).

6. Remerciements

Nous sommes très reconnaissants au Centre national d'études spatiales (CNES) d'avoir soutenu financièrement cette étude dans le cadre du projet SPOT 4 MIR (91/CNES/0434).

7. Références

- BOISSARD, P., POINTEL, J. G., RENAUX, B. et BEGON, J. C. 1989. Zonage et quantification de la stabilité structurale de sols cultivés basés sur des données du satellite Landsat-TM, Application au cas d'une parcelle d'orge en Beauce. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série II, pédologie, vol. 309, p. 145-152.
- BOWERS, S. A. and SMITH, S. J. 1972. Spectrophotometric determination of soil water content. Soil Science Society of America journal, vol. 36, p. 978-980.

- CONDIT, H. R. 1970. The spectral reflectance of american soils. *Photogrammetric Engineering*, vol. 36, p. 955-960.
- COURAULT, D. 1989. Étude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection, analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Collection Sols (17), Institut national agronomique, Paris, 237 p.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C. and COURAULT, D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 27, p. 37-46.
- FOODY, G. M. 1991. Soil moisture content ground data for remote sensing investigations of agricultural regions. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, p. 1461-1469.
- GARGUET-DUPORT, B. et GIREL, J. 1993. Analyse par télédétection de la structure du paysage alluvial en fonction des conditions hydrologiques et géomorphologiques. Programme avals-ERS : utilisation des données «ERS» pour l'étude des milieux alluviaux de la vallée du Rhône de Genève à Lyon. (1^{ère} partie). Ministère de l'Environnement, Délégation de la qualité de la vie, Paris, 23 p.
- HILL, J. and AIFADOPOULOU, D. 1990. Comparative analysis of Landsat-5 TM and Spot HRV-1 data for use in multiple sensor approaches. *Remote Sensing of Environment*, vol. 34, p. 55-70.
- HOFFER, R. M. and JOHANNSEN, J. 1969. Ecological potentials in spectral signature analysis, *in* *Remote Sensing in Ecology*, (P.L. Johnson ed.), University of Georgia Press, Athens, p. 1-16.
- HOVIS, W. A. Jr. 1966. Infrared spectral reflectance of some common minerals. *Applied Optics*, vol. 5, p. 245-248.
- JAMES, M. 1992. Essai de caractérisation de la vallée de la Garonne par le comportement hydrique et spectral des sols. Mémoire de DEA, Université Paul Sabatier, Toulouse, 51 p. + annexes.
- LAMBERT, R. 1988. Atlas géomorphologique de la vallée de la Garonne. Université Le Mirail, Toulouse, 1: 25 000.
- LINDBERG, D. R. and SNYDER, D. G. 1972. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. *The American Mineralogist*, vol. 57, p. 485-493.
- MULLER, E. 1993. Evaluation and correction of angular anisotropic effects in multitemporal SPOT and Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 45, p. 295-309.
- MULLER, E. et JAMES, M. 1993. Évaluation de la bande TM5 pour la cartographie morpho-hydrogéologique de la moyenne vallée de la Garonne. Rapport final du projet SPOT 4 / MIR (91/CNES/0434), CERR, Toulouse, 47 p.
- PROST, R., KING, C. et LEFEBVRE D'HELLENCOURT, 1983. Propriétés de réflexion diffuse de pâtes de kaolinite en fonction de leur teneur en eau. *Clay Minerals*, vol. 18, p. 193-204.
- STONER, E. R. and BAUMGARDNER, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectance of soils. *Soil Science Society of America journal*, vol. 45, p. 1161-1165.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J. and DESCHAMPS, P. Y. 1986. Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (5 S). Université des sciences et des techniques, Laboratoire d'optique atmosphérique, Lille, 148 p.
- TRAUTMANN, J. 1991. L'apport des données satellitaires SPOT pour la cartographie hydrogéomorphologique : l'exemple de la vallée de la Durance (France). *Revue de géomorphologie dynamique*, p. 65-75.
- VOGT, T. and LENCO, M. 1993. Mapping and monitoring wetlands in the Rhine alluvial plain to the south of Strasbourg (France) with Landsat TM. 25th International Symposium, Remote Sensing and Global Environmental Change, Graz, Austria, 4-8 April 1993, 12 p.
- ZINCK, J. A. and VALENZUELA, C. R. 1990. Soil geographic database : structure and application examples. *ITC Journal*, vol. 3, p. 270-293.

Suivi des ressources hydriques de la zone méditerranéenne du nord : premiers résultats du projet HYDRE

JÜRGEN VOGT et PAUL VOSSEN

*Institut des applications de la télédétection, Centre commun de recherche (CCR),
Commission des communautés européennes, TP 440, 21020 Ispra (Va), Italie;
téléphone : +39 (332) 78-9205; télécopieur : +39 (332) 78-9074*

Résumé

Dans le cadre du projet HYDRE, le Centre commun de recherche de la Commission des communautés européennes collabore avec quatre régions pilotes de la zone méditerranéenne pour le développement d'un système de suivi des ressources hydriques par des modèles agrométéorologiques et des données satellitaires du capteur AVHRR de NOAA. Le but du projet est de fournir en temps réel des informations sur la situation hydrique actuelle pouvant servir de base pour la prise de décision de gestion de l'eau. Depuis mars 1993, un bulletin mensuel est édité contenant des cartes des paramètres météorologiques, des paramètres sur le développement des cultures et des paramètres environnementaux dérivés à partir des images satellitaires. Les résultats des premiers mois ont confirmé que le modèle agrométéorologique permet la détection d'occurrence de stress hydrique et une simulation réaliste de la croissance des principales cultures. Cependant, il est apparu que des problèmes liés à la répartition des stations météorologiques et à l'interpolation des données météorologiques limitent la représentativité spatiale des résultats. Les données satellitaires sont traitées jusqu'au niveau d'une mosaïque journalière des indices de végétation et de la température de surface. Leur interprétation et l'analyse des séries temporelles des différents paramètres ont montré leur capacité pour la détection des zones souffrant de stress hydrique.

1. Introduction

Au cours de ces dernières décennies, la zone méditerranéenne a connu une intensification progressive de l'activité humaine permanente ou saisonnière. L'extension de périmètres irrigués, l'implantation d'industries ainsi que la croissance de la population et le développement du tourisme entraînent des besoins en eau constamment croissants. Cependant, cette zone est caractérisée par une forte variabilité des ressources hydriques en cours de l'année et entre les années. Les variations interannuelles et spatiales de la pluviométrie et de l'état hydrique des cultures et de la végétation naturelle sont donc à surveiller avec une attention particulière.

Devant cette situation, la Commission méditerranéenne de la Conférence des régions périphériques maritimes de l'Union européenne (CRPM de l'UE) et la Direction générale des politiques régionales de la Commission des communautés européennes (DG XVI de l'UE) ont lancé le projet HYDRE (Suivi des ressources hydriques au service des politiques régionales de l'agriculture et de l'environnement). Dans le cadre de ce projet, l'Institut des applications de la télédétection (IATD) du Centre commun de recherche (CCR) de l'UE collabore avec quatre régions pilotes de la zone méditerranéenne pour développer un système de suivi des ressources hydriques par des modèles agrométéorologiques et des données satellitaires du capteur AVHRR de NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, US National Oceanographic and Atmospheric Administration). La zone couverte par le projet et les régions pilotes, soit l'Andalousie (E), le Languedoc-Roussillon (F), la Sardaigne (I) et la Sicile (I), sont illustrées sur la figure 1.

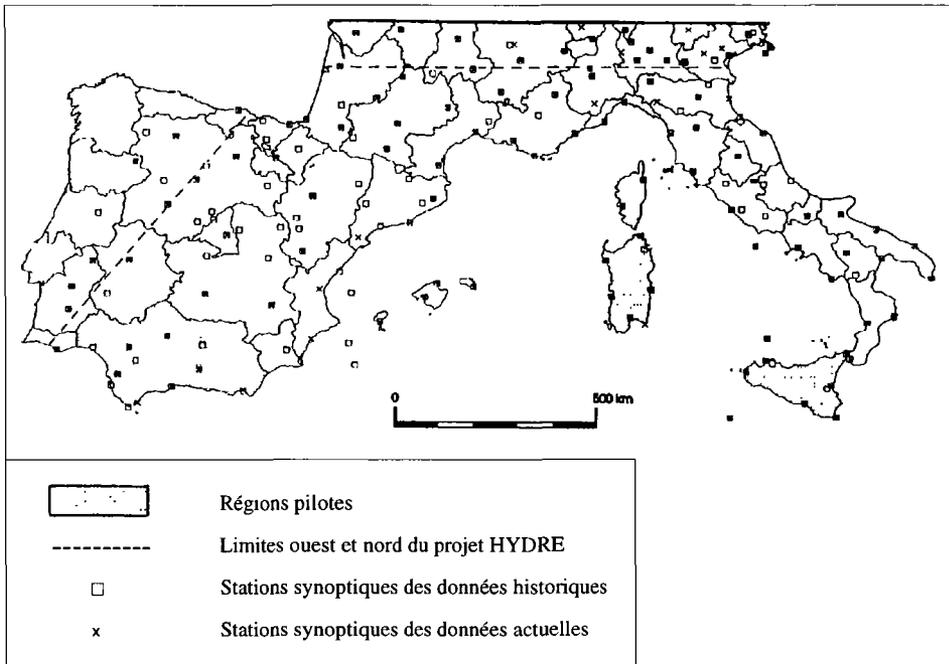


Figure 1. Zone couverte par le projet HYDRE

Le but du projet est de créer des cellules de suivi des ressources hydriques au niveau de chaque région du réseau. Une activité clé pour ces cellules sera la production d'un bulletin mensuel de suivi conjoncturel, permettant d'évaluer la situation hydrique actuelle, lequel servira de base pour des décisions de la gestion de l'eau. Afin de réaliser également une analyse structurelle des besoins en eau de chaque région, des informations régionales, relatives à la couverture végétale, la distribution de la population et la répartition de l'industrie sont colligées et seront intégrées dans le SIG.

L'article présente l'approche méthodologique choisie ainsi qu'une discussion des premiers résultats obtenus.

2. Approche méthodologique

L'approche choisie doit satisfaire à la fois trois nécessités imposées par le caractère des ressources en eau :

- l'acquisition et l'analyse en temps quasi-réel des données;
- l'intégration et l'analyse spatiale des paramètres environnementaux;
- la modélisation des phénomènes qui ont une influence sur les variations temporelles des conditions hydriques.

Ces exigences sont satisfaites par l'utilisation des données satellitaires et des modèles agrométéorologiques en combinaison avec un SIG.

2.1. Modèle agrométéorologique

À l'origine, le modèle agrométéorologique est le modèle WOFOST (*World Food Studies*) (VAN KEULEN and WOLF, 1986; VAN DIEPEN *et al.*, 1989). Il fut modifié et validé pour une application à l'échelle régionale par le CCR Ispra (BURRILL and VOSSEN, 1992; VOSSEN, 1990 et 1992) sous le nom ASM (*Agricultural Season Monitoring*). À partir des données météorologiques journalières, d'une carte numérisée des sols, d'un modèle numérique du terrain (MNT) et des informations régionales sur l'agriculture, le modèle (fig. 2) est capable de simuler la croissance d'une dizaine de cultures européennes.

Les données météorologiques du projet proviennent d'environ 150 stations synoptiques (fig. 1). Ces données constituent une base de données journalières historiques sur 20 à 30 années avec 12 paramètres météorologiques. Elle est actualisée quotidiennement. Au cours du projet, elle sera élargie avec des données journalières sur la pluviométrie et les températures de l'air mesuré par une cinquantaine de stations dans chaque région pilote.

D'autres données d'entrée sont la carte des sols de l'UE au 1: 1 000 000 et le MNT ETOPOS 5 du US NGDC (United States National Geophysical Data Centre), avec une résolution de 5' en latitude et en longitude. La carte des sols est numérisée et complétée par des informations sur la profondeur du sol et sa capacité maximale de rétention en eau. Ces données permettent de travailler avec une maille régulière d'une résolution de 25 km x 25 km.

Au niveau de chacune des régions pilotes, les différentes couvertures du SIG sont complétées par des données régionales plus détaillées, soit les cartes régionales des sols, les cartes d'occupation du sol, les MNT avec une résolution plus fine. Ce perfectionnement de la base de données permet de travailler avec des mailles plus fines ou bien avec des polygones représentatifs d'unités écologiques.

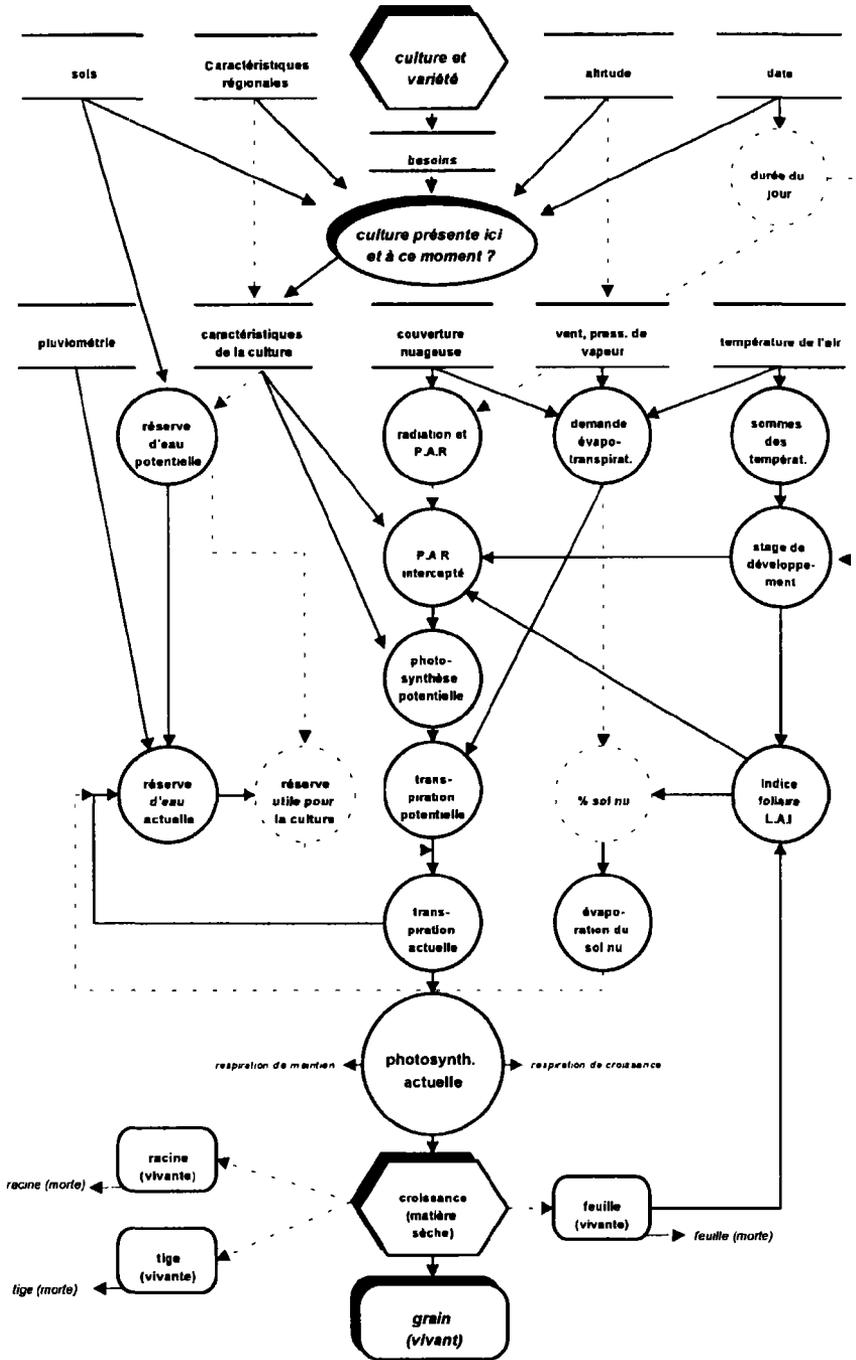


Figure 2. Vue schématique du modèle agrométéorologique (P.A.R. : *Photosynthetic Active Radiation*)

Les modules du système sont gérés par des programmes écrits sous ARC/INFO. Ce SIG est aussi utilisé pour la gestion et la présentation des résultats sous forme de cartes ou de tableaux. Les paramètres retenus sont les suivants :

- pour les données météorologiques : température (moyenne, minimum et maximum), rayonnement, pluies, évaporation et bilan hydrique climatique; chaque paramètre peut être présenté sous forme de cartes journalières, décennales ou mensuelles ainsi qu'intégré pour la période végétative;
- pour les données agrométéorologiques : la phase de développement des cultures, l'indice foliaire, le poids cumulé de matière sèche et le poids cumulé de grain.

Tous ces paramètres sont représentés comme valeur absolue et par rapport à une valeur de référence calculée à partir des données historiques.

2.2. Données satellitaires

Les données satellitaires utilisées sont enregistrées par le capteur AVHRR en orbite sur des satellites NOAA. L'AVHRR donne une couverture complète du monde deux fois par jour avec une résolution spatiale maximale de 1,1 km x 1,1 km. Dans le projet HYDRE, on utilise des images de l'après-midi, enregistrées entre 13 h 30 et 16 h 00 solaire au nadir.

L'AVHRR enregistre la radiation électromagnétique dans cinq canaux, soit dans le visible, dans le proche infrarouge et dans l'infrarouge thermique; cela permet le calcul ou l'estimation de différents paramètres environnementaux comme des indices de végétation, la température de surface et l'albédo hémisphérique (GOWARD *et al.*, 1991; GUTMAN, 1991; PRICE, 1984 et 1989; GUTMAN *et al.*, 1989; SAUNDERS, 1990; VOGT, 1992). Chacun de ces indices porte des informations indicatives sur l'état hydrique de la surface. L'indice de végétation donne des informations sur la couverture végétale et sa vigueur, la température sur le bilan énergétique, et l'albédo sur le bilan radiatif.

L'IATD traite toutes les images de l'après-midi qui couvrent une partie du territoire de l'UE. Le logiciel SPACE (*Software for Processing AVHRR Data for the Communities of Europe*), utilisé pour le prétraitement des images, fut développé par le CCR (SHARMAN, 1990). Le résultat du prétraitement est une mosaïque journalière de cinq canaux, couvrant l'ensemble de l'Europe avec une résolution nominale de 1,1 km x 1,1 km. Les données sont calibrées et corrigées pour les influences de l'atmosphère et de la géométrie. De plus, des informations auxiliaires, comme un masque des nuages et l'angle de vue, sont enregistrées. D'autres logiciels permettent l'accès à cette base de données, l'extraction d'une zone d'étude et le calcul des paramètres environnementaux décrits précédemment. Finalement, ces paramètres peuvent être agrégés à des mailles ou polygones définis par l'utilisateur. La gestion et la présentation du dernier niveau des résultats sont réalisées sous ARC/INFO en vue de faciliter l'analyse par rapport aux données météorologiques et agrométéorologiques.

3. Premiers résultats

Pour l'année 1993, un bulletin mensuel est réalisé sous forme de test. Ce bulletin contient des cartes des différents paramètres météorologiques et agrométéorologiques (valeurs absolues et déviations par rapport à la moyenne interannuelle) pour des mailles de 50 km x 50 km et 25 km x 25 km. Sur la figure 3, on montre un exemple du bilan hydrique climatique absolu, calculé pour la période du 1^{er} octobre 1992 jusqu'au 31 juillet 1993. On voit bien les forts déficits sur de grandes parties de l'Espagne, de la Sardaigne et de la Sicile.

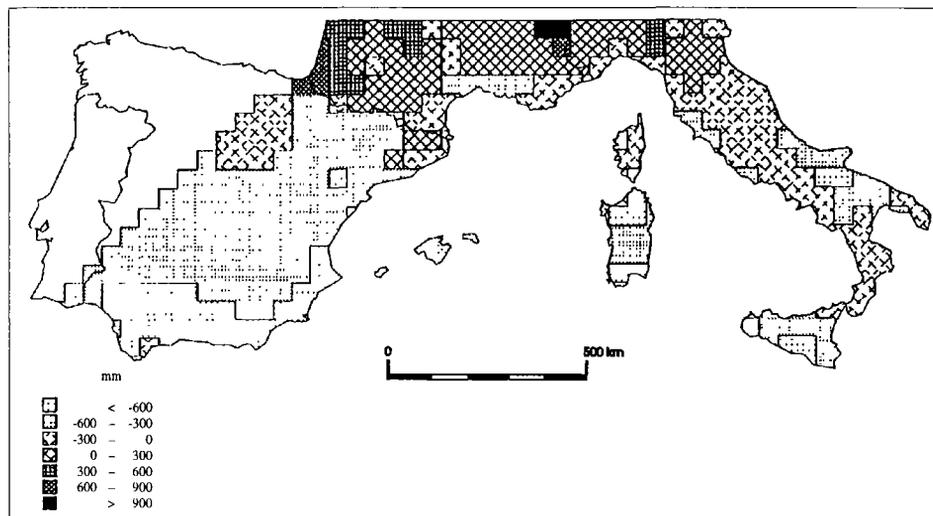


Figure 3. Bilan hydrique climatique calculé pour la période du 1^{er} octobre 1992 au 31 juillet 1993 (maille : 50 km x 50 km)

Ces déficits, représentant parfois des valeurs de plus de 25 % inférieures à la moyenne historique, montrent une situation grave pour l'année courante. Parallèlement, le poids de matière sèche et le poids de grain, calculé par le modèle agrométéorologique, indiquent des pertes significatives des récoltes dans ces régions. Les prévisions du modèle - actualisé mensuellement - ont été confirmées par des observations sur le terrain et les informations des équipes régionales du projet. Ces premiers essais de calcul du bilan hydrique et de prévision qualitative des récoltes au niveau régional sont encourageants, surtout si l'on considère la faible résolution spatiale de la base de données.

Sur les figures 17-4 et 17-5 (voir cahier couleur), on donne des exemples d'images de la température de surface et de l'indice de végétation (NDVI) du 29 juillet 1993, calculé à partir des mesures effectuées par l'AVHRR. On y montre bien la résolution spatiale plus détaillée par rapport aux cartes des données météorologiques. Le gradient nord-sud et les variations même au niveau des régions sont documentés clairement par les valeurs de la température de surface, variant entre 25 °C au sud de la France et au nord d'Italie et plus de 50 °C dans certaines zones de l'Andalousie, de la Sardaigne et de la Sicile. En général, les températures sont corrélées aux valeurs du NDVI qui donnent une indication sur la présence ou l'absence de la végétation photosynthétiquement active. La présence de la végétation (NDVI élevée) cause des températures relativement basses, tandis que le manque de végétation se traduit par des températures plus élevées (voir, par exemple, la situation en Sardaigne ou en Sicile).

L'analyse des séries temporelles de ces données permet un suivi de l'évolution de la végétation et une première évaluation de la situation hydrique au niveau régional. Sur la figure 6, on donne un exemple des séries temporelles du NDVI pour la région de Salamanque en Espagne. Les courbes montrent bien la différence entre les années 1991 et 1993, d'une part, et l'année 1992, d'autre part. Cette dernière était caractérisée par une forte sécheresse.

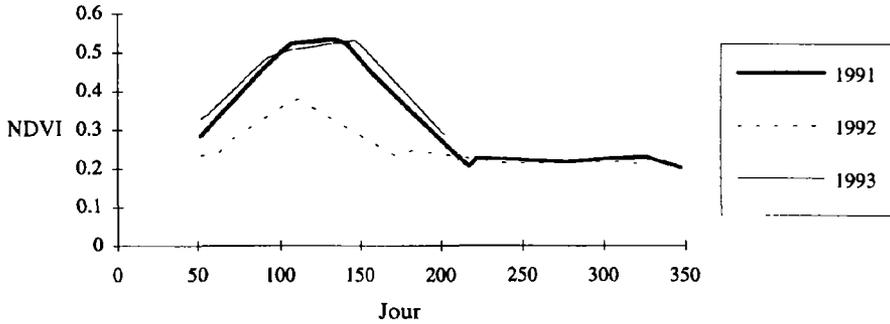


Figure 6. Courbes temporelles du NDVI pour la région de Salamanque en Espagne; données extraites des images AVHRR prétraitées par SPACE

La relation entre température de surface et bilan hydrique a été étudiée par plusieurs chercheurs dont GUTMAN (1990), JACKSON (1982), SEGUIN *et al.* (1991), et VIDAL *et al.* (1987). Leurs résultats montrent que les séries temporelles de la température de surface et de leur différence par rapport aux températures de l'air, offrent la possibilité pour un suivi de la situation hydrique au niveau régional. Bien que dans la première phase du projet HYDRE ces données sont utilisées seulement dans un sens qualitatif pour la comparaison avec les résultats du modèle agrométéorologique, ultérieurement elles seront utilisées de manière quantitative pour le suivi de la satisfaction des besoins en eau des plantes cultivées au niveau régional.

4. Discussion

Bien qu'actuellement des cartes et des images permettant une évaluation qualitative de la situation hydrique sont fournies mensuellement, il reste plusieurs problèmes à résoudre.

Un des points les plus importants est l'agrandissement de la base de données météorologiques et l'amélioration de leur interpolation. Les premiers mois du projet HYDRE ont montré que le nombre de stations synoptiques disponibles et leur répartition ne sont pas satisfaisants pour une interpolation représentative de la zone méditerranéenne. La topographie très variable et les variations climatiques spatiales, parfois très fortes, demandent une densité plus élevée de stations, ceci surtout pour la pluviométrie qui est caractérisée par une variabilité spatiale très forte. Cette amélioration de la représentation spatiale des paramètres météorologiques est très importante pour leur analyse en combinaison avec des paramètres dérivés à partir des mesures du AVHRR.

Actuellement, les températures de surface sont estimées selon l'algorithme de PRICE (1984). Cet algorithme n'est pas adapté à la zone d'étude et des informations sur l'émissivité de surface ne sont pas disponibles. En conséquent, la précision de l'estimation n'est que de 3 à 4 °C. D'autres problèmes sont liés à l'analyse des séries temporelles des températures et à la comparabilité des températures mesurées dans les différentes parties de la trace du satellite. Le premier problème est dû au décalage du temps de passage des satellites qui est de l'ordre de 30 minutes par an. Le deuxième est dû au changement de l'heure solaire locale sur la trace du satellite qui est de l'ordre de 1 h 40 min. Une correction de ces aspects sera indispensable pour une analyse quantitative des séries temporelles.

5. Conclusion

Malgré les problèmes méthodologiques à résoudre, la première phase du projet HYDRE a montré la possibilité de traiter en temps réel un grand nombre des données de différentes sources pour le suivi de la situation hydrique à l'échelle régionale. Le projet permet pour la première fois d'appliquer et de tester l'utilisation combinée de modèles agrométéorologiques et de données satellitaires journalières pour le suivi des ressources hydriques dans un cadre opérationnel et au niveau de régions étendues.

6. Remerciements

Nous remercions P. Loopuyt qui a préparé les cartes pour les figures 1 et 3 et M. Sharman, P. Gervais, H. de Groof et J.-M. Dubois pour des commentaires critiques sur une première version du manuscrit.

7. Références

- BURRILL, A. and VOSSSEN, P. 1992. Development of an Operational Agro-Meteorological Monitoring System. Proceedings of the Second Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy; Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication no 14262, Brussels/Luxembourg, p. 357-360.
- GOWARD, S.N., MARKHAM, B, DYE, D.G., DULANEY, W. and YANG, J. 1991. Normalised Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 257-277.
- GUTMAN, G., GRUBER, A., TARPLEY, D. and TAYLOR, R. 1989. Determination of the Clear-Sky Planetary Albedo from AVHRR Using a Bi-Directional Reflectance Model. *Advances in Space Research*, vol. 9, n° 7, p. 251-254.
- GUTMAN, G. 1990. Towards Monitoring Droughts from Space. *Journal of Climate*, vol. 3, n° 2, p. 282-295.
- GUTMAN, G. 1991. Vegetation Indices from AVHRR : An Update and Future Prospects. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 121-136.
- JACKSON, R.D. 1982. Canopy Temperature and Crop Water Stress. *in* D. HILLES (ed.). *Advances in Irrigation*. New York, p. 43-85.
- PRICE, J.C. 1984. Land Surface Temperature Measurements from the Split-Window Channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, vol. 89, n° D5, p. 7231-7237.
- PRICE, J.C. 1989. Quantitative Aspects of Remote Sensing in the Thermal Infrared. *in* G. ASRAR (ed.). *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. New York, p. 578-603.
- SAUNDERS, R.W. 1990. The Determination of Broad Band Surface Albedo from AVHRR Visible and Near-Infrared Radiances. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, p. 59-67.
- SEGUIN, B., LAGOUARDE, J.P. and SAVANE, M. 1991. The Assessment of Regional Crop Water Conditions from Meteorological Satellite Thermal Infrared Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 141-148.

- SHARMAN, M. 1990. Exploiting the AVHRR for Agricultural Monitoring. Proceedings of the Conference on The Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 10-11 October 1989, Varese, Italy; Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication n° 12581 EN, Brussels/Luxembourg, p. 163-170.
- VAN DIEPEN, C. A., WOLF, J., VAN KEULEN, H. and RAPPOLDT, C. 1989. WOFOST : A Simulation Model of Crop Production. Soils Use and Management, vol. 5, n° 1, p. 16-24.
- VAN KEULEN, H. and WOLF, J. 1986. Modelling of Agricultural Production : Weather, Soils and Crops. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Pudoc, Wageningen (NL), 479 p.
- VIDAL, A., KERR, Y., LAGOUARDE, J.P. et SEGUIN, B. 1987. Télédétection et bilan hydrique : utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite NOAA AVHRR. Agriculture and Forest Meteorology, vol. 39, p. 155-177.
- VOGT, J. 1992. Characterizing the Spatio-Temporal Variability of Surface Parameters from NOAA AVHRR Data. A Case Study for Southern Mali. Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication n° 14637 EN, Brussels/Luxembourg, 263 p.
- VOSEN, P. 1990. Modèles agrométéorologiques pour le suivi des cultures et la prévision de rendements des grandes régions des Communautés européennes. Proceedings of the Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 10-11 October 1989, Varese, Italy; Commission of the European Communities-Joint Research Centre, EUR Publication n° 12581 EN, Brussels/Luxembourg, p. 75-84.
- VOSEN, P. 1992. Forecasting National Crop Yields of E.C. Countries : The Approach Developed by the Agriculture Project. Proceedings of the Second Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, 26-27 November 1991, Belgirate, Italy; Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication n° 14262, Brussels/Luxembourg, p. 159-176.

PARTIE IV

Littoral

Caractérisation du panache turbide d'un fleuve en zone intertropicale à l'aide d'une image HRV de SPOT : cas du Bandama en Côte-d'Ivoire

KOUADIO AFFIAN ¹, PATRICE JOURDA ¹, KOUAME AKA ¹ et JACQUES ABE ²

¹ *Faculté des sciences et techniques (FAST), Département des sciences de la terre, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte-d'Ivoire; téléphone : +225 44-90-00; télécopieur : +225 44 -04-12; télex : rectuci 26138;*

² *Centre de recherches océanologiques (CRO), 01 B.P. V18, Abidjan, Côte-d'Ivoire; téléphone : +225 35-50-14; télécopieur : +225 24-65-04; télex : 214235*

Résumé

L'analyse du panache turbide de l'embouchure du Bandama par le biais d'une image satellitaire HRV de SPOT, prise le 11 décembre 1986, a permis de montrer que le canal XS2 est adapté à l'étude des matières en suspension. La géométrie du panache montre que les matières détritiques en provenance du Bandama sont reprises au niveau du plateau continental par un courant de surface (courant de Guinée) et déportées vers l'est. La structuration du panache met en évidence sa subdivision en quatre zones ayant des valeurs radiométriques caractéristiques. Ces zones ont été mises en relation avec les marées basses antérieures à la prise de l'image, ce qui prouve que la répartition des sédiments en suspension sur le plateau se fait suivant un mécanisme de pulsation en relation avec la marée. Nous avons donc pu remonter à des suspensions qui ont pu être expulsées 48 heures environ avant la prise de l'image.

1. Introduction

Le Bandama est l'un des quatre grands fleuves qui traversent la Côte-d'Ivoire du nord au sud. Il draine le plus grand bassin versant du pays (97 500 km²) et constitue par ailleurs l'une des plus importantes sources d'apport en sédiments détritiques à la mer (788 600 t/an) (MONET, 1972). Son embouchure se situe à 90 km à l'ouest d'Abidjan (fig. 1).

Le Bandama a un régime tropical de transition à crue unique (août-octobre) qui se caractérise par son irrégularité accentuée par une grande variabilité interannuelle.

L'intégration des débits mensuels de la période 1980-1987 donne un débit mensuel moyen compris entre 66 et 298 m³/s. Les minima des débits mensuels varient entre 3 et 141 m³/s tandis que les maxima sont compris entre 224 et 844 m³/s.

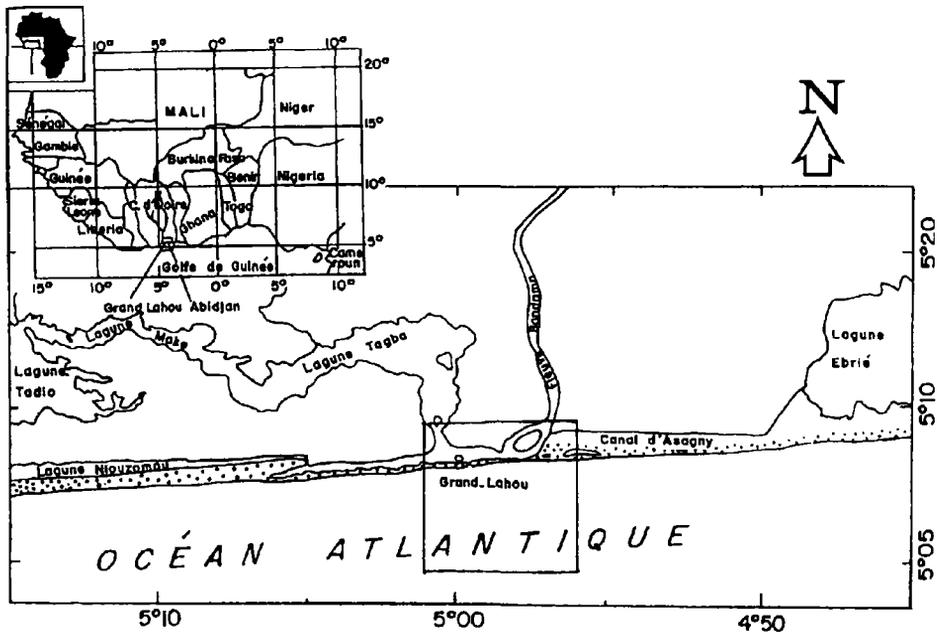


Figure 1. Situation de la zone d'étude

1.1. Paramètres océaniques

Sur les côtes ivoiriennes, la marée est de type semi-diurne avec un marnage très faible (1,5 m). À l'embouchure du Bandama, le marnage ne dépasse guère 1 m. La houle d'amplitude moyenne, dans l'ensemble, est inférieure à 2 m avec des périodes de forte agitation en mai-juin-juillet. Elle attaque la côte avec un angle d'environ 24°. La courantologie sur le plateau continental se résume au courant de Guinée, qui porte d'ouest en est (0,3 à 1,1 m/s) sur une tranche de 20 à 50 m et son sous-courant plus faible d'une vitesse comprise entre 0,3 et 0,7 m/s orienté vers l'ouest (MARTIN, 1973).

1.2. Données relatives à l'image satellitaire

L'image HRV de SPOT étudiée a été prise le 11 décembre 1986 à 10 h 53, c'est-à-dire globalement après les périodes de crue situées dans le mois de novembre. La prise de vue a été effectuée lors d'une période de mi-marée montante (basse mer : 8 h 06; haute mer : 14 h 15) (fig. 2).

Les trois canaux de cette image sont le canal XS1 (500-590 nm), le canal XS2 (610-680 nm) et le canal XS3 (790-890 nm). Cette image numérique est du niveau de prétraitement 1B, ce qui suppose une première correction géométrique et radiométrique effectuée par SPOT Image.

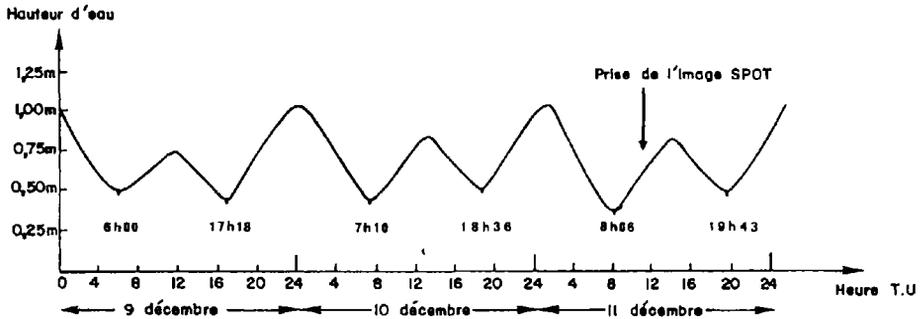


Figure 2. Position de l'image HRV par rapport à la courbe marégraphique journalière du 11 décembre 1986

2. Méthodologie

L'image numérique a été analysée avec un logiciel de traitement d'image EASI/PACE de l'entreprise PCI. Une fenêtre de 512 x 512, centrée sur l'embouchure du fleuve, a été retenue. Le niveau de prétraitement 1B ne permettant pas de placer chaque pixel dans un référentiel donné, nous avons procédé à une seconde correction géométrique de l'image en utilisant des points d'appui à partir d'une carte topographique au 1:50 000. Nous aboutissons à une précision de l'ordre du pixel.

Nous avons par ailleurs procédé à une étude de la distribution statistique des valeurs radiométriques des trois canaux et la comparaison des profils radiométriques pour sélectionner les canaux adéquats pour l'étude des panaches turbides.

Nous nous sommes enfin attachés à la définition de la géométrie du panache turbide et de sa structure afin de mettre en évidence la direction du courant de surface décrite à partir d'autres méthodes.

3. Comparaison des données radiométriques des trois canaux

Les valeurs radiométriques (N) données par l'image HRV sont traduites par la formule suivante :

$$N(k) = A(k) \cdot L(k)$$

où N(k) = valeur radiométrique issue de la bande spectrale k (XS1, XS2, XS3);

A = coefficient liant la luminance équivalente SPOT avec la valeur numérique N;

L = luminance de l'atmosphère (CNES-SPOT IMAGE, 1986).

4. Distribution statistique

La distribution des données numériques des trois canaux a été traduite sous forme d'histogramme. Les paramètres tels que le nombre total de pixels pris en compte, la moyenne, la médiane et l'écart-type sont présentés sur la figure 3. Le faible contraste de l'image est traduit au sein des trois canaux par le regroupement des valeurs radiométriques autour de la moyenne. Les valeurs radiométriques du canal XS2 sont plus élevées que celles des deux autres canaux; la valeur de XS2 varie de 48 à 60 tandis que celles de XS1 et XS3 varient respectivement de 16 à 32 et de 32 à 48.

Compte tenu de la faiblesse des valeurs radiométriques de XS1, probablement due à la couleur des particules en suspension dont les réflectances sont mesurées, nous nous sommes abstenus d'utiliser ce canal pour l'étude du panache. Par ailleurs, la faible réflectance et la forte absorption de XS3 dans l'eau de façon générale (FROIDEFOND *et al.*, 1991), nous ont conduits à n'utiliser que XS2 qui, en plus, est adapté pour l'étude des matières en suspension (MOREL and PRIEUR, 1977; ROBINSON, 1985; FROIDEFOND *et al.*, 1991).

5. Caractéristiques du panache

5.1. Géométrie du panache

Afin d'améliorer le rendu visuel du panache, nous avons appliqué dans un premier temps un filtre médian et un rehaussement (étalement linéaire) au canal XS2. Le panache qui déborde vers l'ouest de l'embouchure, apparaît comme un lobe orienté vers l'est (fig. 4). Ce débordement du panache vers l'ouest doit être lié à l'hydrodynamique de l'eau fluviale qui, une fois arrivée dans le milieu ouvert qu'est le plateau continental, aura tendance à se répandre dans toutes les directions avant d'être reprise par le courant de surface. L'orientation générale du lobe décrit par le panache serait la résultante du courant de jusant qui expulse le matériel détritique en mer et le courant de Guinée qui porte vers l'est. Tout ce processus se passe tel qu'indiqué à la figure 5. Le deuxième niveau d'appréciation a été de cerner le contour du panache du point de vue des valeurs radiométriques. Ainsi, ont été réalisées des coupes radiométriques N-S (fig. 6) positionnées sur la figure 5. À cette occasion, le canal XS2 a été multiplié par deux pour accroître l'échelle de variation des valeurs radiométriques. La limite entre le panache et l'eau de mer est marquée par un brusque décalage au niveau de l'histogramme. La jonction de tous ces niveaux repères permet de définir le contour du panache.

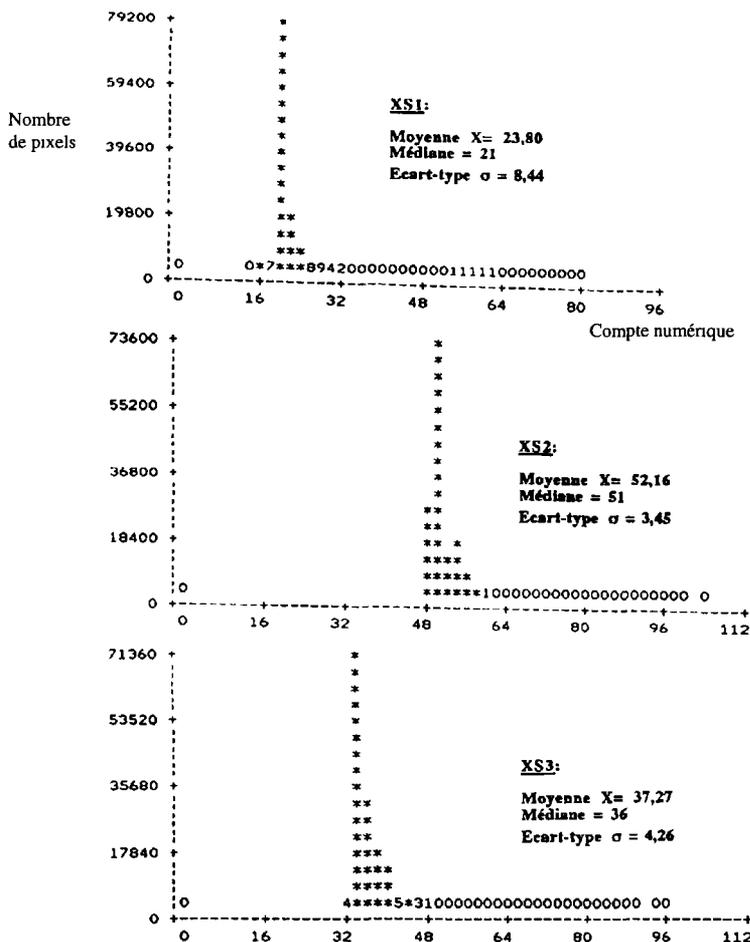


Figure 3. Distribution statistique des trois canaux d'une image HRV (fenêtre de 512 x 512)

5.2. Structure du panache

La structuration du panache se traduit par la répartition des niveaux de gris en son sein; en effet, de l'embouchure vers le large, on note quatre zones aux teintes de gris différentes et qui épousent la forme du lobe décrit par le panache. Les coupes radiométriques confirment cette structuration. En effet, les cinq profils réalisés (fig. 6) présentent des segments homogènes. Ainsi, sur le profil 1, localisé à l'extérieur du panache (fig. 6a), on n'observe aucun segment homogène. Sur le profil 2, localisé juste à la sortie du panache (fig. 6b), on observe deux parties : une partie «a» traduisant le panache et une seconde partie qui indique la mer sans les suspensions. Sur le profil 3 (fig. 6c), on note au sein du panache deux segments «a» et «b». Les profils 4 et 5 (fig. 6d et 6e) présentent respectivement 3 et 4 segments homogènes notés «a», «b», «c» et «a», «b», «c», «d». Ces différents segments



Figure 4. Image HRV (canal XS2) du 11 décembre 1986 rehaussée (étalement linéaire) et filtrée (filtre 3 x 3) montrant l'organisation interne du panache du Bandama

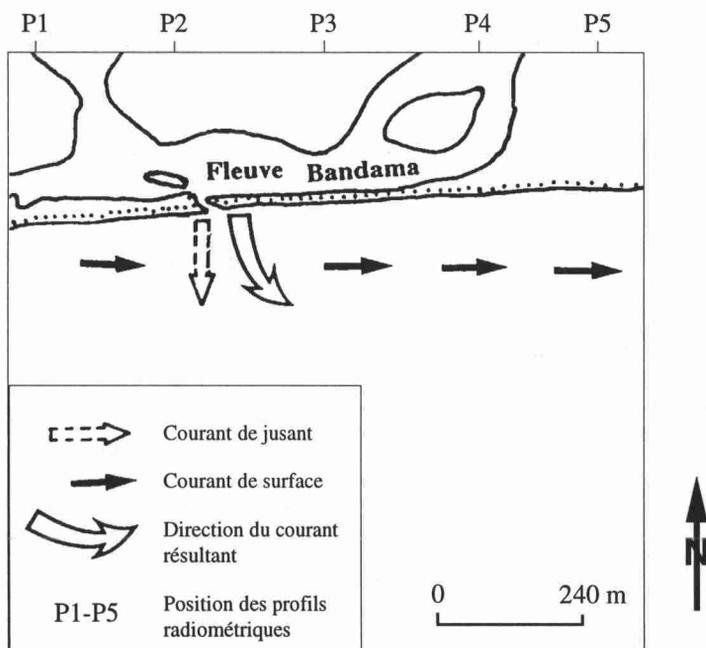


Figure 5. Direction des courants suggérée par la géométrie du panache turbide du Bandama

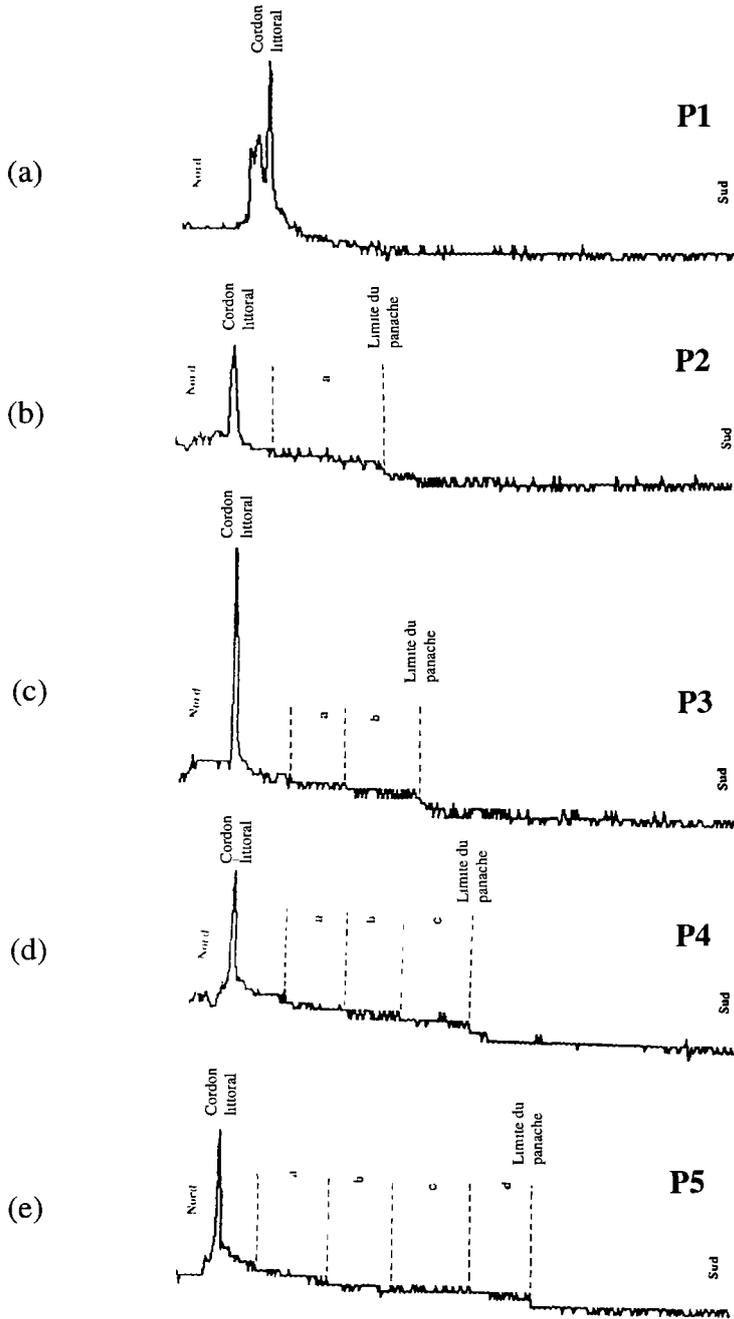


Figure 6. Profils radiométriques (P1-P5); le segment «a» du profil 2 permettant de distinguer le panache turbide de l'eau marine dépourvue de matières en suspension; les segments homogènes notés «a», «b», «c», «d» des profils 3, 4, 5 étant en relation avec différentes concentrations en sédiments

traduisent des zones aux caractéristiques radiométriques identiques (fig. 7). Des prélèvements, non synchrones à la prise de l'image HRV, effectués par AKA (1991) présentent des teneurs de sédiments en suspension dont la concentration décroît de l'embouchure vers le large, en passant de 6,13 mg/l à 0,43 mg/l (AKA, 1991). Selon cet auteur, les matières solides sont constituées d'argile, de quartz, de gypse, de feldspath, pour la partie inorganique, et de tintinidés, de ptéropodes, de diatomées, de foraminifères, de radiolaires, de péridiniens et d'ostracodes pour la partie organique.

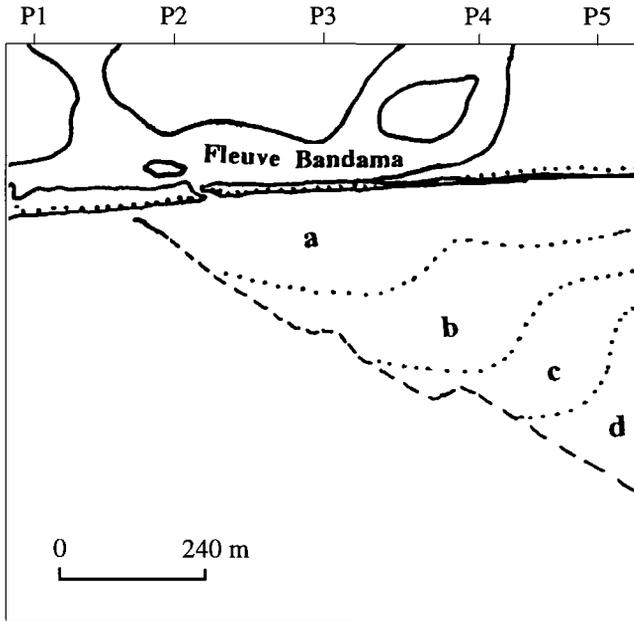


Figure 7. Structure du panache turbide; P1-P5 indiquant la position respective des profils radiométriques; «a», «b», «c», «d» indiquant la limite des subdivisions du panache turbide du Bandama en relation avec les marées basses successives

5.3. Chronologie du panache

La répartition du panache, suivant des aires géographiques bien précises, doit être liée à un phénomène périodique. La bathymétrie de la zone étant régulière et les sédiments de fond homogènes (sable moyen à très fin) (MARTIN, 1973), cette répartition ne peut être rapportée à des irrégularités du fond de la mer. Nous l'avons donc mise en relation avec la marée, comme l'avaient déjà signalé FROIDEFOND *et al.* (1991) pour le panache turbide de la Gironde, en France. La marée est semi-diurne sur la côte ivoirienne; l'on observe par conséquent une marée basse toutes les 12 h 30 min au cours de laquelle, le fleuve expulse les sédiments sur le plateau continental. La concentration des sédiments en

suspension décroissant de l'embouchure vers le large, les valeurs de réflectance qui lui sont associées varieront également de la côte vers le large mais aussi en fonction de l'heure de leur mise en place. Sur cette base, l'on pourrait dire que la subdivision notée «a» sur le profil 2 et qui s'observe juste à la sortie du Bandama (fig. 6a), s'est mise en place deux heures avant la prise de l'image, soit le 11 décembre à 8 h 06. Les deux segments baptisés «b» et «c» seraient en relation avec les deux autres marées basses antérieures, c'est-à-dire celles du 10 décembre à 18 h 36 et 7 h 10, et enfin le segment «d», serait lié à la marée basse du 9 décembre à 17 h 19, conformément aux données de l'annuaire marégraphique de 1986. Sur les plates-formes continentales (CASTAING, 1981), les effets des courants de marée sont souvent masqués par les courants généraux et les courants de dérive dus aux vents. Le panache qui arrive en mer en faveur des marées basses se met en place par conséquent sous le contrôle des courants de marée, des courants généraux et du vent.

6. Conclusion

Le traitement des données HRV centrées sur l'embouchure du Bandama par télédétection satellitaire a permis de montrer que le canal XS2 est adapté pour l'étude qualitative des sédiments en suspension. Les rehaussements, filtrages et profils radiométriques N-S, réalisés sur ce canal, ont permis de mettre en évidence la géométrie du panache dont l'orientation est sous la double dépendance des courants de jusant et des courants de surface du plateau continental. La structuration du panache met en évidence quatre générations de suspension en relation avec les marées basses antérieures à la prise de l'image.

7. Références

- AKA, K. 1991. Sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire : essais de modélisation. Thèse de doctorat, n° 146, Université nationale de Côte-d'Ivoire, 233 p.
- CASTAING, P. 1981. Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes : cas de la Gironde. Thèse de doctorat, n° 701, Université de Bordeaux 1, 530 p.
- CNES-SPOT IMAGE 1986. Manuel de l'utilisateur des données SPOT. SPOT Image, Toulouse, vol. 1-2.
- FROIDEFOND, J. M., CASTAING, P., MIRMAND, M. and RUCH, P. 1991. Analysis of the turbid plume of the Gironde (France) based on SPOT radiometric data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 36, p. 149-163.
- MARTIN, L. 1973. Morphologie, sédimentologie et paléogéographie au Quaternaire récent du plateau continental ivoirien. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 340 p.
- MONET, C. 1972. Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama, Côte d'Ivoire : évolution chimique des eaux de son estuaire. Thèse de doctorat, Université de Nice, 427 p.
- MOREL, A. and PRIEUR, L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnologie Océanographie*, vol. 22, n° 4, p. 709-722.
- ROBINSON, I. S. 1985. *Satellite oceanography : an introduction for oceanographers and remote sensing scientists*. Ellis Horwood, 455 p.

Étude par télédétection des paramètres physiques au parc national de l'Ichkeul (Tunisie)

MOHAMED RACHED BOUSSEMA ¹, MOHAMED FADHEL MEGDICHE ¹
SAMIRA RAÏS ² et RÉGIS CALOZ ³

¹ *Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie; téléphone : +216 (1) 514-700; télécopieur : +216 (1) 510-729*

² *Laboratoire d'hydraulique, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie; téléphone : +216 (1) 514-700; télécopieur : +216 (1) 510-729*

³ *SIRS, Département de génie rural, École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse; téléphone : +41 (21) 693-57-82; télécopieur : +41 (21) 693-57-90*

Résumé

Ce travail constitue une contribution à l'étude, par télédétection, de quelques paramètres physiques du parc national de l'Ichkeul. Il s'intéresse à la description du lac de l'Ichkeul et des zones limitrophes, dont certaines sont caractérisées par une forte dégradation. Les données-images utilisées se composent d'une image MSS de Landsat de 1977, d'une image HRV de SPOT de 1988 et d'une image TM de Landsat de 1989. La numérisation de la carte topographique au 1: 25 000 a permis l'obtention d'un modèle numérique de terrain et des cartes dérivées des pentes et des orientations. L'occupation du sol a été établie au moyen d'une classification dirigée des images. Certaines caractéristiques morphométriques du lac ont été étudiées à savoir la détermination de sa ligne de rivage instantanée, la mesure de sa surface et de son périmètre. L'évolution nette du lac a ainsi été mise en évidence, surtout la diminution des apports des oueds en eau douce et en matériel solide. La méthode utilisée montre l'apport de la télédétection dans le suivi des écosystèmes des parcs comme ceux de l'Ichkeul.

1. Introduction

Le présent article s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche partagée de l'AUPELF-UREF intitulé «apport de la télédétection à l'étude du bassin versant du système lacustre de Bizerte - hydrodynamique des lacs». De par la diversité de ses biotopes (montagne, lac et marais), le parc national de l'Ichkeul est d'une richesse exceptionnelle en faune et en flore sauvages (ENNABLI et KALLEL, 1990). C'est ainsi que ce parc est aujourd'hui inscrit sur trois listes internationales, à savoir : la Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme réserve ornithologique (ou Convention Ramsar), la Convention pour la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel, et le Réseau des réserves de la biosphère de l'UNESCO.

Compte tenu de la problématique de l'écosystème des lacs de l'Ichkeul et de Bizerte, engendrée par le déficit hydrique causé par les aménagements programmés par le Plan directeur des eaux du Nord, plusieurs organismes nationaux et internationaux ont envisagé d'effectuer une étude sur le parc national de l'Ichkeul en vue d'évaluer sa situation écologique actuelle et de déterminer les mesures à prendre pour sa sauvegarde et sa mise en valeur.

Ainsi, cette étude préliminaire a pour objectif général l'évaluation des potentialités de la télédétection dans le suivi de l'écosystème du parc national de l'Ichkeul et la contribution à l'élaboration d'un système d'information géographique (SIG) relatif à cette région. Plus particulièrement, l'étude vise la cartographie de la dynamique de l'environnement, l'inventaire des aspects statiques et des changements survenus dans le milieu physique par l'activité humaine ou par la nature, causant la dégradation du parc.

2. Description du site

Le parc national de l'Ichkeul est situé à l'extrême nord de la Tunisie et il s'étend entre 9°35' et 9°45' de longitude ouest et 46° à 50°15' de latitude nord. Il comprend le jebel Ichkeul (508 m d'altitude), le lac et des marais. Le lac draine un bassin versant d'une superficie de 2 080 km² (en gris sur la figure 1). Il constitue une vaste dépression en communication avec le lac de Bizerte auquel il est relié par l'oued Tinja. Sa superficie varie de 78 à 90 km² (ENNABLI et KALLEL, 1990).

Les principaux cours d'eau qui se déversent dans ce lac sont les oueds Sejnane, Joumine, Tine, Ghezala, Melah, Douimis et Tinja.

La zone de l'Ichkeul connaît un climat méditerranéen humide, caractérisé par une grande variabilité des précipitations, des vents et des températures. Ce climat conditionne fortement l'état de l'écosystème du parc. Les moyennes pluviométriques annuelles sont variables dans le temps et dans l'espace. Elles dépendent de l'altitude et varient entre 500 mm, dans les plaines, et 900 mm, sur les hauteurs. Sur les reliefs de l'ouest, elles sont importantes : de l'ordre de 600 mm/an. La quasi-totalité des pluies annuelles (environ 96 %) s'étale sur la saison fraîche (de septembre à mai). Le maximum de pluviométrie est généralement observé au cours des mois de décembre, janvier et février. Les trois mois restants de l'année sont caractérisés par un climat très sec. Par ailleurs, et généralement en automne, les pluies ont un caractère torrentiel typique du climat méditerranéen et ont des conséquences géomorphologiques sur des terrains exposés à l'érosion (MATHLOUTHI, 1985).

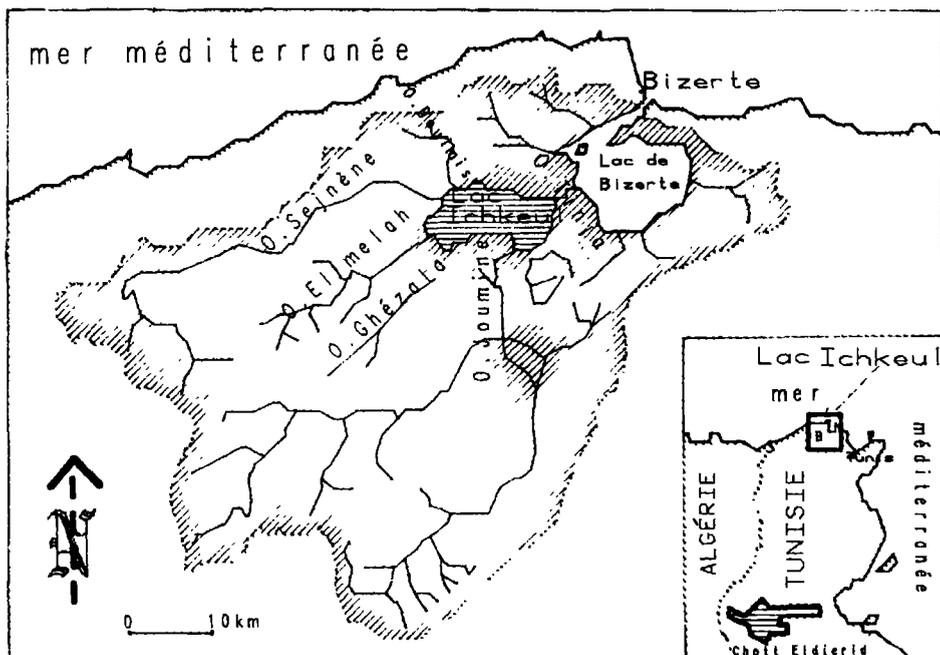


Figure 1. Localisation géographique

Pendant les saisons fraîches, les vents dominants, soufflant surtout du nord-ouest, sont généralement forts et souvent générateurs de pluies, tandis que, dans la période estivale, les vents soufflent surtout de l'est et du sud. Les vents provoquent une forte agitation de l'eau, accompagnée d'une remise en suspension des sédiments.

Au cours de l'année, la région du système lacustre de Bizerte bénéficie d'un régime thermique modéré grâce aux influences maritimes. Cependant, de grandes variabilités saisonnière et journalière s'observent d'une saison à une autre comme pour le régime pluviométrique. À l'opposé des précipitations et pendant la saison chaude (de mai à septembre), les températures atteignent les valeurs les plus importantes, ce phénomène accentue l'évaporation et favorise la déflation sous l'action des vents, surtout à l'est, en raison de l'ensablement de la région. Dans cette période, le mois d'août reste le plus chaud de l'année. Pendant la saison fraîche, les variations journalières de la température sont parfois importantes, elles peuvent aller du simple au double. Les températures basses sont plus fréquentes et plus accusées dans les reliefs, ce qui doit favoriser parfois le phénomène de gélification. Le minimum absolu enregistré (1965-1982) dans la station de Bizerte-Sidi Ahmed, au mois de février, est de $-4,2^{\circ}\text{C}$ (MATHLOUTHI, 1985).

L'abondance de l'eau (mer, lac de Bizerte, lac de l'Ichkeul, oueds, marécages et végétation) favorise le phénomène de l'évaporation, particulièrement pendant l'été quand l'intensité de l'éclairement et de l'insolation est à son maximum. Ce phénomène est à l'origine de l'assèchement des marécages et de l'abaissement du niveau du lac de l'Ichkeul qui tend à être compensé par l'intrusion de l'eau salée du lac de Bizerte.

3. Données et méthodes de traitement

Pour effectuer cette étude, une image TM de Landsat du 29 octobre 1989, une image MSS de Landsat du 26 janvier 1977 et une image HRV de SPOT du 5 mai 1988 ont été utilisées. La zone est couverte par une carte topographique au 1: 25 000 datant de 1981.

Le traitement des images satellitaires a été effectué à l'aide du logiciel IDRISI, tandis que la numérisation des cartes a été réalisée en utilisant le logiciel ARC/INFO.

La méthodologie adoptée est présentée schématiquement par l'organigramme de la figure 2.

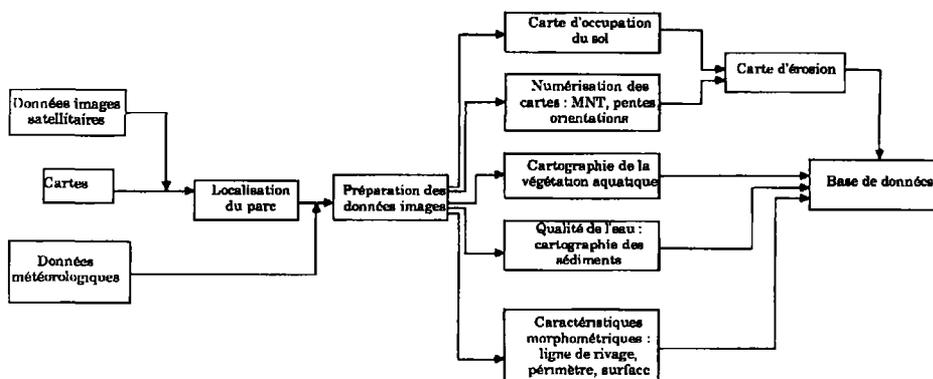


Figure 2. Méthodologie adoptée

Une fenêtre relative à la zone d'étude a été extraite et appliquée à toutes les scènes disponibles. Des corrections géométriques par la méthode polynomiale, utilisant cinq points d'appui, ont été effectuées sur les différentes images obtenues afin de les rendre superposables entre elles ainsi qu'aux cartes existantes.

4. Résultats

4.1. Carte d'occupation du sol

Pour l'étude de l'occupation du sol, une classification dirigée, basée sur la méthode du maximum de vraisemblance, a été effectuée sur les images multibandes à des dates différentes (fig. 19-3, voir cahier couleur).

Le résultat obtenu sur l'image de janvier 1977 (fig. 19-3a, voir cahier couleur) est surtout caractérisé par la présence de poches d'eau turbide (couleur jaune) au niveau de l'embouchure des oueds Sejnene et Melah. La même couleur se retrouve au niveau de l'oued Tinja, assurant la liaison avec le lac de Bizerte. Trois autres classes correspondent à la présence de végétation aquatique qui, selon OUKAD (1982), sont : *Salicornia marsh* (en bleu foncé), *Ampelodesma mauritanica* (en magenta) et *Potamogeton pectinatus* (en brun). Sur l'image de mai 1988 (fig. 19-3b, voir cahier couleur), nous constatons la

disparition des poches d'eau turbide et l'apparition de *Scirpus marsh* (en magenta et brun) et de phragmites (en vert moyen). Sur l'image d'octobre 1989 (fig. 19-3c, voir cahier couleur), on voit les extensions des classes correspondant au *Potamogeton* (en magenta) et l'*Ampelodesma* (en vert moyen).

4.2. Numérisation des cartes

La numérisation des cartes au 1: 25 000, couvrant la zone d'étude, a été réalisée. Ainsi, selon le schéma classique de saisie de données pour un SIG, plusieurs couvertures ont été réalisées comportant : les courbes de niveau, le réseau hydrographique et les limites du lac Ichkeul en 1981. Les différentes couvertures d'une même entité ont été assemblées par la suite. Après transformation du plan des courbes de niveau en coordonnées Lambert, le module SEM (*Structured Elevation Model*) d'ARC/INFO a permis de créer le modèle numérique de terrain (MNT), les cartes de pente, d'orientation des pentes et des superpositions des différentes couvertures avec le MNT.

4.3. Étude de caractéristiques morphométriques

L'exploitation des images MSS, TM et HRV, corrigées géométriquement, a permis d'obtenir la ligne de rivage instantanée. Le canal proche infrarouge a fourni le meilleur seuil dichotomique entre eau et terre émergée. Pour un bon seuillage, il faut éviter la confusion entre la terre émergée et l'eau très turbide. La différence de nature physique entre les eaux même turbides et la terre émergée même humide doit se traduire par une discontinuité sur le transect radiométrique (PESTRE et VERGER, 1980). L'analyse des histogrammes des différentes images a pu identifier quatre populations : eau du lac, terre émergée, eau turbide, mélange terre émergée-eau turbide. Le centre de la classe, correspondant à la discontinuité des propriétés radiométriques, a été choisi comme seuil pour la mise en évidence de la ligne de rivage. Celle-ci a été ainsi déterminée pour les trois images et a permis de déterminer, par la suite, l'aire et le périmètre du lac aux différentes dates (tab. 1).

Tableau 1. Périmètre et superficie du lac de l'Ichkeul à différentes dates

	MSS de Landsat (26-01-1977)	HRV de SPOT (05-05-1988)	TM de Landsat (29-10-1989)
Périmètre (km)	92,45	79,51	65,32
Superficie (km ²)	107,16	103,40	73,84

5. Discussion

L'un des problèmes les plus persistants en télédétection, au niveau des solides en suspension dans l'eau, est la difficulté de discriminer entre les effets de la turbidité et les algues. Plusieurs indices de végétation ont été essayés, ce sont les classifications qui ont donné les résultats les plus significatifs et qui confirment certains travaux antérieurs (MATHLOUTHI, 1985; OUKAD, 1982). Pendant les périodes de prises de vues, soit

l'automne (TM : 29 octobre 1989) et le printemps (HRV : 5 mai 1988), l'évaporation est relativement importante (DJEKBI, 1993) et l'activité chlorophyllienne se trouve masquée par cet effet. La teneur en eau de la végétation aquatique vient de son côté amplifier ce phénomène. Ainsi, le comportement spectral de cette végétation et celui de l'eau du lac se confondent. Cela explique l'échec de l'application des différents indices de végétation rencontrés dans la littérature.

Les différents résultats obtenus ont permis d'effectuer une étude d'évolution. Sur l'image de 1977 (fig. 19-3a, voir cahier couleur), avant le début de construction des barrages prévus sur les six oueds, et en particulier celui de Joumine, on met en évidence l'apport d'eau douce et d'eau turbide rentrant dans le lac. Ces apports sont beaucoup moins évidents sur les images de 1988 et de 1989 (fig. 19-3b et 19-3c, voir cahier couleur). Peut-on ainsi confirmer que, jusqu'à 1985, date de mise en service du barrage de Joumine, les apports sédimentaires ont assuré un flux de matières qui a permis à l'écosystème «lac de l'Ichkeul et de ses marais-lac de Bizerte» de se développer et de se maintenir en équilibre ? De plus, la turbidité pourrait être utilisée comme traceur naturel de la circulation des masses d'eau dans le lac (fig. 19-3a, voir cahier couleur). L'emploi et la validation des modèles numériques de la dynamique sédimentaire et des courants d'eau peuvent ainsi être facilités.

6. Conclusion

Ce travail présente des résultats préliminaires d'une méthodologie développée pour le suivi, à l'aide d'images satellitaires et de données cartographiques, de quelques paramètres physiques décrivant l'écosystème du lac de l'Ichkeul. L'accent a été mis surtout sur la problématique de l'utilisation de la télédétection pour l'étude d'un tel milieu. Plusieurs problèmes restent à résoudre. Il y a d'abord la nécessité de calibrer les données par la recherche d'un repère disposant d'informations sûres et connues. Ensuite, la tendance à la baisse de la superficie du lac est à confirmer. On cherchera par la suite à étudier l'apport des oueds et l'impact des barrages construits sur le lac.

7. Remerciements

Cette étude est rendue possible grâce à une subvention de l'AUPELF-UREF dans le cadre d'un projet de recherche partagée entre l'École nationale d'ingénieurs de Tunis et l'École polytechnique fédérale de Lausanne.

8. Références

- DJEKBI, M. 1993. Étude hydrodynamique et écologique du lac Ichkeul (Partie hydrodynamique). Mémoire de DEA, École nationale d'ingénieurs de Tunis, 133 p.
- ENNABLI, M. et KALLEL, M. R. 1990. Caractérisation hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Ichkeul. Séminaire international sur la sauvegarde du parc national de l'Ichkeul, Rapport introductif, commission 1, Tunis, 16-18 février, 8 p.

Étude par télédétection des paramètres physiques au parc national de l'Ichkeul (Tunisie)

- MATHLOUTHI, S. 1985. Étude géomorphologique des environs du système lacustre de Bizerte. Thèse de doctorat de spécialité, Faculté des lettres, Tunis, 287 p.
- OUAKAD, M. 1982. Évolution sédimentologique et caractères géochimiques des dépôts récents de la Garaet el Ichkeul. Thèse de doctorat de spécialité, Perpignan, 165 p.
- PESTRE, C. et VERGER, F. 1980. Géomorphologie de la baie du Mont-Saint-Michel par télédétection des lignes de rivage instantanées. Annales des Mines, avril-mai 1980, p. 175-181.

Évolution morphodynamique et suivi par télédétection de l'embouchure du fleuve Sénégal

ALIOUNE KANE

*Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines,
Université Cheikh Anta Diop, Dakar-Fann, Sénégal;
téléphone : +221 24-63-70, télécopieur : +221 25-49-77, télex : 51-262 UNIV-DAK*

Résumé

Deux images HRV de SPOT sont utilisées pour suivre le cheminement des eaux d'origine continentale et leur charge sédimentaire, la mobilité et les modifications géomorphologiques de l'embouchure, après l'édification du barrage de Diama, 54 km plus en amont. Les traitements numériques réalisés sur l'image du 01-10-1986 au cours du maximum de la crue annuelle mettent en évidence un panache turbide très développé au large de l'embouchure et la dynamique des eaux dans le chenal fluvial et dans la zone littorale. Sept classes d'eau sont obtenues en fonction des niveaux de gris dans les trois canaux du HRV et des signatures spectrales sont générées avec une bonne séparabilité. À partir du canal XS3 (0,79-0,90 μm : proche infrarouge) fortement absorbé par l'eau, un masque est créé pour tout ce qui est continent. Une classification par le maximum de vraisemblance, une table de pseudo-couleurs et un filtre sont ensuite appliqués aux eaux. Les concentrations des différentes classes d'eau sont extrapolées à partir des mesures effectuées à Saint-Louis en 1981 et 1982, et à Diama en 1989, 1990, 1991 et 1992. L'image en date du 26-11-1990, à la fin de la saison des hautes eaux, montre la prédominance de la dynamique marine et la présence de barres d'avant-côte témoigne de la faiblesse des débits liquides et des apports terrigènes. La comparaison des deux images montre des modifications importantes, notamment l'allongement de la Langue de Barbarie avec l'apparition de nombreuses zones de flexion et la fermeture progressive de la lagune de Mboumbaye. L'écodynamique révèle la faiblesse des débits fluviaux et une relative stabilisation de la Langue de Barbarie. L'embouchure a atteint sa limite maximale de progression sans que l'on ne puisse prévoir de rupture prochaine du cordon dunaire.

1. Introduction

Le bassin du Sénégal s'étend entre 10°30' et 17°30' de latitude Nord sur environ 289 000 km². À partir de Rosso (fig. 1), à 165 km de l'embouchure, la géomorphologie du cours inférieur est celle d'un delta dont les défluents ont été, à l'Holocène, recapturés par le cours principal brusquement détourné vers le sud. Ainsi, dans l'ultime partie de son cours, le Sénégal abandonne la direction E-O pour obliquer vers le sud et longer la mer en s'en rapprochant progressivement. Au niveau et en aval de la ville de Saint-Louis, le fleuve n'est plus séparé de l'océan que par un unique et mince cordon sableux, de largeur décroissante du nord au sud, la Langue de Barbarie, et son embouchure se déplace constamment vers le sud.

2. Approche géomorphologique du littoral

2.1. Langue de Barbarie

La Langue de Barbarie est une flèche littorale (fig. 2) de sable fin blanc, dont l'âge s'échelonne entre 4000 et 1900 ans B.P. (MICHEL, 1973). Elle est encore aujourd'hui le résultat d'un long processus alternatif d'engraissement et de démaigrissement de la plage par la dérive littorale. On y distingue trois segments : 1) un segment proximal, depuis la racine de la flèche à 3 km au nord de Saint-Louis jusqu'à l'hydrobase; 2) un segment médian, de l'hydrobase à la hauteur de Gandiole; 3) un segment distal, de Gandiole à l'embouchure, où les hauteurs sont faibles (< 2 m) et les largeurs minimales (< 200 m).

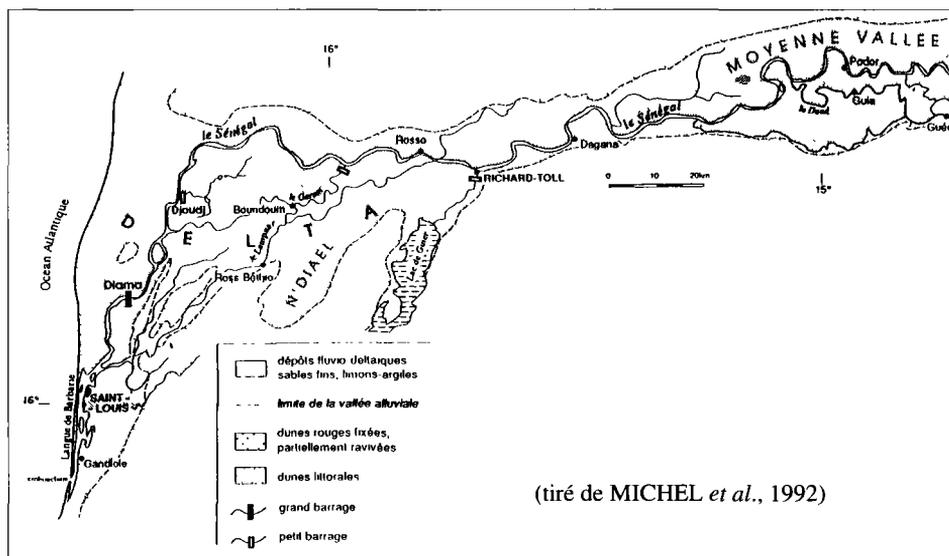


Figure 1. Carte de situation du delta du fleuve Sénégal

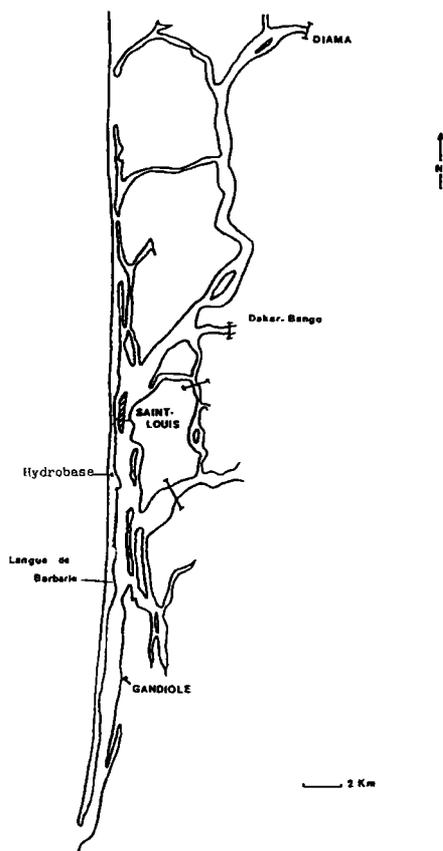


Figure 2. L'estuaire du fleuve Sénégal

Dans le sens transversal, la Langue de Barbarie peut être divisée en trois secteurs : 1) un secteur maritime, ou rivage externe, constitué par la plage sous l'influence de la dynamique marine; 2) un secteur de dunes (haute plage et dunes vives littorales) sous l'influence du vent; 3) un secteur fluvial, ou rivage interne, soumis à l'influence directe des écoulements de la crue fluviale et de la marée estuarienne.

2.2. Embouchure du fleuve Sénégal

Le maintien d'une embouchure, soit à l'extrémité, soit le plus souvent au travers du cordon littoral, est essentiellement le résultat des courants littoraux et fluviaux. L'embouchure du Sénégal est caractérisée par sa mobilité, tout en conservant une largeur assez constante d'ordre kilométrique. L'embouchure du côté de la mer est traversée par une barre de sable sur laquelle viennent se briser de hautes vagues, modifiées lors de la rencontre du courant fluvial avec les eaux océaniques. Grâce à son courant et au volume d'eau charrié, le fleuve y fait deux ouvertures appelées passes. Les profondeurs à l'embouchure du fleuve sont faibles et se modifient continuellement. Elles varient de 2,5 à 3,5 m selon les saisons : les plus élevées sont obtenues en saison sèche et les plus faibles en hivernage.

2.3. Principaux facteurs responsables de la dynamique

La houle et la dérive littorale du NO transportent et déposent les sables sur le rivage externe; les estimations du transit sédimentaire effectué le long de la Langue de Barbarie, calculées selon diverses méthodes, sont variables suivant les auteurs : SURVEYER *et al.* (1972) trouvent en moyenne 900 000 m³/an, PINSON-MOUILLOT (1980) avance un chiffre de 1 500 000 m³/an, tandis que BARUSSEAU (1980) donne des valeurs comprises entre 223 000 et 495 000 m³/an et, enfin, SALL (1982) l'estime à 365 000 m³/an. L'évolution du rivage interne est sous la dépendance, d'une part, des apports sédimentaires transportés par les flots annuels de la saison des hautes eaux et, d'autre part, des actions de remontée des eaux marines dans l'estuaire pendant la saison des basses eaux. Le Sénégal ne transporte en période de crue que de fines particules (diamètre inférieur à 0,05 mm selon KANE, 1985).

3. Variation de la morphologie et de la position de l'embouchure du fleuve Sénégal

3.1. Mécanismes de translation

Le maintien d'une embouchure soit à l'extrémité, soit le plus souvent au travers du cordon littoral, est essentiellement le résultat de l'influence des courants de marées (TRICART, 1961; GAC *et al.*, 1982). L'embouchure du Sénégal est caractérisée par sa mobilité; la passe subit une translation vers le sud. Ce déplacement implique une mobilisation et un dépôt sur la bordure nord et une érosion sur la bordure sud. Au bout d'une période d'environ 11 ans (NICOLAS, 1954) ou 14 ans en moyenne (GAC *et al.*, 1982), durant laquelle l'embouchure progresse vers le sud, une nouvelle brèche se produit dans le cordon littoral, à 7 ou 8 km au nord, tandis que l'ancienne embouchure se ferme. Il faut remarquer, avec DIAKHATÉ (1988) que l'ouverture d'une nouvelle passe creusée dans le cordon n'entraîne pas la disparition de sa partie aval; au contraire, celle-ci subsiste et peut se rattacher au continent par son extrémité méridionale. Il se forme alors, au sud de la passe, une lagune dont l'étendue est peu à peu réduite par la migration de la nouvelle embouchure.

3.2. Facteurs de la translation

De nombreuses études effectuées en vue d'aménagements portuaires ont souligné le rôle primordial de la dynamique littorale dans la construction et l'érosion du cordon sableux. Les résultats de ces travaux (KANE, 1985) peuvent être résumés ainsi :

- la Langue de Barbarie est une formation de la dérive littorale, parallèle à la côte et orientée vers le sud;

- la vitesse du courant, et donc le transport littoral, sont fonction de l'énergie de la houle. Cette puissance de la houle augmente en saison sèche et coïncide avec la progression de l'embouchure vers le sud. Il existe une relation directe entre le transit littoral et l'énergie cinétique de la houle; on sait que la côte sénégalaise, au large de l'embouchure du fleuve Sénégal, est soumise à l'une des plus fortes agitations au monde; la puissance de la houle y serait de l'ordre de $110 \cdot 10^7$ ergs (COLEMAN and WRIGHT, 1975), c'est-à-dire 550 fois plus importante qu'au niveau du Mississippi, 50 et 5 fois plus forte qu'aux embouchures respectives du Niger et du Nil. La partie active du transit littoral est localisée à faible

profondeur (de 0 à -2,50 m : I.G.N.) dans la zone des brisants où le courant atteint sa valeur maximale;

- la dynamique de son système hydrologique, car le fleuve Sénégal avec le temps a rompu et a continué encore récemment de rompre le cordon littoral en des endroits de faiblesse, appelés «zones de flexion» (DIAKHATÉ, 1988), vu le caractère temporaire des ouvertures pratiquées par les eaux de crue. Le façonnement du delta et l'évolution de ses formes actuelles sont particulièrement liés à l'action érosive des eaux de la crue, de leur charge en matières en suspension et de leur vitesse de propagation.

Les contours de la côte du delta du Sénégal sont donc le résultat d'un état d'équilibre provisoire entre l'action du fleuve et des courants littoraux engendrés par la houle.

3.3. Essai de reconstitution de la morphodynamique

D'anciennes embouchures avaient été reconnues au nord de Saint-Louis : l'un des premiers débouchés connus avec certitude est le marigot de Niader (dit marigot des Maringouins), situé à 6,6 km au nord de Saint-Louis et emprunté jusqu'à la fin du XVIII^e siècle par des navires de plus de 60 tonneaux selon divers témoignages. D'autres traces d'embouchures ont été décelées au nord de Ndiago et de Salsal (NICOLAS, 1954).

La recherche d'un exutoire définitif du fleuve sur l'océan s'est accompagnée de modifications du tracé du bras principal qui longe désormais le littoral de Barbarie. L'ouverture à proximité de Saint-Louis date du milieu du XVII^e siècle (TRICART, 1961) et, depuis 1850, il n'y aurait jamais de nouvelles communications fleuve-océan au nord de la ville. NICOLAS (1954) signale que l'île de Saint-Louis, établie sur un banc de sable, n'aurait pu exister à son emplacement actuel qu'après la migration de l'embouchure vers une position plus méridionale, sinon, elle aurait disparu comme beaucoup d'autres îles (Gueber, Sal, îles aux Anglois, etc.) avec les migrations de l'embouchure. Depuis son origine, l'embouchure du Sénégal s'est alors acheminée très régulièrement vers le sud avec, par intermittence, des replis de 4 à 5 km vers le nord. On note une évolution dans le sens longitudinal avec l'allongement de la Langue de Barbarie vers le sud jusqu'à une limite située à 30 km en aval de Saint-Louis, suivie de ruptures du cordon et d'une migration de l'embouchure. Le cordon littoral extrêmement mobile ne s'est ni élargi, ni surélevé, mais il n'a cessé de se développer, de s'étendre et de reprendre inlassablement, après chaque rupture, sa progression vers le sud.

La Langue de Barbarie a compté pas moins de 24 ruptures :

- de 1850 à 1900, 7 ruptures importantes ont été dénombrées; la plus forte a eu lieu en 1884 en provoquant le démantèlement du cordon sur près de 4 km;
- depuis 1900, 13 ruptures d'importance inégale se sont produites : la plus connue a eu lieu au mois de mars 1959 et la plus récente s'est produite en 1973.

4. Suivi par télédétection et cartographie de l'évolution récente

Le cadre géographique couvert par les images s'étend depuis l'embouchure du fleuve Sénégal (feuille Louga : environ 15°50' de latitude N et 16°30' de longitude O) et le parc national aux oiseaux du Djoudj (feuille Saint-Louis : 16°30' de latitude N et 16°25' de longitude O). Deux sous-images centrées sur le panache turbide, l'embouchure et la partie est ont été créées, l'une de 1024 x 1024 pixels (fig. 20-3, voir cahier couleur) et l'autre de 512 x 512 pixels (fig. 20-4, voir cahier couleur).

4.1. Hydrologie fluviale dans l'estuaire du Sénégal après la mise en eau du barrage de Diama

Le barrage de Diama, édifié à 54 km de l'embouchure et mis en eau en novembre 1985, est conçu pour arrêter la remontée des eaux marines dans le cours inférieur du fleuve pendant la saison des basses eaux et créer ainsi un réservoir d'eau douce dans la basse vallée.

Pendant la saison des hautes eaux, les vannes sont largement ouvertes et le débit fluvial est suffisamment élevé pour repousser les eaux marines dans l'estuaire, au large de l'embouchure. À la station hydrologique de Diama, les écoulements sont déterminés grâce à un programme de PIEKUTOWSKI (1990). Avec ce programme, on considère que le débit d'une vanne de réglage noyée est assimilable au débit d'un orifice et que le débit peut donc être calculé par la formule suivante :

$$Q = C \cdot A \cdot (2g \cdot \Delta H)^{1/2}$$

- où Q = débit (m³/s);
 C = coefficient de débit de l'orifice;
 A = superficie de l'orifice (m²);
 g = accélération de la gravité (9,8 m/s²);
 ΔH = charge hydraulique (niveau d'eau amont - niveau d'eau aval) (m).

Cet auteur, grâce à cette formule, a pu déterminer les déversements au barrage de Diama entre 1986 et 1989. Nous avons procédé de la même manière pour 1990.

Au 01-10-1986, la situation hydrologique, correspondant à une forte expulsion de sédiments, se présente telle qu'indiquée sur le tableau 1. Le volume total écoulé au barrage de Diama à cette date est d'environ 4,162 · 10⁹ m³, soit la moitié de l'écoulement annuel qui s'est élevé à 8,18 · 10⁹ m³ (le barrage étant resté ouvert du 28-07-1986 au 02-12-1986). La moitié des écoulements a donc permis le développement d'un important panache d'eau turbide au large de l'embouchure du Sénégal (fig. 2). Le débit journalier est évalué à 1 231,1 m³/s à Diama pour un volume journalier écoulé de 104,26 · 10⁶ m³. Il faut souligner que le maximum journalier est passé depuis le 25-09-1986 avec un débit de 1 537,8 m³/s.

Tableau 1. Situation hydrologique au barrage de Diama le 01-10-1986

Heure	H aval (m) IGN	H amont (m) IGN	Δ H moyenne (m)	Temps d'ouverture (min)	Débit (m ³ /s)	Volume écoulé (m ³)
00:00-01:00	0,89	1,02	0,125	60	1249	4,5 · 10 ⁶
01:00-07:30	0,88	1,00	0,125	390	1249	2,9 · 10 ⁷
07:30-12:30	0,93	1,04	0,115	300	1198	2,1 · 10 ⁷
12:30-17:40	0,88	1,02	0,125	310	1249	2,3 · 10 ⁷
17:40-23:30	0,93	1,03	0,120	350	1224	2,6 · 10 ⁷
23:30- 24:00	0,89	1,01	0,110	30	1172	2,1 · 10 ⁶

H = Hauteur

IGN = Institut géographique national

Ouverture-palier = 14

Vannes ouvertes = 7

Ouverture nette = 6,704 m

Le volume écoulé à la station de Diama à la date du 28-11-1990 est d'environ $5,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, soit pratiquement la totalité de l'écoulement fluvial vers l'embouchure ($5,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$). Ces déversements ont été les plus faibles enregistrés à Diama depuis la mise en eau du barrage. Les débits moyens journaliers sont considérablement réduits, le maximum enregistré en pleine saison hydrologique n'est que de $801,6 \text{ m}^3/\text{s}$ le 02-09-1990, et il s'établit à $117 \text{ m}^3/\text{s}$ le 28-11-1990.

Sur l'image du 28-11-1990 (fig. 20-4, voir cahier couleur), les eaux douces d'origine continentale pénètrent très faiblement dans le milieu océanique. La faiblesse de l'écoulement, la rétention des eaux douces en amont du barrage et la saison hydrologique assez avancée expliquent l'absence de panache d'eau turbide.

4.2. Turbidités côtières, dynamique et circulation des masses d'eau

Les variations saisonnières de la turbidité des eaux du Sénégal sont très visibles et il est aisé d'en esquisser le schéma général. Pendant la saison des hautes eaux, les eaux fluviales sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons; leur couleur est alors «jaune-sale». Elles s'éclaircissent à partir de la fin novembre-début décembre et deviennent «bleu-sombre» dès la fin décembre avec la fermeture totale des vannes du barrage de Diama et l'arrivée massive des eaux marines dans l'estuaire du Sénégal.

Sur l'image du 01-10-1986 (fig. 20-3, voir cahier couleur), on observe un panache d'eau douce turbide particulièrement bien développé autour de l'embouchure du fleuve Sénégal. Les distinctions opérées sur l'image permettent de voir nettement :

- une frange d'eaux douces continentales extrêmement turbides, centrée dans le chenal fluvial et au droit de l'embouchure du fleuve Sénégal;
- une frange d'eaux de transition vers le large, avec une diminution progressive de la concentration des matières en suspension : c'est une zone de dilution et de décantation;
- une grande masse d'eaux marines.

La position de ce panache se révèle être un bon traceur pour le suivi de la dynamique des masses d'eau et montre d'ailleurs une bonne correspondance avec le schéma courantométrique du littoral nord sénégalais.

Les grands traits de la circulation marine de la zone tropicale sont suffisamment bien connus (REBERT, 1980) à la latitude du Sénégal; deux grandes circulations superficielles existent au large : 1) le courant nord équatorial qui transporte vers l'ouest des eaux froides du courant des Canaries; 2) le contre-courant équatorial qui transporte vers l'est les eaux chaudes et salées formées sur la bordure sud du tourbillon nord atlantique.

À la côte, cette circulation zonale se transforme en circulation méridienne sur le plateau continental. En ce qui concerne la dynamique saisonnière du panache turbide, on a donc :

- le flot principal qui est d'abord dirigé vers le nord sous l'effet des courants moins stables, circulant entre juin et août, et de la rotation naturelle vers la droite d'un écoulement d'eau douce en mer dans l'hémisphère nord;
- pendant la saison chaude (septembre-octobre), correspondant à la date de l'image de 1986, une renverse générale des courants, sur toute la côte nord et un courant qui se développe vers le sud; ce phénomène est mal connu et souvent passe inaperçu; selon REBERT (1980), le seul critère mettant en évidence l'existence d'un tel courant est l'apparition d'eau dessalée à la station de Kayar; «en effet, alors que le flux d'eau dessalée provient du sud et crée un gradient sud-nord de salinité, il se produit soudain une chute brutale des salinités à Kayar qui ne peut être attribuée qu'à l'arrivée des eaux du fleuve Sénégal; donc à un courant sud»;

- une période de courants, associée à des eaux froides, qui dure de novembre à mai, et qui assure alors le transport et la dispersion des sédiments; son influence est alors perceptible au large du Cap-Vert jusqu'en janvier, surtout pendant les années de très forte crue.

Ce panache d'eau turbide dessalée est caractérisé par une salinité croissant à l'embouchure et, toujours selon REBERT (1980), au niveau de Saint-Louis, la salinité peut être inférieure à 20 ‰. Cependant, son épaisseur en mer reste très faible et l'influence des eaux du fleuve n'est en général perceptible que dans les dix premiers mètres, là où est essentiellement confiné le transport vers le large.

4.3. Traitements numériques des images

L'analyse des résultats d'images HRV de SPOT, du 1^{er} octobre 1986 et du 28 novembre 1990, met en évidence un panache turbide au large de l'embouchure du fleuve Sénégal, les charges en suspension dans l'estuaire, ainsi que la typologie des paysages de la zone littorale.

Les traitements appliqués aux images ont comporté les procédures suivantes : création de la base de données, rehaussements radiométriques, choix de sites d'entraînement, détermination de signatures spectrales, création d'un masque dans le canal 3 pour séparer tout ce qui est eau du continent, classification par maximum de vraisemblance, génération d'une table de pseudo-couleurs et sortie sur papier de l'image classifiée.

Une interprétation des images en fausses couleurs avec rehaussement linéaire a permis le choix des sites d'entraînement uniquement sur l'eau; la classification a été effectuée en fonction du degré de concentration des matières en suspension. D'ailleurs, des courbes d'isoturbidité, variables en fonction des teneurs en sédiments et probablement perturbées par la bathymétrie, peuvent être nettement délimitées. Ainsi, 7 classes d'eau ont été définies à partir des 3 canaux : XS1 (0,50-0,59 μm), XS2 (0,61-0,69 μm) et XS3 (0,79-0,90 μm). Ces classes d'eau définies *de visu*, ont permis de générer des signatures spectrales (tab. 2); une bonne séparabilité est obtenue grâce au test de Bhattacharya (PCI, 1990). La séparabilité moyenne des classes est de 1,998 et elle est comprise dans le bon intervalle 1,9-2,0 (tab. 3). La séparabilité minimale est de 1,982 et la maximale de 2,000.

Dans un premier temps, l'algorithme de classification par le maximum de vraisemblance a été appliqué successivement aux données brutes et aux images rehaussées linéairement. Les résultats sont médiocres car un très faible pourcentage de pixels est classé.

À partir du canal XS3, lequel est fortement absorbé par l'eau, nous avons créé un masque pour séparer l'eau du continent (valeur 0 à tout pixel supérieur à 102). Cependant, il faut souligner que les particules en suspension du panache turbide assurent beaucoup de diffusion du rayonnement électromagnétique.

L'algorithme de classification par le maximum de vraisemblance, appliqué aux trois canaux, donne de bons résultats car tous les pixels «eau» sont pratiquement classés. Ainsi, près de 35 % de l'image a été classifiée à l'intérieur des différentes classes d'eau et 64,57 % des effectifs se rapportent à la surface terrestre, laquelle a été masquée (tab. 4). La classification est ensuite affichée selon une palette de couleurs grâce à une table de pseudo-couleurs, laquelle permet de rendre la valeur d'un pixel par une intensité lumineuse pour chacun des canaux d'affichage.

Le résultat final (fig. 20-3; voir cahier couleur) permet de mieux appréhender les courbes d'isoturbidité. Pourrait-on alors déterminer les classes d'eau en fonction de leur concentration en sédiments ? Nous ne disposons pas de mesures de concentration au moment de la prise de l'image par le satellite le 01-10-1986. Cependant, des données

Tableau 2. Choix des classes et des valeurs des niveaux de gris

Classe	Canal	Niveau de gris minimum	Niveau de gris maximum
Eau douce fortement chargée en M.E.S.	XS1	12	12
	XS2	89	95
	XS3	56	59
Eau douce moyennement chargée en M.E.S.	XS1	12	12
	XS2	86	89
	XS3	47	49
Eau douce faiblement chargée en M.E.S.	XS1	10	10
	XS2	82	84
	XS3	41	42
Eau de transition faiblement chargée en M.E.S.	XS1	8	8
	XS2	63	65
	XS3	34	36
Eau de transition légèrement chargée en M.E.S.	XS1	8	8
	XS2	54	58
	XS3	30	33
Eau de transition légèrement salée et faiblement chargée en M.E.S.	XS1	6	6
	XS2	46	50
	XS3	29	31
Eau de mer	XS1	2	2
	XS2	34	34
	XS3	23	25

M.E.S. = Matières en suspension

Tableau 3. Matrice de séparabilité des classes

Signature spectrale	1	2	3	4	5	6
2	1,982					
3	2,000	1,994				
4	2,000	2,000	2,000			
5	2,000	2,000	2,000	1,988		
6	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	
7	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000

Tableau 4. Classification par maximum de vraisemblance de l'image HRV du 01-10-86

Classe	Nombre de pixels	% de l'image
Eau douce 1	48 889	4,66
Eau douce 2	22 358	2,13
Eau douce 3	21 998	2,10
Eau de transition 1	23 901	2,28
Eau de transition 2	82 788	7,90
Eau de transition 3	58 308	5,56
Eau de mer	113 301	10,81
Partie masquée (terre)	677 023	64,57
Total	1 048 576	100,00

chiffrées sur les teneurs en suspension du Sénégal (KANE, 1985, 1991, 1992) sont disponibles et permettent d'avoir une idée sur l'évolution des eaux turbides.

Il faut dire, qu'au cours de la saison hydrologique, les charges solides en suspension restent supérieures à 200 mg/l jusqu'à l'amorce de la décrue. Ainsi, les plus fortes concentrations journalières observées au cours de quelques cycles d'étude ont été : 1) à la station de Saint-Louis, de 686,4 mg/l le 15-08-1981 et de 415 mg/l le 20-08-1982 (KANE, 1985) bien avant la mise en eau du barrage; 2) à la station de Diama, de 740,6 mg/l le 01-09-1989, 378,9 mg/l le 30-08-1990, 665,5 mg/l le 04-09-1991 et de 529,4 mg/l le 15-09-1992 (KANE, 1991, 1992).

Dès la première quinzaine du mois d'octobre, avec la diminution des précipitations et le début du retrait des eaux fluviales des plaines d'inondation, il y a une baisse brutale de la charge en suspension du Sénégal. Dans cette deuxième phase de la saison hydrologique, nous disposons également de quelques mesures de concentration. Pendant la période d'avant-barrage, à Saint-Louis, des teneurs de 131,4 mg/l le 05-10-1981 et de 151,2 mg/l le 04-10-1982 ont été obtenues (KANE, 1985) alors qu'à Diama les mesures s'échelonnent ainsi : 127,7 mg/l le 01-10-1989, 76,7 mg/l le 02-10-1990 et 143,6 mg/l le 04-10-1991 (KANE, 1991, 1992).

On pourrait extrapoler ces mesures sur l'image HRV de 1986 pour dire que la concentration maximale moyenne serait d'environ 120-130 mg/l pour la classe des eaux douces très turbides alors qu'elle serait nulle pour la masse d'eau océanique.

L'image HRV de 1990 montre les mêmes distinctions eaux douces-eaux salées. Il faut noter cependant :

- la faible pénétration des eaux douces dans le domaine océanique consécutive à la situation au barrage de Diama;
- l'absence d'un panache d'eau turbide à cette période de l'année au large de l'embouchure; néanmoins une faible présence de sédiments est décelée, mise en suspension par les courants marins côtiers et transportée dans la direction générale de la dérive littorale;
- la présence de barres d'avant-côte dont le tracé s'incurve légèrement vers le large au droit de l'embouchure, témoignant de la faiblesse des débits liquides du Sénégal.

À ce moment de la saison hydrologique, l'éclaircissement des eaux fluviales est largement entamé. La concentration en sédiments dans le fleuve est relativement faible, le 30-11-1990, soit de 42,9 mg/l. Cette concentration est assez proche des valeurs obtenues

au cours de quelques années de mesures à Saint-Louis [34,3 mg/l le 27-11-1981; 11,2 mg/l le 29-11-1982 (KANE, 1985)] et à Diama [10,8 mg/l le 27-11-1989; 55,5 mg/l le 26-11-1991; 97,2 mg/l le 22-11-1992 (KANE, 1991, 1992); cette dernière donnée paraît cependant élevée pour la période].

5. Résultats de la cartographie et modifications morphologiques dans la zone d'embouchure du fleuve Sénégal

La comparaison des cartes issues des images de 1986 et de 1990 (fig. 5) montre des modifications géomorphologiques très nettes dans la zone d'embouchure du fleuve Sénégal. Nous remarquons :

- une extension vers le sud de la Langue de Barbarie qui, mesurée sur les deux images, s'est allongée de près de 4000 m;
- un élargissement du segment distal de la Langue de Barbarie qui fonctionne comme une zone d'accumulation de sédiments;
- l'apparition de nombreuses zones de flexion; en effet, sur son rivage interne, la Langue de Barbarie présente des échancrures susceptibles d'être érodées par le courant fluvial;
- un raccourcissement de la flèche sableuse de la lagune de Mboumbaye;
- une portion de la lagune de Mboumbaye, où sa partie terminale est complètement isolée du système estuarien, c'est-à-dire des eaux fluviales et des eaux marines.

Des variations géomorphologiques importantes sont effectives dans la zone d'embouchure du fleuve Sénégal; elles sont étroitement liées à l'hydrodynamisme estuarien, plus ou moins contrôlé depuis 1985 par le fonctionnement du barrage de Diama.

En gros, l'évolution actuelle de la Langue de Barbarie est plutôt marquée, depuis le début des années 1980, par le rétrécissement du rivage externe (la mer avance aujourd'hui dans les secteurs de démaigrissement, de 15 à 50 cm par an selon DIAKHATÉ, 1988), et aussi par l'allongement de sa pointe méridionale. Ceci est confirmé par l'ensablement partiel ou l'exhaussement du mur de protection encore présent sur la plage de Guet-Ndar et de Ndar-Toute, à Saint-Louis, renforcé récemment par des barrages brise-jets perméables contre les hautes marées et leurs effets sur les concessions à proximité de la mer. Tout cela se traduit donc par une érosion très marquée avec un recul de la haute plage et du sillon oblique de 12,5 m au droit de Guet-Ndar et de 2,5 à 5,0 m ailleurs au cours de la saison sèche (BA et SY, 1987). La Langue de Barbarie a atteint son maximum d'extension : l'embouchure est à Taré, soit à près de 30 km au sud de Saint-Louis et elle est susceptible de se rompre sous la poussée de très fortes crues et avec d'importantes charges en suspension.

Depuis 1985, aucune rupture du cordon sableux par la dynamique fluviale ou marine n'a été enregistrée, même si l'extension méridienne et l'érosion sur les rivages internes et externes sont encore réelles. Une stabilisation précaire est observée dans l'évolution du littoral sans que l'on ne sache si le cycle des ruptures va reprendre. Le fonctionnement de Diama se répercute sur l'évolution d'ensemble de l'estuaire.

6. Conclusion

La construction du barrage de Diama et du port de Nouakchott en Mauritanie opère une importante rétention sédimentaire. La réalisation de multiples ouvrages dans le cadre de

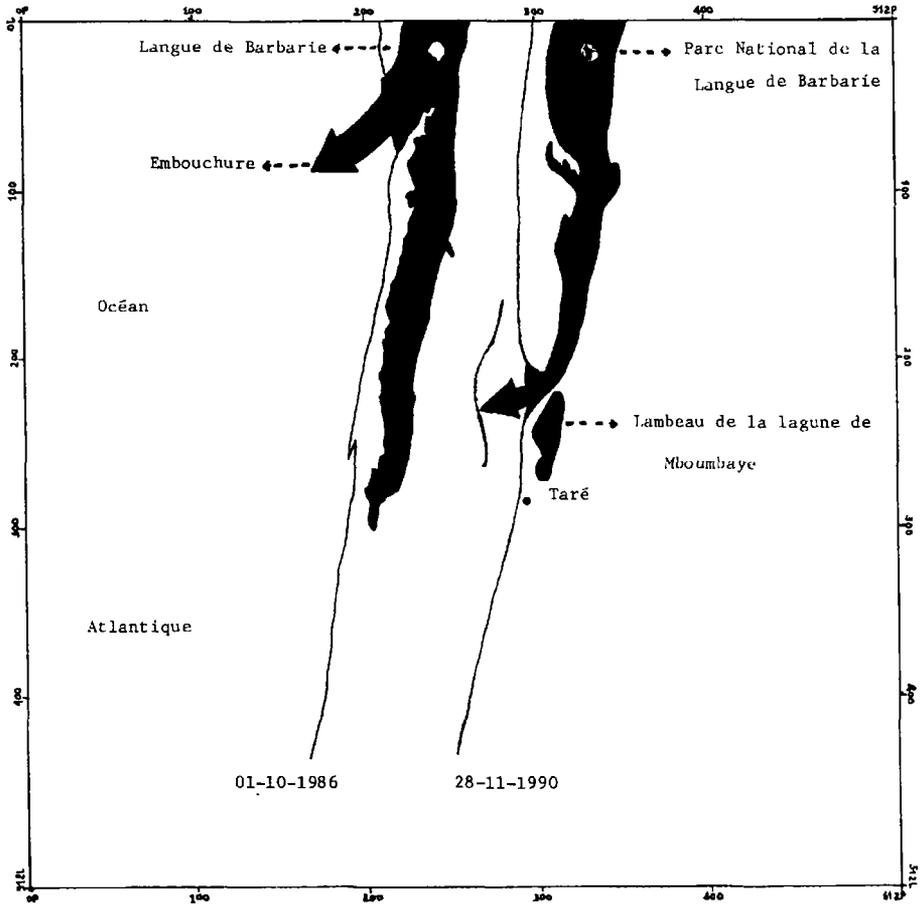


Figure 5. Évolution de la position de l'embouchure du fleuve Sénégal d'octobre 1986 à novembre 1990

l'après-barrage va modifier profondément la morphodynamique dans le bas estuaire avec, notamment : 1) le port en eau profonde en rive gauche au sud de Saint-Louis; 2) le chenal d'entrée qui sera creusé dans la Langue de Barbarie et qui va nécessiter l'excavation de $2 \cdot 10^6$ m³ de sable de plage; 3) le chenal d'approche en relation avec le chenal d'entrée et les infrastructures portuaires qui vont impliquer l'extraction de $1,8 \cdot 10^6$ m³ de sédiments fluvio-marins; 4) les brise-lames de protection du chenal d'entrée. Il paraît donc hasardeux et prématuré de prévoir une quelconque évolution. Un suivi par la télédétection permettra de mieux cerner l'évolution des unités paysagiques du bas delta, désormais sous l'influence de facteurs aléatoires comme l'hydraulicité du fleuve et les courants marins côtiers induits par le chenal d'entrée et le système de brise-lames.

7. Références

- BA, M. et SY, I. 1987. Introduction à la sédimentologie de la Langue de Barbarie et à l'hydrologie de l'estuaire du Sénégal. Études des estuaires et des lagunes du Sénégal. Rapport final, Équipe pluridisciplinaire d'étude des écosystèmes côtiers, Université Cheikh Anta Diop, UNESCO (Division des sciences de la mer), Dakar, 41 p.
- BARUSSEAU, J.-P. 1980. Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint-Louis et Joal (Sénégal). Bulletin ASEQUA (Association sénégalaise d'études du Quaternaire), n°s 58-59, p. 31-39.
- COLEMAN, J.-M. and WRIGHT, L.-D. 1975. Moderns rivers deltas : variability of processes and sand bodies. *In* Deltas (Ed. M.-L. Broussard), Houston Geological Society, p. 99-149.
- DIAKHATÉ, M. 1988. Écodynamique des milieux et effets d'impact potentiel du barrage de Diama dans le delta du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat, Université de Lyon, 450 p.
- GAC, J.-Y., KANE, A. et MONTEILLET, J. 1982. Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. Cahiers ORSTOM, Série Géologie, vol. XII, n° 1, p. 73-76.
- KANE, A. 1985. Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine dans la vallée du fleuve. Contribution à l'hydrologie en milieu tropical humide et à la dynamique estuarienne en domaine sahélien. Thèse de doctorat de 3^e cycle, Université de Nancy II, 205 p.
- KANE, A. 1991. Dynamique sédimentaire et granulométrie des matières en suspension dans l'estuaire et au large de l'embouchure du fleuve Sénégal. Programme CEE-ORSTOM, n° TS20198-F-EDB, projet EQUASEN (Environnement et qualité des eaux du Sénégal), 13 p.
- KANE, A. 1992. Flows of continental sediments in the estuary of Senegal river. *In* Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins. Oslo, International Association of Hydrological Sciences, publication, n° 210, p. 95-98.
- MICHEL, P. 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Mémoire ORSTOM, n° 63, 845 p.
- MICHEL, P., BARUSSEAU, J. P., RICHARD, J. F. et SALL, M. 1992. L'après-barrage dans la vallée du Sénégal. Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques : conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Projet CAMPUS, rapport final, Centre d'études et de recherches éco-géographiques, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 9 p.
- NICOLAS, J.-P. 1954. Essai d'interprétation de l'évolution récente et contemporaine de l'embouchure du Sénégal. Institut fondamental d'Afrique noire-Mission d'aménagement du fleuve Sénégal, Saint-Louis, 12 p.
- P.C.I. 1990. EASI/PACE User's manuals.
- PIEKUTOWSKI, T. 1990. Les déversements au barrage de Diama de 1986 à 1989. Rapport hydrologique établi par le projet USAID/OMVS de suivi des eaux souterraines, Saint-Louis, 8 p.
- PINSON-MOUILLOT, J. 1980. Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 106 p.
- REBERT, J.-P. 1980. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye/Institut sénégalais de recherches agricoles.
- SALL, M.-M. 1982. Dynamique et morphogénèse actuelle au Sénégal occidental. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 604 p.

SURVEYER, NENNIGER et CHENEVERT. 1972. Étude de la navigabilité et des ports du fleuve Sénégal. Études portuaires à Saint-Louis, Kayes et Ambidédi. En collaboration avec C. OSTENFIELD et W. JONSON, Danish Institute of Applied Hydraulics, projet ONU 51/71 Saint-Louis, OMVS.

TRICART, J. 1961. Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. Mémoire du BRGM, n° 8, 137 p.

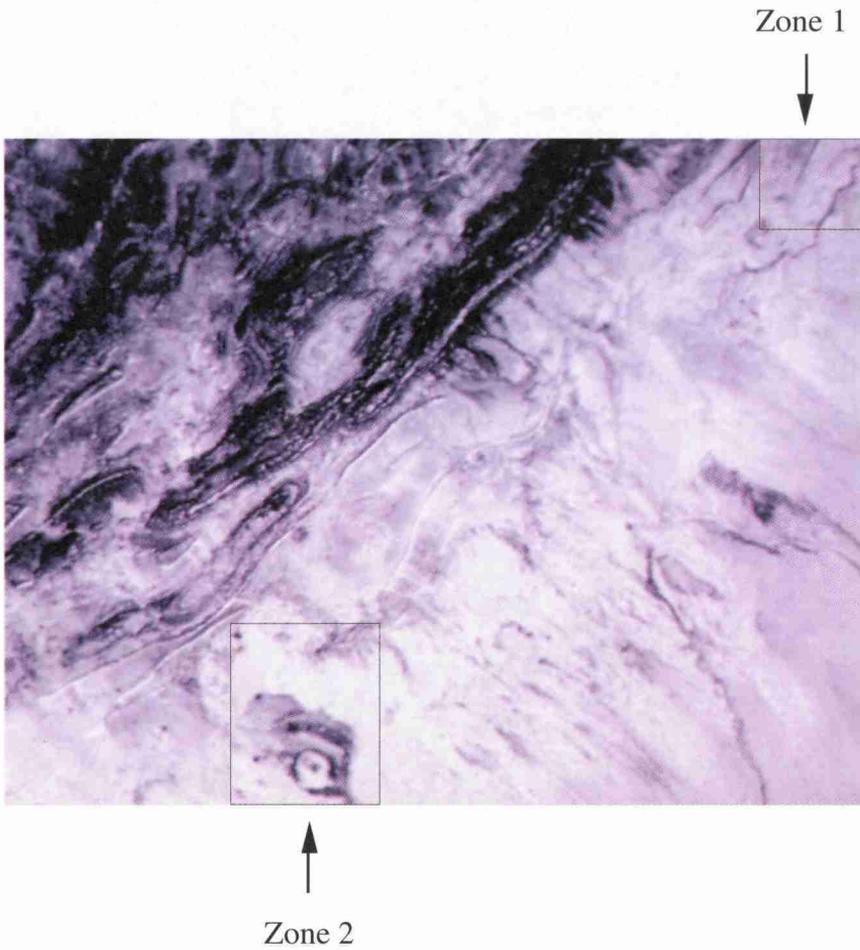


Figure 1-3. Zone globale correspondant à la scène TM 196/37 avec rééchantillonnage de 1 pixel sur 3 en lignes et en colonnes; les zones 1 et 2 correspondent respectivement à la région du sud de Laghouat et à la région de Brézina

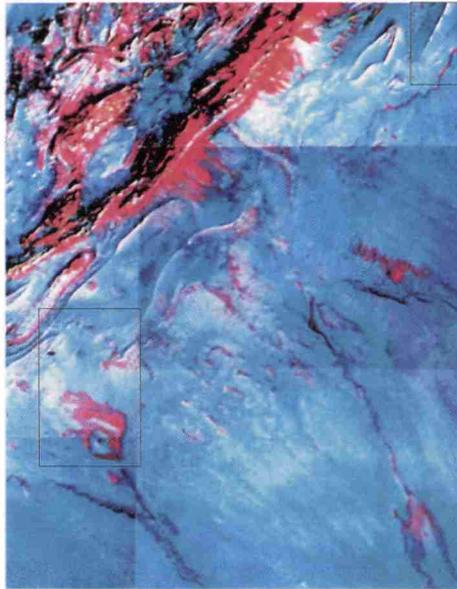


Figure 1-8. Image résultante de la composition colorée des canaux TM4, TM5 et TM6 (thermique) sur la zone globale

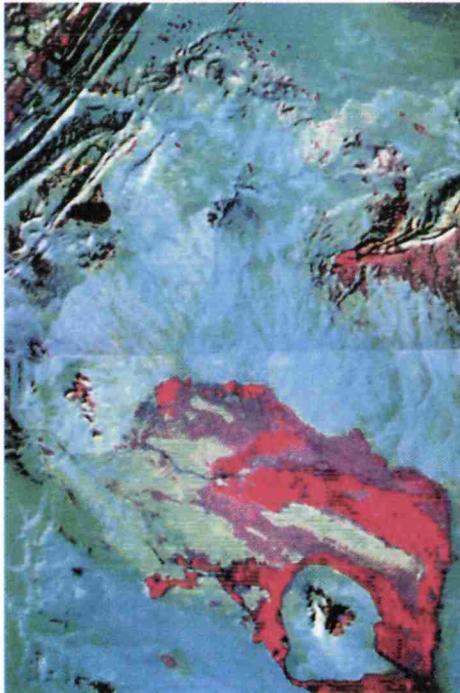


Figure 1-9. Image à pleine résolution, correspondant à la zone pilote 2 (Brézina)

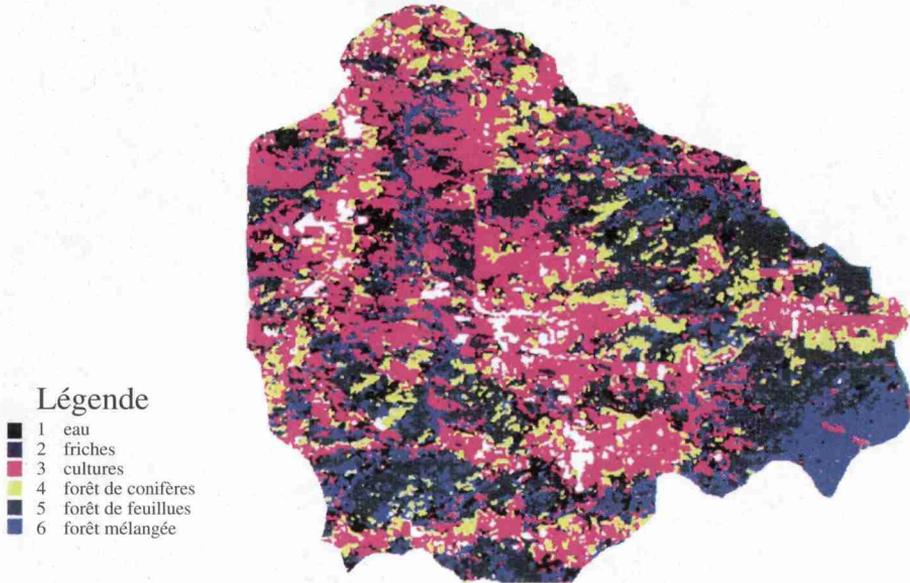


Figure 2-2. Classes d'utilisation du sol issues de l'image TM-Landsat

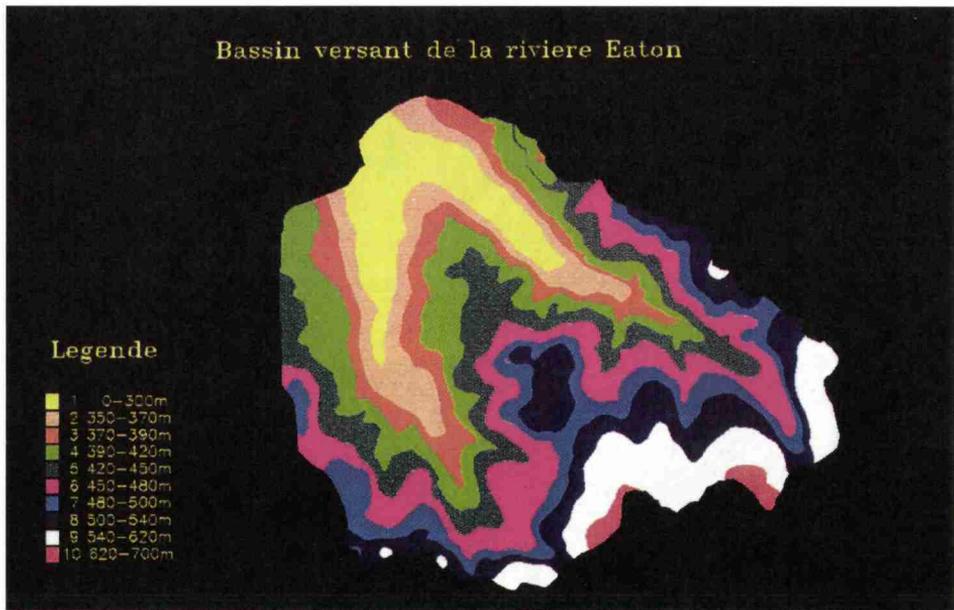


Figure 2-3. Modèle numérique d'altitude à 30 m de résolution

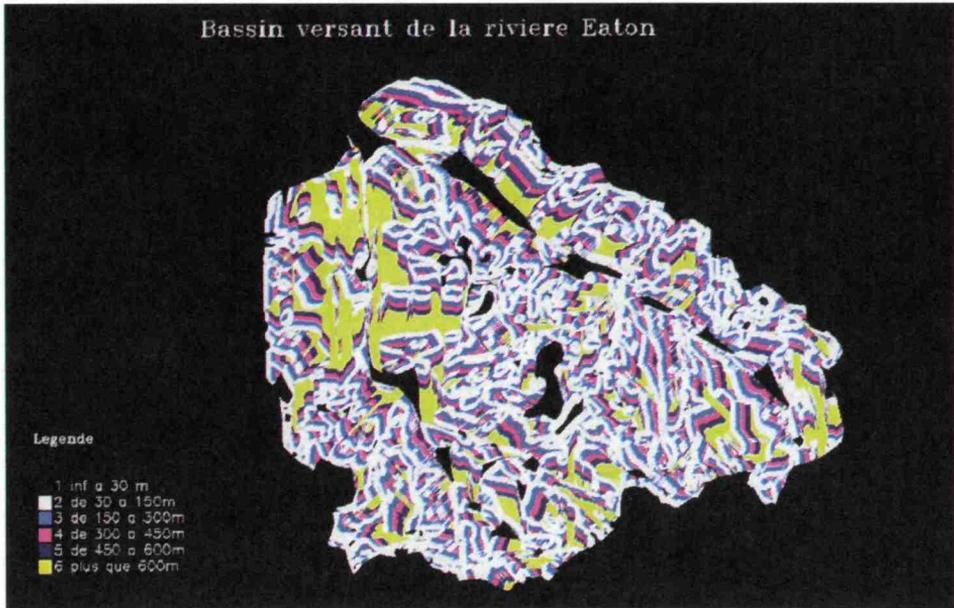


Figure 2-4. Longueurs de pente issues du MNA à 30 m de résolution (tiré de FORTIN *et al.*, 1991)

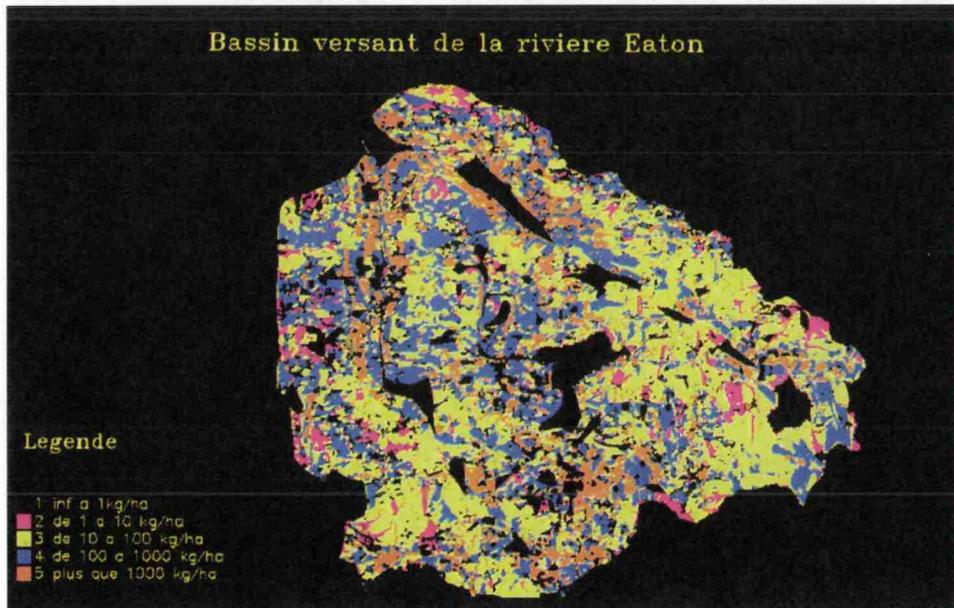
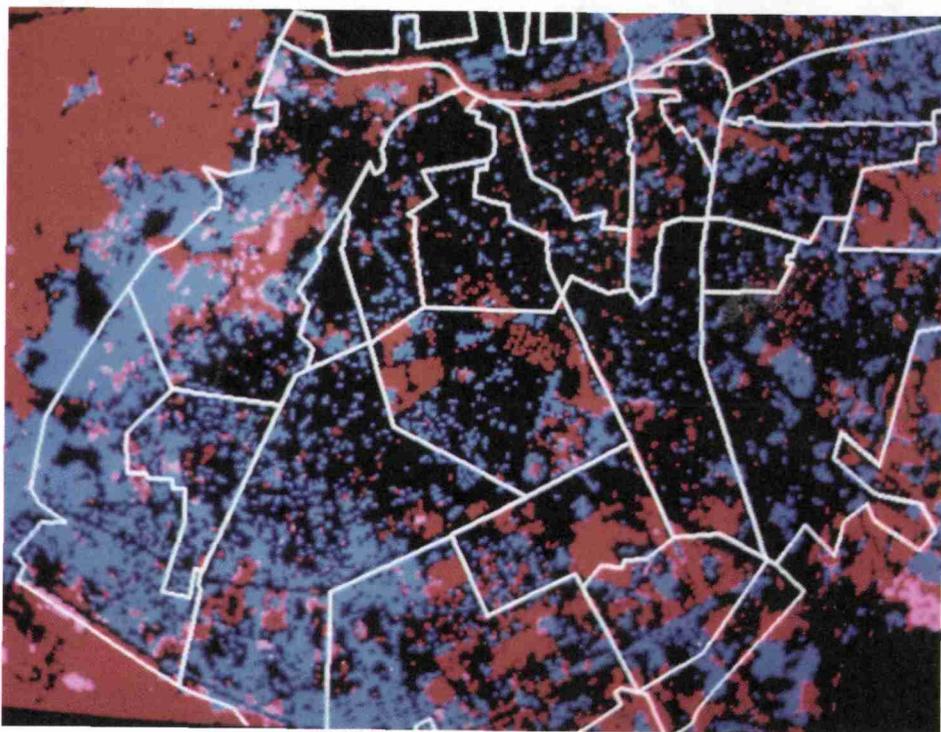


Figure 2-6. Pertes de sol simulées pour un mois selon la MUSLE



Légende

Bleu : sols nus

Rouge : végétation

Rose : pixels mixtes

Figure 3-1. Résultats des classifications sur l'image HRV de SPOT

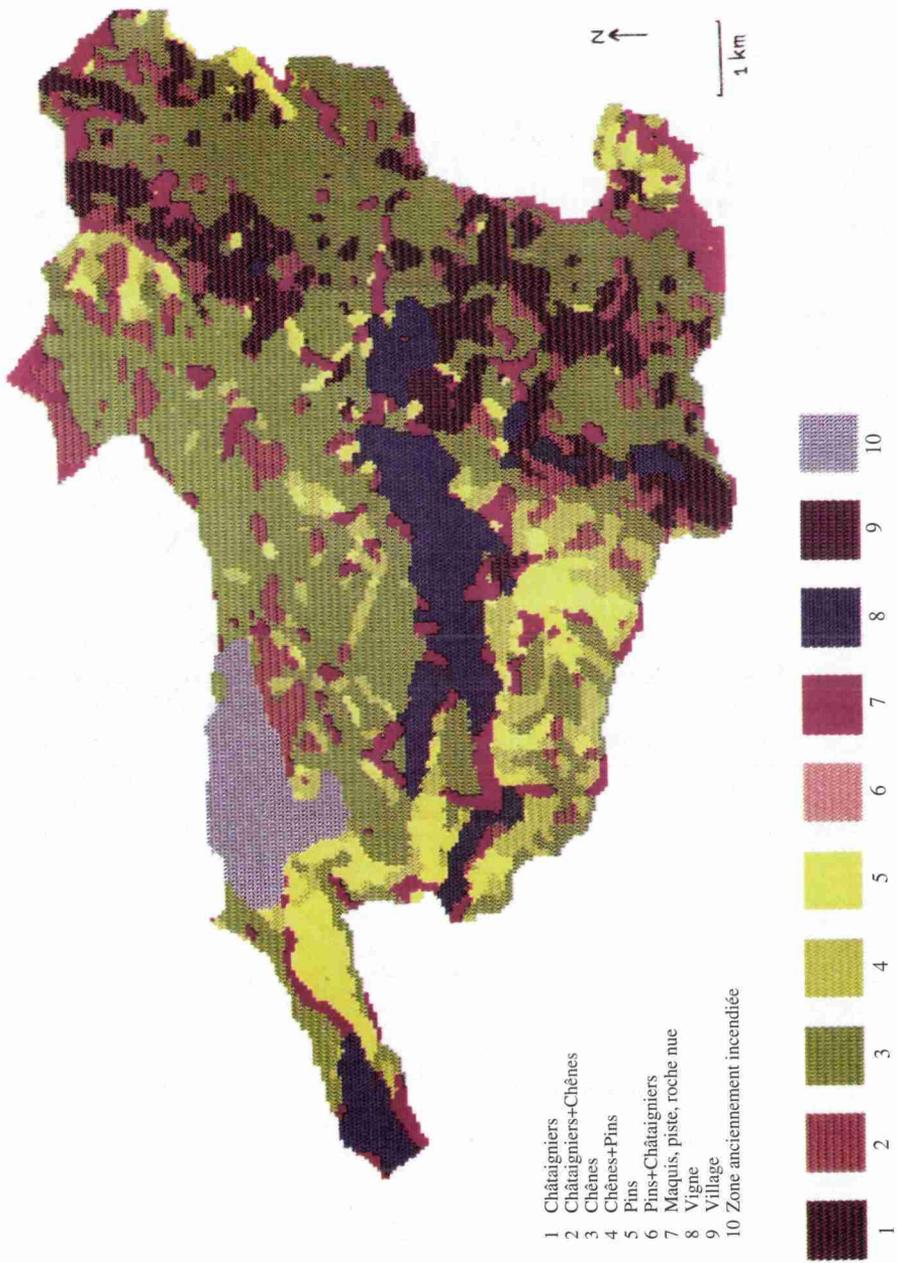


Figure 6-4. Cartographie des peuplements forestiers

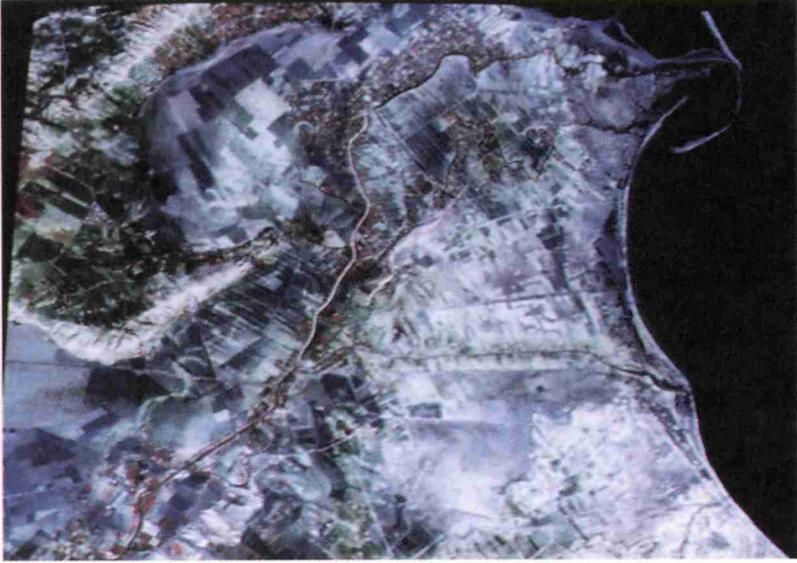


Figure 14-3. Composition colorée par combinaison de TM4 (rouge), TM5 (vert) et TM3 (bleu)

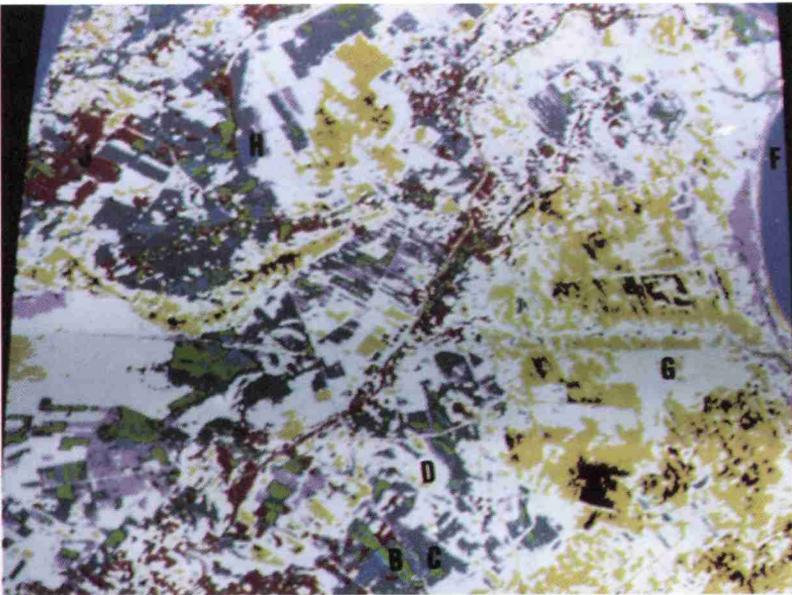


Figure 14-4. Classification dirigée par distance minimale sur l'image TM du 29-10-1989

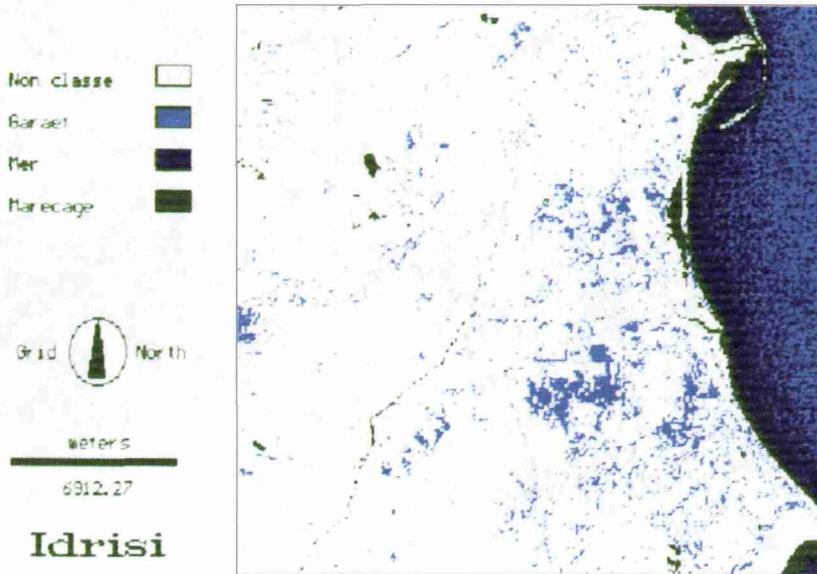


Figure 14-5. Résultats du seuillage des zones humides appliqué au canal TM5

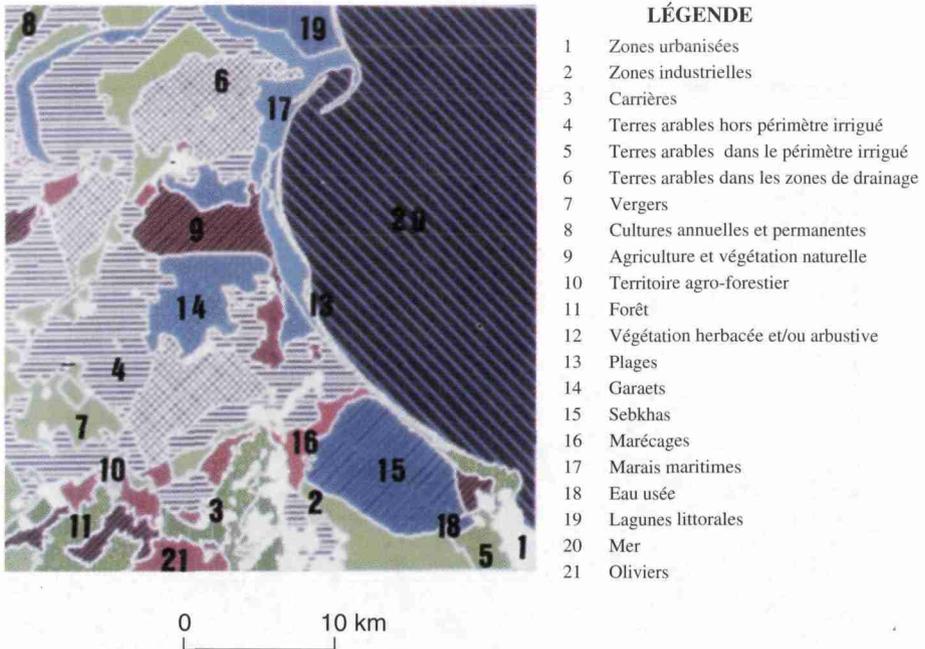
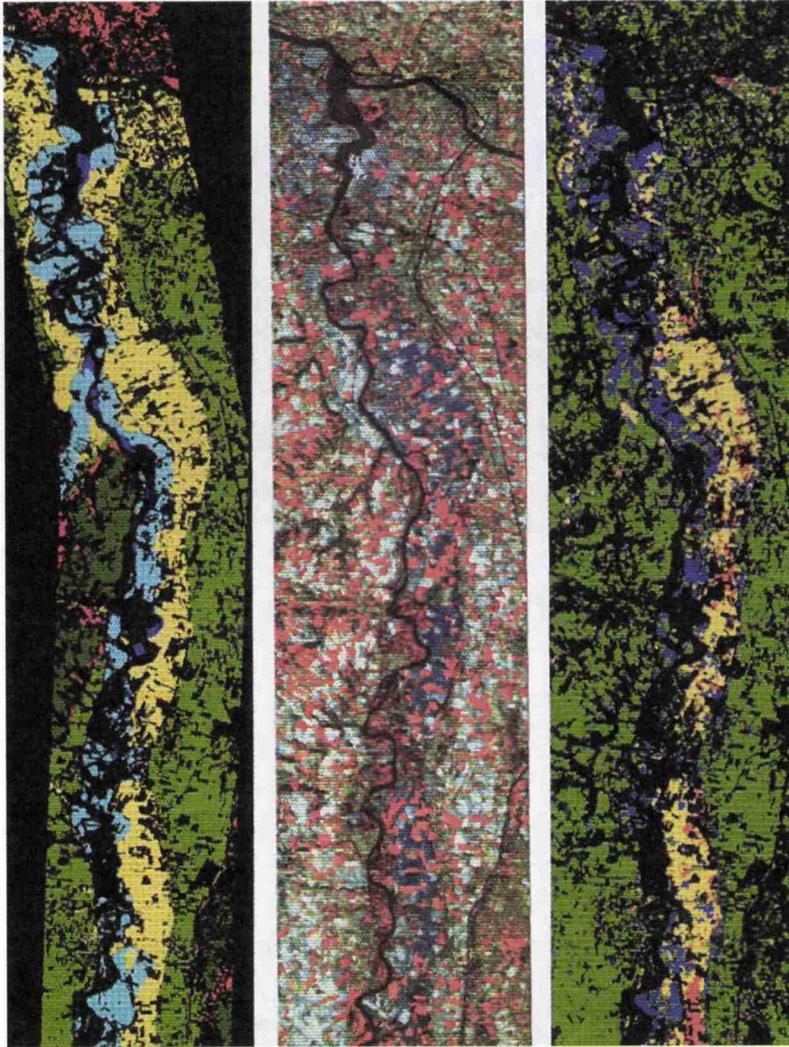


Figure 14-7. Carte d'occupation du sol : résultat de la photo- interprétation de l'image HRV XS du 21-06-1988



(a)

(b)

(c)

FW Vert sombre
 FX1 Vert foncé
 FX2 Vert clair
 FZ1 Jaune
 FZ2 Bleu ciel
 FZ3 Bleu foncé
 Substrat III Rouge

TM4 : Rouge
 TM5 : Vert
 TM3 : Bleu

L Vert
 AL Jaune
 SL Bleu
 A Rouge
 (avec incrustation,
 en noir, des surfaces
 autres que sols nus)

Figure 16-6. Exemple de classification supervisée d'une image composite multitemporale : a) carte géomorphologique numérisée; b) composition colorée (image du 23 avril 1987); c) image classée (images du 2 mai 1987 et du 6 mai 1992)

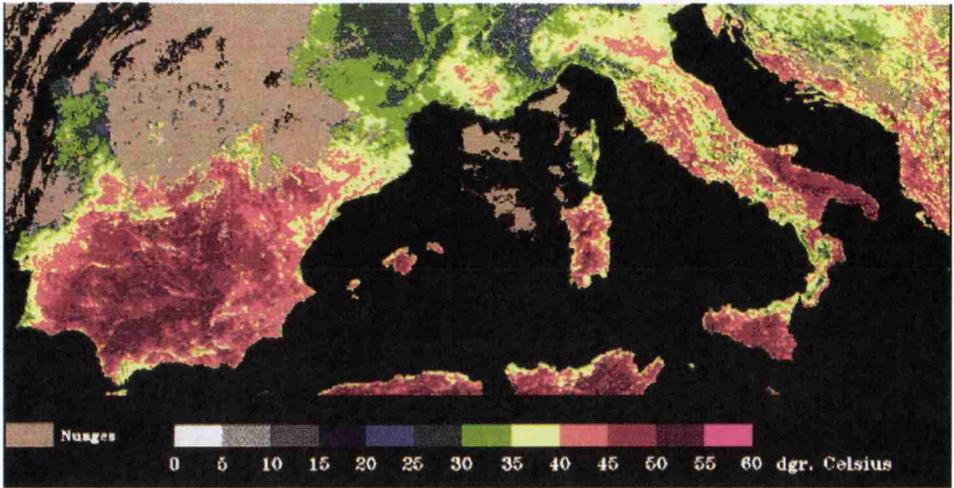


Figure 17-4. Température de surface estimée à partir de AVHRR de NOAA, le 29 juillet 1993

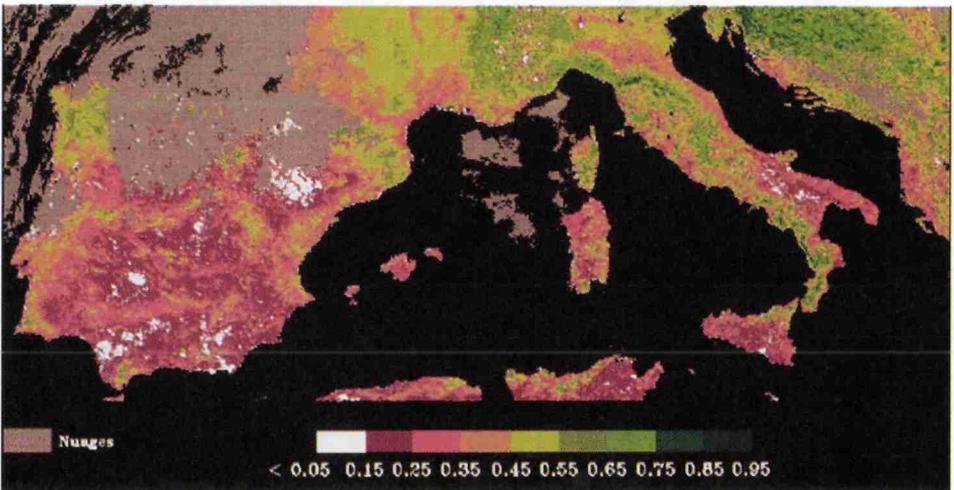
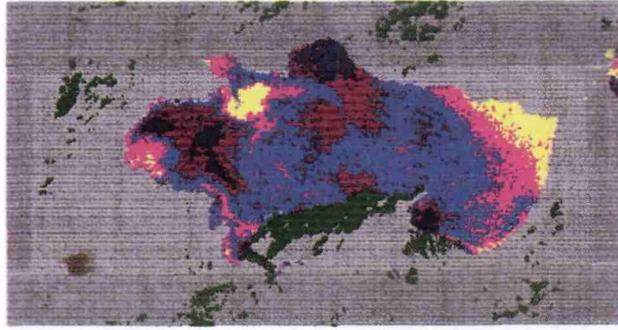
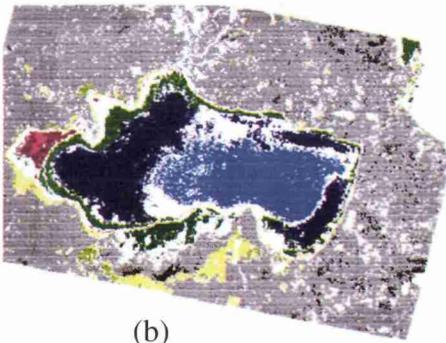


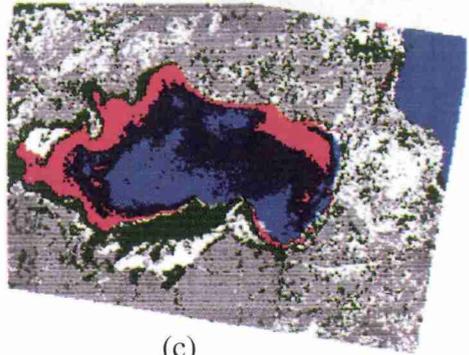
Figure 17-5. Indice de végétation calculé à partir de AVHRR de NOAA, le 29 juillet 1993



(a)



(b)



(c)

	MSS de Landsat (26-01-1977)	HRV de SPOT (05-05-1988)	TM de Landsat (29-10-1989)
Eau permanente	Cyan	Cyan	Cyan + Bleu foncé
Eau turbide	Jaune	-	-
Végétation naturelle	Vert	Vert foncé	Vert foncé
<i>Salicornia marsh</i>	Bleu foncé	-	-
<i>Ampelodesma mauritanica</i>	Magenta	Vert clair	Vert
<i>Potamogeton pectinatus</i>	Brun	Bleu foncé	Magenta
Phragmites	-	Vert	-
<i>Scirpus marsh</i>	-	Magenta + Brun	-

Figure 19-3. Classifications dirigées : a) image MSS de Landsat; b) image HRV de SPOT; c) image TM de Landsat

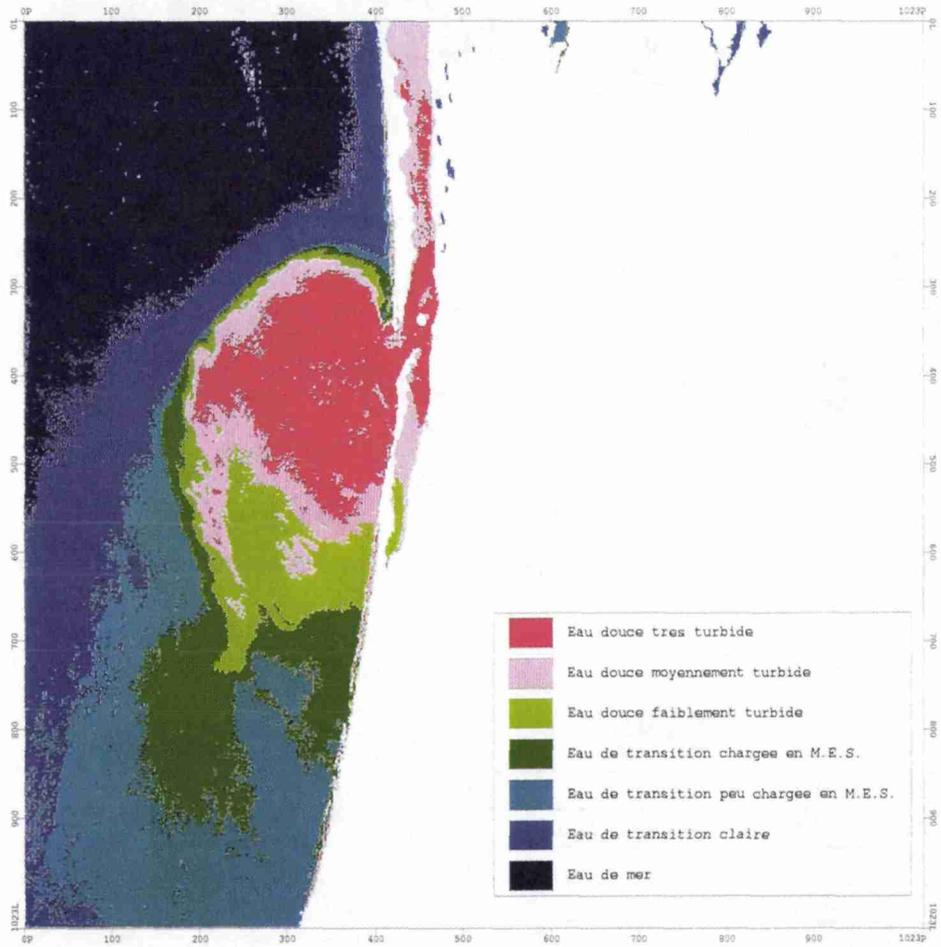


Figure 20-3. L'embouchure du fleuve Sénégal; image HRV de SPOT du 01-10-1986

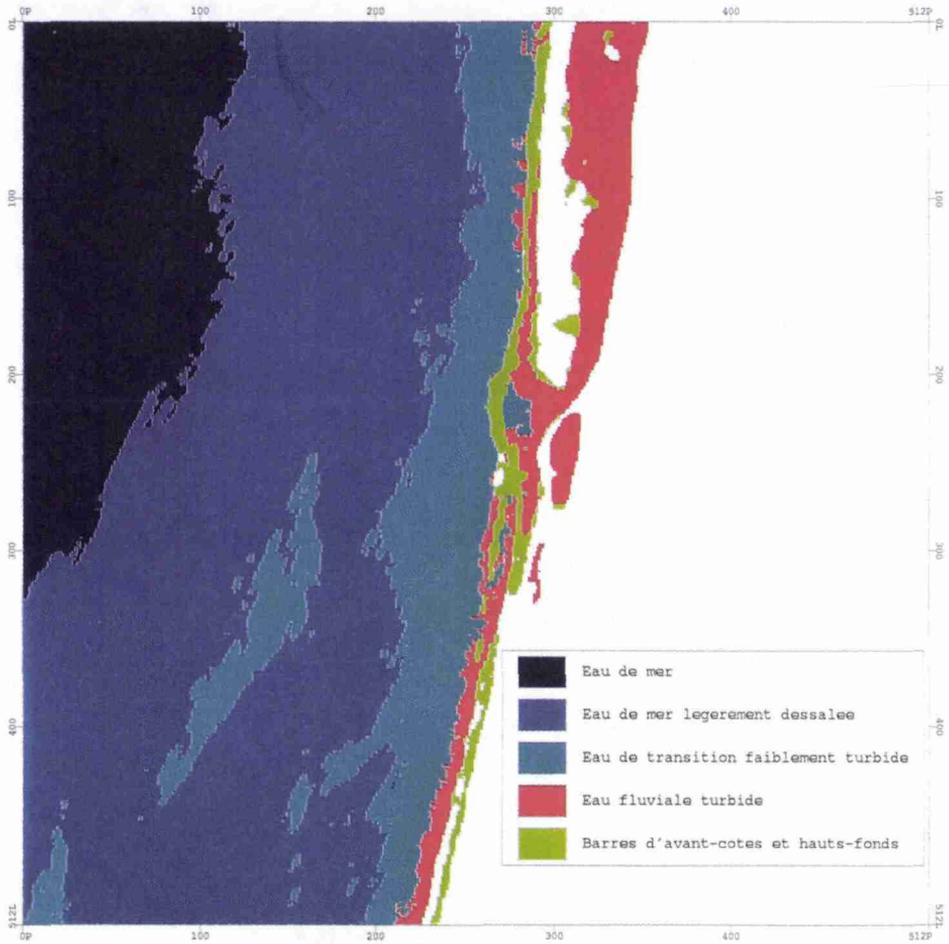


Figure 20-4. L'embouchure du fleuve Sénégal; image HRV de SPOT du 28-11-1990

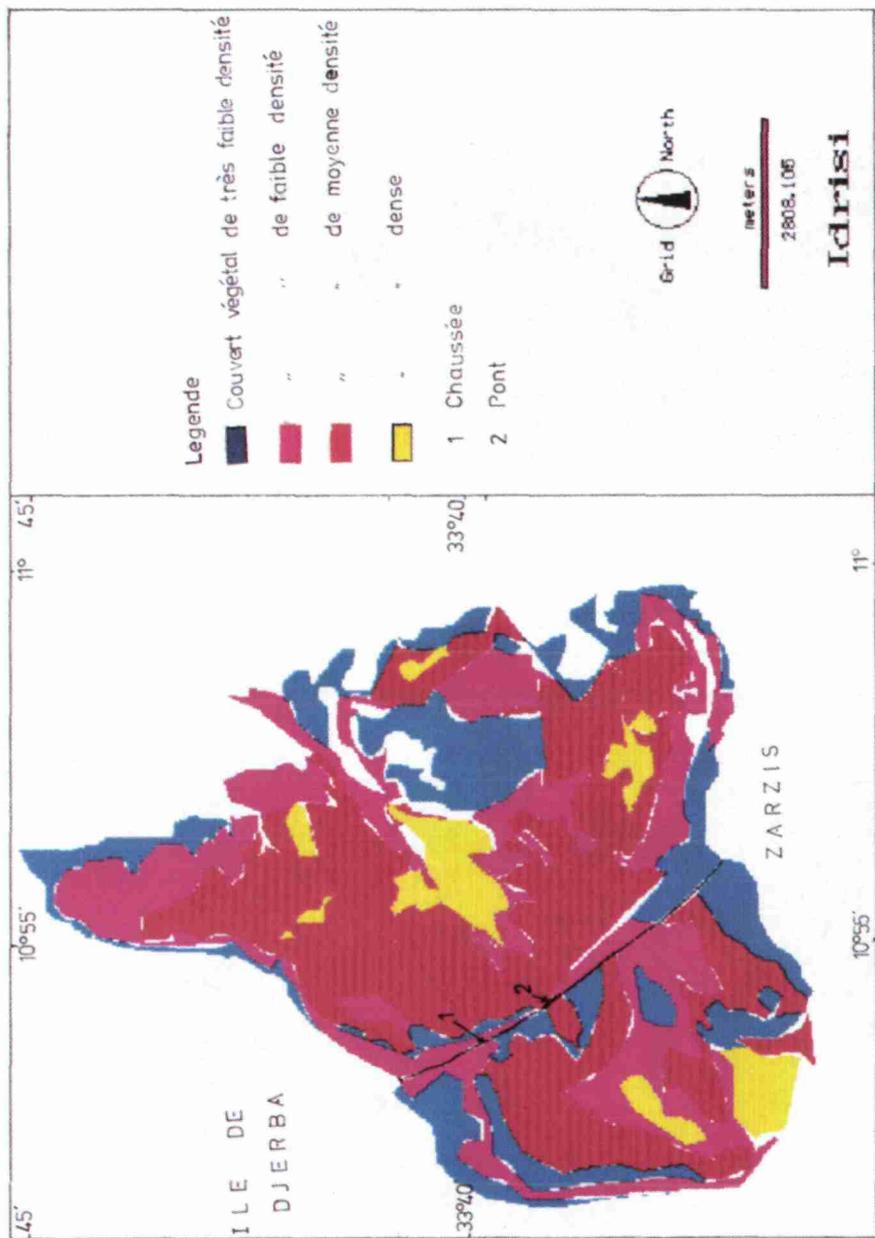
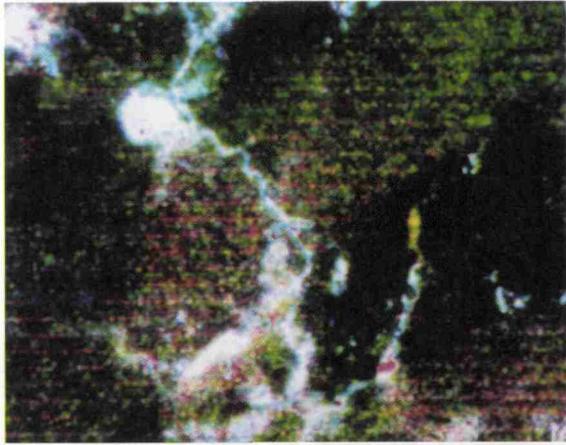


Figure 22-6. Tapis végétal au niveau de la baie d'El Kantara; résultat de l'indice pigmentaire

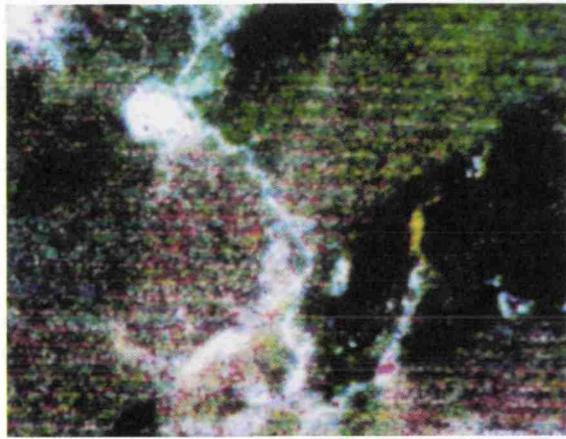


Figure 23-5. Visualisation simultanée des valeurs des indices de coloration RI calculées pour trois images HRV de SPOT sur la région de Menzel Habib (en bleu : juin 1987; en vert : juin 1990; en rouge : juin 1991); l'image couvre environ 10 km x 10 km

(a)



(b)



(c)

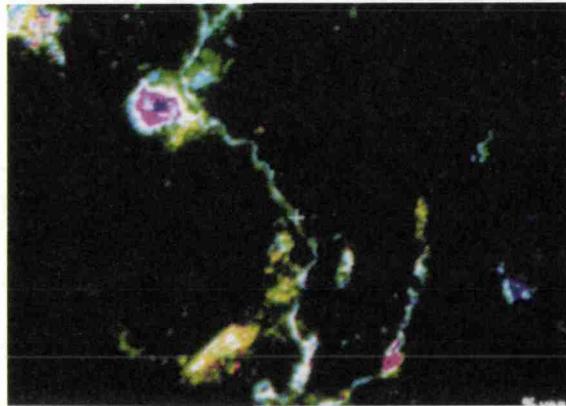
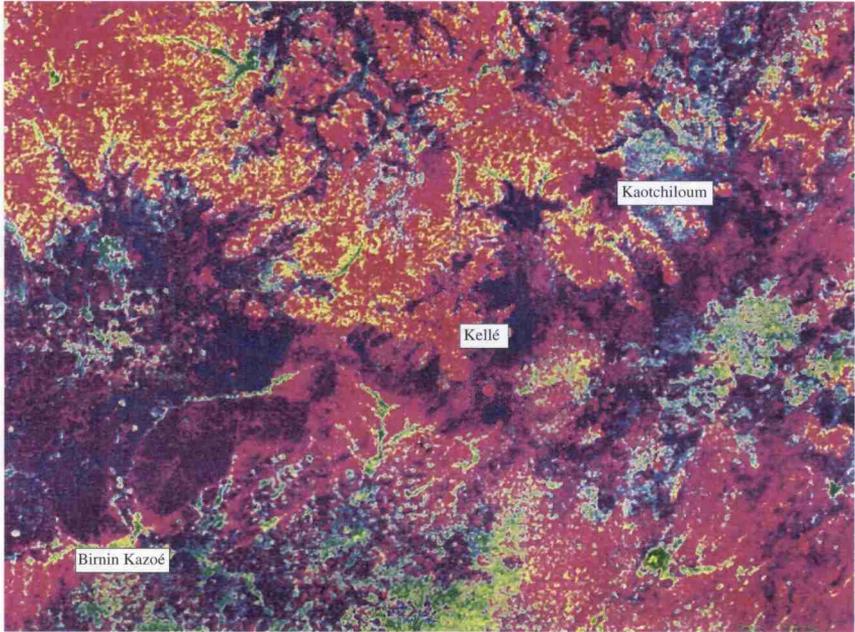


Figure 24-2. Compositions colorées d'indices et de pourcentages de la végétation (secteur SE de Zinder) : a) indice de végétation de la différence normalisée; b) indice foliaire; c) pourcentage de la végétation. En rouge : 1973; en vert : 1976; en bleu : 1987

(a)



(b)

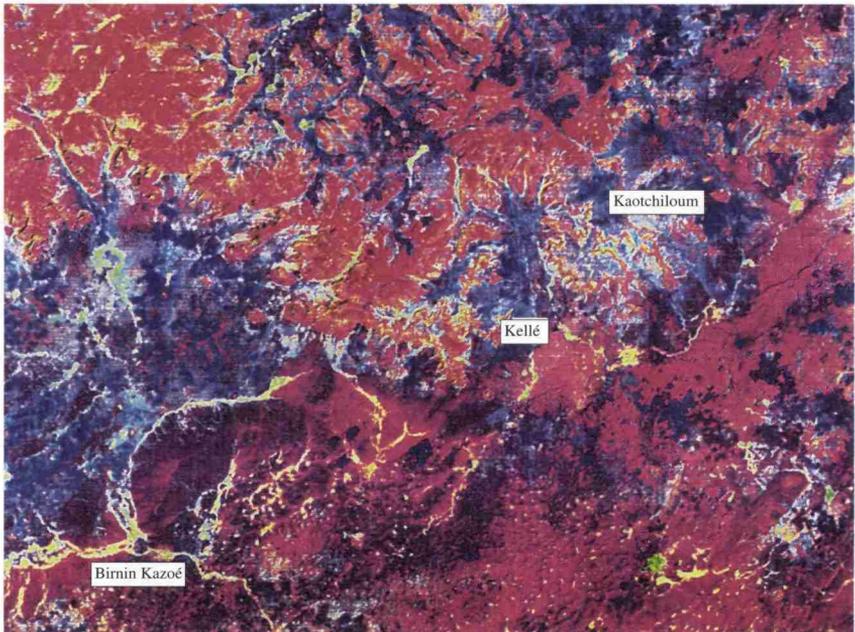


Figure 24-4. Application du modèle de mélanges spectraux (rouge : latérite; vert : végétation; bleu : sable remanié) au Koutous méridional : a) situation en 1976; b) situation en 1987

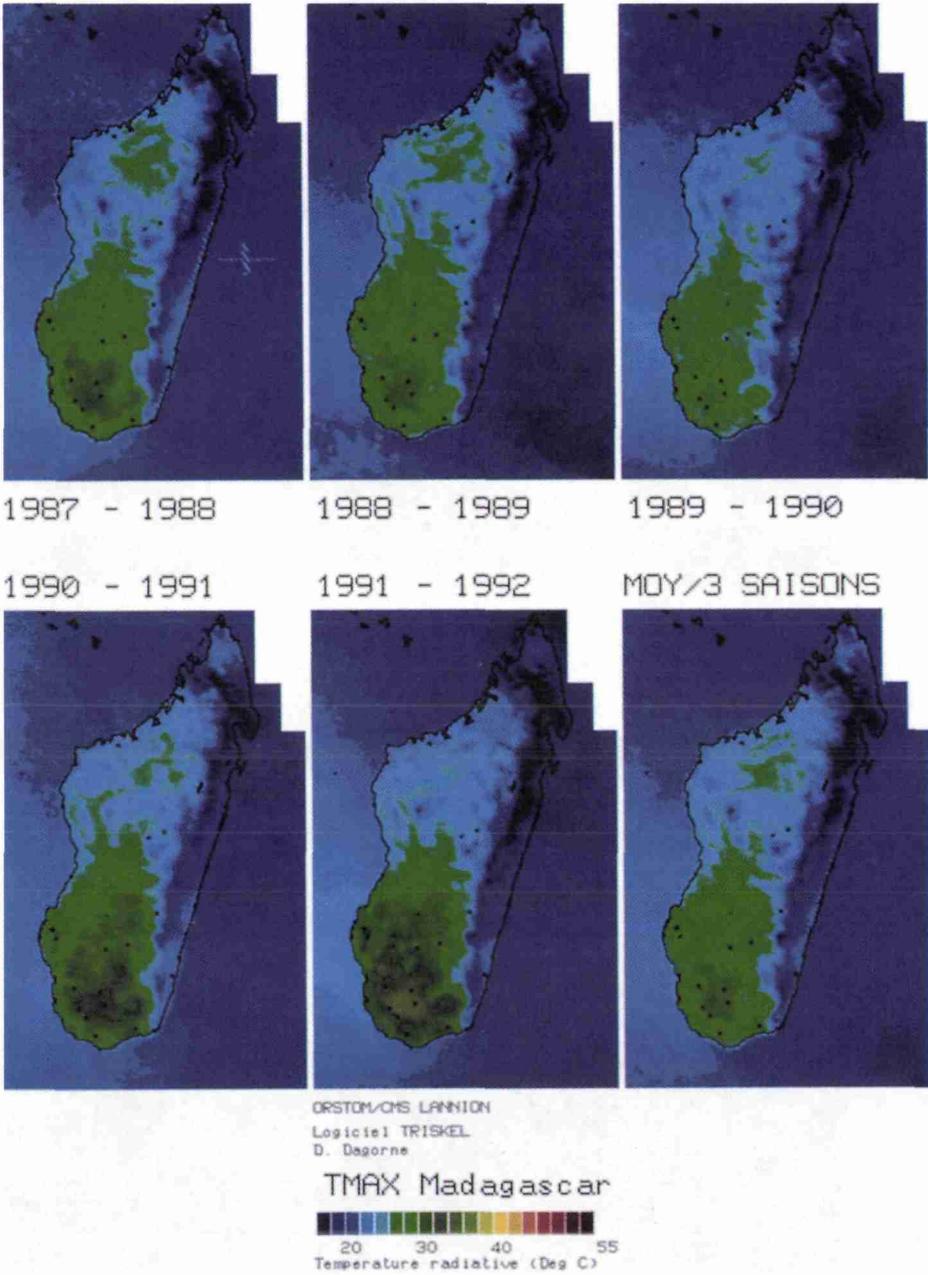


Figure 26-2. Moyennes saisonnières de la température radiative maximum de surface (TMAX) pour cinq saisons de pluie (1987-1992); Madagascar

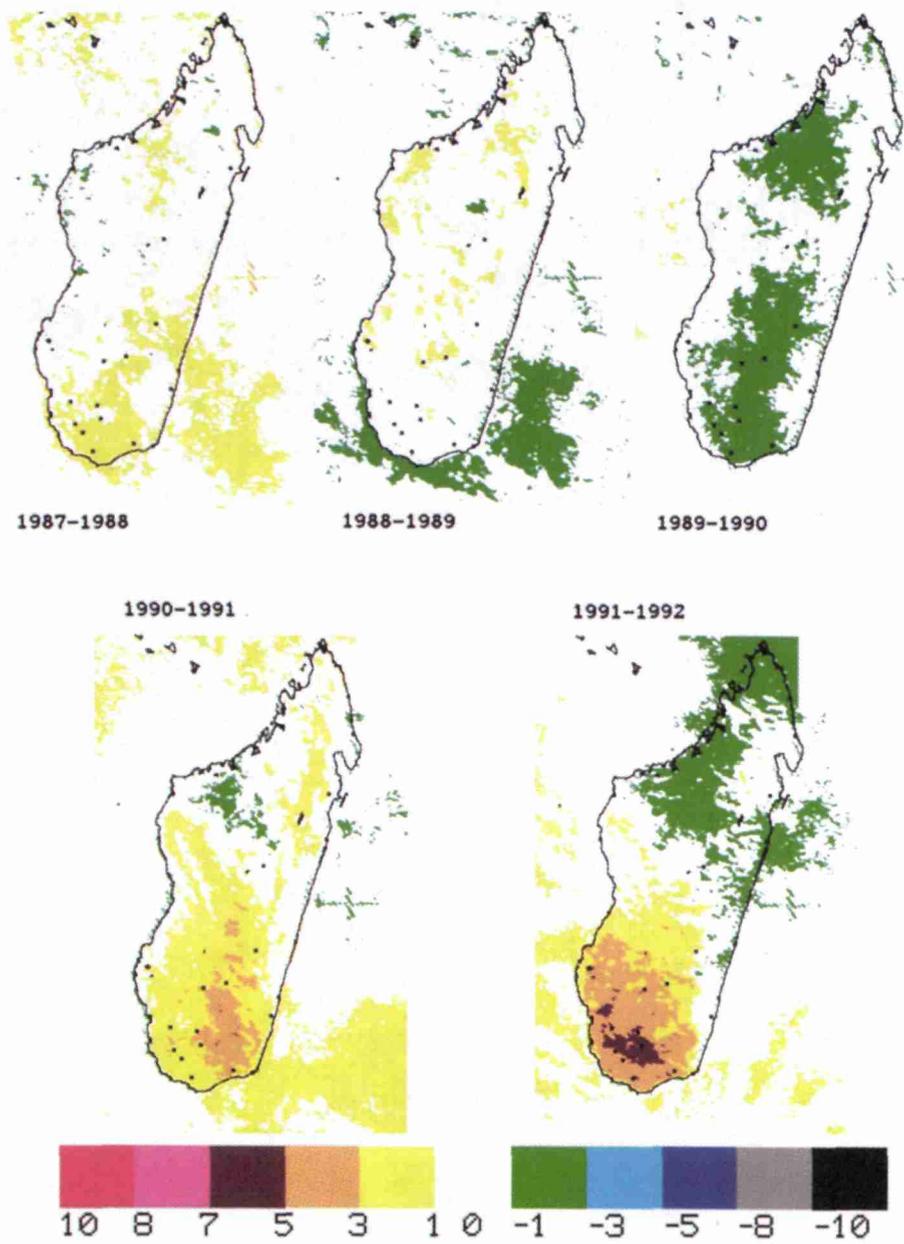


Figure 26-3. Écarts des valeurs moyennes saisonnières de la température radiative maximum de surface par rapport aux trois saisons 1987-1990; Madagascar

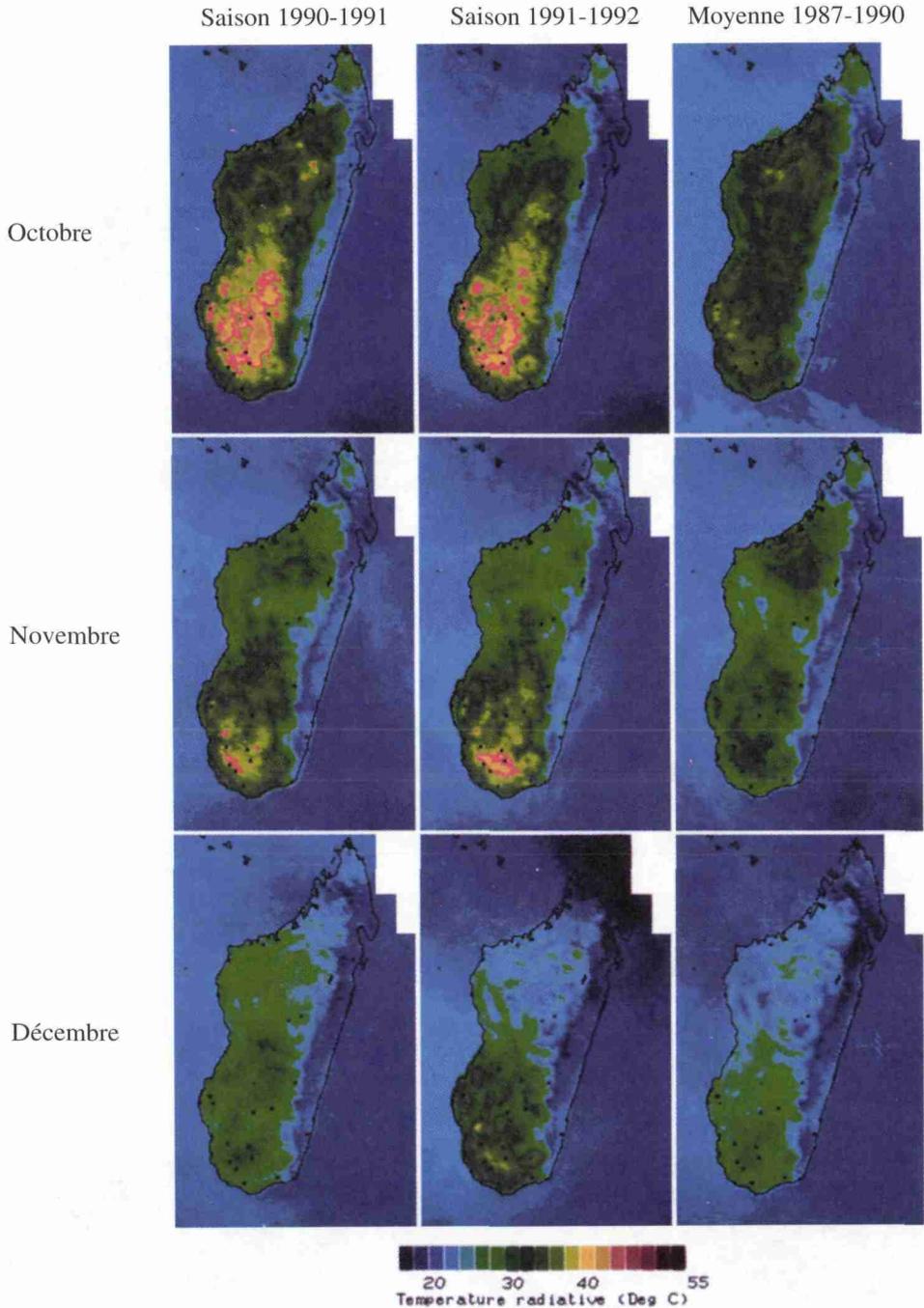


Figure 26-4 (partie 1). Valeurs mensuelles (1990-1991 et 1991-1992) et moyennes mensuelles interannuelles (1987-1989 et 1988-1990) de la température radiative maximum de surface; Madagascar

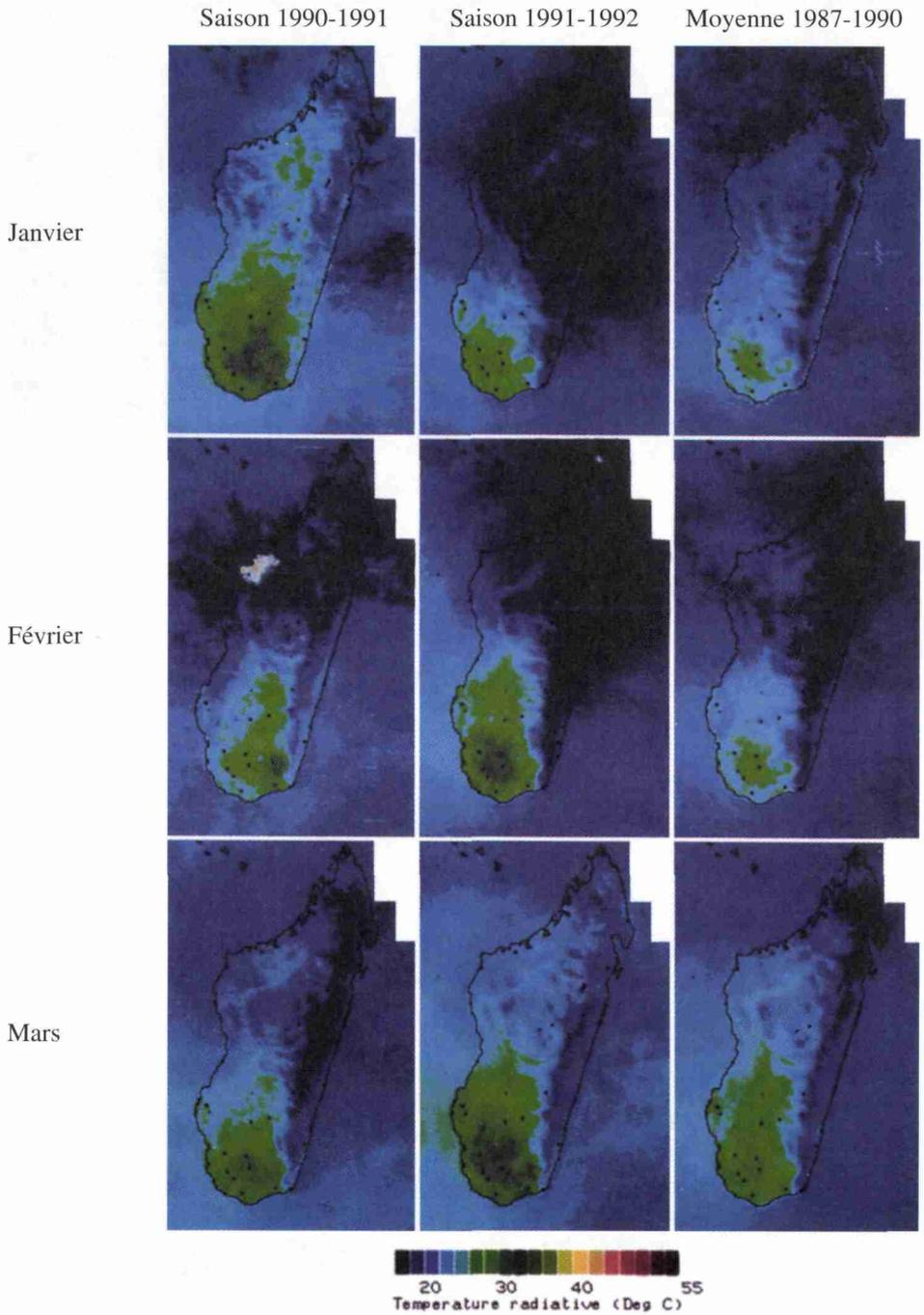


Figure 26-4 (partie 2). Valeurs mensuelles (1990-1991 et 1991-1992) et moyennes mensuelles interannuelles (1987-1989 et 1988-1990) de la température radiative maximum de surface; Madagascar

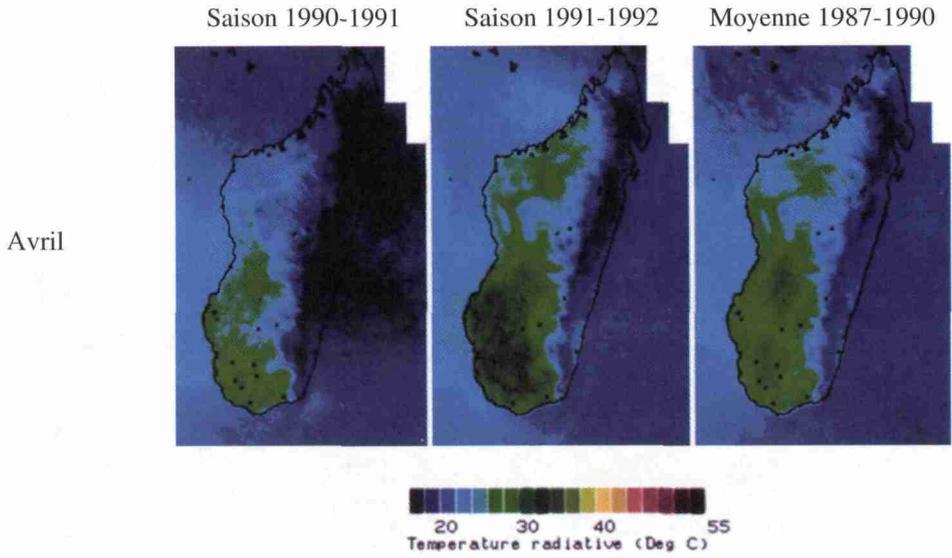


Figure 26-4 (partie 3). Valeurs mensuelles (1990-1991 et 1991-1992) et moyennes mensuelles interannuelles (1987-1989 et 1988-1990) de la température radiative maximum de surface; Madagascar

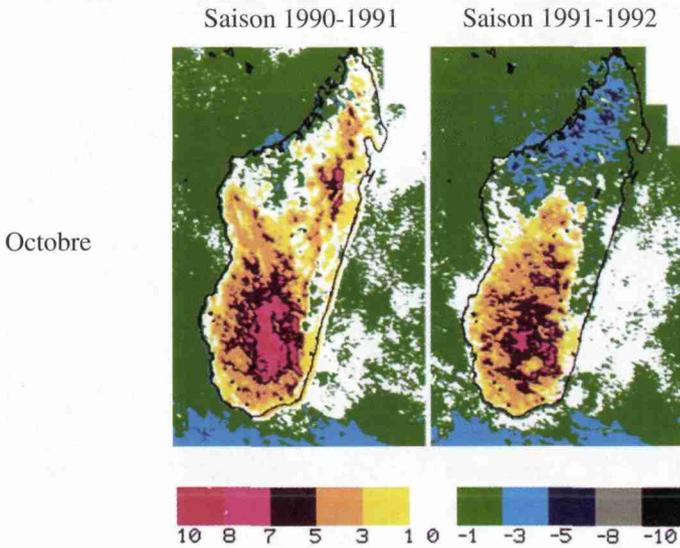


Figure 26-5 (partie 1). Écarts des valeurs mensuelles de température radiative maximum de surface (°C) des saisons 1990-1991 et 1991-1992 par rapport aux moyennes mensuelles interannuelles 1987-1990; Madagascar

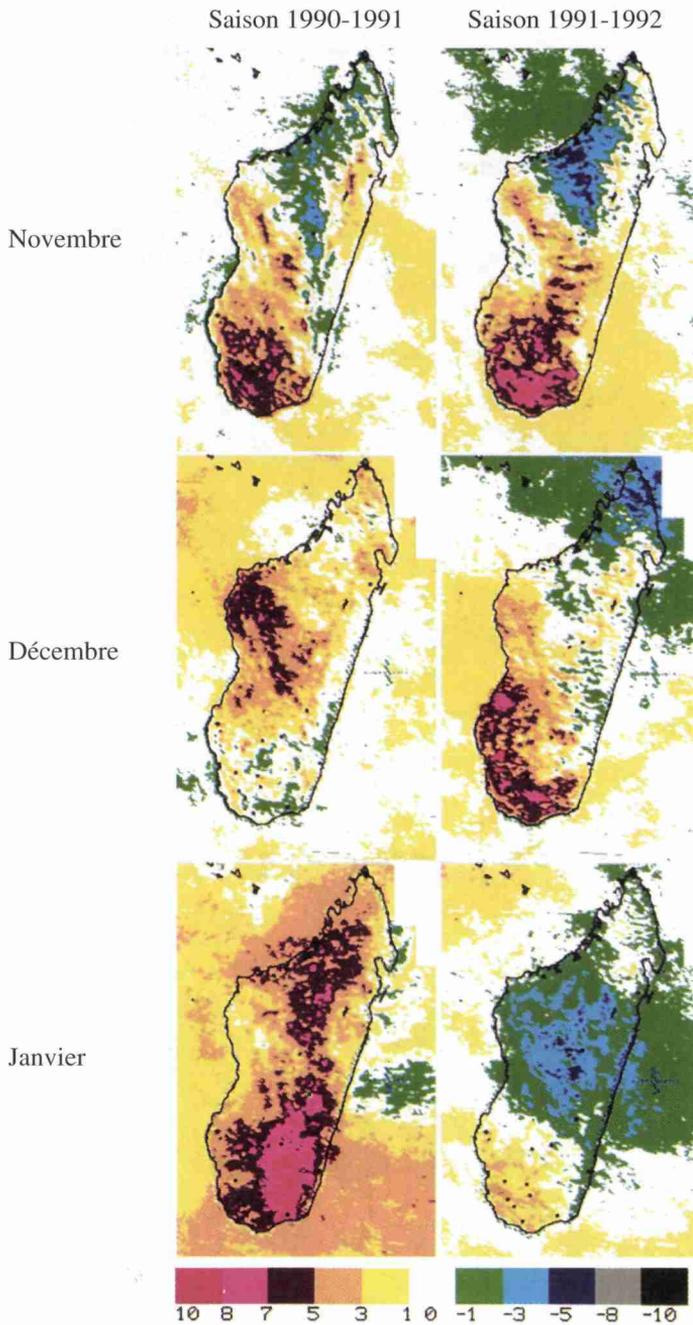


Figure 26-5 (partie 2). Écarts des valeurs mensuelles de température radiative maximum de surface (°C) des saisons 1990-1991 et 1991-1992 par rapport aux moyennes mensuelles interannuelles 1987-1990; Madagascar

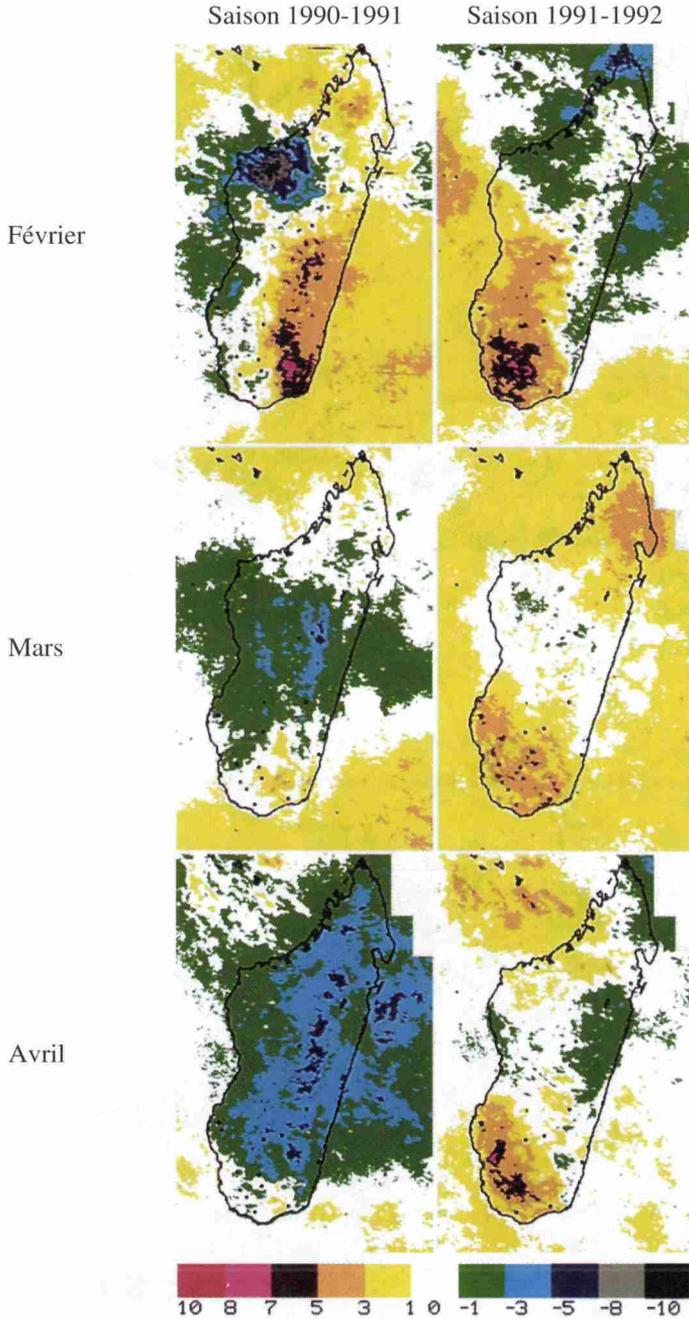


Figure 26-5 (partie 3). Écarts des valeurs mensuelles de température radiative maximum de surface (°C) des saisons 1990-1991 et 1991-1992 par rapport aux moyennes mensuelles interannuelles 1987-1990; Madagascar

Apport des images RAS de ERS-1 dans l'étude de la houle et de son influence sur le transit sédimentaire littoral

ANDRÉ OZER, YVES CORNET et ANNE-LISE COMHAIRE

*Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Université de Liège,
7, Place du XX Août, B-4000 Liège, Belgique;
téléphone : +32 (41) 66-53-35; télécopieur : +32 (41) 66-57-22*

Résumé

Dans le cadre d'une analyse du bilan sédimentaire de sept zones côtières choisies comme sites-tests, nous avons entrepris une étude de la houle par observation satellitaire. Nous présentons les principaux résultats d'une partie de l'étude destinée à déterminer les caractéristiques énergétiques de la houle à partir des données du RAS (radar à antenne synthétique) de ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*). Ainsi, le calcul de la longueur d'onde a été réalisé par autocorrélation spatiale. L'ordre de grandeur des résultats est satisfaisant, mais la signification statistique bidimensionnelle doit encore être évaluée. Par contre, l'estimation de la hauteur de la houle par étude de la variation relative du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) n'a pas encore été menée à son terme. Par ailleurs, nous introduirons cette approche par un rappel des principaux éléments influençant la rétrodiffusion de l'onde radar. Enfin, par quelques exemples, nous illustrerons les phénomènes perturbateurs de la visibilité du plan de houle par observation radar.

1. L'observation radar

L'exemple de la figure 1 nous permet de rappeler quelques principes de l'observation radar. Cette image représente la zone intertidale de Saafingen au sud du méandre de l'Escaut, «*Schaan van de Noord*» (sud-ouest des Pays-Bas). Il s'agit d'une imagerie découpée dans

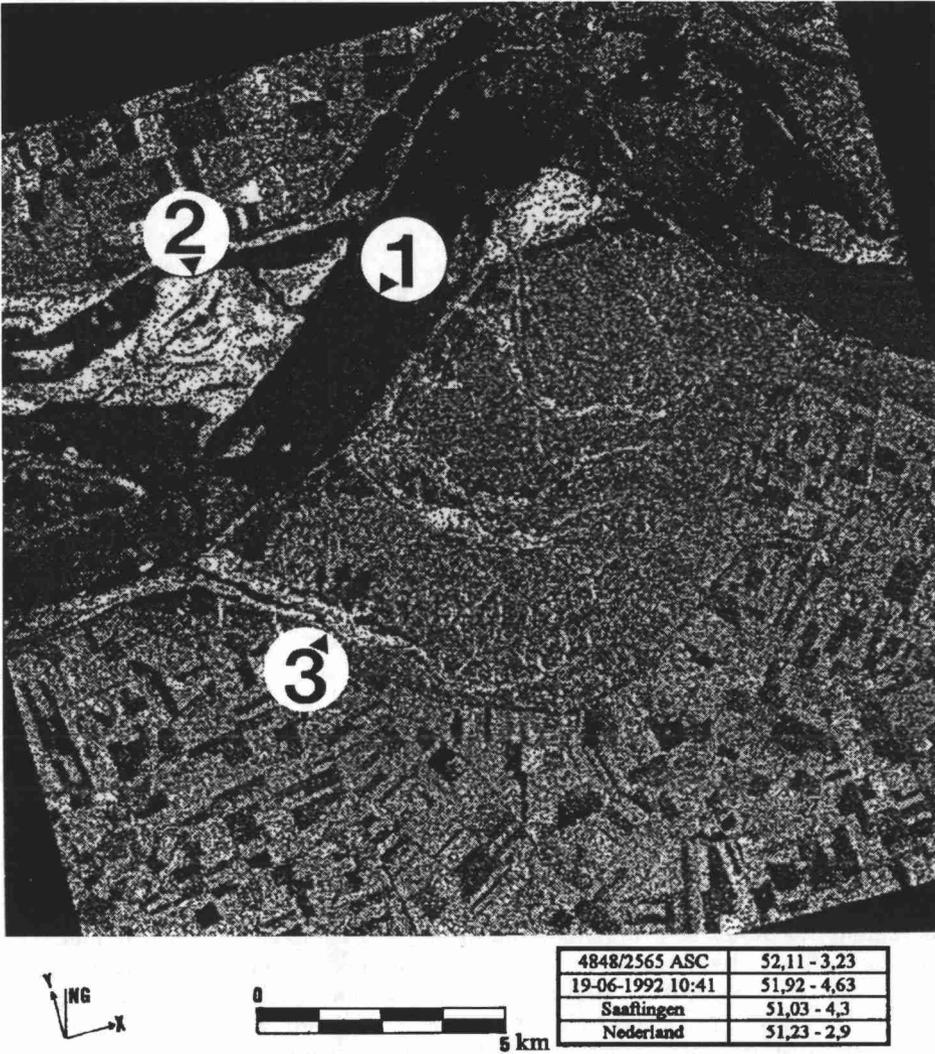


Figure 1. Slikke et schorre de Saafingen au sud de l'Escaut (Pays-Bas); les observations relatives aux indications chiffrées sont reprises dans le texte

la scène RAS 4848/2565 du satellite ERS-1. La longueur d'onde de ce radar est de 5,7 cm et sa fréquence de 5,3 GHz. La scène a été saisie en noeud descendant à 10 h 41 TU. Elle a dû subir une réflexion par rapport à un axe vertical et une rotation de 14° dans le sens horaire des aiguilles d'une montre.

La direction de visée (X) du radar de ERS-1 est toujours orientée vers la droite selon un angle de 90° par rapport au sens de progression du satellite (Y). La résolution d'une image PRI (*Precise Range Imagery*) est de 12,5 m. La scène ayant été traitée avant le 01-09-92 par le Centre de traitement et d'archivage du Royaume-Uni (*United-Kingdom - Processing*

and Archiving Facility; UK-PAF), elle n'est donc pas corrigée radiométriquement pour la dispersion énergétique selon l'axe X, ni pour le gain d'antenne (LAUR, 1992). Ces corrections sont indispensables quand on veut réaliser des traitements diachroniques ou quand on veut comparer des zones d'une même image pour lesquelles l'angle d'incidence est très différent. Pour une même scène RAS de ERS-1, cet angle varie de 19° à 26°.

Sur la figure 1, nous pouvons remarquer que l'eau (1) présente des valeurs numériques faibles (noir). L'eau se comporte généralement comme une surface spéculaire parfaite quand le vent est faible, quand les structures de turbulence liées aux courants ont peu de répercussion sur l'état de surface (rugosité) de l'eau et quand la houle ne déforme pas la surface libre de l'eau.

Les îles (2) apparaissent en blanc. La rétrodiffusion y est très forte. Pourquoi ? À ce phénomène, deux explications sont possibles. Premièrement, dès que le niveau d'eau redescend (marée basse comme c'est le cas sur cette image), le sable saturé en eau présente des caractéristiques diélectriques provoquant une augmentation de la rétrodiffusion (ULABY *et al.*, 1986). Deuxièmement, comme on peut le voir dans les chenaux de marée (3), la slikke et les champs de rides de courant asymétriques, dont la longueur d'onde de l'ordre de 10 cm, provoquent une très forte rétrodiffusion suite au phénomène de résonance de Bragg (ULABY *et al.*, 1982). Celui-ci, qui peut aussi s'observer en mer lorsque le vent provoque des ondes capillaires, s'explique par l'effet cumulatif d'ondes rétrodiffusées en phase. Ce phénomène est maximum lorsque :

$$\Delta R = n \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

où ΔR = retard de phase entre deux ondes atteignant deux crêtes successives du microrelief;
 λ = longueur d'onde du radar;
 n = un entier.

La figure 2 illustre parfaitement la relation entre L, ΔR et Θ :

$$L = \frac{\Delta R}{\sin \Theta} \quad (2)$$

avec L = longueur d'onde de l'onde capillaire et Θ = angle d'incidence.

Ainsi, l'onde radar qui atteint le point A est en phase avec celle qui atteint B au même moment si L répond à l'équation suivante :

$$L = n \frac{\lambda}{2 \sin \Theta} \quad (\text{pour } n = 0, 1, 2 \dots) \quad (3)$$

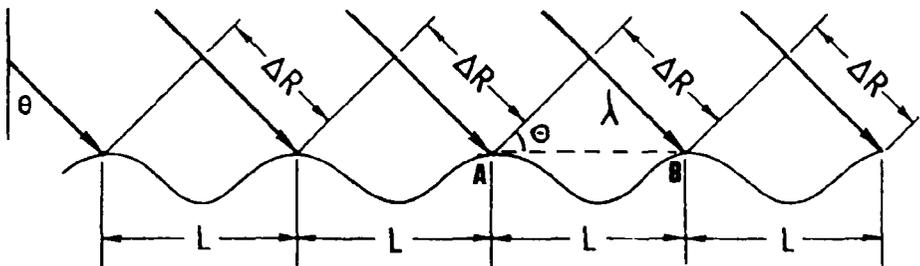


Figure 2. Résonance de Bragg (modifié de ULABY *et al.*, 1982)

Dans le cas du RAS de ERS-1, pour lequel $\lambda = 5,7$ cm et $\Theta = 23^\circ$, la valeur répondant à cette équation pour $n = 1$ est 7,3 cm.

2. Visualisation de la houle sur l'image RAS

L'onde capillaire n'est pas la seule onde qui affecte la surface de l'océan. Celle-ci est en fait déformée selon une superposition d'ondes de longueurs différentes (ULABY *et al.*, 1982) : la houle est l'une d'elle. Celle-ci provoque une variation de l'angle d'incidence local i , par rapport à l'angle d'incidence normal Θ . L'angle d'incidence local i , est mesuré par rapport à un plan tangent à la surface de l'eau tandis que l'angle d'incidence normal Θ , est défini par rapport à la verticale. La variation de cet angle explique en fait la modulation de la rétrodiffusion et donc l'alternance de zones successivement claires et foncées sur l'image. C'est sur la base de cette alternance spatiale que cette étude a été effectuée.

D'abord, nous avons extrait la longueur d'onde par autocorrélation spatiale selon X et selon Y. Par la suite, sur la base d'une estimation de la modulation relative du coefficient de rétrodiffusion (σ°), qui est fonction de la variation de i

$$\sigma^\circ(i) = \sigma_{\text{Réf}}^\circ \cos^2(i) \quad (4)$$

selon un axe correspondant aux orthogonales, nous avons tenté d'estimer la cambrure et donc la hauteur de la houle à partir de la combinaison de l'équation (4) et de l'équation (5) reprise ci-dessous et qui exprime la valeur de l'angle d'incidence local i , en fonction de l'angle d'incidence normal Θ , et de la variation relative du σ° :

$$i = \Theta + \arctg\left(\frac{\pi H}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi H}{L}\right) \quad (5)$$

avec L = longueur d'onde de la houle et H = hauteur de la houle.

Étant donné les résultats peu satisfaisants obtenus pour H et qui se justifient par la non-linéarité des équations, selon ULABY *et al.* (1986), nous nous contenterons de présenter ci-après les résultats des calculs d'autocorrélation spatiale.

3. Première tentative de calcul de L par autocorrélation

Sur une partie de la scène PRI 3953/855, acquise le 17 avril 1992 à 21 h 41 TU, nous avons réalisé les premiers calculs (OZER *et al.*, 1992). Cette scène est localisée en haute mer au nord-ouest du site-test de Calvi (Corse) qu'elle ne comprenait malheureusement pas.

Les conditions météorologiques des 24 heures précédant l'acquisition étaient tout à fait favorables à une forte cyclogénèse sur le bassin méditerranéen occidental avec circulation méridienne sur l'Europe nord-occidentale, soit des conditions de Mistral dans la vallée du Rhône et un effet de Föhn sur les Pyrénées orientales.

En ce qui a trait aux conditions météorologiques et hydrodynamiques au moment de l'acquisition, le bulletin météorologique français signalait, dans la zone, des vents de 10 noeuds et de direction N300E, tandis que la première houle renseignée a une direction N280E, une période de 5 secondes et une hauteur de 3 m. Il s'agit ici d'une houle résiduelle, car elle était déjà signalée à 0 h TU avec une même direction et des période et hauteur respectivement de 8 secondes et de 4 m.

Le calcul d'autocorrélation, réalisé sur une image brute (fig. 3), a été entrepris sur une imagerie de 101 par 101 pixels. Les corrélogrammes montrent l'évolution du coefficient d'autocorrélation selon X (fig. 4a) et selon Y (fig. 4b). Une longueur d'onde selon X, L_x , de 112,5 m, a été obtenue tandis que la longueur d'onde selon Y, L_y , tend vers l'infini. Comme le montre la figure 4, le r_x maximum correspondant à 112,5 m, est à la limite de signification statistique pour n égal à 8100. Rappelons qu'à une houle de période T, correspond une longueur d'onde donnée par la formule suivante, applicable en eau profonde :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (6)$$

avec L = longueur d'onde de la houle et T = période de la houle.

Si T est de 5 secondes, alors L vaut 39 m. Par contre, si T est de 8 secondes, alors L vaut 100 m. À la lueur de ces résultats, nous avons tenté d'adapter la technique de calcul de L à des zones littorales aux côtes échancrées, pour lesquelles le calcul sur des fenêtres aussi grandes n'était pas possible à cause de la dimension réduite des baies et des phénomènes de réfraction et de diffraction de la houle (fig. 5). Une routine de calcul de L par autocorrélation a été créée.

4. AUTOCORREL : programme de calcul de L par autocorrélation

4.1. Principe

Le programme AUTOCORREL a été développé afin de calculer automatiquement, pixel par pixel, les longueurs d'onde de la houle selon X (L_x) et Y (L_y) ainsi que les valeurs des coefficients d'autocorrélation, r_x et r_y , qui y correspondent, afin de permettre des tests de signification statistique.

Le principe du calcul est illustré sur la figure 6. Pour chaque position d'une fenêtre mobile de dimension définissable $n \times n$, le programme permet d'échantillonner un vecteur de n valeurs selon les médianes orientées suivant les axes X et Y. L'autocorrélation est calculée sur les n valeurs de ces deux vecteurs. Pour chaque direction, le «Lag», exprimé en pixels, auquel correspond le r maximum rencontré après un «Zero down-crossing» puis un «Zero up-crossing» est stocké dans un fichier de sortie où il est exprimé en m («Lag», exprimé en pixels, multiplié par 12,5 m). Dans ce fichier, sont également stockées les valeurs du r correspondant. Ainsi, le fichier résultant constitue une image composée de quatre bandes : r_x , L_x , r_y et L_y .

4.2. Un exemple

Ce programme a été testé sur une imagerie de 128 par 128 pixels découpée dans la scène PRI 3953/819 du 17-04-92. Cette scène est située dans la partie orientale du golfe de l'Asinara (Sardaigne). Les conditions météorologiques sont comparables à celles de la scène 3953/855 analysée ci-dessus.

L'imagerie n'a pas été corrigée géométriquement. Deux tentatives de filtrage du chatoiement ont été réalisées (MATTEINI, 1992). Un filtre médian et un filtre statistique

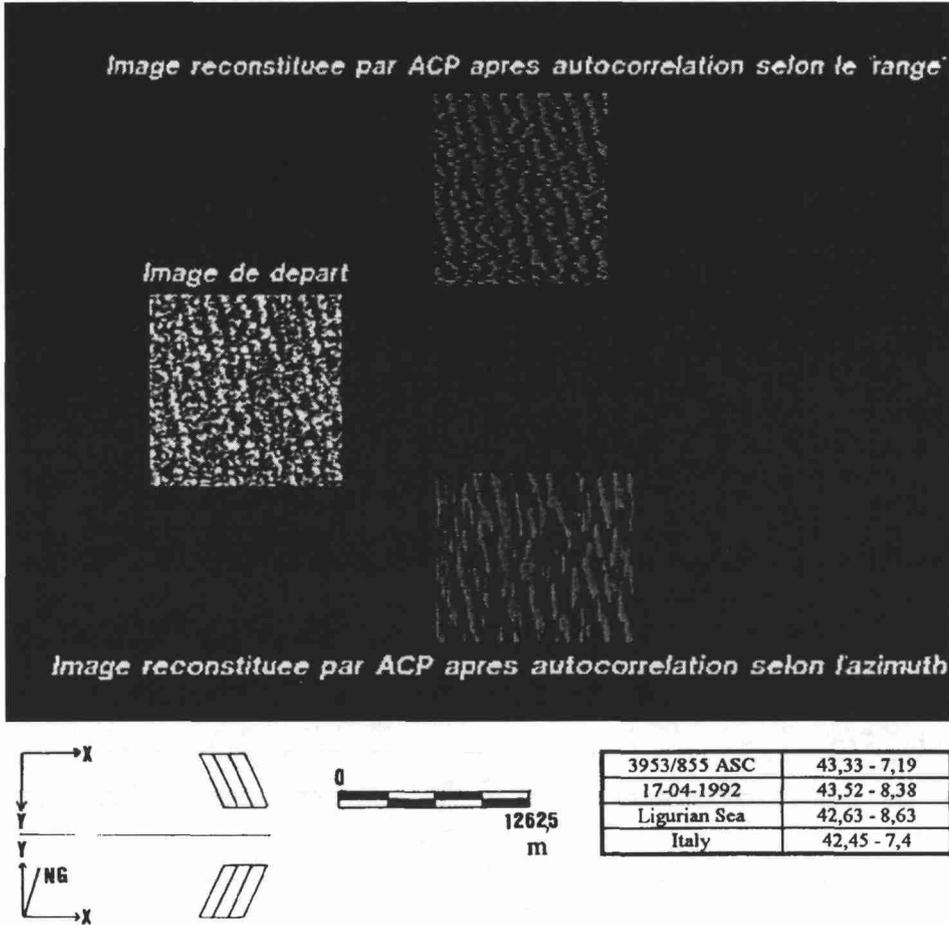


Figure 3. Résultats de l'autocorrélation sur l'imagette de la scène 3953/855

ont été appliqués. Les spectres de Fourier (fig. 7) montrent la possibilité d'obtenir une meilleure signification statistique des valeurs de r_x et r_y pour le calcul d'autocorrélation à partir du résultat du filtrage statistique 5×5 . En effet, les deux maxima apparaissent de façon symétrique dans les premier et troisième quadrants des spectres de Fourier. Ils déterminent un cyclique de haute fréquence spatiale selon la direction définie par ces maxima (crêtes et creux de la houle). Ces derniers sont beaucoup plus contrastés sur le spectre de l'imagette filtrée statistiquement (fig. 7c) que sur les deux autres spectres.

Les résultats d'AUTOCORREL sur l'imagette ainsi filtrée sont illustrés sur la figure 8. Statistiquement, les distributions de r_x , r_y , L_x et L_y sont normales au niveau de 95 %. Le tableau 1 montre que la valeur moyenne de r_x n'est pas significativement différente de celle de r_y . Il en va d'ailleurs de même pour L_x et L_y .

Cependant, si nous observons la figure 9, nous pouvons remarquer que les distributions des valeurs de L_x et L_y sont plurimodales. La valeur extrême de 375 m n'est pas significative; elle résulte du choix de la longueur d'onde L correspondant à la répétitivité spatiale des structures dues à la houle.

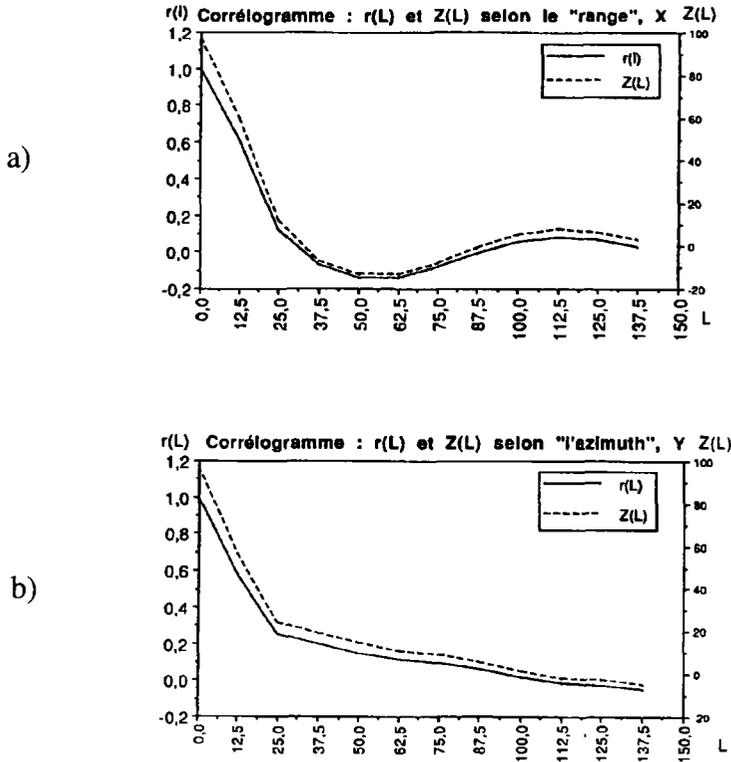


Figure 4. Corrélogrammes relatifs à l'autocorrélation appliquée à l'imagette de la scène 3953/855 : a) selon X; b) selon Y

Tableau 1. Description statistique de r_x , r_y , L_x et L_y calculés par AUTOCORREL sur l'image filtrée

	100 r_x	100 r_y	L_x (m)	L_y (m)
Moyenne	22,7	23,7	181,1	191,6
Écart-type	18,0	19,4	102,6	118,2
Minimum	0	0	50	50
Maximum	81	84	375	375

La partie de l'histogramme pour laquelle le calcul de L doit être réalisé est donc plus réduite. Sur le tableau 2, on montre les valeurs moyennes de L pour la partie de l'histogramme comprise entre 50 et 200 m.

Un autre critère doit cependant être pris en considération pour le calcul du L moyen. Il s'agit de la signification statistique de r_x et r_y . Dans notre cas, AUTOCORREL a été appliqué en choisissant une fenêtre de 30 x 30 pixels. Or, pour un $n = 30$, r est significativement différent de 0 s'il est supérieur à 0,30 au niveau de 90 %, à 0,35 au niveau de 95 % et à 0,45 au niveau de 99 % (DIEM et LENTHER, 1978). Sur le tableau 3, on

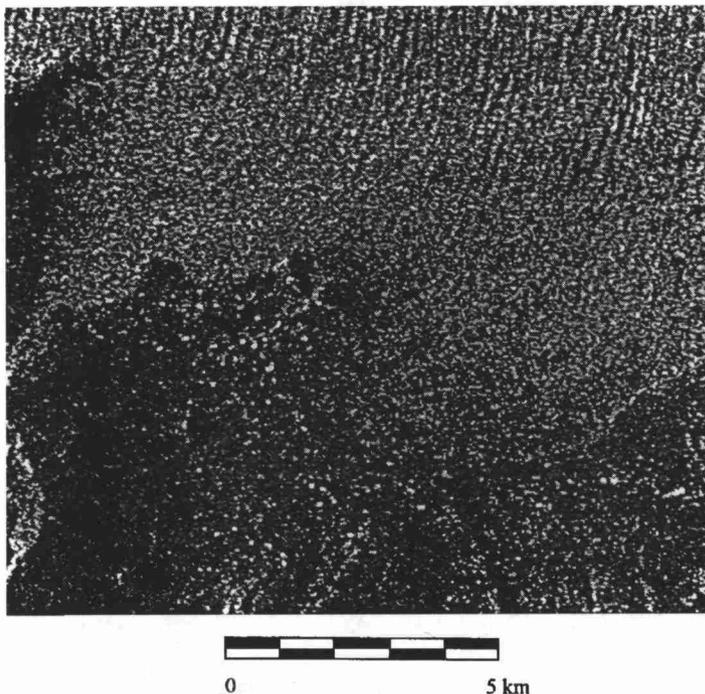


Figure 5. Diffraction et réfraction de la houle à Calvi, imagerie extraite de la scène 1660/855

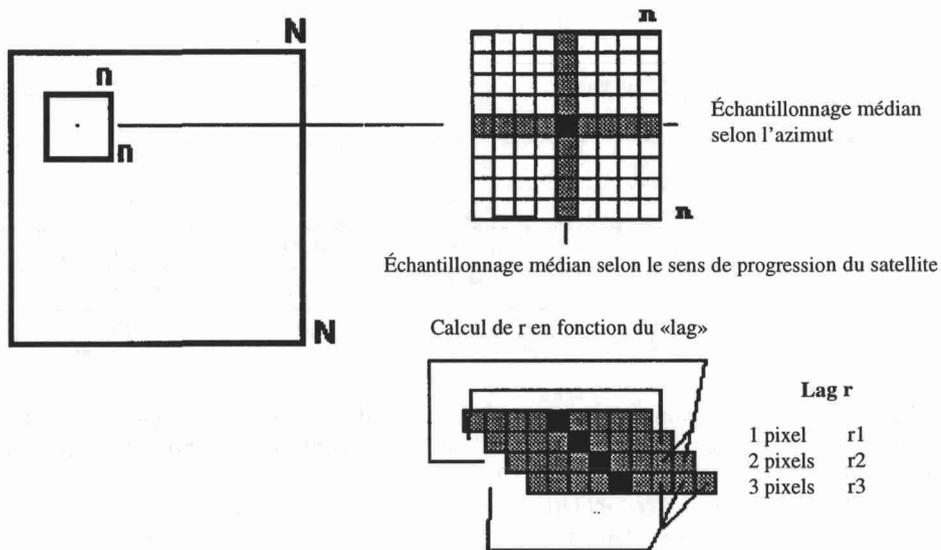


Figure 6. Principes du programme AUTOCORREL

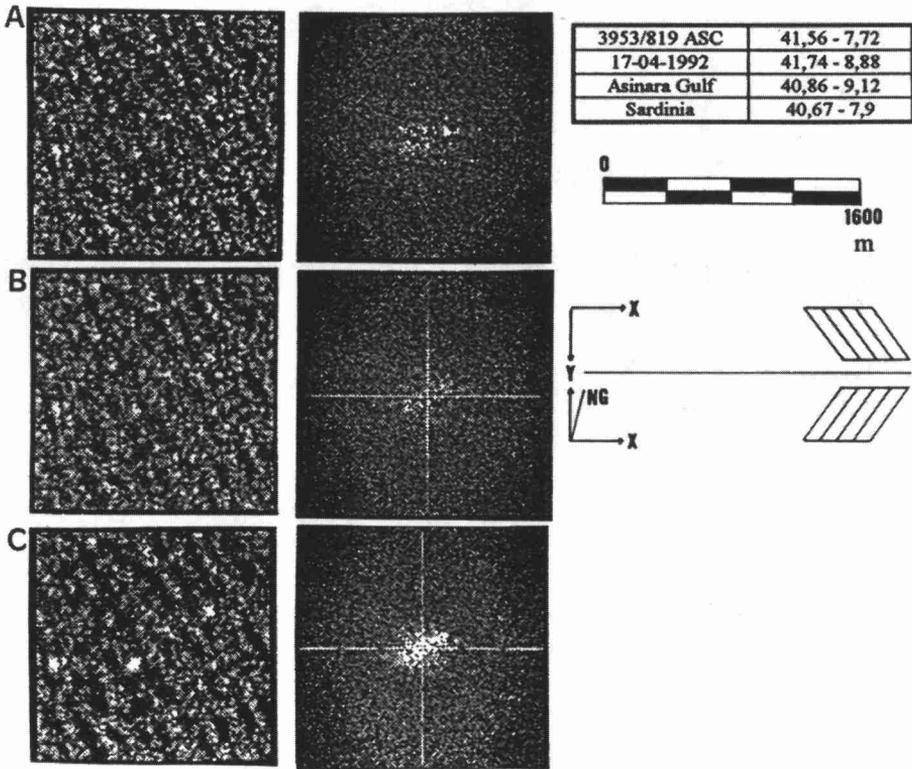


Figure 7. Imagerie extraite de la scène 3953/819 (golfe de l'Asinara) : a) image brute et spectre de Fourier; b) image filtrée (filtre médian 5 x 5) et spectre de Fourier; c) image filtrée (filtre statistique 5 x 5) et spectre de Fourier

Tableau 2. Valeurs moyennes pour L_x et L_y calculées entre 50 et 200 m (le nombre total de valeurs était de $94 \times 94 = 8\ 836$)

	Proportion de valeurs ≥ 300 m	Moyenne entre 50 et 200 $\pm \sigma$	Proportion de 0
L_x	1 645	$125 \pm 106,7$	319
	Proportion de valeurs ≥ 312 m	Moyenne entre 50 et 200 $\pm \sigma$	Proportion de 0
L_y	2 286	$125 \pm 106,7$	542

σ = écart-type

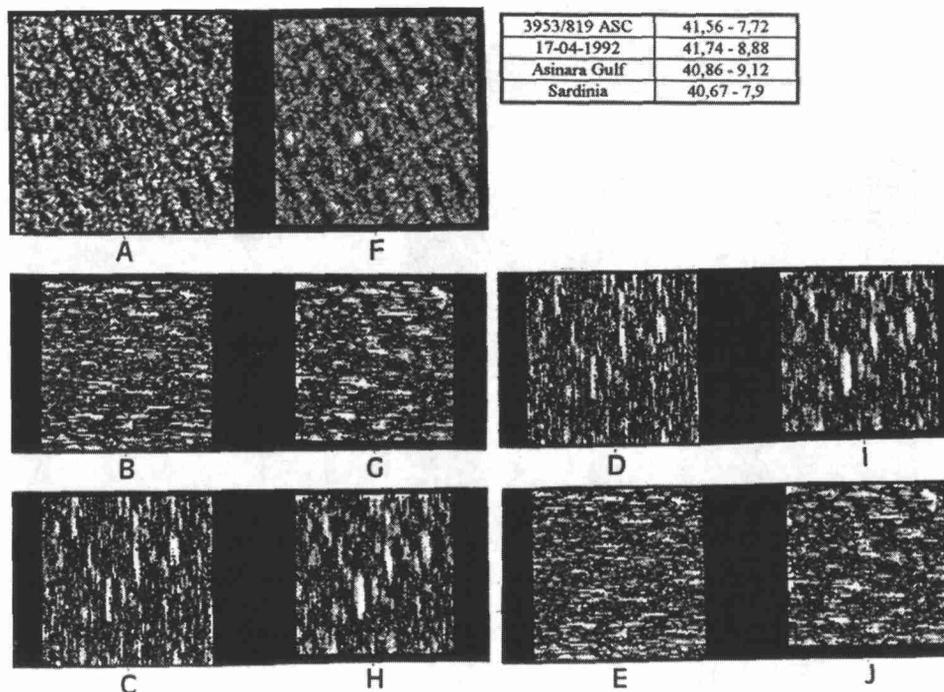


Figure 8. Résultat d'AUTOCORREL sur l'imagette filtrée statistiquement : a) imagette brute; b-c) distribution des valeurs du coefficient d'autocorrélation spatiale calculé selon X (ou Y pour c) sur l'imagette (a) et correspondant au 1^{er} cycle mis en évidence; d-e) distribution des valeurs de longueur d'onde correspondant au 1^{er} cycle mis en évidence selon X (ou Y pour e) sur l'imagette (a); f) imagette filtrée (filtre statistique 5 x 5); g-h) distribution des valeurs du coefficient d'autocorrélation spatiale calculé selon X (ou Y pour h) sur l'imagette (f) et correspondant au 1^{er} cycle mis en évidence; i-j) distribution des valeurs de longueur d'onde correspondant au 1^{er} cycle mis en évidence selon X (ou Y pour j) sur l'imagette (f)

montre la proportion de l'image pour laquelle r_x et r_y sont plus grands que ces valeurs, ainsi que les valeurs de L_x et L_y calculées à partir des pixels qui vérifient cette condition.

5. Quelques observations pratiques

La houle est un phénomène à haute fréquence spatiale et temporelle. Elle n'est pas toujours le seul phénomène observable sur les scènes RAS. En fait, d'autres processus à plus grandes échelles spatiale et temporelle peuvent accentuer ou atténuer la structure cyclique caractéristique de la houle. Ainsi, les facteurs suivants peuvent provoquer ce phénomène : les variations de vitesses des courants (BOER and VOGELZANG, 1992), en relation avec la bathymétrie et l'état de la marée (fig. 10); les structures frontales (JOHANNESSEN *et al.*, 1991); la circulation mésoscale, soit le vent local (ULABY *et al.*, 1982) et la structure verticale de la basse atmosphère (ASKARI *et al.*, 1993). La convection due à l'instabilité des masses d'air froid arrivant au contact d'une surface océanique chaude provoque en effet une forte variation de la rugosité de la surface de la mer.

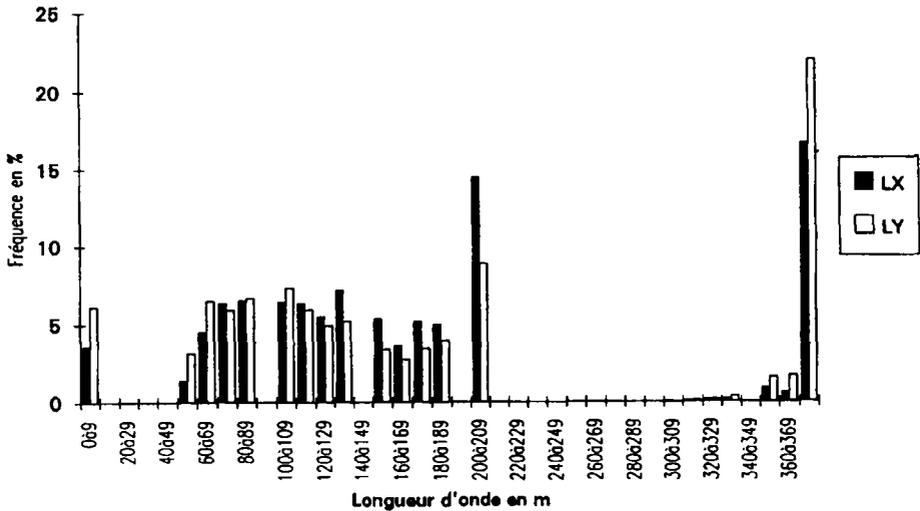


Figure 9. Densités de probabilité des valeurs de L_x et L_y

Tableau 3. Proportion de l'imagette présentant des valeurs de r_x et r_y significativement différentes de 0 pour $2\alpha = 0,10, 0,5$ et $0,01$, ainsi que les valeurs moyennes et écarts-types de L_x et L_y

$1-2\alpha$	r(table)	Proportion pour r_x	Proportion pour r_y	Moy. L_x $\pm \sigma$	Nombre de pixels	Moy. L_y $\pm \sigma$	Nombre de pixels
0,90	0,30	26,06	29,00	137,5 $\pm 88,4$	868	125 $\pm 106,1$	471
0,95	0,35	21,3	24,17	137,5 $\pm 88,4$	562	156 $\pm 62,2$	264
0,99	0,45	13,6	15,88	168,5 $\pm 44,6$	220	168,5 $\pm 44,6$	70

α = niveau du test

r(table) = limite de signification de r contre 0 au niveau α considéré

σ = écart-type

6. Conclusion

Indépendamment de cette interaction entre phénomènes à échelles spatiale et temporelle différentes, le calcul de la longueur d'onde par autocorrélation spatiale réalisé sur des imagettes localisées dans des zones adéquates est plus significatif s'il est appliqué sur une image filtrée statistiquement que sur une image brute. En effet, les tests réalisés sur des



Figure 10. Structures frontales au large de Walkeren et visibilité de la houle; imagerie (512 x 512 pixels) extraite de la scène 4848/2565 saisie le 19-06-92 à 10 h 41 TU

images originales ont donné de 7 à 11 % de longueur d'onde significative sur la base du test sur r au niveau de 85 %. La proportion obtenue sur l'image filtrée est plus élevée bien qu'encore relativement basse : 21,3 à 24,2 % au niveau de 95 %. D'autres aspects de notre recherche (interprétation analogique et confrontation avec les données météorologiques et hydrodynamiques) nous permettent de confirmer que les houles de longueur d'onde et de hauteur respectivement inférieures à 50 et 1 m semblent ne pas être détectables.

7. Remerciements

Cette publication a été réalisée dans le cadre du «Programme de recherche scientifique dans le domaine de la télédétection spatiale – deuxième phase», pour le compte de l'État belge et de l'Agence spatiale européenne.

8. Références

- ASKARI, F., GEENAERT, G.I., KELLER, W.C. and RAMAN, S. 1993. Radar imaging of thermal fronts. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, n° 2, p. 275-295.
- BOER, S. and VOGELZANG, J. 1992. Mapping of sea bottom topography with spaceborne SAR. BCRS project OP - 1.28 - BCRS report n° 91-14, 89 p.
- DIEM, K. et LENTHER, C. 1978. Tables scientifiques. Documentation Geigy, 7^e édition, Ciba-Geigy Sa., Bâle (CH), 823 p.
- JOHANNESSEN, J. A., SHUCHMAN, R. A., JOHANNESSEN, O. M., DAVIDSON, K. L. and LYZENZA, D. R. 1991. Synthetic aperture radar imaging of upper ocean circulation features and wind fronts. *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, n° C26, p. 411-422.
- LAUR, H. 1992. ERS-1 SAR calibration. Derivation of backscattering coefficient σ° in ERS-1.SAR.PRI products. European Space Agency, Frascati (Italy), Issue 1, Revue 0, 17th october 1992, 16 p.
- MATTEINI, V. 1992. Study on structure detection a new speckle filtering techniques for ERS-1 images. European Space Agency, Noordwijk (The Netherlands), 60 p.
- OZER, A., CORNET, Y. et COMHAIRE, A. L. 1992. Morphodynamique des côtes et caractéristiques énergétiques de la houle étudiée grâce au SAR de ERS-1. First ERS-1 Symposium, 4-6 novembre 1992, Cannes, p. 851-855.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. and FUNG, A. K. 1982. Microwave remote sensing. Active and passive. Volume 2 : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. A series of advanced level text books and reference works. Artech House, Norwood, MA, 1064 p.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. and FUNG, A. K. 1986. Microwave remote sensing. Active and passive. Volume 3 : From theory to applications. A series of advanced level text books and reference works. Artech House, Norwood, MA, 2162 p.

Apport de la télédétection pour l'évaluation de l'impact des ouvrages maritimes sur l'environnement littoral : cas de la région de la Jeffara orientale (Tunisie)

MOHAMED CHEDLY RABIA ¹ et AMOR KLAI ²

¹ *Institut national de la recherche scientifique et technique (INRST), B.P. 95, 2050 Hammam-Lif, Tunisie; téléphone : +216 (1) 430-470; télécopieur : +216 (1) 430-917*

² *Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie; téléphone : +216 (1) 514-700; télécopieur : +216 (1) 510-729*

Résumé

Dans ce travail, les données TM de Landsat (juin 1985) et HRV de SPOT (avril 1990) associées à des photographies aériennes au 1: 80 000 (1985) ont permis d'évaluer l'impact de deux ouvrages maritimes de la Jeffara orientale (sud-est de la Tunisie) sur la circulation des masses d'eau, la dynamique sédimentaire et l'évolution du couvert végétal. Des opérations de prétraitement, essentiellement de correction géométrique, ont permis de rendre superposables les images multidates. L'essentiel des traitements, effectués à l'aide du logiciel IDRISI installé sur PC, se résume en la méthode de segmentation qui a comporté des opérations de seuillage d'histogramme, de détection de contours et de segmentation en régions homogènes. L'étude d'impact a été facilitée par la numérisation de certaines portions de documents cartographiques préexistants disponibles (carte bathymétrique, carte topographique). La construction du port de Zarzis a provoqué le déferlement de vagues au niveau de la jetée, donnant lieu ainsi à une zone turbide et assez agitée au niveau du chenal d'accès. Vers le sud du site, une zone d'ensablement est mise en évidence sur les images HRV. La limitation de la circulation des eaux au niveau de la chaussée reliant l'île de Djerba au continent a contribué à l'établissement de zones préférentielles de turbidité, de dépôts et de prolifération de phytoplancton.

1. Introduction et problématique

L'outil de base pour le suivi de l'évolution de la dynamique sédimentaire sous l'influence des ouvrages maritimes est la cartographie d'inventaire des différents marqueurs de cette dynamique (érosion et engraissement des côtes, état de surface du tapis végétal, qualité de l'eau). Dans la région de Zarzis, les études effectuées avant la construction du port commercial prévoient des zones d'ensablement. Au niveau de la baie d'El Kantara, un appauvrissement en poissons a été constaté par les pêcheurs locaux. Pour la vérification et la compréhension de ces phénomènes, aucun suivi périodique n'a été assuré et seuls quelques documents existent : une carte bathymétrique datant de 1891 et les études effectuées depuis une quinzaine d'années par JÉDOUI (1979) et le MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT (1982). Le potentiel de la télédétection et son apport à ce genre d'étude n'étant plus à démontrer (VERGER *et al.*, 1987; LYZENGA, 1981; LESSARD *et al.*, 1989), c'est dans ce cadre que nous avons utilisé les données TM de Landsat et HRV de SPOT. Ces images multidates ont été utilisées tant pour favoriser la compréhension des phénomènes liés à l'impact des ouvrages étudiés que pour le suivi ultérieur des zones à risque de comblement, d'érosion ou de confinement.

1.1. Cadre géographique et climatique

Située dans le sud-est de la Tunisie, la Jeffara orientale est limitée au nord par le golfe de Gabès et au sud avec la frontière tuniso-libyenne. Le littoral est caractérisé par l'implantation d'une multitude d'ouvrages maritimes dont deux ont fait l'objet de cette étude. Il s'agit du site portuaire de Zarzis, mis en exploitation en 1990 et dont la construction a débuté en 1985. Le deuxième site étudié est celui de la chaussée dite «romaine» traversant la baie d'El Kantara sur une dizaine de kilomètres (fig.1).

Dans ces régions, le climat est semi-aride avec un régime de vents variable d'une saison à l'autre. En hiver, ce sont des vents d'ouest modérés à forts qui dominent avec un courant frais dérivant du nord-ouest. En été, un régime de vents d'est domine. Ce régime est parfois perturbé par des vents chauds et secs du sud-ouest ou d'ouest qui sont souvent chargés de poussières venant du Sahara.

1.2. Hydrologie du littoral de la Jeffara

1.2.1. La houle

Les houles sont principalement dues aux vents locaux et se déplacent en général d'est en ouest. Le site d'El Kantara est faiblement influencé par la houle du large, à cause de la présence de l'île de Djerba au nord et du cordon reliant cette île à Zarzis à l'est. Dans la région de Zarzis, les houles les plus fréquentes proviennent du secteur nord-est, tandis que celles venant du secteur sud-est sont moins fréquentes (tab. 1).

1.2.2. La marée

Dans la région d'étude, la marée est d'origine méditerranéenne. Elle est de type semi-diurne, avec deux hautes mers et deux basses mers par 24 heures. La marée maximale, de 2 m environ, est enregistrée dans le golfe de Gabès. En allant vers le sud, la valeur enregistrée est plus faible. À El-Kantara, la valeur maximale de la marée atteint 40 cm

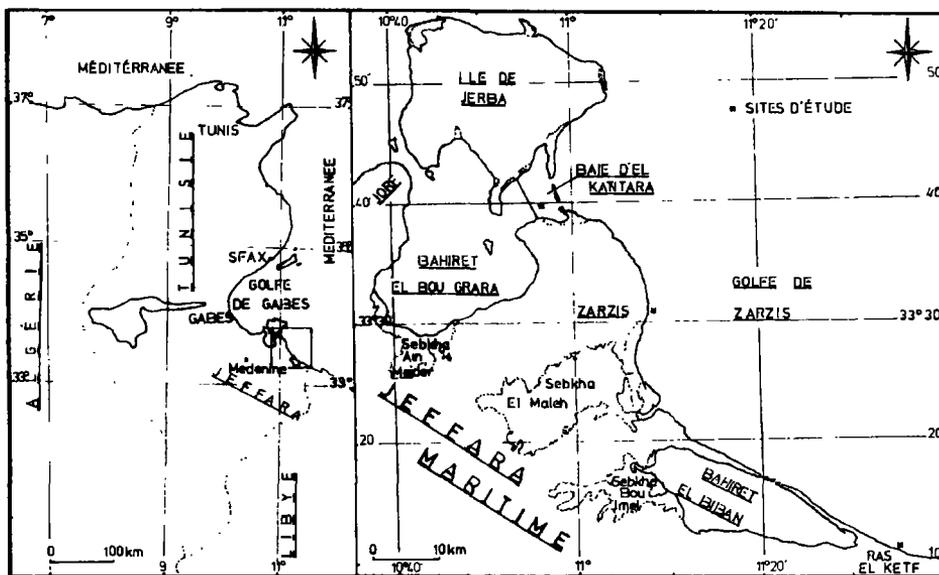


Figure 1. Localisation des sites d'étude

Tableau 1. Les caractéristiques des houles au large de Zarzis (MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, 1982)

	Période (s)	Direction au large	Amplitude au large (m)
Houles longues	12,0	ENE	5,5
	9,0	E	3,5
	8,0	ESE	3,1
Houles courtes	2,5	SE	0,6

(JÉDOUI, 1979). Dans la région de Zarzis, le marnage est plus important : il est de 90 cm en vives-eaux et de 10 cm en période de mortes-eaux. Plus au sud, dans la région de Ras El Ketf, le marnage moyen est de 80 cm en période de vives-eaux et de 20 cm en période de mortes-eaux, la marée moyenne étant de 50 cm.

1.2.3. Les courants marins

Dans la plupart des cas, les courants généraux n'interviennent que rarement sur les aménagements portuaires. Par contre, les courants de marée peuvent jouer un rôle important. En Tunisie, leur rôle est, le plus souvent, masqué par les courants associés aux vents locaux. Les courants littoraux sont à l'origine de transport de sédiments.

Au nord de l'île de Djerba, le courant de flot venant de l'est se dirige vers l'ouest et s'épanouit dans le golfe de Gabès. Plus au sud, il se propage vers l'ouest, parallèlement aux côtes devant le banc d'El Biban et vers le nord-ouest aux abords de Zarzis. Les courants

de marée sont généralement faibles et leur vitesse est de l'ordre de 10 cm/s. Vers Zarzis, les mesures ont donné des valeurs très faibles (7 cm/s au maximum). Ces courants sont en relation avec la force et la direction du vent. Vers le pont d'El Kantara, les vitesses des courants sont importantes et atteignent 250 cm/s en période de vives-eaux (JÉDOUI, 1979).

2. Matériel et approche méthodologique

2.1. Données utilisées

Pendant cette étude, nous avons utilisé les images TM et HRV couvrant la majeure partie du littoral de la Jeffara orientale. Sur le tableau 2, on montre les caractéristiques de ces images. Pour le traitement numérique de ces données, nous avons utilisé les logiciels ERDAS, installé sur une station SUN, et IDRISI, installé sur PC.

Tableau 2. Caractéristiques des données satellitaires utilisées

	HRV de SPOT	TM de Landsat
Date	17-04-1990	05-1985
Résolution (m)	20 (XS) - 10 (P)	30
Mode	- Multibande (XS1, XS2, XS3) - Panchromatique (P)	- Multibande (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5)

2.2. Cheminement méthodologique

Suite à la lecture des images brutes, une phase de prétraitement généralisé et systématique a été nécessaire. Il s'agit tout d'abord d'une correction géométrique s'appuyant sur une vingtaine de points amers repérés sur les cartes topographiques au 1: 50 000, suivie d'un recalage entre les données images. Ces opérations ont permis la superposition des différentes données multisources (cartes et images).

Le deuxième volet de cette phase de prétraitement a concerné l'extraction des deux sites d'étude et le choix des meilleurs canaux TM ou HRV qui donnent le maximum d'informations sur la géomorphologie du fond, la dynamique sédimentaire, la végétation et les houles en zone littorale. L'amélioration de l'impact visuel des images a été obtenue par des étirements de la dynamique.

La phase de traitement proprement dit a englobé la caractérisation des phénomènes étudiés et leur cartographie. Les opérations de filtrage ont permis de dégager les traits linéaires tels que les crêtes des houles au niveau du port de Zarzis, les hauts fonds et les chenaux. Il faut signaler, ici, l'importance de ces facteurs dans le cheminement des sédiments et leur dépôt.

Les opérations de segmentation d'images par seuillage d'histogramme ont conduit à tracer le trait de côte en 1985 et en 1990, et à dégager les zones d'engraissement. Les calculs d'indices de pigmentation et de transparence (BEN MOUSSA, 1987) ont conduit à l'extraction de la couverture végétale au niveau de la baie d'El Kantara.

Enfin, une analyse visuelle et une comparaison des résultats obtenus avec les documents préexistants ont permis de comprendre la relation de cause à effet entre les phénomènes mis en évidence et les édifices étudiés. Lors de cette phase, seule l'information relative à l'évolution du trait de côte a été extraite à partir de l'intégration automatique des données images et des données cartographiques.

3. Résultats et discussion

L'étude diachronique par télédétection satellitaire n'a été possible qu'au niveau du port commercial de Zarzis couvert par les deux scènes en notre possession.

3.1. Premier cas d'étude : le site portuaire de Zarzis

La lecture des données brutes TM et HRV, correspondant respectivement au début des travaux et à la mise en exploitation du port commercial de Zarzis, confirme un engraissement du site et de sa partie méridionale (fig. 2a, 2b). Un seuillage d'histogramme permet de préciser ces informations. Par ailleurs, sur XS1, on remarque la présence d'une zone d'ensablement assez importante (fig. 2b). Pour mieux apprécier ces phénomènes, nous avons, dans un premier temps, extrait les lignes de rivage instantané à différentes dates (fig. 3). La première ligne de rivage a été numérisée à partir de cartes topographiques de Zarzis au 1: 50 000. Les deux dernières ont été obtenues en effectuant des seuillages binaires sur les données TM5 de 1985 et XS3 de 1990.

Afin de comprendre ce recul du trait de côte ainsi que les causes de l'ensablement remarqué à environ deux kilomètres au sud du port, nous avons, d'abord, essayé d'extraire la géomorphologie sous-marine (fig. 4). Il faut noter que la nature des structures géomorphologiques (présence ou absence des hauts-fonds) ainsi que leur orientation, présentent un facteur essentiel dans le comportement hydrodynamique et sédimentaire d'un littoral. Dans notre cas, elles constituent un élément indispensable à l'interprétation du cycle sédimentaire.

L'obtention de la morphostructure a été le résultat de deux filtrages successifs effectués sur la bande XS1 (0,50-0,59 μm) qui représente le maximum de pénétration dans l'eau. Le premier est un filtre passe-bas permettant d'éliminer le train de houles; le deuxième est un filtre passe-haut accentuant les traits morphostructuraux visibles jusqu'à 15 m de profondeur.

Par la suite, nous avons essayé de suivre le comportement de la houle au niveau des principaux édifices liés au site. L'accentuation des lignes de crête des houles a été obtenue par un filtrage passe-haut (fig. 5).

Sur la figure 5a, la direction de la houle ainsi que son interaction avec la jetée du port sont nettes. La figure 5b montre la direction de la houle à l'intérieur du chenal du port.

Il est clair que la majeure partie de l'ensablement de la côte sud de Zarzis peut être attribuée aux travaux d'aménagement du site portuaire. Cependant, une fraction non négligeable est due à des conditions de remobilisation et de dépôt liées à l'existence du port lui-même. En effet, la houle, venant le plus souvent d'est et du nord-est subit au niveau de la jetée une réfraction importante, crée une zone d'agitation au niveau du chenal d'accès et perd de son énergie plus au sud. C'est dans cette zone, à l'abri des houles et du transit littoral nord, que les sédiments provenant du large et du continent (transport éolien) se déposent. Toute chance de remobilisation de ces dépôts est, par ailleurs, annulée par la présence d'un haut fond plus au sud (fig. 4), lequel freine l'effet du transit littoral sud.

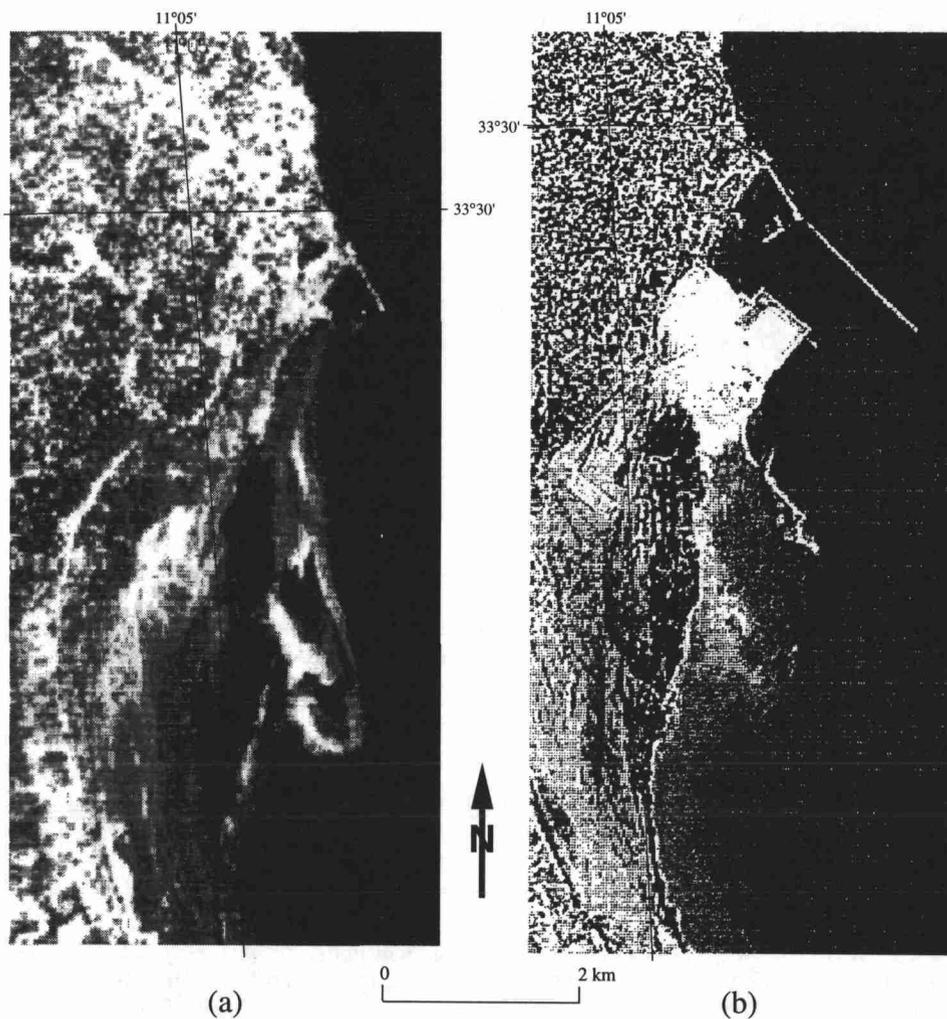


Figure 2. Site portuaire de Zarzis: a) canal TM1 seuillé; b) canal XS1 seuillé

3.2. Deuxième cas d'étude : la baie d'El Kantara

Cette zone n'est couverte que par les données TM. Le canal TM1 montre une géomorphologie caractérisée par la présence de plusieurs chenaux qui se comportent en véritables oueds sous-marins. La présence de ces chenaux est vitale puisqu'ils évitent à la baie un confinement total. Au cours des périodes de flot, le canal d'El Kantara prolonge un renouvellement relatif, mais non suffisant, des eaux de la partie occidentale. La photo-interprétation des données TM permet de dégager des zones de dépôt assez importantes, situées dans la partie sud occidentale du site. Dans ces zones, les valeurs radiométriques élevées dans le canal TM1 témoignent d'une forte réflectivité.

À défaut de mesures *in situ* des paramètres de la qualité de l'eau (surtout la salinité), seul l'indice de transparence exprimant la couverture végétale (BEN MOUSSA, 1987) a été

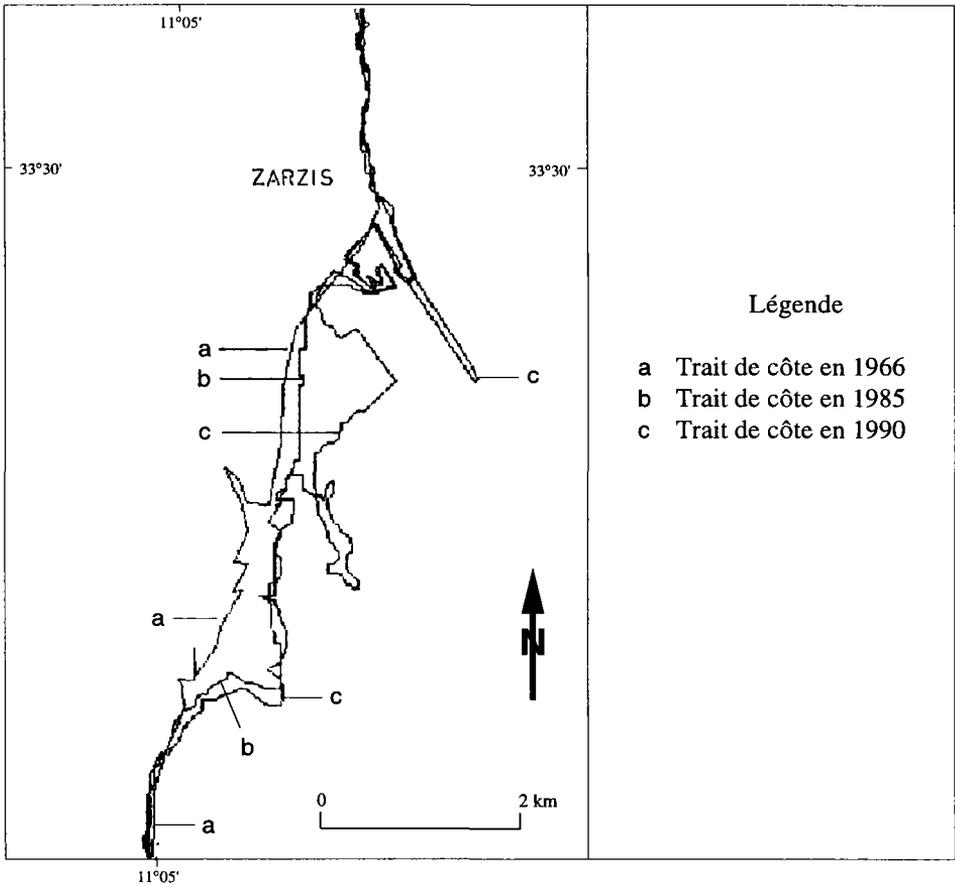


Figure 3. Les lignes de rivage instantané

calculé (fig. 22-6, voir cahier couleur). Sur cette figure, on constate l'établissement de zones préférentielles de développement végétal installées près des oueds sous-marins. Dans la partie occidentale de la baie, la zone sud semble présenter des conditions défavorables à la prolifération des végétaux.

À notre avis, la limitation de la circulation des eaux entre la baie et le large, d'une part, et entre ses deux parties suite à l'édification de la chaussée «romaine», d'autre part, a contribué à la création de régions abritées favorables au dépôt des sédiments. Ces régions sont essentiellement installées immédiatement au pied de la chaussée et vers la partie sud occidentale de la baie. Le non-renouvellement complet et périodique des eaux ainsi que la diminution de la tranche d'eau dans certains endroits ont causé un confinement des lieux et la disparition du couvert végétal.

Comme première solution à ce problème, l'élargissement du canal d'El Kantara qui assure la liaison entre les deux parties de la baie, ne serait que bénéfique.



Figure 4. Hauts-fonds perpendiculaires au transit littoral au golfe de Zarzis (XS1 filtré)

4. Conclusion

À défaut de documents de suivi périodique et continu, des opérations simples de traitement d'images satellitaires peuvent nous permettre d'extraire le maximum d'informations sur l'évolution d'un littoral. Ainsi, au niveau de la zone méridionale du site portuaire de Zarzis, la présente étude montre la nécessité à moyen terme d'un brise-lames afin d'éviter l'ensablement. Une première estimation de l'impact de la chaussée «romaine» se fait ressentir par l'existence de zones presque dépourvues de couverture végétale. Cependant, la précision de cet impact ne peut être effective que par l'établissement de stations de mesures de la qualité de l'eau. La combinaison entre ces données de terrain et les images satellitaires permettra une cartographie plus précise des différents paramètres.

5. Remerciements

Une partie de cette étude a été financée par le programme d'actions de recherche partagée du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF. Certains traitements ont été effectués au Service régional de traitement d'images et de télédétection de Strasbourg. Nous en remercions leurs responsables.

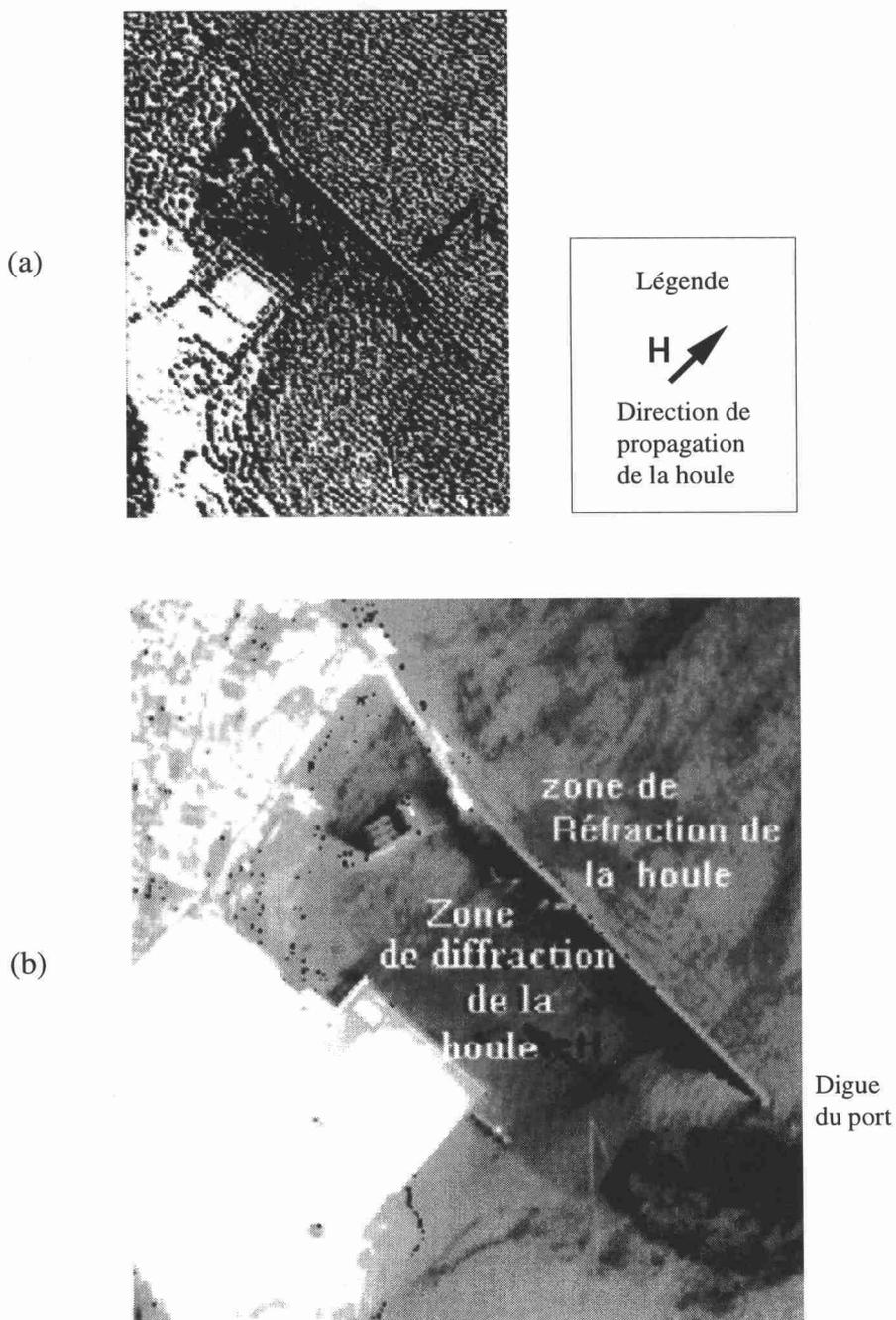


Figure 5. Crêtes de la houle au niveau du site portuaire de Zarzis : a) extraites à partir de XS; b) extraites à partir de l'image panchromatique (P)

6. Références

- BEN MOUSSA, H. 1987. Contribution de la télédétection satellitaire à la cartographie des végétaux marins : archipel de Molène (Bretagne, France). Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 123 p.
- JÉDOUI, Y. 1979. Étude hydrologique et sédimentologie d'une lagune en domaine méditerranéen : La Bahiret El Bougrara (Tunisie). Thèse de 3^e cycle, Université de Bordeaux I, 190 p.
- LESSARD, G. L., CAVAYAS, F. et DUBOIS, J.-M. 1989. Cartographie géomorphologique du littoral par télédétection numérique : validation des données et résolutions requises. *in* BERNIER, M., BONN F. et GAGNON, P. (éd.). Télédétection et gestion des ressources. Association québécoise de télédétection, vol. VI, p. 365-376.
- LYZENGA, D. R. 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, p. 71-82.
- MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT. 1982. Étude pour la construction du port de Zarzis. Rapport de la direction des services maritimes et aériens, 82 p.
- VERGER F., WANG, L., CUQ, F. et HE, D. C. 1987. Données multitemporelles SPOT-1 pour l'étude du régime des côtes sableuses : la pointe d'Arçay (Vendée, France). *Photo-Interprétation*, n° 4, fasc. 1, p. 1-10.

PARTIE V

Sécheresse et désertification

Propriétés spectrales des surfaces et télédétection de variations spatiales et temporelles de l'infiltrabilité de sols arides (Menzel Habib, Tunisie)

RICHARD ESCADAFAL ¹, ROGER PONTANIER ¹ et ABDERRAZAK BELGHITH ²

¹ *ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, Mission en Tunisie, B.P. 434, 1004 El Menzah, Tunisie; téléphone : +216 (1) 750-009; télécopieur : +216 (1) 750-254*

² *CNT, Centre national de télédétection de Tunisie, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie; téléphone : +216 (1) 760-900; télécopieur : +216 (1) 760-890*

Résumé

En régions arides, le cycle de l'eau est fortement influencé par les caractéristiques de la surface des sols, qui déterminent en particulier l'aptitude au ruissellement et l'érodabilité du milieu. Les capteurs à haute résolution spatiale, tel le HRV de SPOT, fournissent des mesures des propriétés spectrales des surfaces dans le domaine optique du visible au proche infrarouge. Dans cette étude, la réflectance spectrale des échantillons de surface a été mesurée sur le terrain avec un spectroradiomètre portable, dans la région de Menzel Habib, en Tunisie méridionale. Six sites ont été étudiés, représentant des faciès écologiques typiques dans la région et pour lesquels des mesures d'infiltration sous pluies simulées sont disponibles. La comparaison des deux séries de mesures montre que les variations d'état des surfaces se traduisent aussi bien sur le plan hydrodynamique que sur celui des propriétés spectrales. En particulier, l'indice de coloration calculé à partir des bandes visibles décroît en fonction de la dégradation des surfaces, qui se traduit par une infiltrabilité plus faible. Par calcul de cet indice pour trois images HRV de SPOT prises à des dates différentes, un essai d'application au suivi de la variation de l'infiltrabilité des sols et de l'état de dégradation du milieu est présenté à titre d'illustration de l'intérêt de la démarche proposée.

1. Introduction

1.1. Contexte

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre d'un projet mené par le Centre national de télédétection de Tunisie intitulé «Veille satellitaire de la désertification». Il est réalisé avec la collaboration scientifique de l'ORSTOM (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) et avec les partenaires nationaux tels les directions techniques du ministère de l'Agriculture (Direction des forêts, Direction des sols), les Commissariats régionaux au développement agricole, l'Institut national de la météorologie, le ministère de l'Environnement et l'Institut des régions arides (Médénine). Son objectif est de mettre au point une méthode de surveillance par télédétection des milieux arides en Tunisie méridionale. En utilisant les différents types de données-images disponibles, après interétalonnage, les changements affectant ces milieux seront détectés, qu'il s'agisse de dégradation (ensablement, diminution du couvert végétal) ou d'amélioration de l'état du milieu à la suite des actions de protection (mise en défens, travaux de fixation des sables, entre autres).

Dans ce cadre, une des premières étapes entreprises est la caractérisation des surfaces représentatives des différents écosystèmes et de leur condition (bon état, dégradé, etc.). En sus des données sur les sols et la végétation, qui sont déjà bien connues grâce aux travaux de terrain des différents organismes cités ci-dessus, des mesures spectroradiométriques sont réalisées sur des sites représentatifs. Une base de données sur les propriétés spectrales de la surface des sols de la Tunisie aride est ainsi en cours de constitution.

1.2. Problématique

Dans le domaine de la télédétection des ressources en eau, en ce qui concerne la détermination des paramètres du bilan hydrique, l'accent est mis sur la mesure directe des flux (évaporation, par exemple) ou de la teneur en eau des sols. Une approche alternative a été mise au point ces dernières années, montrant que, en zone aride, les caractères de la surface des sols déterminent leur aptitude à l'infiltration : on parle d'«infiltrabilité potentielle». Ceci a été mis en évidence sous pluies simulées, au Sahel (CASENAVE et VALENTIN, 1989) et en Tunisie par les travaux de ASSELINE *et al.* (1989), ESCADAFAL (1989) et FLORET *et al.* (1992).

Ainsi, s'il est possible de distinguer les différents types de surface par leurs propriétés optiques, les données de télédétection à haute résolution nous permettraient de délimiter des surfaces de comportement hydrodynamique connu, ce qui est d'un grand intérêt pour la modélisation du cycle de l'eau. Des essais dans ce sens ont déjà été réalisés par classification empirique d'images satellitaires (ALBERGEL *et al.*, 1987).

1.3. Objectifs de l'étude

Le présente étude aborde cette problématique en se basant sur des mesures au sol pour préciser les relations entre propriétés hydrodynamiques et propriétés spectrales. Les données spectroradiométriques de terrain obtenues au cours de ce travail sont mises en relation avec les mesures d'infiltration sous pluies simulées déjà réalisées dans la région de Menzel Habib (fig. 1). En vérifiant la séparabilité des différentes surfaces à partir de mesures dans les bandes spectrales des canaux HRV de SPOT, cette étude a pour but d'évaluer la faisabilité de la télédétection de l'infiltrabilité de sols du sud de la Tunisie.

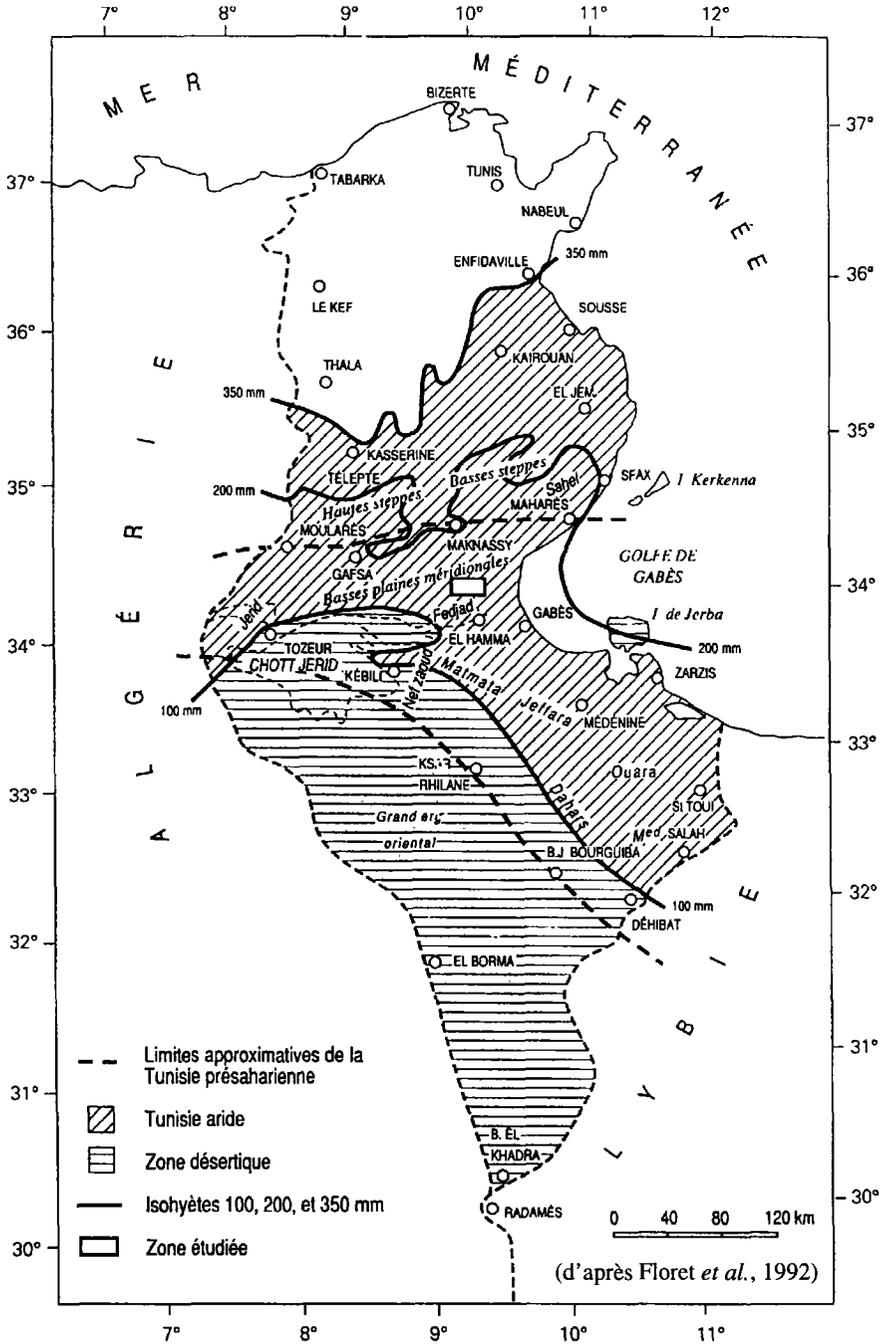


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude

2. Données de terrain

Le climat de la zone d'étude est de type aride méditerranéen, avec des précipitations irrégulières tombant surtout en hiver (moyenne annuelle de 150 à 180 mm). La végétation, sous forme de steppes à ligneux bas exploitées en parcours, présente un recouvrement qui excède rarement 30 %, sur des sols sablo-limoneux calcaires. La céréaliculture pluviale se développe entraînant des phénomènes de dégradation et des problèmes de durabilité inhérents à la fragilité de ces milieux.

2.1. Sites sélectionnés

Les résultats des nombreux travaux sur l'écologie de cette région ont été synthétisés dans l'ouvrage de FLORET et PONTANIER (1982), auquel on se référera pour une description plus complète des différentes séquences de dégradation et de la nomenclature des faciès correspondants. Parmi les différents écosystèmes qui y ont été décrits, nous avons sélectionné deux d'entre eux qui couvrent une grande partie de la zone, et qui ont des caractéristiques nettement différentes :

a) les piémonts limoneux dans lesquels deux faciès sont distingués :

- faciès de dégradation, caractérisé par un couvert végétal très faible (3 %), soumis à une exploitation pastorale intensive (AA1, suivant FLORET et PONTANIER, 1982);

- faciès de restauration du même milieu, après deux années de mise en défens, la végétation s'est bien développée et couvre 20 % de la surface (AA2);

b) les steppes sur sol sableux (à *Rhantherium suaveolens*) qui présentent une séquence de dégradation dont nous avons suivi quatre faciès, de la steppe en bon état (RK3) sur sol profond, jusqu'à la steppe dégradée sur sol érodé battant (RK1), en passant par les faciès intermédiaires RK2 et RK2-1.

2.2. Mesures sous pluies simulées

2.2.1. Appareillage

Les mesures d'infiltration ont été réalisées avec un petit simulateur de pluie facilement transportable. Il est constitué d'une tour démontable de 4 m de hauteur, du haut de laquelle un gicleur asperge une parcelle d'essai limitée par un cadre métallique de 1 m de côté. Le gicleur est placé sur un bras oscillant, dont l'amplitude peut être réglée, déterminant ainsi l'intensité de l'averse simulée. Le débit de l'eau qui ruisselle éventuellement vers l'exutoire de la parcelle d'essai est mesuré par un limnigraphe à mouvement rapide. L'infiltration est calculée par différence entre la quantité d'eau appliquée et la quantité ruisselée. La description complète du dispositif peut être trouvée dans ASSELINE *et al.* (1989).

2.2.2. Protocole de mesures

Trois averses simulant différents types d'événements pluvieux observés dans la région ont été successivement appliquées. Le tableau 1 résume les caractéristiques de ces averses, composées respectivement de trois, puis de deux, puis d'une phase d'intensité pluviométrique constantes. Ce protocole est celui qui a été défini pour tester, en Tunisie centrale et méridionale, une séquence pluvieuse de retour décennale. (FLORET *et al.*, 1989).

Tableau 1. Protocole de pluies simulées appliqué sur les six échantillons de surface

Averse	Séquence	État du sol	Intensité (mm/h)	Durée (min)	Pluie appliquée (mm)
1	a	Sec	20	15	5
	b	Humide	40	15	10
	c	Humide	80	15	20
2	a	Ressuyage de 24 h	30	20	10
	b	Humide	60	15	15
3		Ressuyage de 24 h	120	10	20

2.2.3. Résultats des mesures d'infiltration

Le protocole décrit ci-dessus a été appliqué de façon systématique dans les campagnes de simulation de pluies qui ont été réalisées sur un large ensemble des sites en Tunisie. Les résultats de plus de 500 pluies sur 160 parcelles forment une masse d'information qui est stockée dans la base de données DS-SIMUL, développée par la Direction des sols avec l'ORSTOM (MARTINI *et al.*, 1991). C'est de cette base que nous avons extrait les données d'infiltration utilisées dans cette étude. Ainsi, la figure 2 représente les coefficients d'infiltration obtenus sur chacun des types de surfaces étudiés, pour chacune des trois averses simulées.

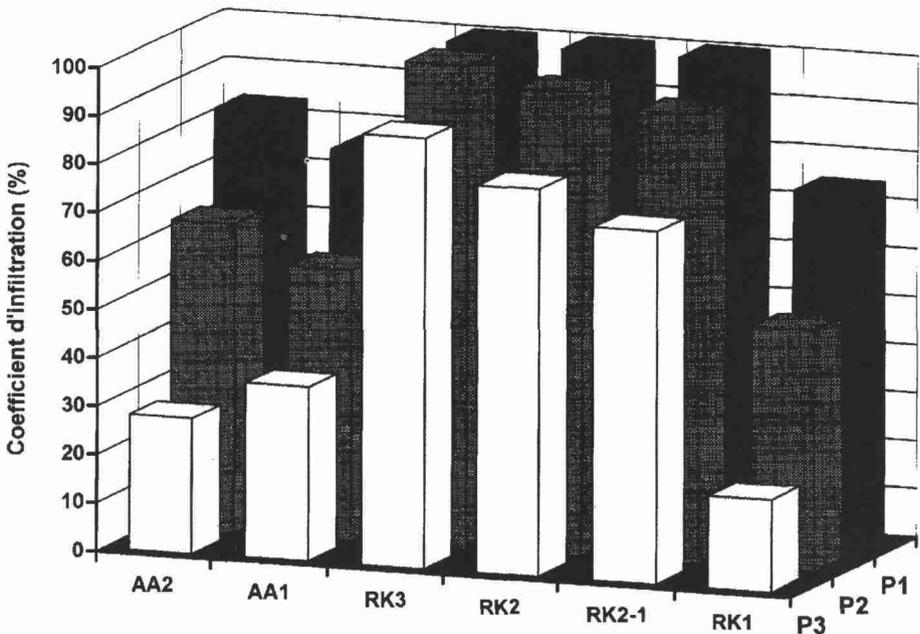


Figure 2. Coefficients d'infiltration observés sur les six échantillons de surface selon les pluies simulées appliquées P1, P2 et P3 (voir tab. 1)

De façon prévisible, les coefficients d'infiltration sur sol sableux (RK) sont globalement plus forts que ceux observés sur sol limoneux (faciès AA). On remarque en particulier que l'infiltration reste élevée même sous des averses de forte intensité (averse P3). Le faciès RK1 correspondant à un sol sableux très dégradé a un comportement hydrodynamique similaire au sol limoneux (AA1). D'une façon générale, les faciès dégradés présentent une infiltration plus faible, c'est d'autant plus net que l'intensité de l'averse est élevée.

2.3. Mesures spectroradiométriques

2.3.1. Dispositif de mesures

De nombreux instruments sont actuellement disponibles sur le marché pour réaliser des mesures du rayonnement réfléchi par les objets au sol, dans le domaine optique couvert par les satellites de télédétection. Pour cette expérience un spectroradiomètre portable modèle PSII a été utilisé (fabriqué aux USA par Analytical Spectral Devices, Colorado). Cet appareil compact et léger est constitué d'un câble à fibre optique captant la lumière à une extrémité et la conduisant à l'intérieur du boîtier de mesure, où elle est dispersée par un réseau sur une barrette de détecteurs. Un micro-ordinateur interfacé au-dessus du boîtier permet d'ajuster la durée de la mesure et d'enregistrer les valeurs numériques fournies par les détecteurs. La luminance spectrale des échantillons a été mesurée sur le terrain par temps clair, entre 10 et 15 h, d'une hauteur de 1 m de hauteur et en visée nadirale. Le champ de visée du capteur utilisé étant de 18°, la tache au sol a un diamètre de 60 cm environ. Les mesures ont été réalisées le long de transects dans chacun des échantillons de surface, à raison de 10 fois 3 mesures, selon un intervalle de 3 m. Le spectroradiomètre utilisé enregistre les valeurs de luminance en comptes numériques, mesurées sur 512 bandes entre 350 et 1 100 nm (selon un pas de 1,4 nm). Les valeurs de luminance de chaque surface ont été obtenues en faisant la moyenne des 30 mesures. La réflectance spectrale a été calculée en divisant les valeurs de luminance obtenues sur les échantillons de surface par celles obtenues au-dessus d'une cible de référence (panneau de Halon réfléchissant le rayonnement incident à 99,6 %).

2.3.2. Résultats des mesures spectroradiométriques

La figure 3 représente les courbes de réflectance obtenues, rééchantillonnées avec un pas de 5 nm, pour une meilleure lisibilité et un lissage du bruit. De plus, ces valeurs de réflectance spectrales ont été convoluées avec les courbes de transmission des capteurs de satellites courants. Ce calcul permet de simuler les valeurs de réflectance des échantillons de surfaces, telles qu'elles seraient mesurées par les satellites (après correction des effets atmosphériques) et donc de tester l'efficacité des différents capteurs et de leurs canaux, du point de vue de la séparabilité spectrale. Le tableau 2 montre les valeurs obtenues dans le cas du capteur HRV de SPOT, auquel nous nous sommes particulièrement intéressés dans cette étude, car nous disposons d'un jeu d'images de ce capteur en mode multibande (XS) sur la région.

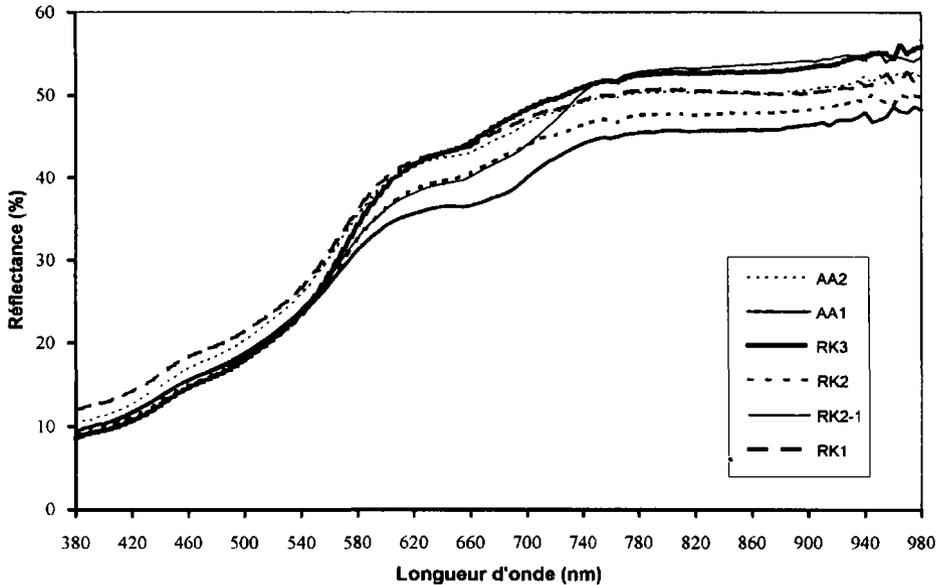


Figure 3. Courbes de réflectance spectrales obtenues avec le spectroradiomètre de terrain sur les six échantillons de surface

Tableau 2. Valeurs de réflectance des six échantillons de surface observées dans les bandes HRV de SPOT et indice de coloration RI (données simulées à partir des mesures spectroradiométriques)

	AA2	AA1	RK3	RK2	RK2-1	RK1
XS1	29,75	26,51	27,97	27,00	27,51	30,49
XS2	34,93	30,53	34,23	32,22	32,44	35,65
XS3	41,36	36,91	41,95	38,73	41,23	41,81
RI	0,080	0,070	0,101	0,088	0,082	0,078

3. Application au suivi des changements : premiers essais sur images HRV

3.1. Indice de coloration

Les courbes de réflectance spectrale obtenues sur les six échantillons de surface étudiés suivant la technique décrite ci-dessus apparaissent sur la figure 3. La réflectance des surfaces y varie principalement en amplitude : les surfaces sont plus ou moins réfléchissantes. Parmi les critères radiométriques des surfaces, la «brillance» est effectivement utilisée depuis longtemps, par exemple dans l'interprétation de niveaux de gris sur des photographies aériennes en noir et blanc. Cependant, ce paramètre est particulièrement sensible aux effets de variations des conditions d'éclairage, ce qui rend les valeurs obtenues à différentes dates délicates à interpréter en termes d'évolution temporelle des surfaces.

Mis à part ce premier critère de «brillance», les courbes de réflectance peuvent être aussi caractérisées par des critères de forme. Si elles ont ici des allures monotones croissantes comparables, on remarque cependant que la pente générale des courbes varie d'un échantillon de surface à l'autre. Même dans le cas des bandes relativement larges des données satellitaires, telles celles du HRV, les variations de cette pente peuvent être détectées par un calcul basé sur le rapport entre les deux bandes visibles XS1 et XS2. Ainsi, nous avons utilisé l'indice de coloration, RI, défini comme la différence normalisée entre les valeurs obtenues dans les bandes vertes et rouges, soit XS1 et XS2 dans le cas du HRV (ESCADAFAL and HUETE, 1991a). Cet indice, qui varie comme la pente de la courbe de réflectance, a été appelé «indice de coloration», car il est d'autant plus élevé que les sols sont plus colorés (plus précisément, il est corrélé avec la saturation de la couleur des sols; ESCADAFAL *et al.*, 1989; ESCADAFAL, 1993). Comme on s'y attend pour des rapports de canaux, l'indice RI est de fait relativement peu affecté par les conditions d'éclaircissement et de visée (ESCADAFAL and HUETE, 1991b).

Sur la figure 4 apparaissent les valeurs d'indice RI, calculées à partir des valeurs de réflectance dans les bandes XS, mesurées au sol sur les six échantillons de surface étudiés. Des différences notables apparaissent entre les échantillons de surfaces, montrant en particulier une diminution de l'indice RI entre la steppe sableuse en bon état (RK3) jusqu'à la steppe dégradée (RK1).

3.2. Combinaison de trois dates

Pour réaliser un essai d'application de cet indice à des données satellitaires, nous avons utilisé trois images HRV que nous disposons sur la zone, acquises respectivement en juin 1987, juin 1991 et juin 1992. Pour permettre l'intercomparaison des données, après

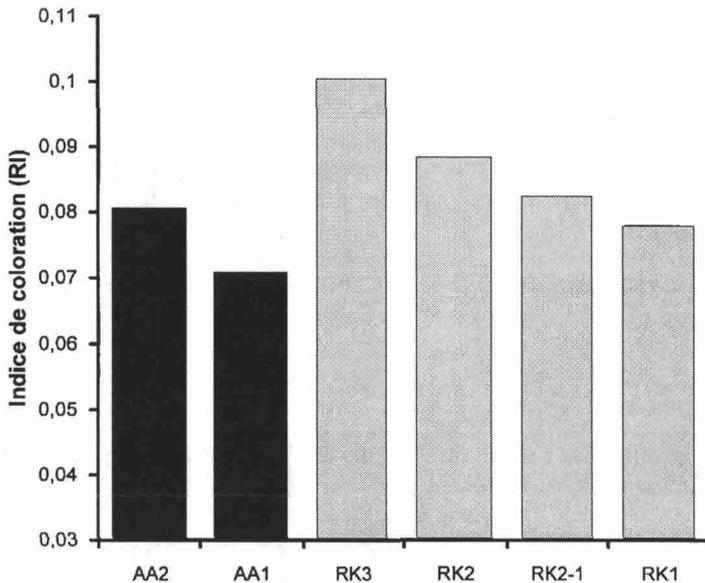


Figure 4. Indice de coloration des surfaces (RI) calculé dans les bandes du capteur HRV de SPOT (données simulées à partir des mesures spectroradiométriques)

correction géométrique, une correction atmosphérique simplifiée a été réalisée en soustrayant de chacun des canaux utilisés un niveau de comptes numériques attribué à la diffusion atmosphérique, tel que les pixels «sombres» (de compte numérique minimal) aient la même valeur dans les deux canaux de chacune des trois images (fixée ici à 10 comptes numériques). Cette correction est loin d'être absolue, mais elle permet de réaliser facilement des rapports de canaux où les effets d'«offset» sont minimisés (CRIPPEN, 1987).

Par chaque image nous avons calculé un canal contenant les valeurs de RI, défini ci-dessus. Puis, ces néo-canaux correspondant à l'indice de coloration à chacune des trois dates ont été affichés simultanément en bleu, vert et rouge, formant une composition colorée. La figure 23-5 (voir cahier couleur) montre un extrait de cette image où apparaissent les variations temporelles de l'indice de coloration des surfaces. Sur cette imagerie qui couvre environ 10 par 10 km, les zones sombres (noires) correspondent aux surfaces qui ont un indice de coloration faible à chacune des trois dates (surface de couleur pâle des sols limoneux dégradés, par exemple). Les zones très claires (blanches) représentent au contraire les surfaces d'indice de coloration élevé aux trois dates (surfaces sableuses, par exemple). Les couleurs jaunes, roses, bleues ou vertes qui apparaissent dans d'autres portions de l'imagerie correspondent aux zones où l'indice de coloration a varié d'une date à l'autre. Ainsi, à titre d'exemple, une surface qui a un indice de coloration élevé en 1987, puis plus faible aux deux autres dates, va apparaître avec une dominante bleue.

4. Discussion

Dans la région aride considérée, les résultats sous pluies simulées indiquent que l'infiltrabilité des sols diffère entre les deux écosystèmes étudiés. À l'intérieur de chacun d'eux, l'infiltrabilité diminue lorsque leur état de dégradation augmente, c'est particulièrement net dans le cas de la séquence des faciès RK3 à RK1. Parallèlement, cet état de dégradation se manifeste au niveau des courbes de réflectance spectrale dont la pente diminue, ce qui se traduit par une baisse des valeurs de l'indice de coloration. Ceci correspond à un changement de composition des matériaux pédologiques en surface. Sableux et rougeâtres au départ, sous l'effet de la dégradation, ces matériaux deviennent plus limoneux, avec une structure compacte et une couleur beige pâle, plus terne.

Cette variation de l'indice de coloration, qui correspond à des changements d'état des surfaces et donc d'état des milieux, peut être suivie par télédétection avec HRV de SPOT comme l'indique le premier essai de la figure 23-5 (voir cahier couleur).

5. Conclusion

Les résultats présentés ici montrent que, en attendant les données à haute résolution spectrale qui permettront de suivre des variations subtiles de la forme des spectres des surfaces, il est déjà possible de «télédétecter» des changements avec des critères simples comme l'indice de coloration. Ces changements observés depuis l'espace correspondent aussi à une évolution sur le plan écologique et, en particulier, à une modification de l'aptitude du sol à l'infiltration. La dégradation se traduit de fait par une augmentation du ruissellement potentiel des surfaces et donc de l'«aridité édaphique» du milieu (FLORET et PONTANIER, 1982). Dans ces cas favorables, il est alors envisageable d'interpréter l'imagerie satellitaire non plus seulement en classes d'état de surface (sableux, limoneux,

etc.) mais indirectement en termes de bilan hydrologique régional. La présente étude n'est cependant qu'un premier essai destiné à tester la faisabilité de la télédétection de différents types de faciès écologiques de la région sur la base de leur comportement spectral. Des travaux complémentaires seront nécessaires pour préciser les possibilités d'extrapolation de cette approche et ses limites. Le programme de «Veille satellitaire de la désertification» entrepris par le CNT apportera sa contribution à cet effort, sous la forme d'une base de données sur les propriétés spectrales des milieux naturels de la Tunisie aride et de méthodes de suivi à long terme par télédétection.

6. Références

- ALBERGEL, J., CHEVALLIER, P. et LORTIC, B. 1987. D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso), *Hydrologie Continentale*, vol. 2, n° 2, p. 77-86.
- ASSELIN, J., ESCADAFAL, R. et MTIMET, A. 1989. Étude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride Bir Lahmar, Sud tunisien. *Sols de Tunisie*, n° 14, p. 17-62.
- CASENAVE, A. et VALENTIN, C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.
- CRIPPEN, R. E. 1987. The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 4, p. 767-776.
- ESCADAFAL, R. 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Études et thèses, ORSTOM, Paris, 317 p.
- ESCADAFAL, R. 1993. Remote sensing of soil color : principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, n° 7, p. 261-279.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C. and COURAULT, D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat data MSS and TM. *Remote Sensing of Environment*, n° 27, p. 37-46.
- ESCADAFAL, R. and HUETE, A. R. 1991a. Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil «noise». *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Paris*, 312, série II, p. 1385-1391.
- ESCADAFAL, R. and HUETE, A. R. 1991b. Influence of the viewing geometry on the spectral properties high resolution visible and NIR of selected soils from Arizona. 5^e Colloque International «Mesures physiques et signatures en télédétection», Courchevel, France, 14-18 janvier 1991, European Space Agency, SP-319, p. 401-404.
- FLORET, C. et PONTANIER, R. 1982. L'aridité en Tunisie présaharienne. *Travaux et documents de l'ORSTOM*, Paris, 544 p. + annexes 100 p.
- FLORET, C., LE FLOC'H, E. et PONTANIER, R. 1992. Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne. in Le Floc'h, E., Grouzis, M., Cornet, A. et Bille, J. C. (éds.). *L'aridité, une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés*. Collection Didactiques, ORSTOM, Paris, p. 449-463.
- FLORET, C., MTIMET, A. et PONTANIER, R. 1989. Régime hydrique et sensibilité à l'érosion des systèmes écologiques de la zone aride Tunisie. *Cahier ORSTOM, série Pédologie*, vol. 25, n° 1-2, p. 53-69.
- MARTINI, P., DEROUICH, M. C. et PONTANIER, R. 1991. Gestion et exploitation des données de simulation des pluies en Tunisie. *Direction des sols/ORSTOM, Étude spéciale*, n° 260, Tunis, 17 p.

Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification dans le secteur sahélien du Niger

SALIFOU KARIMOUNE ¹, ANDRÉ OZER ², PHILIPPE TRÉFOIS ³ et ELS GOOSSENS ⁴

¹ *Faculté de pédagogie, Université de Niamey, B.P. 10963, Niamey, Niger; téléphone : +227 73-33-44*

² *Laboratoire de géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, 7, Place du 20 Août, B-4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (41) 66-54-46; télécopieur : +32 (41) 66-57-00*

³ *Laboratoire de télédétection aérospatiale, Section de cartographie, Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique; téléphone : +32 (2) 769-54-26; télécopieur : +32 (2) 767-02-42*

⁴ *Laboratoire de télédétection et d'aménagement des forêts, Université de Gand, Coupure Links 653, 9000 Gand, Belgique; téléphone : +32 (9) 264-61-08; télécopieur : +32 (9) 264-62-40*

Résumé

Dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF sur la désertification, des recherches ont été entreprises dans la région de Zinder (Niger méridional) par les universités de Niamey, de Liège et de Gand et le Musée royal de l'Afrique centrale à Tervuren. Les objectifs poursuivis sont la mise en évidence, par télédétection, de la dégradation de la couverture végétale, d'une part, et le suivi de l'évolution des processus de déflation et de remobilisation des sables, d'autre part. Trois images MSS de 1973 et de 1976 et une image TM de 1987 ont été utilisées. Les traitements réalisés sont des calculs

d'indices de végétation et l'application de modèles de mélanges spectraux sur la base de données satellitaires préalablement corrigées pour les effets atmosphériques et rendues géométriquement et spectralement compatibles entre elles. L'application du modèle de mélange s'appuie sur des mesures radiométriques réalisées *in situ* lors d'une campagne sur le terrain au cours de laquelle des estimations du taux de couverture des couronnes d'arbres ont également été effectuées. Les traitements ont permis de relever, entre 1973 et 1987, une réduction de la couverture végétale qui, d'un état diffus, passe à une structure plus contractée, se localisant dans des sites refuges, dans les lits d'oueds et autour des mares. La déflation et les remaniements de sable se sont amplifiés aux abords des villages et autour des reliefs qui perturbent le transit éolien.

1. Introduction

1.1. Objectifs

De nombreux travaux de télédétection ont été consacrés à l'étude des changements environnementaux intervenus dans les régions sahéliennes à la suite de l'installation de la sécheresse. Souvent, par ces travaux, on analyse la dynamique de la végétation soit au cours de la saison pluvieuse, soit d'une année à l'autre afin de dégager, pour une série multidade, l'évolution de la biomasse (TUCKER *et al.*, 1986; TOWNSHEND and JUSTICE, 1986; JUSTICE and HIERNAUX, 1986).

L'étude sur deux ou plusieurs années des formations végétales sahéliennes, considérées globalement, fait davantage ressortir les déficits pluviométriques d'une année à l'autre et traduit mal la dégradation continue des milieux. Celle-ci ne peut être appréhendée que par l'analyse des formations ligneuses qui ont une sensibilité pluriannuelle, laquelle reflète mieux l'évolution de la couverture végétale à moyen terme (JACQUEMINET, 1990). C'est pourquoi, les images qui sont traitées dans ce travail sont seulement des images prises en saison sèche, au moment où, en dehors des zones de cultures maraîchères, l'activité chlorophyllienne est surtout le fait de la végétation ligneuse.

Les objectifs poursuivis par les recherches pluridisciplinaires entreprises dans la région de Zinder (Niger méridional), dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF sur la désertification, visent à cerner non seulement la dégradation de la couverture végétale, mais également d'autres processus qui vont de pair avec celle-ci, entre autres l'amplification des processus éoliens. En effet, ceux-ci engendrent des modifications géomorphologiques sur les modelés dunaires hérités des phases arides du Quaternaire supérieur et opèrent une ablation notable sur les horizons supérieurs de sols par ailleurs très pauvres.

Au cours de travaux antérieurs (KARIMOUNE *et al.*, 1993), nous avons mis en évidence, pour un territoire limité, par comparaison d'une image HRV de SPOT et de photographies aériennes numérisées, une forte dégradation de la couverture végétale entre le vol de 1958 et celui de 1975, ainsi que d'importants remaniements éoliens depuis 1975.

Dans la présente étape, le suivi de l'évolution de la désertification a été effectué grâce aux traitements de trois images MSS et d'une image TM de Landsat. La première image (MSS 202-51) a été prise le 11-03-1973, les deux suivantes (MSS 202-50 et 202-51) ont été acquises le 10-01-1976. L'image TM est une scène composée (188-50/51) du 04-01-1987. Les traitements réalisés sont le calcul d'indices de végétation et l'application de modèles de mélanges spectraux. Cette dernière technique permet de faire ressortir à la fois la dégradation du couvert végétal et les remaniements éoliens.

1.2. Cadre géographique

L'étude concerne la région située au sud et à l'est de la ville Zinder dans le Niger méridional (fig. 1). Elle couvre en latitude le secteur compris entre 13°20' N et 14°30' N. En longitude, elle s'étend, au sud du 14^e parallèle, entre 9° et 10° E. Mais plus au nord, elle s'étire jusque 10°20' E. Ce territoire correspond au Damagaram occidental et central et au Koutous méridional. Il est caractérisé par une pluviométrie moyenne variant entre 575 mm au sud (moyenne établie sur la période 1938-1990, station de Magaria) et 263 mm au nord (moyenne de la station de Tanout calculée sur la période 1936-1990). Les formations végétales les plus caractéristiques sont, au sud, une savane arborée dont l'espèce la plus représentée est l'*Acacia albida* et, au nord, une savane arborée-arbustive où dominent *Acacia raddiana*, *Acacia seyal*, *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca* (AUBREVILLE, 1949; LE HOUÉROU, 1979; DE FABREIGUES, 1980; KARIMOUNE *et al.*, 1993).

Du point de vue morphologique, les modelés dunaires hérités de phases arides du Quaternaire supérieur dominant le paysage (KARIMOUNE *et al.*, 1990, 1993). Leur susceptibilité aux processus éoliens actuels constitue une des principales formes de caractérisation de l'évolution de la désertification dans la région. Les remaniements des sables sur la partie sommitale des dunes suivent ou vont de pair avec la dégradation du couvert végétal, celle-ci ayant plus attiré l'attention. La mise en évidence de cet ensemble de processus de désertification, soit dégradation du couvert végétal et amplification des processus éoliens, a été réalisée grâce à la comparaison d'images diachroniques : MSS de 1973, MSS de 1976 et TM de 1987.

2. Techniques et méthodes

2.1. Travaux antérieurs et préparation de l'étape actuelle

Dans les travaux antérieurs (KARIMOUNE *et al.*, 1993), nous avons montré, grâce à la comparaison d'une image HRV (haute résolution visible) de SPOT du 22-11-1987 et de photographies aériennes de 1958 et de 1975 numérisées, l'importante réduction de la couverture végétale, surtout entre 1958 et 1975, et l'amplification des remaniements éoliens, notamment depuis 1975. Ces travaux ne concernaient qu'un territoire réduit, car une photographie de 1958 (au 1: 50 000) et une de 1975 (au 1: 60 000) avaient été numérisées par balayage. Nous avons donc envisagé d'étendre la méthode à des secteurs plus étendus et variés. L'acquisition de trois images MSS de 1973 et de 1976 ainsi que d'une image TM de 1987, nous a permis de poursuivre notre recherche dans cette voie. Cependant, il faut signaler ici que, comme mentionné plus haut, la dégradation de la couverture végétale a été sévère surtout au début de la sécheresse, c'est-à-dire entre 1968 et 1973. Or, les images satellitaires ne sont disponibles que depuis 1972, avec le lancement de ERTS devenu Landsat-1. Ceci constitue une limitation dans l'estimation des dégradations du paysage par rapport à des situations antérieures.

Pour se mettre dans une situation optimale de comparaison des images MSS et TM, qui ont des caractéristiques différentes quant à la position des bandes spectrales et la résolution spatiale, une campagne de mesures radiométriques *in situ* a été réalisée en vue de l'étalonnage des données. Une cinquantaine de mesures ont été réalisées avec un spectroradiomètre à haute résolution GER IRIS MARK V (995 canaux, 2 à 4 nm de résolution). Les signatures spectrales des principaux éléments du paysage ont été établies

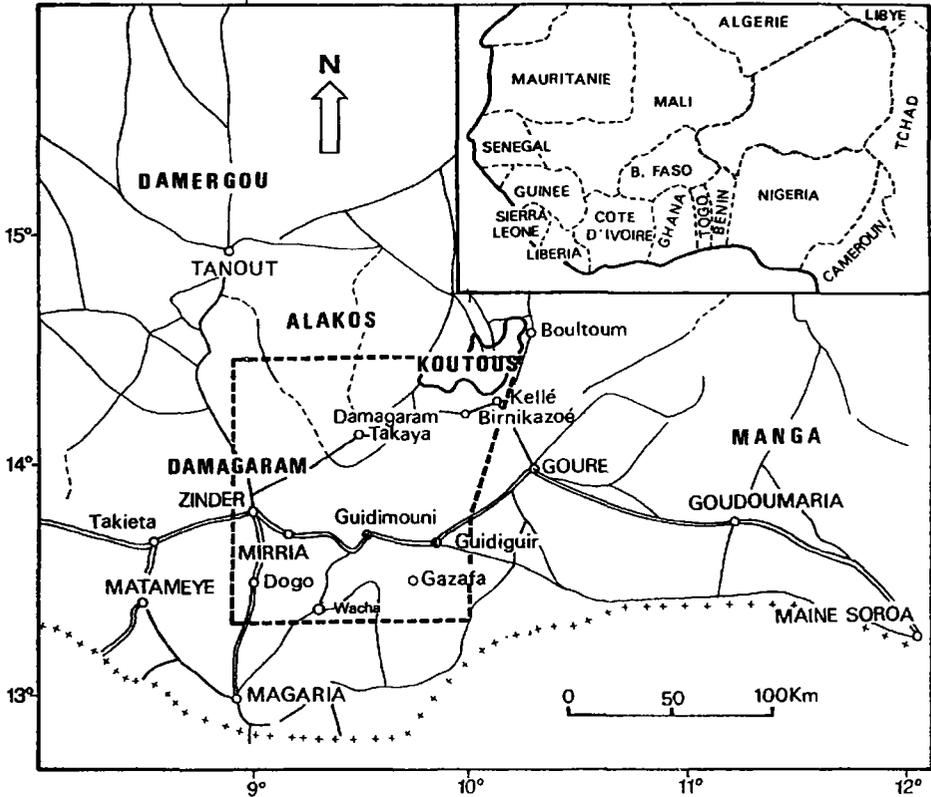


Figure 1. Localisation du secteur d'étude

à partir des mesures radiométriques effectuées sur le terrain : végétation verte et sèche, différents types de sable, dont les sables blancs remaniés, eau, affleurements rocheux (quartzite, grès, granites), grenailles et cuirasses latéritiques, glaçages. Les courbes de réflectance des sables ocre et rouges, ainsi que celles des grenailles latéritiques et des grès altérés sont marquées par une concavité de départ liée à l'absorption par les oxydes de fer, dans le visible et le proche infrarouge (KARIMOUNE *et al.*, 1992; TRÉFOIS, 1992).

Au cours de la même campagne, des estimations de taux de couverture des couronnes ont été effectuées. Ces taux très élevés dans les lits de certains oueds et autour des mares (de 60 à 80 %) ne dépassent guère 10 % dans la partie sud et tombent à moins de 5 %, voire même à 1 % dans le secteur nord. Même dans le sud mieux arrosé, les arbres sont rares sur les sommets des dunes qui correspondent à des champs abandonnés, colonisés par une végétation arbustive de *Leptadenia pyrotechnica*, indicatrice de l'épuisement des sols et de la dégradation des paysages.

2.2. Traitements

La première étape a consisté à superposer des images MSS sur la sous-scène TM dont le format et la taille des pixels ont été choisis comme référence. Ce choix a été dicté par le fait que l'image TM présentait une géométrie moins déformée que celle des images MSS.

La deuxième étape a consisté en un réétalonnage des données. Les valeurs physiques mesurées par les capteurs des satellites ont été calculées, utilisant les valeurs de luminance minimale et maximale pour les images MSS (ROBINOVE, 1982) et les gains et niveaux de sortie à entrée nulle donnés sur la bande CCT pour la scène TM. Ensuite, une correction atmosphérique (logiciel 5S, TANRÉ *et al.*, 1990) a été appliquée. Les paramètres pris en compte dans cette correction atmosphérique sont, entre autres, un climat tropical avec aérosol de type continental et une visibilité horizontale de 30 km. Ce dernier paramètre est, en fait, tout à fait arbitraire, ne correspondant pas aux données météorologiques précises du moment de l'acquisition des images.

Les valeurs physiques obtenues ont été ensuite recalées dans une fourchette de 256 niveaux de gris (TRÉFOIS *et al.*, 1992).

Sur la base des données réétalonnées, des compositions colorées (rouge : 4, vert : 3, bleu : 2, pour l'image TM et rouge : 6, vert : 5, bleu : 4 pour les images MSS) ont été réalisées; leur interprétation visuelle donne déjà des éléments d'appréciation des changements intervenus entre les trois dates de prise de vues.

Les indices de végétation, soit l'indice de végétation de la différence normalisée NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) et l'indice foliaire, ont été ensuite calculés pour les trois dates et superposés en une composition colorée où l'année 1973 est représentée en rouge, 1976 en vert, et 1987 en bleu (fig. 24-2, voir cahier couleur).

Cette démarche permet de mettre en évidence l'évolution de la couverture végétale. La dominance d'une couleur sur une partie de la zone étudiée traduit l'abondance de la végétation pour l'année à laquelle correspond la couleur considérée. Les secteurs où aucun changement n'est intervenu apparaissent en blanc et ceux où il n'y avait pas de végétation aux trois dates sont en noir.

Pour être dans des conditions optimales de comparaison, les histogrammes des images MSS ont été recalés sur celui de l'image TM. L'image TM ayant une meilleure résolution spatiale et radiométrique que les images MSS, elle semblait présenter, *a priori*, une meilleure dynamique. Aussi a-t-elle été prise à nouveau comme référence pour recalibrer les histogrammes des deux autres images. Mais ce traitement n'a apporté aucun changement dans la qualité des résultats.

L'étape suivante a été le calcul du modèle de mélange des spectres. Sur la base de la connaissance du terrain, les principaux éléments du paysage ont été identifiés sur les compositions colorées : végétation, sable fixé et sable remanié, cuirasse latéritique, eau, glaçages auxquels s'ajoute l'ombre. Le principe du modèle de mélange repose sur le fait que, dans les régions désertiques ou subdésertiques, déjà à l'échelle du pixel, la réponse spectrale correspond non pas à un seul élément du paysage, mais à la combinaison de réponses élémentaires où interviennent la végétation, différents types de sols, l'ombre, etc. Au contraire, les classifications et les calculs d'indices de végétation supposent qu'un élément unique du paysage correspond à au moins quelques pixels (SMITH *et al.*, 1990).

Le postulat de départ du modèle de mélange suppose que les principales variations spectrales à l'intérieur d'une scène sont le fait du mélange, en proportions variables, d'un petit nombre d'objets (SMITH *et al.*, 1990). La contribution à la réflectance globale, de chacun de ces éléments, considérés comme «termes extrêmes», est calculée, pour chaque pixel, par l'équation :

$$DN_b = \sum_{i=1}^n F_i \cdot DN_{i,b} + E_b \quad \left(\sum F_i = 1 \right)$$

où DN_b = compte numérique d'un pixel de l'image dans la bande b;
 F_i = fraction représentée par le terme extrême i;

$DN_{i,b}$ = réflectance du terme extrême i dans la bande b ;

n = nombre des termes extrêmes;

E_b = somme d'erreurs, dans la bande b , pour l'assiette de termes extrêmes utilisés (SMITH *et al.*, 1990).

Dans la présente étude, les termes extrêmes choisis sur la base du travail de vérité terrain et des mesures *in situ* sont : la végétation verte, les sables, la cuirasse, les glaçages et l'ombre.

Des images de mélanges spectraux ont ensuite été réalisées avec les termes extrêmes tirés des données satellitaires étalonnées, puis avec ceux mesurés sur le terrain et, enfin, à partir d'une régression image-terrain. Il est important de remarquer que ces termes, qui sont décrits comme des objets réels, sont définis dans le modèle par des valeurs spectrales, et déterminés par l'interaction du rayonnement électromagnétique avec les objets. À la résolution spectrale des capteurs des satellites, la relation objet-signature spectrale peut ne pas être univoque. La signature spectrale d'un sable rubéfié par les oxydes de fer présentera des caractéristiques intermédiaires entre celles d'un sable blanc et d'une latérite, ce qui ne correspond pas à la réalité minérale. Connaissant ces limitations, on exploitera les résultats du modèle de façon critique.

3. Résultats

Les images, réalisées à partir de mesures de réflectance de quelques éléments caractéristiques du terrain, comportent de nombreuses confusions, notamment entre cuirasses latéritiques et sables ocre. Malgré les corrections appliquées, il subsiste des différences entre le signal satellitaire et les mesures *in situ*, dues aux différences d'échelles de mesures (50 cm² *in situ*, contre 900 m² pour le satellite), aux conditions d'éclairage et à l'étalonnage absolu des capteurs et du radiomètre de terrain. Les résultats obtenus à partir des termes extrêmes extraits des régressions terrain-image donnent une bonne représentation de l'ombre, de la végétation, des sables ocre et des sables remaniés. Par contre, les latérites et les glaçages sont surestimés. Si, pour certaines parties couvertes par les latérites, on peut encore évoquer la coloration des sables, celle-ci ne peut tout expliquer, en particulier l'extension des cuirasses à des zones de végétation.

Les meilleurs résultats sont ceux réalisés avec des éléments caractéristiques choisis sur l'image. Dans ce cas, seuls les sables remaniés sont sous-estimés (fig. 3).

Cette méthode a ensuite été appliquée aux données MSS. Des compositions colorées ont été réalisées, pour les sites choisis, soit le sud-est de la ville de Zinder et le Koutous méridional.

Pour la région située au sud-est de Zinder, nous disposons des images aux trois dates, soit 1973, 1976 et 1987. La comparaison de compositions colorées de la latérite (R), de la végétation (V) et des sables (B) semble indiquer une légère augmentation de la proportion de la végétation entre 1973 et 1976 et, par contre, une certaine diminution des remaniements éoliens. Il faut souligner ici que la plus grande crise a eu lieu pendant la période sèche de 1972-1973 et qu'elle avait été précédée par une série d'années sèches avec le déficit pluviométrique le plus sévère en 1972. L'année 1976 a, au contraire, été précédée par deux années moyennes. En outre, la date de saisie de l'image de 1973 est plus tardive par rapport à celle de 1976 (11-03-1973 contre 10-01-1976). Ceci pourrait expliquer l'existence d'une végétation verte plus fournie et des remaniements éoliens moins importants en 1976 qu'en 1973.

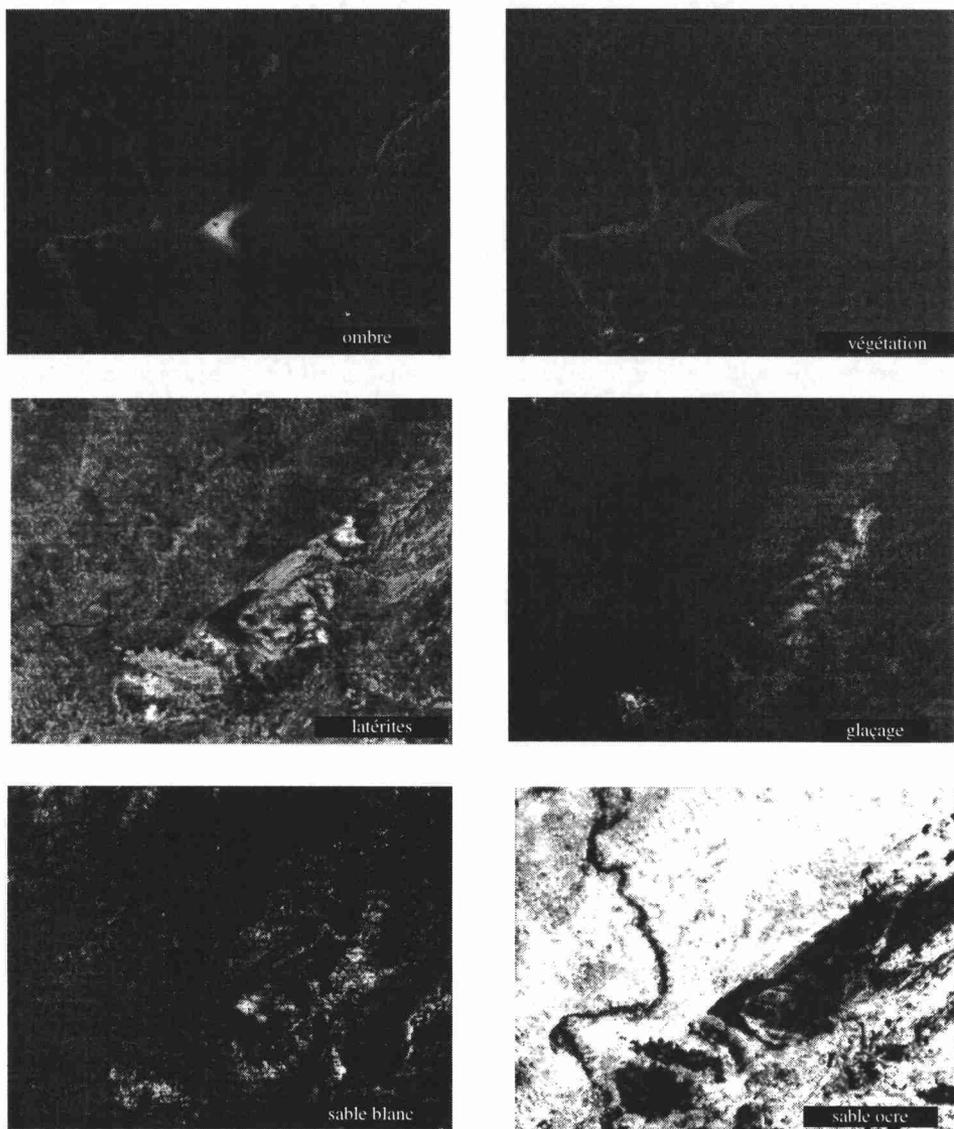


Figure 3. Images de différents éléments du paysage obtenues à partir du modèle de mélanges spectraux (secteur SE de Zinder)

La comparaison de l'image de 1976 avec celle de 1987 fait ressortir une réduction de la couverture végétale. Celle-ci, qui était assez diffuse auparavant, se contracte et se concentre de façon quasi exclusive dans le lit des oueds et autour des mares où sa densité semble diminuer par rapport à la situation de 1976.

Quant aux sables remaniés, leur proportion s'accroît à nouveau, soulignant l'amplification des processus éoliens. Ces sables se localisent autour des villages ou dans le prolongement des couloirs entre les reliefs de quartzites, mais quelquefois aussi, sous le vent de ces reliefs.

Autour des villages, la végétation arborée et arbustive a été complètement détruite par une demande de plus en plus élevée en bois de chauffe. L'effet protecteur de la strate ligneuse y est donc quasiment nul. Par ailleurs, le piétinement excessif par les hommes et les animaux détruit la cohésion des sables, rendant ceux-ci plus susceptibles à l'activité éolienne. Les remaniements de sable dans le prolongement des couloirs entre reliefs sont dus au renforcement de la vélocité des vents suite à la diffuence que ceux-ci subissent à l'abord des obstacles (KARIMOUNE *et al.*, 1993). La faible protection des sols des crêtes dunaires, conséquence de la réduction du couvert végétal, provoque une efficacité accrue des processus éoliens. Dans le cas où les sables sont situés sous le vent des massifs, ils sont plus facilement balayés par les tourbillons qui naissent lorsque les courants éoliens franchissent ces obstacles. L'image du Koutous (fig. 24-4, voir cahier couleur) nous offre quelques exemples de cette évolution. En 1976, les sables remaniés sont localisés soit dans les lits des oueds, soit au débouché de ceux-ci, constituant ainsi des cônes au pied du plateau du Koutous, soit enfin, aux abords des villages. En 1987, la remobilisation des sables prend des proportions considérables. Les dépôts se généralisent au vent des reliefs, tandis qu'en position sous le vent, la déflation et l'érosion éolienne se remarquent à cause d'une structure longitudinale et effilée des sables résiduels. Cela va, bien entendu, de pair avec la réduction de la couverture végétale qui, en 1987, se concentre, ici aussi, dans les lits des oueds et autour des mares avec une densité moins élevée qu'en 1976.

4. Conclusion

En dépit de quelques confusions thématiques liées à la nature spectrale des variables utilisées, le modèle permet de dégager la proportion des principaux éléments du paysage et, ainsi de suivre leur évolution. La limitation principale est sans doute le nombre peu élevé des éléments pris en compte face à une réalité plus complexe du paysage. En outre, d'autres paramètres extrinsèques, comme la correction atmosphérique ou la sensibilité des capteurs, peuvent avoir joué un rôle limitateur dans la précision des résultats. Cependant, sur les deux sites la correspondance est frappante entre les indices de végétation, l'interprétation des compositions colorées simples, d'une part, et les images des résultats des modèles de mélanges, d'autre part, ce qui permet de penser que c'est là un moyen intéressant d'appréciation de l'évolution globale des phénomènes de désertification dans les régions sahéliennes.

Aussi, pensons-nous pouvoir étendre cette approche à d'autres secteurs de la zone d'étude afin d'aboutir à une cartographie plus exhaustive de la dégradation de la végétation et de ses conséquences dans la région de Zinder. On peut également envisager l'application de cette technique à d'autres régions du Niger où des images multidates sont disponibles. Ainsi arriverait-on à cerner, pour le Sahel nigérien, les zones les plus sensibles et envisager des mesures de protection et de gestion plus rationnelles de l'environnement.

5. Références

- AUBREVILLE, A. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques et coloniales, Paris, 351 p.
- CHAVEZ, JR, P.S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, n° 9, p. 1285-1294.

Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification au Niger

- DE FABREIGUES, B.P. 1980. La végétation. *in* Atlas du Niger, Éditions Jeune Afrique, Paris, p. 20-21.
- JAQUEMINET, C. 1990. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 129-144.
- JUSTICE, C. O. and HIERNAUX, P. Y. 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration; Advanced Very High Resolution Radiometer) data : Niger, 1983. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1475-1497.
- KARIMOUNE, S., ALEXANDRE, J. et OZER, A. 1993. Suivi par télédétection, de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). *in* DUBOIS, J.-M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (réd.). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec, Québec, p. 151-159.
- KARIMOUNE, S., OZER, A. et ERPICUM, M. 1990. Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional). Étude de photogéomorphologie. Note préliminaire. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 145-161.
- KARIMOUNE, S., OZER, A., TRÉFOIS, Ph. et GOOSSENS, E. 1992. Recherche par télédétection sur la désertification au Sahel (Niger). Communication présentée au «Workshop» de l'Association européenne de laboratoires de télédétection : Remote sensing and GIS integrated for the management of less favoured areas, Louvain-la-Neuve, Belgique, 29 juin-1^{er} juillet 1992.
- LE HOUÉROU, H. N. 1979. Écologie et désertification en Afrique. *Travaux de l'Institut de géographie de Reims*, n° 39-40, p. 5-26.
- ROBINOVE, C. J. 1982. Computation with physical values from Landsat digital data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, n° 5, p. 781-784.
- SMITH, M. O., USTIN, S. L., ADAMS, J. B. and GILLEPSIE, A. R. 1990. Vegetation in deserts : I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, n° 31, p. 1-26.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J. and DESCHAMPS, P. V. 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *International Journal of Remote Sensing.*, vol. 11, n° 4, p. 659-668.
- TOWNSHEND, J. R. G. and JUSTICE, C. O. 1986. Analysis of the dynamics of african vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1435-1445.
- TRÉFOIS, Ph. 1992. Rapport de mission Damagaram-Mounio et Koutous (Niger). Janvier 1992. Document interne non publié, Laboratoire de télédétection aérospatiale, Section de cartographie, Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, 25 p.
- TUCKER, C. J., JUSTICE, C. O. and PRINCE, S. D. 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing.*, vol. 7, n° 11, p. 1571-1581.

25

Détection et classification automatique de maladies forestières

MOHAMMED KHAMADJA ¹, ATILLA BASKURT ² et
ROBERT GOUTTE ²

¹ *Institut d'électronique, route d'Ain El Bey, 25000 Constantine, Algérie;
téléphone : +213 (4) 68-09-99; télécopieur : +213 (4) 69-60-81*

² *Laboratoire de traitement du signal et ultrasons, Institut national des sciences
appliquées de Lyon (INSA), bât. 502, 69621 Villeurbanne cedex, France;
téléphone : +33 72-43-82-27; télécopieur : +33 72-43-85-26*

Résumé

L'objet de ce travail est de présenter une méthode automatique d'analyse et de caractérisation d'images, en vue d'une classification ultérieure, à partir de données multibandes. Cette méthode est basée sur la mesure de la réflectance foliaire d'un couvert végétal. En effet, l'allure de la réponse spectrale d'une forêt est différente, selon que les arbres la constituant sont sains ou malades. Les films infrarouges couleurs, qui ont la propriété de détecter cette différence, particulièrement marquée dans les bandes de 600 à 700 nm et de 700 à 900 nm, en plus d'un pouvoir de résolution très élevé, sont utilisés pour étudier les couverts végétaux. La classification se fait à partir des histogrammes bidimensionnels. Ces derniers sont calculés soit à partir des canaux bruts, soit à partir de la combinaison linéaire de ces derniers. Les résultats obtenus sont satisfaisants puisque, dans l'ensemble, ils sont conformes à ceux donnés par la photo-interprétation visuelle.

1. Introduction

En télédétection, les atteintes de l'état sanitaire des zones boisées, peuvent se traduire au niveau de la texture des houppiers (pertes de feuilles ou d'épines) et de la réflectance moyenne du couvert végétal; cette dernière est fonction principalement de l'évolution de la réflectance de la feuille et de l'apparition du tronc ou des branches.

Les modifications texturales du houppier peuvent être mises en évidence par des méthodes dites structurelles (TOMITA *et al.*, 1979; HARALICK *et al.*, 1973; HARALICK, 1979), qui sont fondées sur l'étude des primitives existant dans une image et les méthodes statistiques (HARALICK *et al.*, 1973; GALLOWAY, 1975) fondées sur l'étude des fréquences spatiales.

La réflectance foliaire fait l'objet de la présente étude. En effet, l'allure spectrale de la courbe de réflectance des arbres est différente selon que ces derniers sont sains ou malades. Cette différence détectée par le film infrarouge couleur (IRC) est surtout marquée dans les bandes de 600 à 700 nm (où elle augmente pour l'arbre malade) et de 700 à 900 nm (où elle diminue).

La numérisation de l'image équivaut à mesurer, point par point, la densité du film dans la bande spectrale de chaque couche, c'est-à-dire indirectement l'énergie reçue dans le rouge, l'infrarouge et le vert lors de la prise de vue. Elle permet de mettre à profit cette différence de luminance de l'objet. Alors, en effectuant diverses opérations et transformations sur les différents canaux, on essaie de déterminer la meilleure combinaison caractérisant de manière biunivoque un type d'arbre, dans un état sanitaire donné. Cette approche permet ainsi d'identifier l'arbre et, éventuellement, la maladie qui le ronge, avec un taux d'erreur faible lors de la classification.

2. Réflectance foliaire

En analysant la courbe de réflectance (fig. 1), on constate qu'elle présente trois zones essentielles :

- une première zone, correspondant à la couleur verte (environ 550 nm) de réflectance, voisine de 18 %;
- une seconde zone, où la réflectance tombe plus bas que 10 % et qui correspond aux longueurs d'ondes comprises entre 600 et 700 nm;
- une troisième zone où la réflectance atteint des valeurs supérieures à 50 % et qui correspond aux longueurs d'ondes du proche infrarouge.

Cette analyse concerne les feuillus sains, mais c'est également l'allure générale pour les différents types d'arbres, aux valeurs de réflectance près. Ces courbes sont, par contre, modifiées pour les arbres malades. En effet, on assiste alors à un phénomène de balancier qui se traduit par une chute dans le proche infrarouge et une remontée dans les autres zones. En conclusion, l'utilisation du film IRC paraît appropriée pour la détermination de l'état sanitaire d'une zone boisée, à partir de la mesure de sa réflectance. Car en plus de son pouvoir de résolution assez élevé, (AGFA-GEVAERT, 1983), le film IRC a ses couches sensibles centrées à l'intérieur des trois canaux, rouge, infrarouge et vert, ce qui correspond aux trois longueurs d'ondes qui caractérisent le couvert végétal.

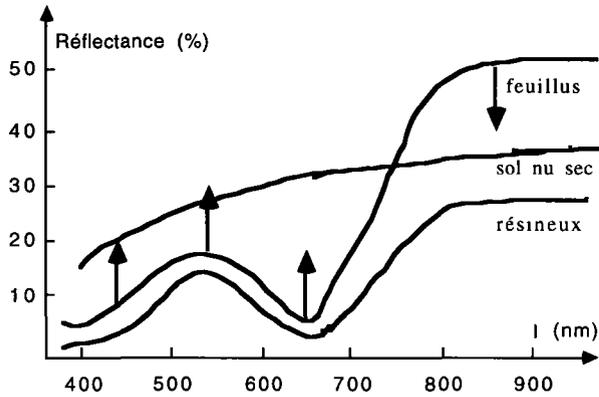


Figure 1. Courbes de réflectance foliaire d'un couvert végétal

3. Acquisition et traitement de l'image

La chaîne d'acquisition et de traitement de l'image se présente selon le schéma synoptique de la figure 2. Le flux lumineux, modulé par la réponse spectrale de l'objet, est intégré par l'émulsion photographique où il provoque des transformations chimiques (formation de l'image latente). Cela conduit, après développement, à une image qui traduit les différentes luminances de l'objet. L'émulsion photographique utilisée est un film IRC. L'image utilisée a été prise à l'aide d'un appareil photographique du type Hasselblad 24 par 36 mm, avec un objectif de 1 000 mm sur un film IRC et à une altitude de 500 m au-dessus du sol, dans le cadre d'une étude méthodologique pour la détection des maladies forestières. Elle nous a été fournie par l'Institut national de recherche agronomique (INRA) de Toulouse, qui en a assuré l'interprétation visuelle. La numérisation, dans les trois canaux (jaune, cyan et magenta), a été faite, à l'aide d'un microdensitomètre à tambour, à partir d'une diapositive de 63,5 x 60,5 mm avec un pas de 50 μm . Chaque pixel de l'image a été codé avec un mot de 8 bits. Pour chaque canal, ceci nous donne une dynamique de 256 niveaux de gris.

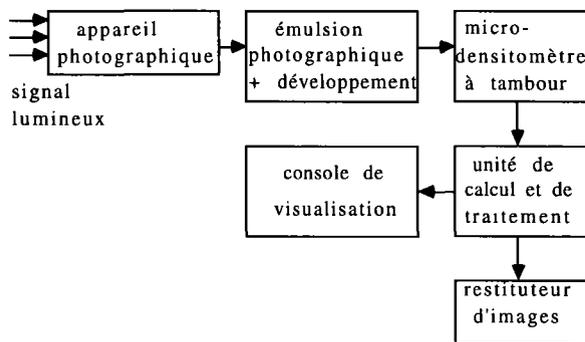


Figure 2. Schéma synoptique de la chaîne d'acquisition et de traitement de l'image

4. Méthodes de caractérisation

La reconnaissance des types de végétation ou du degré de leur atteinte sanitaire est déduite de la relation entre ces types, ou ces états, et les données multispectrales associées. Les résultats, du point de vue numérique, sont donc des niveaux de gris accordés à chaque classe de terrain. Les deux étapes d'une classification (SCHOWENGERDT, 1983; MEISEL, 1972) sont :

- la recherche des caractéristiques des classes auxquelles l'appartenance ou non des différents points de l'image est décidée;
- la classification des points de l'image.

Du fait de notre connaissance *a priori* de l'image, la méthode retenue pour la classification est la méthode supervisée. Les zones d'entraînement sont déterminées à partir :

- soit de la partition de l'histogramme bidimensionnel, calculé à l'aide des canaux les moins corrélés, pour la fenêtre étudiée; ceci permet d'avoir une idée sur le nombre de classes que la fenêtre contient puisqu'on associe à chaque nuage de points une classe; la détermination des zones d'entraînement se fait en traçant des rectangles à l'intérieur de chaque nuage (fig. 3a); on relève leurs limites sur chacun des canaux;
- soit du calcul de la valeur moyenne et de l'écart-type pour la fenêtre de l'image; on délimite la zone étudiée, à l'aide de la console de visualisation, puis on choisit un ensemble de niveau de gris homogène (ce qui caractérise en principe un même type d'arbre ou de maladie); on calcule la moyenne et l'écart-type pour la zone sélectionnée, qui permettent de tracer les rectangles (fig. 3b) devant servir comme zone d'entraînement.

Une fois les zones d'entraînement déterminées et testées, on effectue la classification sur l'ensemble de l'image. Le programme utilisé permet de distinguer jusqu'à 15 classes différentes.

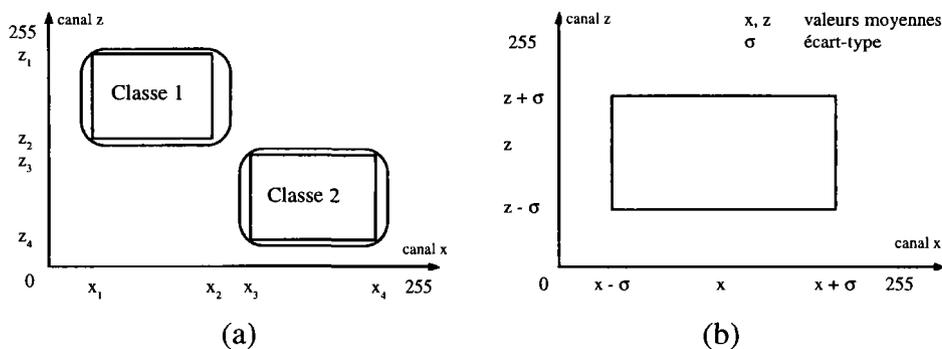


Figure 3. Méthodes de détermination des zones d'entraînement : a) histogramme bidimensionnel; b) valeur moyenne et écart-type

5. Résultats

Des fenêtres, contenant des éléments connus (différents types d'arbres, clairières, niveau de maladie, etc.) ont été sélectionnées.

Notre méthode a été mise en oeuvre, en utilisant premièrement l'histogramme bidimensionnel avec les canaux magenta et cyan, pour la séparation entre :

1- zone boisée et clairières : l'histogramme, donné par la figure 4a, montre l'existence d'au moins deux classes différentes; la classification à partir de ces deux nuages est présentée sur la figure 5a;

2- types d'arbres et l'ombre : les résultats sont donnés sur la figure 4b pour l'histogramme où on distingue trois classes et sur la figure 5b pour la classification; il y avait effectivement des épicéas et des sapins en plus de l'ombre;

3- arbre malade et arbre sain : il s'agissait de différencier entre arbres, d'un même type celui qui est sain de celui qui est faiblement défolié et de celui qui est complètement défolié ou mort. Ces deux derniers ont été mis, apparemment dans la même classe, puisque l'histogramme (fig. 4c) ne montre que trois classes; la classification est présentée sur la figure 5c.

Dans un deuxième temps, la méthode du calcul des critères d'appartenance (moyenne et écart-type) a été utilisée avec un succès similaire à celui de la première méthode.

Dans le cadre de cette étude, des essais de caractérisation à partir des transformations des données spectrales, telles que l'amélioration du contraste, ont été effectués sur les données spectrales. Par ailleurs, d'autres essais, utilisant des combinaisons linéaires sur les données spectrales, ont été faits. Ces combinaisons linéaires consistaient en des calculs de différence et de rapport entre les différents canaux. Ces opérations avaient pour but de nous affranchir des variations de luminances de la cible.

On constate que, dans le cas de la différence entre canaux, l'histogramme donne un nuage très dispersé et donc ne permet aucune classification. Par contre, les rapports donnent un résultat pratiquement identique à celui effectué avec les canaux bruts.

6. Conclusion

Les résultats obtenus sont satisfaisants puisqu'ils ont permis, dans l'ensemble, de faire la distinction entre les différentes composantes de l'image étudiée en accord avec l'interprétation visuelle. Cependant, cette méthode gagnerait à être améliorée afin qu'on puisse objectivement affecter, à chaque type d'arbre ou à un état sanitaire donné, une signature qui pourrait l'identifier sans équivoque. Il serait intéressant de pousser plus loin les investigations en ce sens :

- l'utilisation d'autres méthodes de classification et d'autres critères d'appartenance, beaucoup plus discriminants que ceux utilisés ici;
- l'utilisation de l'histogramme à trois dimensions apporterait certainement beaucoup plus d'information, en autorisant, une meilleure définition des zones d'entraînement;
- la caractérisation des états sanitaires des feuilles, en plus de la caractérisation globale du houppier, et la définition de critères de classification à partir des modifications texturales.

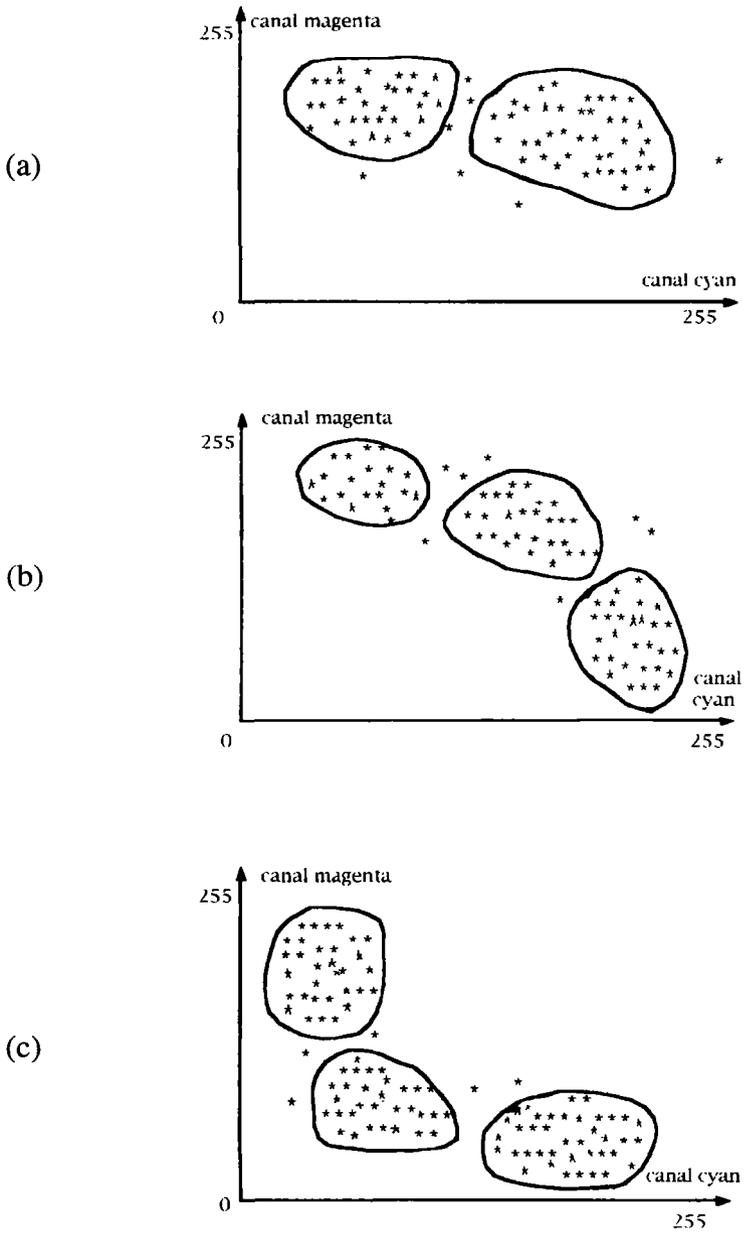
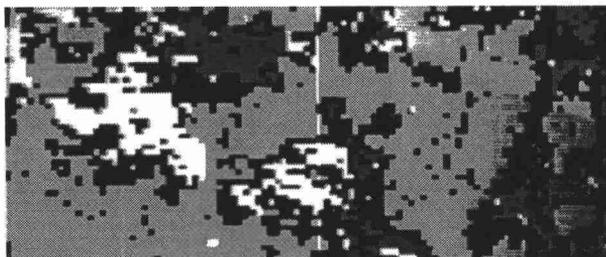


Figure 4. Histogrammes bidimensionnels : a) relatif à la fenêtre 1; b) relatif à la fenêtre 2; c) relatif à la fenêtre 3

(a)



(b)



(c)

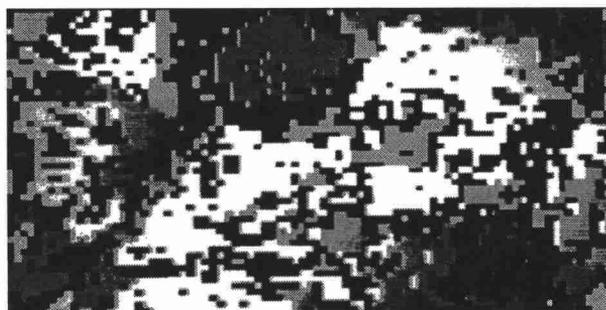


Figure 5. Résultat de classification : a) à l'aide de l'histogramme de la figure 4a (on y distingue 2 classes : la zone boisée et la clairière); b) à l'aide de l'histogramme de la figure 4b (on y distingue 3 classes : deux types d'arbres différents et l'ombre); c) à l'aide de l'histogramme de la figure 4c (on y distingue 3 classes : arbre sain, arbre faiblement défolié et arbre complètement défolié ou mort)

7. Références

- AGFA-GEVAERT 1983. Technologie et notions élémentaires de sensitométrie. Notice d'utilisation, 20 p.
- GALLOWAY, M. M 1975. Texture to analysis using gray level run length. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. n° 4, p.172-179.
- HARALICK, R. M., SHANMUGAN, K. and DISTEIN, I. 1973. Textural features for images classification. *IEEE Trans. Syst. Man and Cyber*, n° 3, p. 610-621.
- HARALICK, R. M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of IEEE*, n° 67, p. 786-804.
- MEISEL, W. S. 1972. *Computer-oriented approaches to pattern recognition*. Academic Press, New-York, 350 p.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. Academic Press, New-York, 420 p.
- TOMITA, F., SHIRAI, Y. and TSUJI, S. 1979. Description of textures by structural analysis. 6th International Joint Conference Artificial Intelligence (IJCAI), Tokyo, p. 884-889.

La sécheresse de 1990-1991 et de 1991-1992 à Madagascar vue à partir des images infrarouges Météosat et les données conventionnelles

SIMONE RANDRIAMANGA ¹, JEAN-PAUL LAHUEC ², DOMINIQUE DAGORNE ², JEANINE PENNARUN ² et BERNARD GUILLOT ²

¹ *Unité d'enseignement et de recherche de géographie (UERG), Université d'Antananarivo, B.P. 907, 101 Antananarivo, Madagascar; téléphone : +261 (2) 318-04; télécopieur : +261 (2) 318-15*

² *Antenne ORSTOM, Centre de météorologie spatiale de Lannion, B.P. 147, 22302 Lannion, France; téléphone : +33 96-48-00-77; télécopieur : +33 96-05-67-37*

Résumé

Les deux saisons des pluies de 1990-1991 et de 1991-1992, très déficitaires à Madagascar, sont présentées au moyen d'un catalogue d'images, réalisé à l'antenne ORSTOM de Lannion. Ces images sont issues d'un traitement de l'imagerie infrarouge Météosat dédié à la variation de la température de brillance maximum de surface. Leur interprétation montre que l'évolution des températures maximum de surface est étroitement corrélée aux variations de la pluviométrie et qu'il est possible de mettre en évidence les zones touchées par la sécheresse dans un contexte géographique et climatique très diversifié. En dernière partie, les mécanismes responsables de ces sécheresses sont analysés à partir des données météorologiques. Le déficit pluviométrique est dû à la persistance anormale de situations de type hivernal, impliquant le blocage de la Zone de Convergence Intertropicale sur l'extrême nord du pays.

1. Introduction

1.1. La zone d'étude

Localisé dans la zone chaude de l'hémisphère sud, Madagascar (fig. 1) est soumis à un régime de climat de type tropical caractérisé par deux saisons contrastées, l'une chaude et pluvieuse, et l'autre sèche et fraîche; de plus, ces saisons sont nuancées par des différences régionales. L'ouest plus sec et plus chaud contraste avec le centre, tempéré par l'altitude, et l'est de tendance subéquatoriale. Le nord, situé dans la zone de balancement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), est nettement plus arrosé que le sud, situé dans une région balayée tout au long de l'année par les perturbations frontales méridionales (PFM) d'origine polaire et évoluant dans les latitudes tempérées. Pour la plupart, ces régions ont connu, de façon plus ou moins répétée, des phases de sécheresse parfois sévères et ce, à plusieurs reprises au cours de ces dernières décennies. Il s'agit d'une sécheresse caractérisée par un déficit marqué de la pluviométrie par rapport à la normale, se manifestant soit par un retard de la saison des pluies soit par l'insuffisance ou l'arrêt des précipitations durant des périodes plus ou moins longues (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1982). Les conséquences en sont parfois catastrophiques et durement ressenties par la population, surtout dans le sud du pays. Elles se traduisent par des disettes ou des famines qui occasionnent de nombreuses pertes en vie humaine et en cheptel. Elles provoquent également une émigration temporaire à plus ou moins longue distance, ce qui désorganise la structure socio-économique régionale (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1985). Tel fut le cas de la dernière phase sèche qui a provoqué une famine très sévère et remarquable dans le sud de Madagascar en 1992.

1.2. Objectifs

Le premier objectif de ce texte est de tester la pertinence d'une méthodologie couramment utilisée à l'antenne ORSTOM en matière de suivi des anomalies climatiques au Sahel (LAHUEC *et al.*, 1992). Depuis 1986, en effet, l'imagerie infrarouge Météosat est utilisée à des fins de suivi qualitatif et quantitatif de la saison des pluies en Afrique de l'Ouest. Ces applications s'effectuent dans le cadre d'un programme intitulé «Veille Climatique Satellitaire» (GUILLOT, 1985). Elles reposent principalement sur l'utilisation de deux fichiers dérivés de l'imagerie satellitaire infrarouge : la température de brillance maximum de surface des sols (TMAX) et le nombre d'occurrences de nuages à sommet froid définies par seuillage thermique à l'échelle du pixel Météosat (< -40 °C).

Ces fichiers de base sont régulièrement documentés depuis 1986 par période décadaire à l'origine, par période pentadaire depuis 1987. Cependant, jusqu'à présent, aucune application de la méthode impliquant une comparaison détaillée des données satellitaires et des données de terrain n'avait été tentée en dehors de l'Afrique de l'Ouest. L'exemple de Madagascar se révèle donc être un test particulièrement intéressant dans la mesure où la grande île des mers du Sud offre des conditions géographiques et climatiques très différentes de la zone soudano-sahélienne, avec notamment des effets orographiques très accusés, des influences cycloniques ou de perturbations d'origine tempérée au sud, des effets côtiers, etc. Les conditions de sécheresse très sévères qui ont caractérisé les saisons 1990-1991 et 1991-1992 dans le sud de Madagascar facilitaient bien entendu le choix de la période la plus appropriée au test d'application.

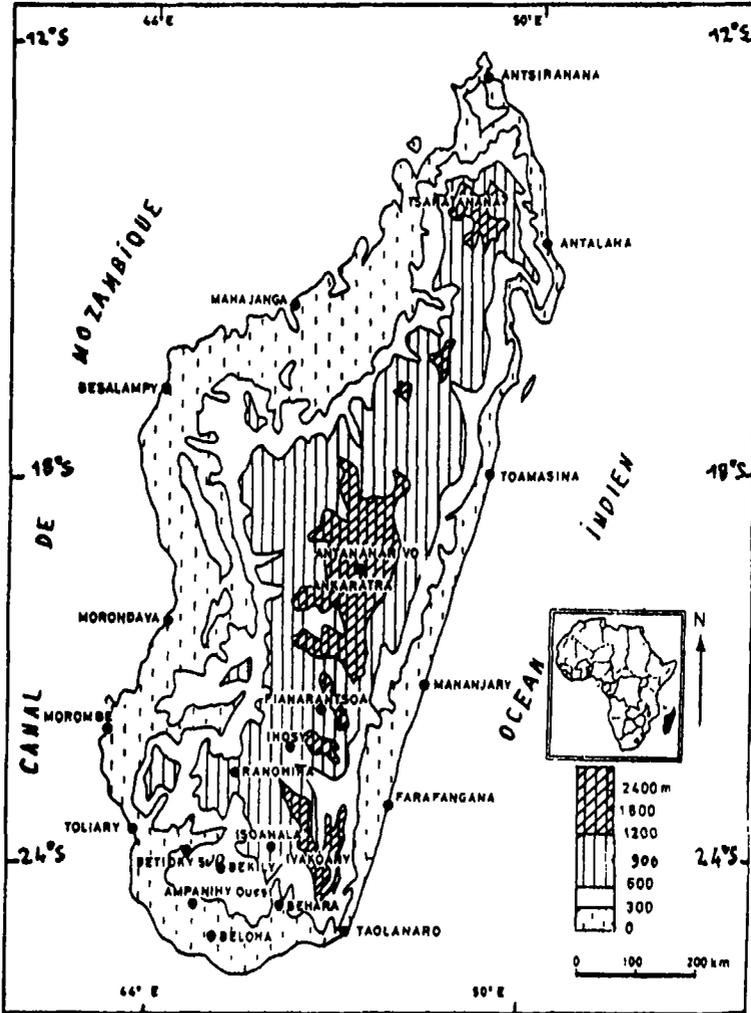


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques

Malheureusement, il nous est impossible d'appliquer à Madagascar l'ensemble des techniques mises en oeuvre pour le suivi de l'hivernage en Afrique soudano-sahélienne. En effet, la limite sud de la zone traitée pour l'élaboration des fichiers d'occurrences de nuages à sommet froid passe aux environs de 18° S. Force est donc de se priver de l'utilisation combinée des images et de confier aux seules images de température de surface du sol le talent de révéler les aires touchées par la sécheresse. Cependant, avant de juger de la pertinence des images TMAX, il importe de présenter la sécheresse de ces deux saisons à travers un bref commentaire des relevés pluviométriques.

2. Caractérisation des saisons des pluies 1990-1991 et 1991-1992

2.1. Les données utilisées

Les observations ont porté sur les relevés pluviométriques des saisons chaudes et pluvieuses 1990-1991 et 1991-1992, qui ont été comparés aux données corrigées de la normale trentenaire 1931-1960 ou, à défaut, celles des périodes 1900-1930 ou 1900-1970 de 25 stations météorologiques, réparties dans les différentes régions climatiques de Madagascar (fig. 1). Mais la série pluviométrique n'a pas toujours été complète pour quelques stations du sud.

2.2. Les résultats de l'étude

La saison pluviométrique 1990-1991 a été déficitaire pour les stations étudiées à l'exception d'Antsiranana et d'Antalaha. Il en fut de même pour 1991-1992. Paradoxalement, si la quantité de pluie enregistrée est déficitaire pour la plupart des stations, le nombre de jours de pluie n'a pas été affecté. Ceci est dû à la prédominance des pluies fines sur les grosses averses d'orage.

3. Méthodologie et données utilisées pour la télédétection de la sécheresse

3.1. Élaboration des fichiers de température de brillance maximum de surface du sol

L'acquisition des images Météosat est faite par le Centre de calcul du Centre de météorologie spatiale (CMS) de Lannion. Les traitements sont réalisés à l'antenne ORSTOM grâce à un ensemble de modules informatiques regroupés dans le logiciel TRISKEL.

L'idée originale consiste ici à s'intéresser, non pas à la «source» de la pluie (les nuages), mais à la «cible» (la surface du sol). Il s'agit en effet de mesurer l'impact de la pluie sur le sol à travers l'évolution de la température de surface. Dans les régions climatiquement contrastées comme celles qui nous intéressent, les variations de la température de surface du sol sont intimement liées à la variation du contenu en eau des sols et au comportement de la végétation. De manière générale et très schématique, les sols nus et secs se réchauffent et se refroidissent beaucoup plus vite que les sols humides recouverts de végétation active. Mettre en évidence les différences thermiques des sols revient donc à discriminer les zones sèches des zones arrosées. Dans la pratique opérationnelle, la mise en évidence des différences de température passe par la réalisation de «synthèses thermiques» pentadaires, obtenues par le calcul de la moyenne des TMAX de chacun des pixels des fichiers Météosat, pour cinq jours consécutifs. Le principe est d'obtenir pour la période incriminée un champ de luminances «claires», c'est-à-dire débarrassé de l'impact des nuages ou des aérosols. Un fichier résultat est documenté image après image, à partir d'un traitement qui ne retient que la température la plus chaude rencontrée au cours de la période sur chacun des pixels du plein disque Météosat. Le choix du paramètre de température de brillance

maximum de surface (TMAX), outre l'élimination quasi-totale des nuages, a aussi pour avantage de limiter les effets de l'absorption atmosphérique du signal par la vapeur d'eau.

La comparaison des cartes pentadaires permet ainsi de suivre l'installation ou le retrait de la saison des pluies, de repérer les enclaves sèches, ou de déceler les interruptions de saison des pluies. En bref, il est possible de suivre les péripéties de la saison des pluies dans toutes les «zones à risques» et ceci à l'échelle synoptique, moyennant, il est vrai, quelques précautions. D'autre part, l'absorption atmosphérique du signal infrarouge est importante dans le cas d'une atmosphère humide. Elle induit par conséquent un manque d'uniformité des mesures dans l'espace selon que l'atmosphère est très sèche ou très humide. Dans le cas de Madagascar, les effets de brise de mer et les entrées d'air maritime atténuent de quelques degrés la mesure de la température maximum de surface du sol du fait de l'apport d'humidité. En conséquence, les zones littorales (ou les zones de forêt dense) vont apparaître sur les images plus fraîches qu'elles ne le sont en réalité. L'utilisation des images «différences» permet cependant de s'affranchir en partie de cet inconvénient. En revanche, si dans une zone donnée, la couverture nuageuse reste présente pendant toute la pentade aux heures les plus chaudes de la journée, la valeur obtenue sera la température de surface maximum des nuages.

3.2. Les images satellitaires

Les données numériques utilisées sont extraites des synthèses pentadaires «température de brillance maximum de surface» (TMAX) réalisées en routine par l'antenne ORSTOM de Lannion. Celles-ci sont utilisées pour l'élaboration de fichiers mensuels représentant la moyenne des températures maximales mesurées par le radiomètre de Météosat au cours des six périodes pentadaires, à la résolution du pixel. Grâce au logiciel Triskel, les images initialement en projection satellitaire et donc très déformées en raison de la position de Madagascar (en limite de la zone d'observation du satellite), ont été redressées en projection Mercator, puis «habillées» du trait de côte ainsi que de la localisation des principales stations du réseau synoptique. À partir des fichiers mensuels, quatre figures d'images ont été réalisées en considérant que la saison des pluies s'étend sur sept mois, soit du 1^{er} octobre au 30 avril.

La figure 26-2 (voir cahier couleur) montre les valeurs moyennes saisonnières des TMAX pour cinq saisons des pluies successives : 1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991 et 1991-1992.

La figure 26-3 (voir cahier couleur) met en évidence les écarts des valeurs de chaque saison par rapport à la moyenne des trois saisons : 1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, considérée comme référence, ceci grâce à l'utilisation d'une palette de couleurs adaptée (même palette utilisée pour la figure 26-5). Les aires à anomalies positives, donc plus chaudes que la moyenne, et par conséquent moins arrosées, apparaissent dans des tons allant du vert au noir en passant par le bleu.

La figure 26-4 (voir cahier couleur) présente les valeurs des TMAX mensuelles des deux saisons 1990-1991 et 1991-1992 ainsi que les moyennes mensuelles interannuelles calculées d'après les données des trois saisons précédentes. Il est supposé au départ que ces trois saisons ont été plus humides que les saisons 1990-1991 et 1991-1992 dans le sud de Madagascar. En toute logique, on s'attend donc à des différences importantes entre les valeurs de températures mensuelles et les valeurs mensuelles interannuelles, les premières devant être plus élevées que les secondes en zones touchées par la sécheresse.

La figure 26-5 (voir cahier couleur) met précisément en évidence ces écarts à la moyenne des TMAX mensuels des saisons des pluies 1990-1991 et 1991-1992. Parallèlement

à la constitution des images, une procédure d'extraction des valeurs de températures aux stations a permis de dresser des tableaux de valeurs ponctuelles facilement comparables aux données pluviométriques, avec toutefois des réserves quant à l'utilisation des températures observées dans les stations littorales

3.3. Les données pluviométriques

À l'instar des informations ponctuelles aux stations, extraites des fichiers images, les données pluviométriques issues de la Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH) d'Antananarivo à Madagascar ont été traitées sous forme de tableaux saisonniers et mensuels. De même, les écarts aux moyennes mensuelles interannuelles établies sur les trois saisons précédentes (1987-1988, 1988-1989 et 1989-1990), ont été calculés, ceci afin de permettre une confrontation directe avec les écarts de température. De ces nombreux tableaux, seuls trois sont publiés ici à titre d'illustration : pluviométrie saisonnière de 1990-1991 et de 1991-1992 (tab. 1), pluviométrie de novembre 1990 et de novembre 1991 (tab. 2), pluviométrie de janvier 1991 et de janvier 1992 (tab. 3).

4. Les saisons de pluie 1990-1991 et 1991-1992

4.1. Les moyennes saisonnières

La première remarque qui vient à l'esprit à la lecture des images de la figure 26-2 (voir cahier couleur) concerne la grande similitude entre les structures de répartition géographique des plages de température et la distribution des isohyètes interannuelles telles qu'elles apparaissent sur la carte publiée par CHAPERON *et al.* (1993). On reconnaît en effet sur toutes les images une bande orientale littorale caractérisée par des températures très fraîches, inférieures à 20 °C, limitée à l'ouest par un gradient très marqué, et qui se caractérise par une pluviométrie annuelle très élevée (> 2 000 mm). Il faut signaler également que cette limite ouest présente de nombreuses incursions qui se retrouvent sur les deux documents et qui correspondent à des massifs montagneux. Une des plus remarquables est certainement l'avancée des températures fraîches selon un axe NE-SO, au sud de la zone en direction de Bekily et qui marque la signature du massif de l'Ivakoany. De même au nord, le massif de Tsaratanana s'individualise très nettement. D'autre part, c'est affirmer une évidence que de dire que le Sud est bien plus chaud que le Nord ou que la bande orientale. De même, sur les deux documents, on remarque l'absence de gradient accusé sur tout le sud-ouest du pays. Cependant, sur chacune des images, une aire plus chaude se détache, délimitée par Betsioky et Isoanala au nord, par Ampanihy et Bekily au sud, ce qui laisse deviner qu'il s'agit d'une zone plus sensible que d'autres aux aléas climatiques.

Les images (fig. 26-2, voir cahier couleur) montrent que, dans le sud de Madagascar, les moyennes des températures de la saison 1991-1992 sont plus élevées que celles de la saison 1990-1991, elles-mêmes supérieures à la moyenne générale. En 1991-1992, l'aire précitée est celle qui présente l'écart de température le plus important (5-6 °C; fig. 26-3, voir cahier couleur). Cette région qui, selon toute logique, devrait avoir été très affectée par la sécheresse s'insère dans une bande d'écarts légèrement plus faibles (3-4 °C), limitée au sud et à l'ouest par la côte, au nord par la diagonale Morondava-Ihoay-Toalagnaro. Cette

Tableau 1. Madagascar : pluviométrie saisonnière de 1990-1991 et de 1991-1992, écarts à la moyenne de 1987-1990

Station	Saison 1990-1991 (mm)	Saison 1991-1992 (mm)	Moyenne 1987-1990 (mm)	Écart 1990-1991 (mm)	Écart 1991-1992 (mm)	Écart 1990-1991 (%)	Écart 1991-1992 (%)
Antsirana	1149,20	1340,10	1168,30	-19,10	171,80	-2	15
Antalaha	1884,40	2157,60	1706,90	177,50	450,70	10	26
Mahajang	1522,00	1661,00	1337,40	184,60	323,60	14	24
Besalamp	1244,10	1065,00	1183,20	60,90	-118,20	5	-10
Toamasin	2608,90	2615,60	2214,57	394,33	401,03	18	18
Antananar	801,70	1197,30	919,27	-117,57	278,03	-13	30
Moronda	900,10	inc*	741,40	158,70		21	
Mananjar	1751,70	2119,80	2106,27	-354,57	13,53	-17	1
Fianarant	909,40	904,70	1034,60	-125,20	-129,90	-12	-13
Morombe	353,20	67,70	292,83	60,37	-225,13	21	-77
Ranohira	625,00	inc	909,90	-284,90		-31	
Farafanga	inc	inc	1852,47				
Toliary	223,50	41,80					
Betioky-s	317,10	207,80	485,17	-168,07	-277,37	-35	-57
Isoanala	809,00	inc					
Bekily	541,90	276,70	676,20	-134,30	-399,50	-20	-59
Ejeda	416,20	inc	533,27	-117,07	-533,27	-22	
Ampanihy	inc	inc	413,77				
Behara	151,50	211,70					
Toalagnar	609,50	715,30	1119,60	-510,10	-404,30	-46	-36
Beloha	343,70	inc	476,80	-133,10		-28	

* inc : donnée incorrecte

Source : Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH), Madagascar

dernière ville présente d'ailleurs l'écart positif le plus faible (1 °C à 2 °C), au sein d'une aire qui s'étend vers le nord sur la partie centrale du pays, sans toutefois atteindre la capitale. Les écarts de température négatifs (-1 °C et -2 °C), c'est-à-dire synonymes d'une pluviométrie légèrement supérieure à la normale se situent au nord d'une ligne passant par Besalampy, Antananarivo et Farafangana.

La saison 1990-1991 ne présente qu'une toute petite région à anomalie négative par rapport à la moyenne des trois saisons, entre Mahajanga et Antananarivo (fig. 26-3, voir cahier couleur). Cette anomalie est essentiellement à mettre au compte des températures de surface anormalement fraîches du mois de février 1991. Des écarts positifs moins accusés que ceux de la saison 1991-1992 (3 °C et 4 °C) sont notés sur une région délimitée par Behara, Bekily, Ranohira et Ihosy. Dans le reste du pays, l'image des écarts à la moyenne saisonnière indique des différences faiblement positives au sud d'une ligne passant par Besalampy, Antananarivo et Fianarantsoa, et une situation normale à faiblement positive au nord.

Tableau 2. Madagascar : pluviométrie de novembre 1990 et de novembre 1991, écarts à la moyenne de 1987-1989, et écarts à la moyenne de 1987-1989 des TMAX en °C

Station	Moyenne 1987-1989 (mm)	Novembre 1990 (mm)	Écart 1990 (mm)	Écart (TMAX) 1990 (°C)	Novembre 1991 (mm)	Écart 1991 (mm)	Écart (TMAX) 1991 (°C)
Antsirana	37,1	23,5	-13,6	-1,5	26,1	-11,0	-2,0
Antalaha	155,8	80,1	-75,7	-1,0	31,6	-124,2	0,5
Mahajang	26,6	23,3	-3,3	-2,0	18,4	-8,2	-2,0
Besalamp	48,1	36,0	-12,1	0,5	5,5	-42,6	2,5
Toamasin	195,0	82,5	-112,5	3,0	121,4	-73,6	1,0
Antananar	97,7	86,1	-11,6	-2,0	160,0	62,3	-0,5
Moronda	18,7	4,9	-13,8	-2,0	inc*	-18,7	0,0
Mananjar	172,5	53,4	-119,1	0,5	190,5	18,0	0,5
Fianarant	92,5	84,5	-8,0	2,5	111,1	18,6	3,5
Morombe	24,2	0,2	-24,0	-2,0	6,0	-18,2	2,0
Ranohira	91,7	151,4	59,7	3,5	45,9	-45,8	7,0
Farafanga	180,0	inc	-180,0	0,5	165,3	-14,7	2,0
Toliary	6,4	9,3	2,9	-2,5	0,0	-6,4	-1,5
Betioky-s	45,5	8,1	-37,4	6,0	21,3	-24,2	5,5
Isoanala	96,8155,	7,5130,4	21,3	5,0	120,2	11,1	5,5
Bekily	96,8	55,6	-41,2	4,0	32,5	-64,3	7,5
Ejeda	63,5	inc	-63,5	5,5	inc	-63,5	6,5
Ampanihy	40,2	0,0	-40,2	6,0	**	-40,2	7,0
Behara		20,5	20,5	5,0	24,5	24,5	8,5
Toalagnar	191,7	62,3	-129,4	4,0	12,8	-178,9	2,0
Beloha	39,4	21,8	-17,6	5,5		-39,4	8,0

* inc : donnée incorrecte

Source : Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH), Madagascar

4.2. Comparaison des images mensuelles et moyennes mensuelles

Dans cette section, nous nous référons, d'une part, à la figure 26-4 (voir cahier couleur) qui montre la distribution des valeurs de températures de surface des deux saisons étudiées et des moyennes mensuelles interannuelles correspondantes et, d'autre part, à la figure 26-5 (voir cahier couleur), celle des écarts à la moyenne de ces mêmes TMAX mensuelles, et enfin à la vérité pluviométrique de terrain associée aux écarts de température par rapport aux moyennes mensuelles interannuelles (tab. 2, 3; à titre d'exemple).

À ce propos, il faut souligner que le fichier de stations obtenu comporte une majorité de villes portuaires. Compte tenu de l'imprécision de la localisation des stations inhérente à la «navigation Météosat» et au mode de calcul de la valeur de température obtenue par moyenne sur des valeurs de neuf pixels, il est bien évident que le résultat obtenu intègre

Tableau 3. Madagascar : pluviométrie de janvier 1991 et de janvier 1992, écarts à la moyenne de 1988-1990, et écarts à la moyenne de 1988-1990 des TMAX en °C

Station	Moyenne 1988-1990 (mm)	Janvier 1991 (mm)	Écart 1991 (mm)	Écart (TMAX) 1991 (°C)	Janvier 1992 (mm)	Écart 1992 (mm)	Écart (TMAX) 1992 (°C)
Antsirana	496,5	202,1	-294,4	3,0	181,5	-315,0	-1,0
Antalaha	357,4	394,7	37,3	1,0	297,8	-59,8	-0,5
Mahajang	517,2	122,0	-395,2	4,5	768,5	251,3	-1,5
Besalamp	371,5	211,9	-159,6	3,0	310,5	-61,0	-1,5
Toamasin	408,6	221,1	-187,5	2,0	272,2	-136,4	-2,0
Antananar	215,6	115,1	-100,5	4,5	410,7	195,1	-5,0
Moronda	311,1	127,4	-183,7	2,5	331,8	20,7	-0,5
Mananjar	366,1	241,7	-124,4	2,5	413,1	47,0	-1,5
Fianarant	346,3	89,5	-256,8	6,5	312,1	-34,2	-1,5
Morombe	107,6	77,0	-30,6	3,0	51,0	-56,6	1,0
Ranohira	195,8	73,8	-122,0	8,0	232,5	36,7	1,5
Farafanga	444,2	133,3	-310,9	4,0	438,9	-5,3	-1,0
Toliary	62,3	31,2	-31,1	3,0	11,0	-50,5	0,0
Betioky-s	113,9	118,5	4,6	4,0	45,2	-68,7	2,0
Isoanala	199,6	120,2	-79,4	7,0	220,2	20,6	2,0
Bekily	138,7	69,1	-69,6	6,0	92,5	-46,2	3,0
Ejeda	130,7	83,2	-47,5	5,0	inc*	-130,7	2,5
Ampanihy	188,3			5,0		-188,3	1,5
Behara		0,0	0,0	10,0	112,2	112,2	1,0
Toalagnar	223,8	106,5	-117,3	3,0	372,3	148,5	0,0
Beloha	186,2	22,8	-163,4	5,0		-186,2	2,5

* inc : donnée incorrecte

Source : Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH), Madagascar

non seulement la mesure du signal infrarouge sur des surfaces terrestres, mais aussi très vraisemblablement celle de surfaces océaniques. Les valeurs de températures aux stations maritimes n'ont donc pas la même signification que celles des stations de l'intérieur. Cette remarque fondamentale devait être faite avant d'aborder le commentaire proprement dit du déroulement des deux saisons des pluies 1990-1991 et 1991-1992.

La figure 26-4 (voir cahier couleur) est intéressante en ce sens qu'elle permet aisément de suivre l'évolution des températures maximales de surface de mois en mois et de les comparer aux moyennes interannuelles correspondantes. Elle permet donc de retracer sans difficulté les différentes péripéties des deux saisons des pluies.

La figure 26-5 (voir cahier couleur) complète la lecture de la figure 26-4 dans la mesure où les écarts de température sont quantifiés, ce qui autorise une régionalisation, voire une cartographie aisée de l'extension des phénomènes de sécheresse ou, au contraire, de pluviosité surabondante. Pour la commodité de l'exposé, nous utiliserons volontiers les

termes d'anomalie négative ou positive, avec cependant les «réserves d'usage» puisqu'une série de données moyennes sur seulement trois ans est loin d'être assez longue pour nous en conférer le droit. Le terme d'anomalie est donc à considérer comme synonyme d'écart et de différence à la moyenne.

À quelques variantes près, les scénarios des saisons des pluies 1990-1991 débutent de la même manière en octobre et en novembre. Les pôles de températures les plus élevées apparaissent au sud; les aires d'anomalies les plus fortes (7 °C et 8 °C) se trouvent décalées vers la côte sud, que ce soit en novembre 1990 ou 1991; le mois d'octobre 1990 est plus chaud que la moyenne sur la quasi-totalité du territoire; des anomalies négatives d'intensité et d'étendue variables apparaissent sur la partie nord. La vérité-terrain confirme bien que l'anomalie positive de températures est liée à un très fort déficit en pluies. Il serait fastidieux de reprendre toutes les informations contenues sur le tableau 3 qui viennent à l'appui d'une étroite corrélation entre les deux paramètres. Nous n'en extrairons donc que quelques exemples parmi les plus significatifs. En octobre 1991, par exemple, toutes les stations situées au sud de Mananjary sont très déficitaires par rapport à la moyenne sur trois ans; par exemple, huit stations sur dix situées au sud de Fianarantsoa n'ont bénéficié d'aucune pluie. Inversement, les températures nettement plus basses que la moyenne observées en octobre 1991 au nord de l'île sont à mettre au compte d'une pluviométrie anormalement élevée pour l'époque de l'année (177,88 mm contre une moyenne de 11 mm pour la période 1987-1989 à Antsiranana par exemple).

Les images des mois de décembre (fig. 26-5 [partie 2], voir cahier couleur) montrent à nouveau une très nette prédominance des tons jaunes et bruns, c'est-à-dire des valeurs de températures plus élevées que la moyenne. Cependant, la situation s'est quelque peu améliorée au sud de l'île, qui se caractérise par une mosaïque d'aires faiblement positives ou faiblement négatives en températures. Les anomalies les plus fortes apparaissent dans la région de Besalampy dont la pluviométrie est très révélatrice : 10,6 mm au cours de ce mois contre une moyenne de 206,2 mm. En décembre 1992, la zone la plus critique (excédent atteignant 8 °C en de nombreuses aires) s'étend le long du littoral depuis Morombe jusqu'à Toalagnaro. Seule la partie nord enregistre des températures plus faibles que la moyenne et synonymes d'excédents pluviométriques (Antsiranana et Antalaha).

Les mois de janvier 1991 et 1992 montrent une situation très contrastée. D'un côté, le mois de janvier 1991 présente les anomalies positives de températures les plus élevées et les plus généralisées de toute la séquence étudiée. D'autre part, des écarts de 10 °C, ce qui est considérable, apparaissent dans le sud de l'île; aucune tache verte déficitaire ne vient contrarier la suprématie des tons jaunes et rouges sur l'ensemble du territoire, c'est dire que toutes les stations dont nous possédons les données, à l'exception d'Antalaha (37 mm d'excédent), ont enregistré des pluies très déficitaires par rapport à la moyenne de janvier 1988-1989 et 1990. À l'inverse, le mois de janvier 1992 présente une large bande centrale de températures inférieures à la normale, ce qui en fait le mois le plus «vert» de la saison 1991-1992. Néanmoins, toute la zone sud, à l'exception d'une mince frange littorale sur la côte est, demeure en anomalie positive pour le quatrième mois consécutif.

En février 1991, la côte est est de nouveau concernée par un déficit pluviométrique. C'est plus particulièrement le cas de Behara, qui enregistre un écart de température positif de 6 °C. C'est aussi le cas de Toalagnaro, station maritime dont l'écart de température extrait des valeurs aux stations (+2 °C), traduit mal l'ampleur du déficit en pluies de 120 mm, alors que la moyenne sur trois ans est de 136 mm, tandis que son proche arrière pays affiche des écarts atteignant les 8 °C. La plus grande partie du pays présente une mosaïque d'aires normales faiblement négatives ou faiblement positives en température. Seule, la région de Mahajanga fait exception. Des températures basses y sont enregistrées

(<18 °C). Ceci résulte soit de la présence continue d'une couverture nuageuse dans les basses couches aux heures les plus chaudes de la journée soit à l'existence d'une séquence pluvieuse exceptionnelle. Les relevés pluviométriques tendent à confirmer la seconde hypothèse puisque 833 mm de pluie ont été mesurés à Mahajanga au cours de ce mois, contre une moyenne 1988-1990 de 300 mm.

En février 1992, l'extrême sud de l'île présente à nouveau les écarts positifs de température les plus élevés.

Les mois de mars et d'avril 1991, contrairement aux premiers mois de la saison, connaissent un développement très important des aires de températures inférieures à la moyenne 1988-1990 de ces mêmes périodes et qui correspondent à une pluviométrie retrouvée. Ce sont ces deux mois qui permettent à cette saison de se différencier de la saison des pluies 1991-1992.

En effet, les mois de mars et d'avril 1992 donnent à nouveau une large prédominance aux aires à écarts de température positifs plus particulièrement accusés sur le sud du pays. Le déficit pluviométrique est une fois de plus largement confirmé à la lecture des relevés de pluie mensuels.

En conclusion de cette section, il faut bien admettre que les images infrarouges Météosat sont à même d'apporter une contribution positive au suivi des sévères anomalies pluviométriques de Madagascar, et cela malgré la diversité des contextes géographiques et climatiques. On rappellera simplement ici que ces images montrent que les sept mois de la saison 1991-1992 apparaissent en anomalie positive de température de surface, dans le sud de l'île, et que ce constat satellitaire est largement en harmonie avec l'analyse des relevés pluviométriques de terrain.

Il importe maintenant dans la dernière partie de cette étude de rechercher les causes de cette sécheresse exceptionnelle en durée et en intensité en nous fondant sur l'analyse des données météorologiques conventionnelles.

5. Les causes de la sécheresse

5.1. Les données de référence

Les références portent sur les cartes synoptiques quotidiennes de 12 h 00 TU établies aux heures chaudes de la journée, car les pluies tombent à Madagascar ordinairement en fin d'après-midi. Quatre niveaux d'altitude ont été considérés : la surface, 850, 700 et 500 hPa. Les radiosondages quotidiens d'Antananarivo à 12 h 00 TU ont été consultés, car Antananarivo est la station la mieux pourvue en matière de radiosondage. D'autre part, du fait de sa localisation, au centre de Madagascar, elle peut être soumise à tous les centres d'action pouvant influencer le temps. Les cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan Indien ont été suivis à partir des publications de la DMH d'Antananarivo.

5.2. La méthodologie de recherche

La méthode utilisée repose sur l'étude statistique des données météorologiques, analysées et comparées aux données identifiées comme étant celles de la normale. La station de Toalagnaro a servi de référence (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1986).

5.3. Les résultats des travaux

5.3.1. L'apport des cartes synoptiques

À l'exception des mois de janvier 1992 et février 1991, pour lesquels le temps dépressionnaire domine, la situation isobarique de surface de type mixte est prépondérante en 1990-1991 et 1991-1992. Dans ce cas la zone dépressionnaire due aux basses pressions thermiques équatoriales ou aux cyclones tropicaux se localise dans le nord ou l'ouest de l'île. La zone anticyclonique due à l'anticyclone mobile (AMob) et à l'anticyclone de l'océan Indien (AOI) se localise essentiellement dans le sud et la côte centre et sud-est. Cette situation mixte se prolonge en altitude jusqu'à 850 hPa. La moitié nord de Madagascar est alors sous l'influence d'un centre dépressionnaire, la moitié sud sous celle d'un centre de haute pression dû à l'AMob ou au renforcement de l'AOI par l'AMob. À partir de 700 hPa la ceinture anticyclonique des hautes pressions subtropicales coiffe la plupart du temps Madagascar. À 500 hPa, la part des talwegs polaires, qui apparaissent épisodiquement dès 700 hPa, est aussi importante que celle des hautes pressions. En avril 1992 par exemple, Madagascar a été coiffé par la ceinture anticyclonique dans 47,3 % du temps; les talwegs polaires dans 47,3 % des cas, et dépressionnaires pour 5,2 %. On constate qu'une situation anticyclonique à tous les niveaux d'altitude caractérise le sud de Madagascar lors des saisons pluviométriques 1990-1991 et 1991-1992. Une telle situation n'est guère favorable à la pluie.

Bien que de faible épaisseur (850 hPa), l'AMob a été très actif pendant ces deux saisons pluviométriques. Centré en moyenne entre 33° à 41° S et 40° à 61° E, il projette une dorsale sur la côte SE après avoir glissé sur le sud de Madagascar. Cet anticyclone froid a souvent renforcé l'AOI et favorisé la persistance d'un temps sec dans le sud. Par contre, l'AOI a moins influencé le temps de 1990-1991 et 1991-1992, car il a été repoussé plus à l'est de Madagascar dans l'océan Indien. Cette situation est normale pour la saison des pluies. Mais, dès 850 hPa, l'AOI se retrouve au-dessus de Madagascar. Les perturbations frontales méridionales (PFM) déterminent une circulation d'ouest dans le sud de Madagascar, aussi bien en été qu'en hiver. Elles sont en général moins fréquentes au cours de la saison chaude et pluvieuse. En 1990-1991 et 1991-1992, leur fréquence a été plus élevée sauf en avril. Le passage de ces PFM est accompagné de pluies fines. Celles-ci ne suffisent pas à combler un déficit pluviométrique accentué dans le sud.

La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) a fluctué aux latitudes malgaches. Cependant, elle est restée dans une position très septentrionale ou n'a fait que frôler la côte NNO. En janvier 1992, elle a atteint par exemple 18° S dans une proportion de 7,4 % du temps pendant lequel elle a fluctué au-dessus de Madagascar. De même, 50 % du temps de février 1992 a été influencé par la ZCIT. Cette situation est presque normale, mais ce mois là, la ZCIT est restée à 46,30 % de ses fluctuations aux environs d'Antsiranana vers 12° S. Ceci est anormal pour la saison car, en janvier et en février, la position habituelle de la ZCIT se situe entre 15° S et 20° S (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1982). Cette situation anormale a réduit considérablement l'apport pluviométrique habituel lié aux orages de fin d'après-midi de la saison chaude à Madagascar.

De plus, l'activité cyclonique qui eut lieu essentiellement dans le canal de Mozambique et dans l'océan Indien a été inférieure à la normale. Seuls 2 cyclones sur 9 habituels ont sillonné les latitudes malgaches tant en 1990-1991 qu'en 1991-1992.

5.3.2. L'apport des radiosondages

L'observation des radiosondages d'Antananarivo à 12 h 00 TU indique la présence, en altitude, de deux masses d'air influençant le temps : l'air tropical maritime (Tm) est charrié par l'AOI ou par l'AMob. C'est l'alizé qui a marqué le temps de 1991-1992 bien plus que de coutume sauf en décembre, janvier et février. Cet alizé a subi un fort réchauffement à la base, fait tout à fait normal dans le cas actuel compte tenu de l'heure des observations. Il est constitué d'un air relativement instable et humide en surface, surmonté par un air stable et sec en altitude, tous deux séparés par une couche d'inversion localisée aux environs de 720 hPa en octobre, et novembre 1991, ainsi que 850 hPa en décembre 1991, et en janvier et avril 1992. Cette altitude peu élevée de la couche d'inversion a pour effet de réduire l'instabilité au sol, fait qui aurait favorisé la pluviogénèse. D'autre part, cet alizé a été sec, ce qui réduit encore plus les chances d'avoir des pluies.

L'air équatorial est épais et humide à tous les niveaux. Il est instable et n'a influencé qu'en partie le temps de décembre, janvier et février mois pendant lesquels il aurait dû être prépondérant. Cet air des basses pressions équatoriales ou des cyclones tropicaux est à l'origine des gros orages de mousson ou des trombes d'eau des cyclones. Mais ces derniers, moins nombreux ont très peu marqué le temps. De plus, ils ont épargné le sud. Il est donc permis de croire que le déficit pluviométrique enregistré est dû à la persistance anormale d'une situation de type hivernal qui se traduit par la prédominance d'un temps d'alizé actif, épais et stable sur Madagascar et plus particulièrement sur le sud pendant la saison chaude et pluvieuse. Ceci a pour conséquence de repousser la zone d'influence des centres d'action favorables à la pluviogénèse dans des latitudes plus septentrionales, d'où sécheresse. Des nuances régionales accentuent cette sécheresse faisant de la moitié nord de l'île une zone plus arrosée que la moitié sud. C'est dire que deux météorologies différentes déterminent le temps à Madagascar. Au nord, une météorologie tropicale génératrice de gros orages tropicaux, influence le temps par le biais de la convergence intertropicale et des cyclones. Au sud, il s'agit d'une météorologie des pays tempérés génératrice de pluies fines de type frontal sous l'influence des perturbations frontales méridionales (PFM) et des anticyclones mobiles (AMob).

6. Conclusion

La sécheresse du sud de Madagascar en 1990-1991 et 1991-1992 s'inscrit dans un déficit quasi généralisé à l'ensemble du pays. Ses causes sont multiples : faible influence de la ZCIT, faiblesse des cyclones tropicaux et persistance d'un temps d'alizé.

Les images infrarouges Météosat sont en mesure de rendre compte des anomalies pluviométriques de Madagascar. Elles permettent de mettre en évidence les variations régionales d'intensité de la sécheresse ainsi que les différences entre la saison 1990-1991 et 1991-1992. Ces résultats quelque peu inespérés au début de l'étude, compte tenu de la complexité du contexte géographique et climatique de Madagascar, rendent envisageable la mise sur pied d'un suivi opérationnel. Celui-ci permettrait aux institutions intéressées de se préparer à d'éventuelles calamités, donc de prévoir des mesures d'aide appropriées.

En matière de télédétection, il conviendrait de poursuivre l'étude, en appliquant l'ensemble des techniques mises en oeuvre par l'antenne ORSTOM, pour le suivi de l'hivernage en Afrique de l'Ouest, à Madagascar. Il serait ainsi intéressant d'analyser les fichiers d'occurrences de nuages à sommet froid, qui ont manqué dans ces travaux, en

parallèle avec ceux de la température de surface du sol. Ce qui permettrait de mieux juger de la pertinence de la méthode appliquée au Sahel. Alors, un programme de suivi de la sécheresse, approprié à Madagascar pourrait être envisagé, à partir des données Météosat, aux fins de développement agricole, non seulement du Sud, mais de l'ensemble du pays.

7. Références

- CHAPERON, P., DANLOUX, J. et FERRY, L. 1993. Fleuves et rivières de Madagascar/Ony sy renirano eto Madagasikara. Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, ministère de la Recherche scientifique, ministère des Transports et de la Météorologie, monographie hydrologique 10, Éditions de l'ORSTOM, Paris, 874 p.
- GUILLOT, B. 1985. Veille Climatique Satellitaire. Revue trimestrielle, ministère de la Coopération, ORSTOM/Lannion, Météo France.
- LAHUEC, J.-P., CARN, M., LE MOIGNE, O. et DAGORNE, D. 1992. La saison des pluies 1991 en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne/Suivi à partir d'un catalogue d'image Météosat. Éditions Norois, Poitiers, t. 39, n° 155, p. 255-267.
- RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, S. 1986. Le climat de Fort-Dauphin et son impact sur l'homme et la végétation. Thèse de doctorat de 3^e cycle de géographie, Université de Madagascar, 221 p., atlas, carte.
- RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, S. 1985. Recherches sur le climat de Toalagnaro. Madagascar/Revue de géographie, n° 1985-46, p. 47-67.
- RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, S. 1982. Exemples de périodes sèches estivales dans la décennie 1970 à Madagascar. Madagascar/Revue de Géographie, n° 1982-40, p. 95-97.



ACHEVÉ D'IMPRIMER EN FÉVRIER 1996
SUR LES PRESSES DE
L'IMPRIMERIE D'ÉDITION MARQUIS
MONTMAGNY (QUÉBEC)

La collection *Universités francophones*, créée en 1988 à l'initiative de l'UREF, propose des ouvrages de référence, des manuels spécialisés et des actes de colloques scientifiques aux étudiants des 2^e et 3^e cycles universitaires ainsi qu'aux chercheurs francophones et se compose de titres originaux paraissant régulièrement.

Les auteurs appartiennent conjointement aux pays du Sud et du Nord et rendent compte des résultats des recherches et des études récentes entreprises en français à travers le monde. Ils permettent à cette collection pluridisciplinaire de couvrir progressivement l'ensemble des enseignements universitaires en français.

Enfin, la vente des ouvrages à un prix préférentiel destinés aux pays du Sud tient compte des exigences économiques nationales et assure une diffusion adaptée aux pays francophones.

Ainsi la collection *Universités francophones* constitue une bibliothèque de référence comprenant des ouvrages universitaires répondant aux besoins des étudiants de langue française.

Un des problèmes des plus cruciaux des pays développés autant que des pays en développement est la gestion de leurs ressources en eau. Dans ce cadre, les données de télédétection représentent une source d'information importante. Les *Cinquièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection »* de l'AUPELF-UREF ont permis de faire le point sur la télédétection des ressources en eau. Bassins versants et érosion hydrique, eaux de surface et eaux souterraines, humidité des sols, littoral, sécheresse et désertification ... soit cinq rubriques et vingt-six textes produits par d'éminents auteurs de disciplines et d'origines géographiques très différentes. Une somme indispensable pour les étudiants comme pour les chercheurs.

Prix Canada : 45 \$ CAN • Prix France : 210 FF • Prix préférentiel UREF : 60 FF



9 782760 508286

ISBN 2-7605-0828-5

59-4713-0