

## 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 <sup>1</sup> et MOHAMED CHEDLY RABIA <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *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

<sup>2</sup> *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 :

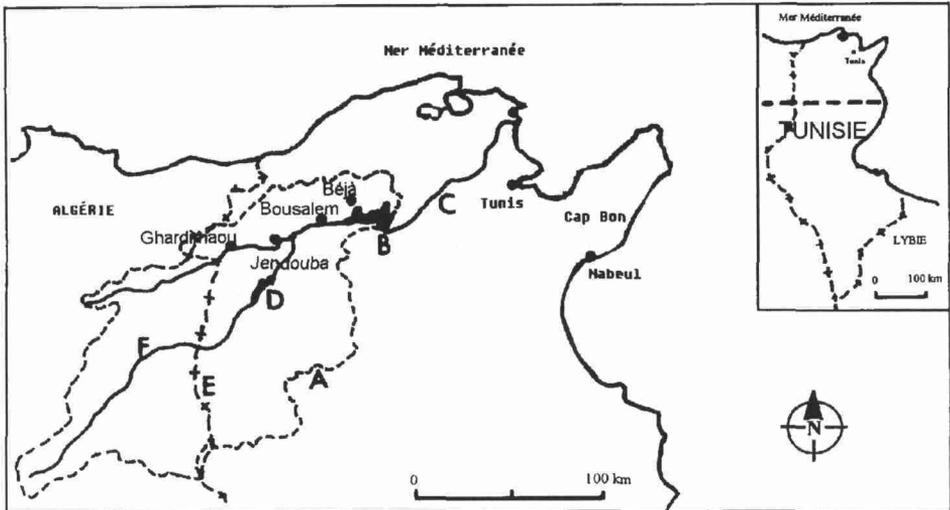
- l'évolution de la prolifération de la biomasse dans les plans d'eau au cours des trois années de sécheresse;
- la répartition spatio-temporelle des algues vertes dans la retenue;
- la propagation des eaux de crue et la dynamique de la sédimentation.

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).

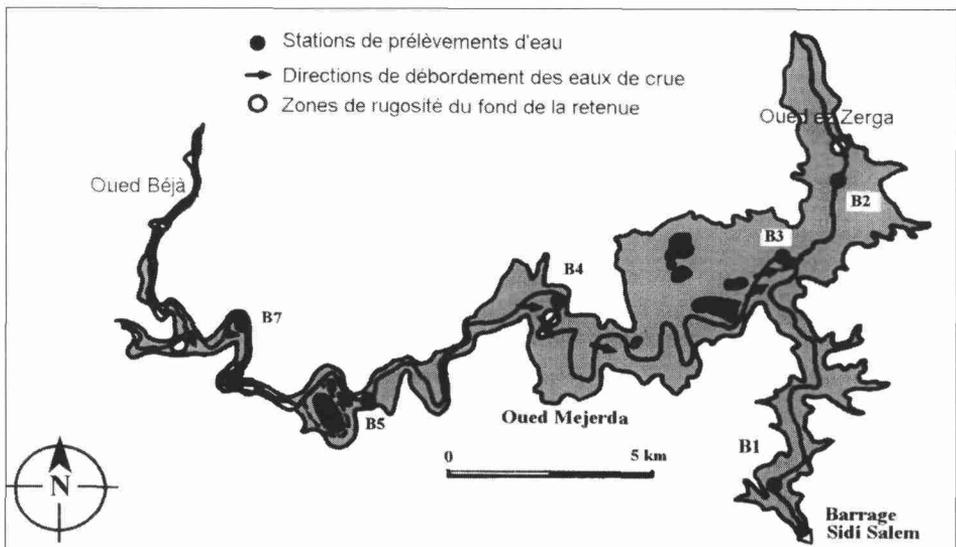
L'évolution de l'alluvionnement et la dynamique de la sédimentation dans la retenue ont été également étudiées par OUKHEY (1987, 1989, 1991) et BEN MAMMOU (1988).

## 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 km<sup>2</sup> (fig. 1). À la cote de retenue normale soit 110 m, nivellement général de la Tunisie (N.G.T.), la capacité est de 550 hm<sup>3</sup> (1 hm<sup>3</sup> = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) 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 <sup>2</sup> )	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
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 [TM2<sup>2</sup>/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.

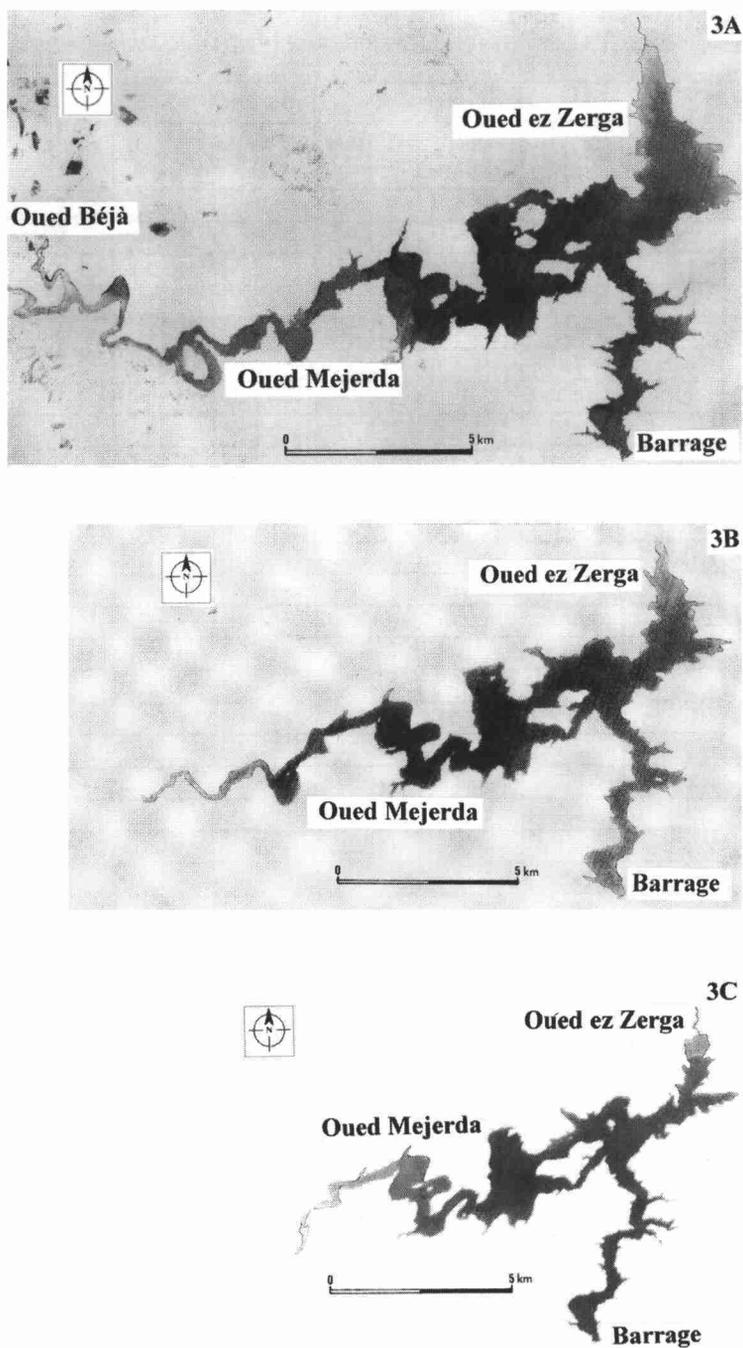
### 4.2.2. Développement d'un modèle de la qualité des eaux

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						

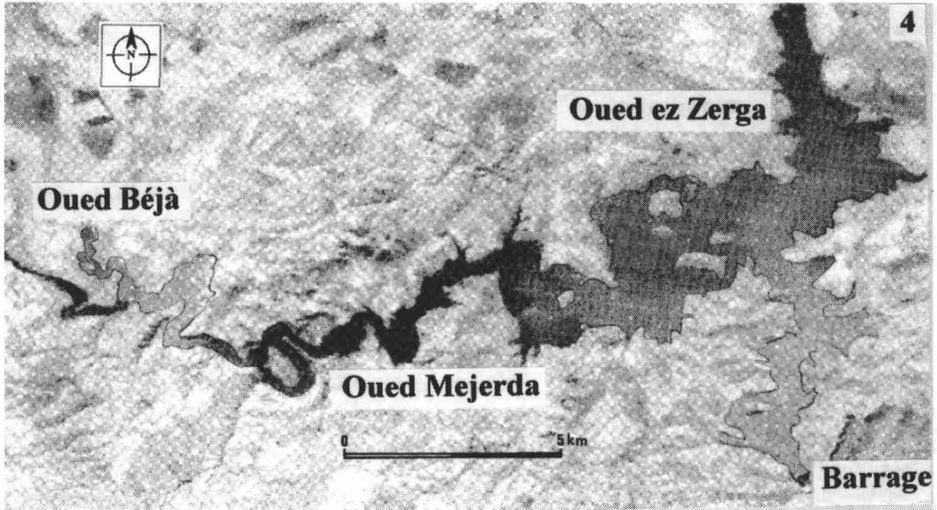


Figure 4. Indice de transparence des eaux de la retenue du barrage Sidi Salem le 27-11-1991

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.

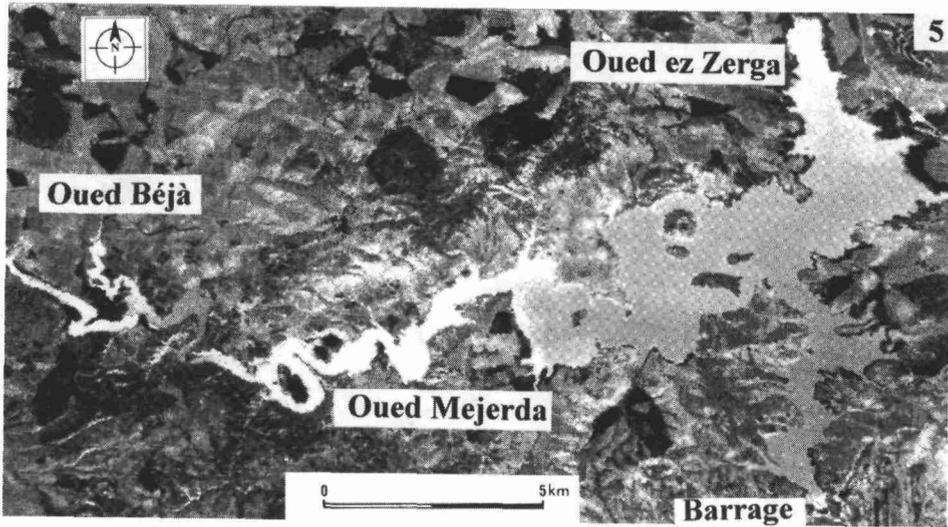


Figure 5. Carte de la matière en suspension dans la retenue du barrage Sidi Salem le 27-11-1991

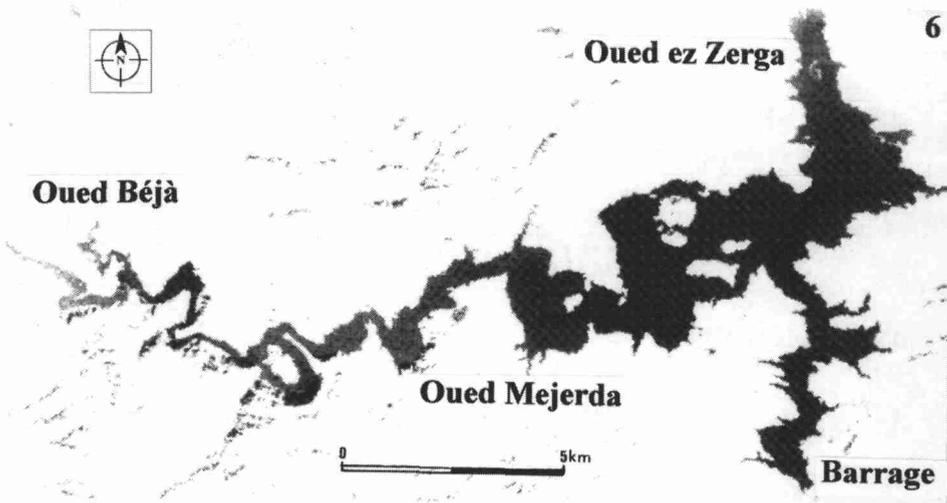


Figure 6. Carte de la turbidité des eaux de la retenue du barrage Sidi Salem le 27-11-1991

#### 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.

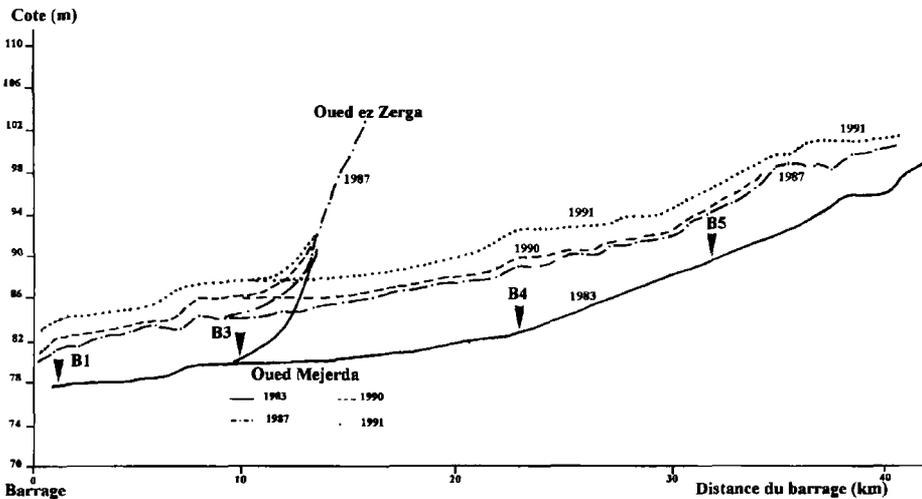


Figure 7. Évolution du profil en long du fond de la retenue du barrage Sidi Salem

## 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 corrélérer 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 <sup>1</sup>, MICHEL FILY <sup>2</sup> et FREDERIC LEONE <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *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*

<sup>2</sup> *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  $10^\circ$  et  $30^\circ$ , 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.

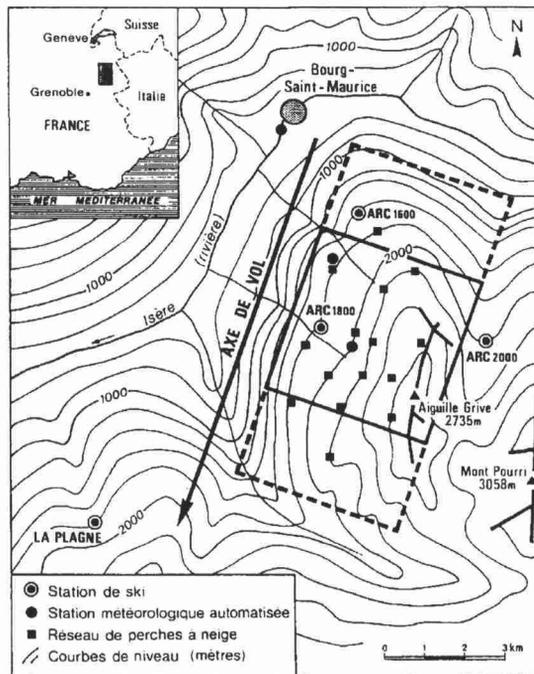


Figure 1. Localisation du site des Arcs (en tireté), des postes de mesures nivo-météorologiques et du secteur géographique étudié

## 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 ( $20^\circ$  à  $60^\circ$ ) pour le mois de décembre et compris entre  $15^\circ$  et  $60^\circ$  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  $-3^\circ\text{C}$  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.

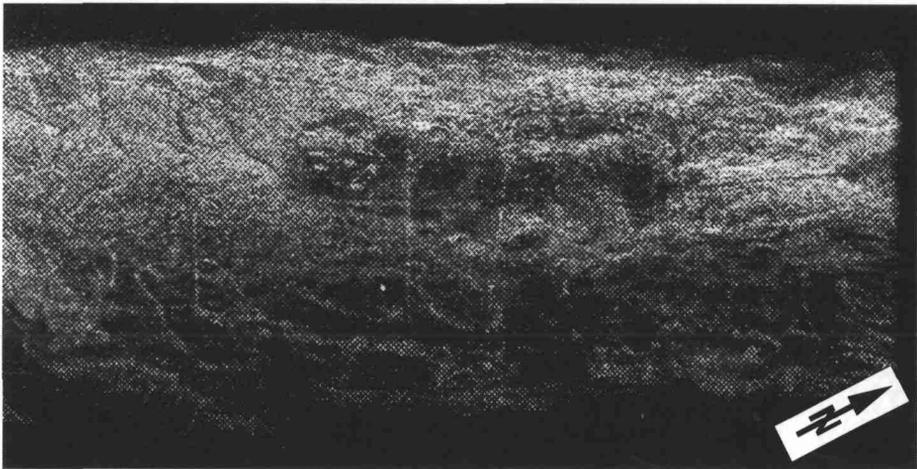


Figure 2. Image RAAS brute du 28 avril 1990 en polarisation VV

## 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  $\mu\text{m}$ ) 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 ( $\theta$ ) qui est la différence entre l'angle d'incidence du capteur ( $\beta$ ) depuis l'axe de vol de l'avion et la pente du terrain visé ( $\alpha$ ) (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

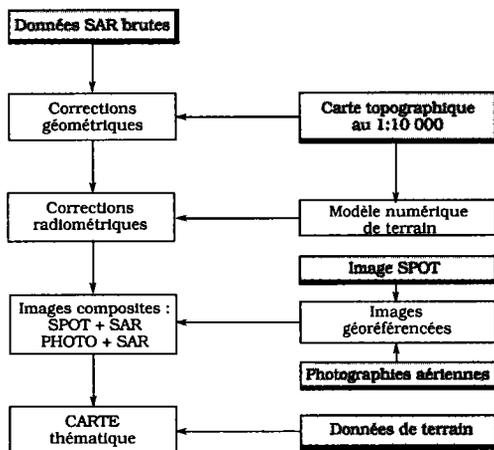


Figure 3. Organigramme de la méthodologie suivie et des résultats produits

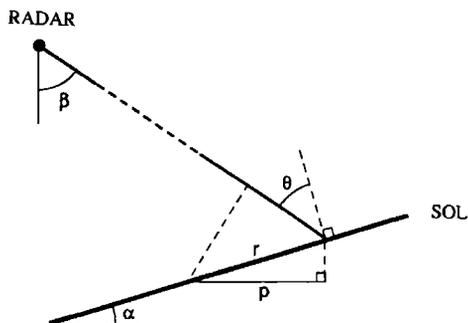


Figure 4. Variation de la taille du pixel en fonction de l'angle d'incidence et de la topographie locale

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  $P_{\text{cor}}$  = taille du pixel corrigé;

$r$  = résolution au sol;

$e$  = taille du pixel brut en distance;

$\alpha$  = angle de pente locale dans le plan du capteur;

$\theta$  = angle local d'incidence de la visée.

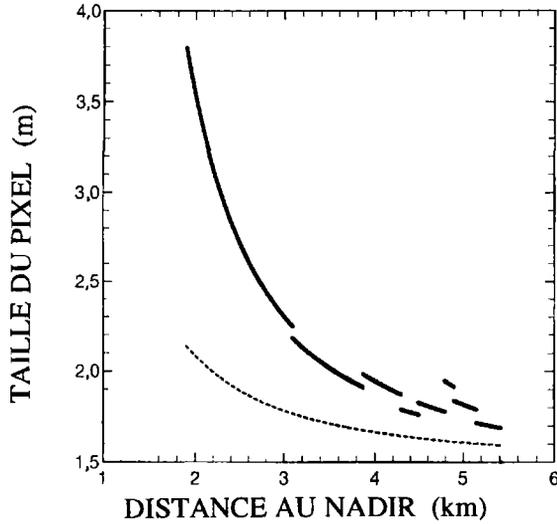
Les résultats graphiques sont donnés sur la figure 5. Les discontinuités de taille des pixels sont dues au fait qu'il y a des ruptures de pente au niveau de chaque point caractéristique. Pour comparaison, la même variation est proposée pour une altitude constante de 2 000 m et pour un terrain considéré 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»

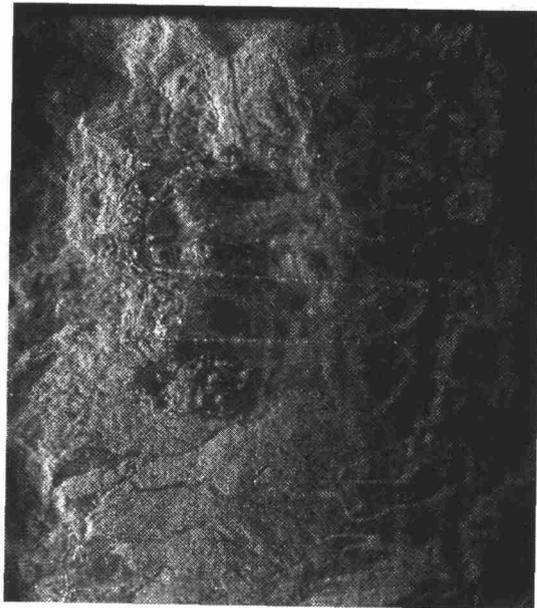
Le contrôle de qualité de la correction géométrique par fonctions «B-Spline» a été ensuite effectué grâce au MNT. Pour un lot de points de validation, la précision obtenue du positionnement en X et en Y est inférieure ou égale à 1 pixel, soit 5 m au sol pour la zone de l'image ayant été rectifiée géométriquement : 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

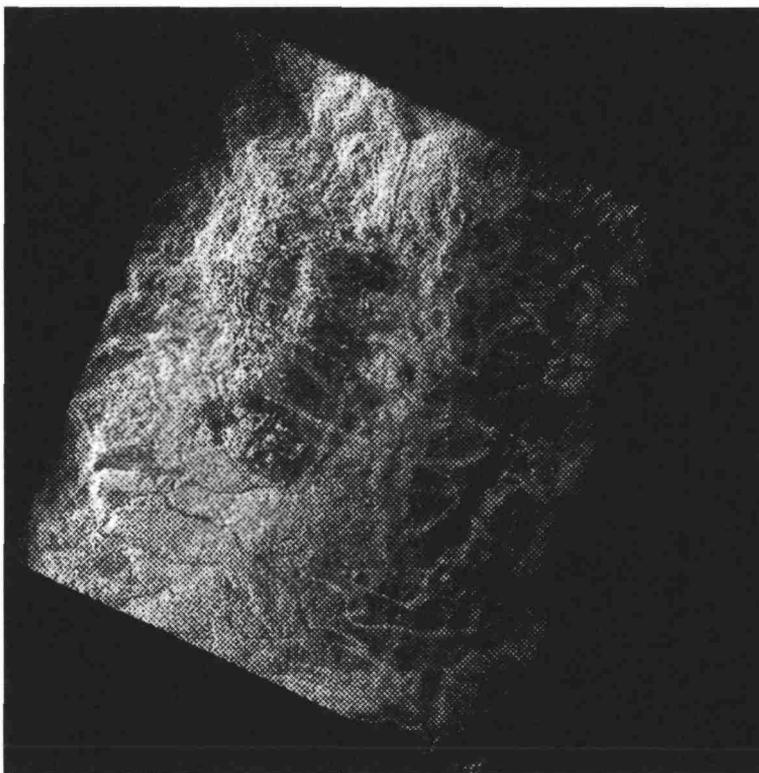


(a)



(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 :

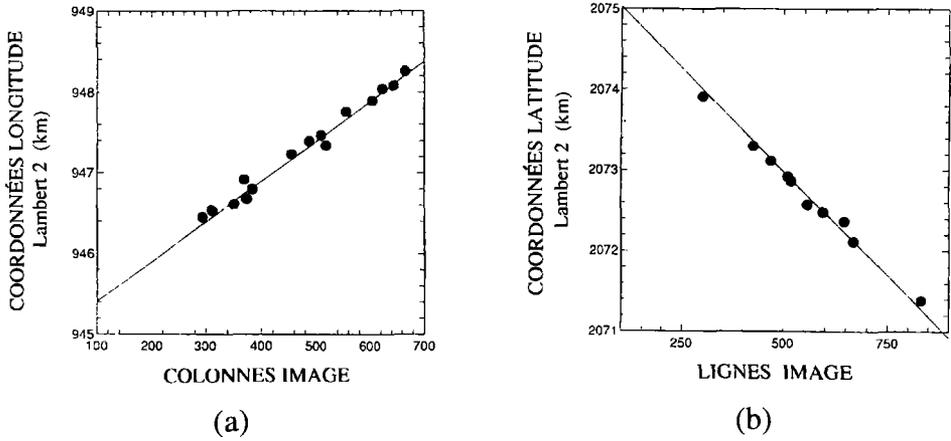
$$R_{cor} = R_{mes} \cdot \sin(\theta)$$

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

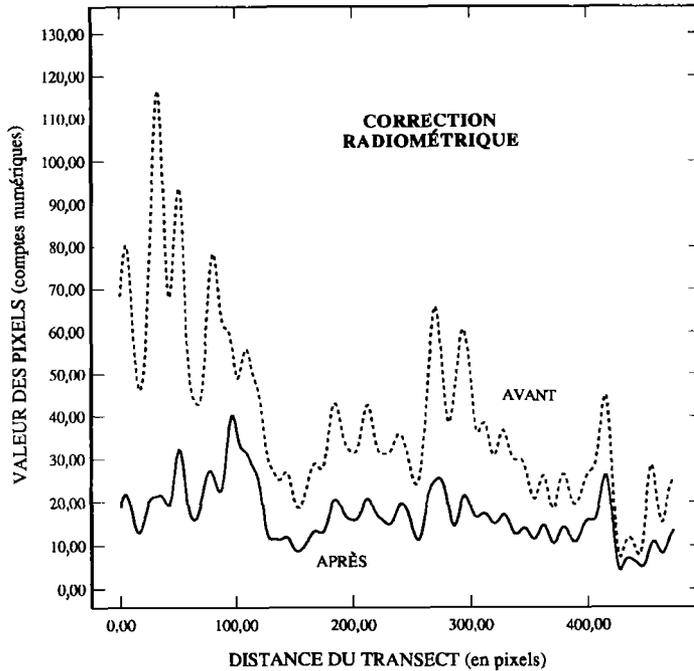
Le calcul de l'angle d'incidence local nécessite les étapes suivantes :

- 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.

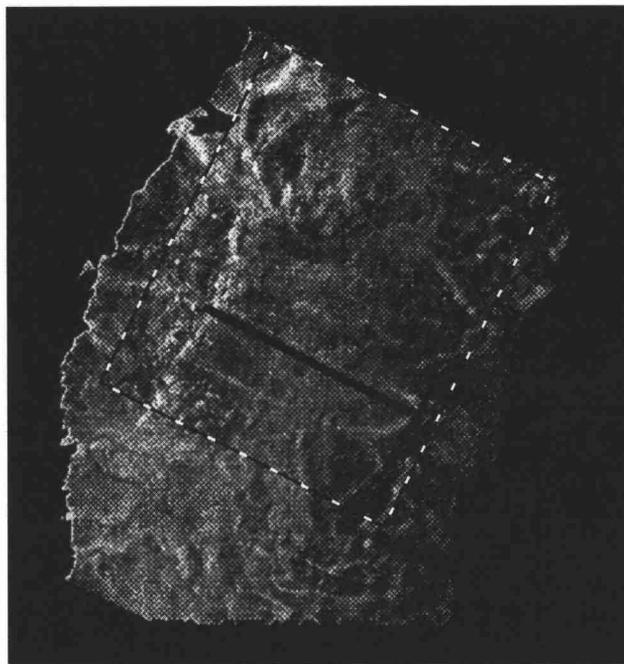
Un transect de contrôle a été établi transversalement dans le fichier-image, perpendiculairement à l'axe de vol de l'avion. Le résultat statistique obtenu est donné par le graphique de la figure 9. On constate que le profil des valeurs rétrodiffusées après correction radiométrique est bien moins influencé 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/m<sup>3</sup> sur piste, alors qu'elle n'était que de 250-350 kg/m<sup>3</sup> 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).

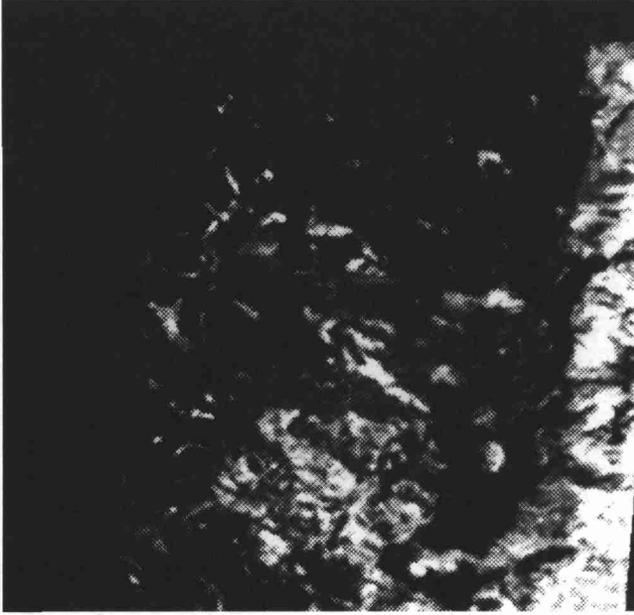
On remarquera enfin que la confrontation à la fois en décembre et en avril entre les deux polarisations HH et VV n'a pas apporté de différence significative entre les deux modes pour la détermination des types de neige ou bien la localisation des zones humides sous-jacentes.

#### **4.1.2. Comparaison avec les données optiques**

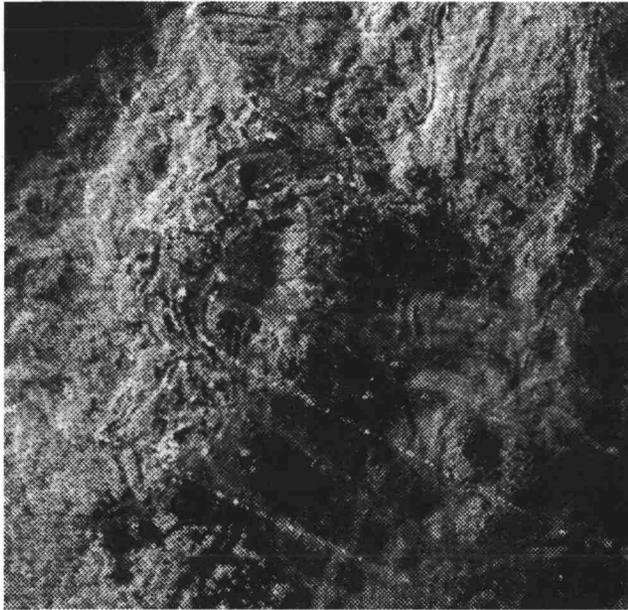
Les hypothèses évoquées ci-dessus ont été validées par le croisement numérique des données RAAS avec les données du visible.

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

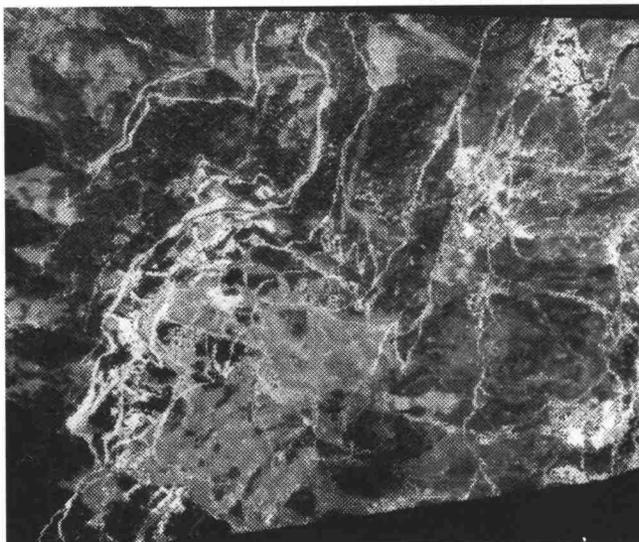


Figure 12. Ortho-photographie panchromatique de juillet 1990 sur le site des Arcs

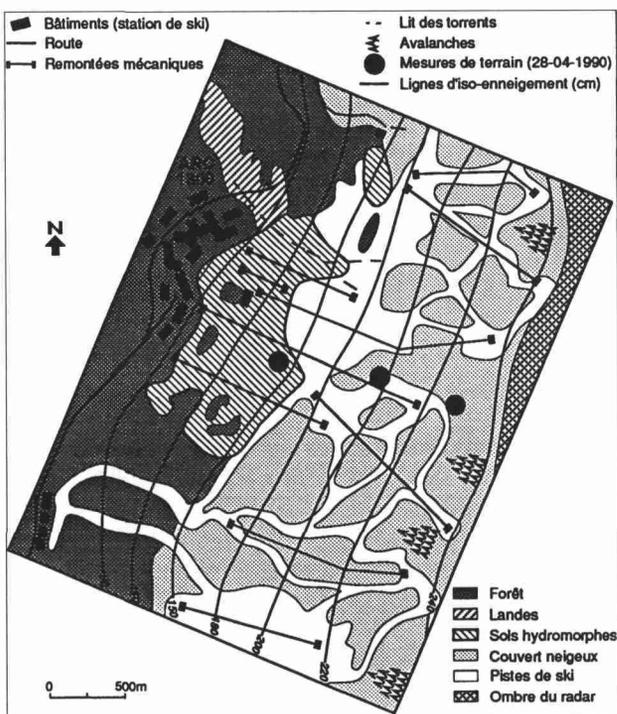


Figure 13. Carte thématique des Arcs correspondant à l'analyse des figures 9 et 12

## **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.

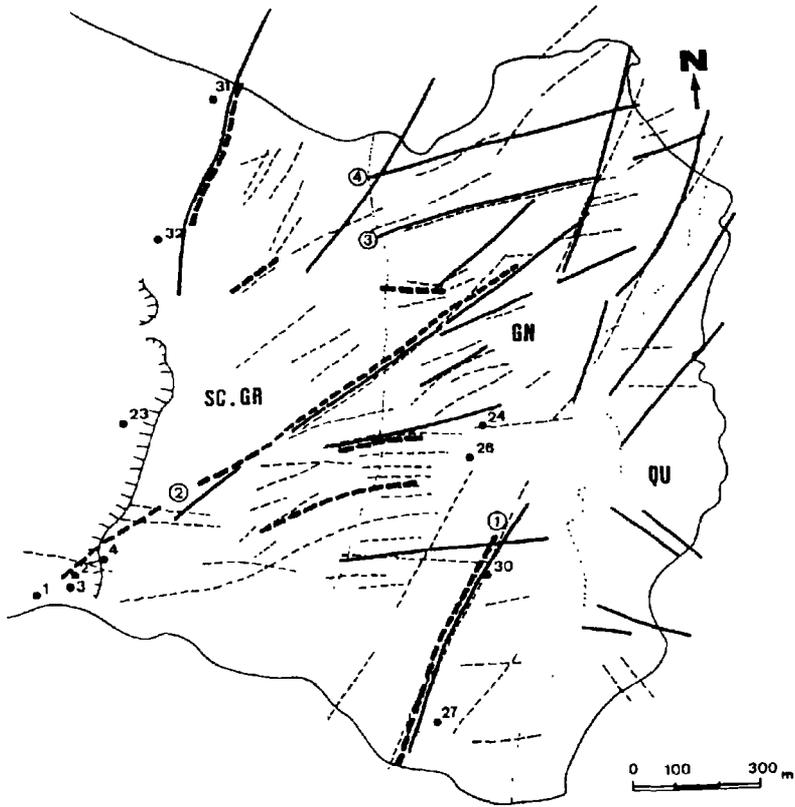
### **4.2.2. Validation**

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 <sup>1</sup>, MICHEL YERGEAU <sup>2</sup>, GOZE BERTIN BÉNIÉ <sup>2</sup>,  
KARIM TRAORÉ <sup>1</sup>, HÉDIA CHAKROUN <sup>2</sup>, KALIFA GOITA <sup>2</sup> et  
ABDOULRASMANE TAO <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *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*

<sup>2</sup> *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/km<sup>2</sup>.

## 1. Introduction

Le Burkina Faso (274 200 km<sup>2</sup>) 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.

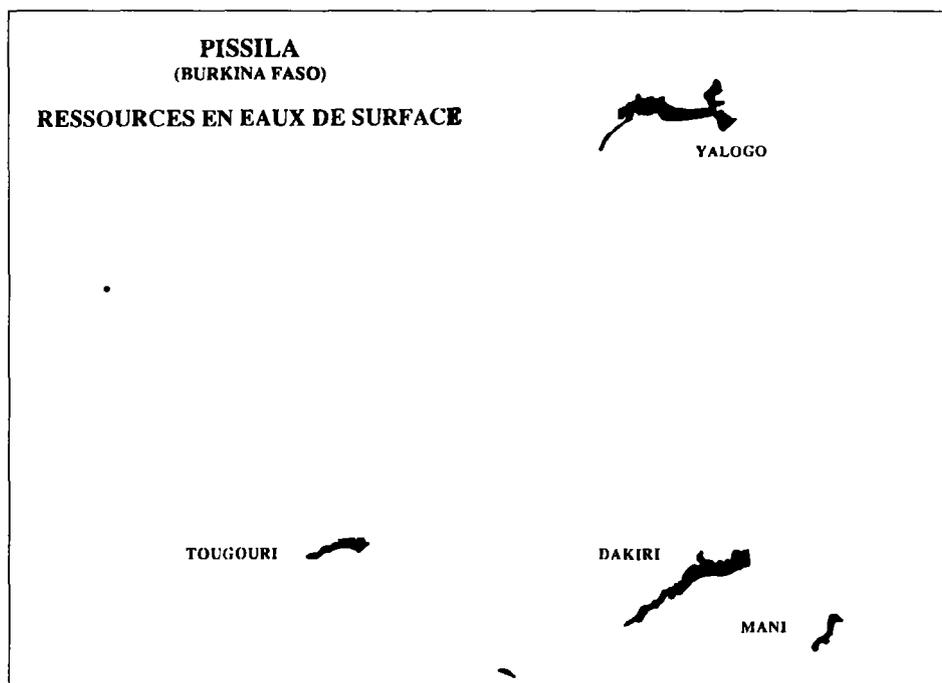


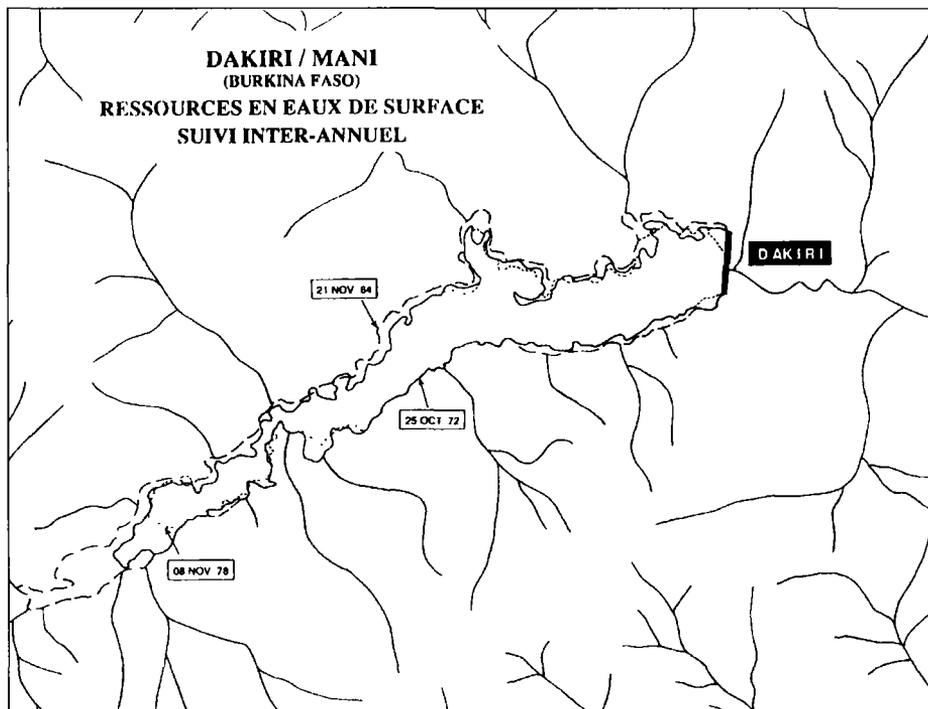
Figure 1. Extrait du feuillet Pissila de la carte des ressources en eau de surface au 1: 200 000

## 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 <sup>2</sup> )					
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

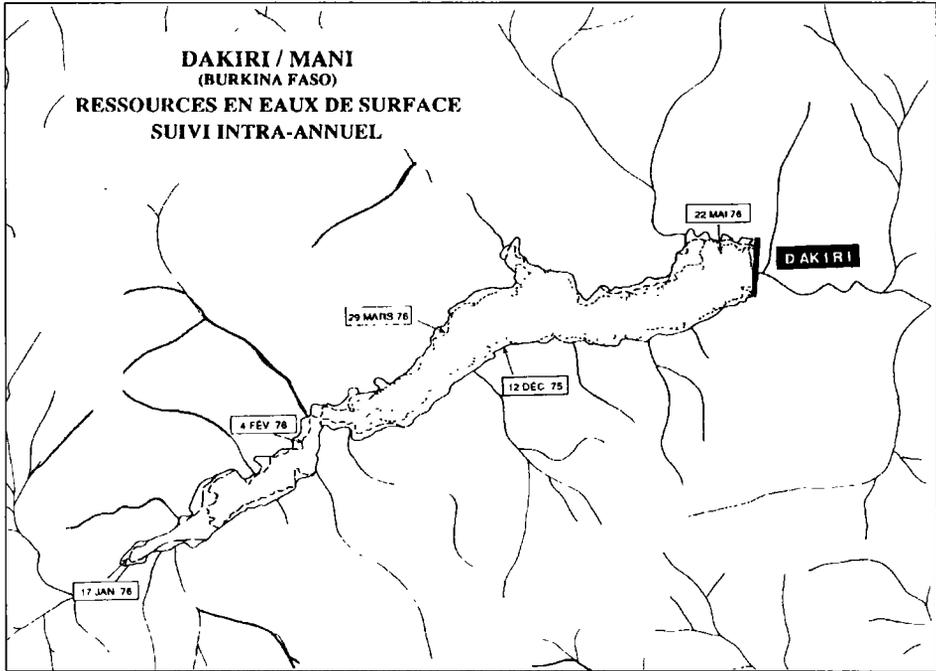
Le suivi intra-annuel permet de connaître la dynamique de chacun des plans d'eau à l'intérieur d'une saison sèche. Cette surveillance devient un outil de gestion des points d'eau pour établir un bilan hydrologique des réservoirs et certaines normes en aménagement du territoire comme le déplacement des 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/km<sup>2</sup> (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 <sup>2</sup> )									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/km<sup>2</sup>.

## **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. (éd.), 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 <sup>1</sup>, GOZE BERTIN BÉNIÉ <sup>2</sup>, Q. HUGH J. GWYN <sup>2</sup> et JEAN BIÉMI <sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *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*

<sup>3</sup> *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 m<sup>3</sup>/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.

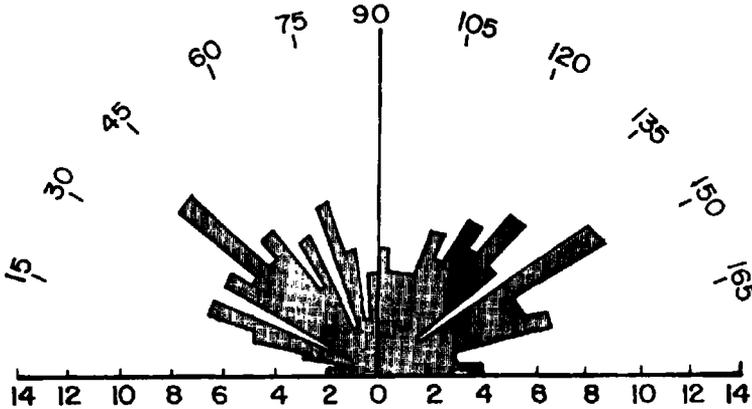


Figure 1. Fréquence des fractures d'une grande proportion du secteur d'étude

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

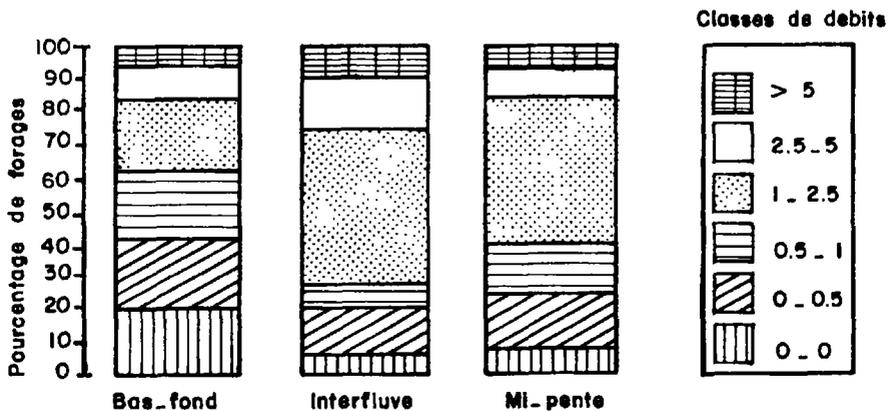
approximation, si on admet la superposition des bassins versants hydrologiques et hydrogéologiques, il est possible de limiter l'aire de drainage d'une fracture, les directions d'écoulement dans le réseau de fracturation et d'estimer l'aire d'alimentation d'un point d'eau.

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 m<sup>3</sup>/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 <sup>3</sup> /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 (m<sup>3</sup>/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 <sup>3</sup> /h)	0 - 20	0 - 15	0 - 12
Débit moyen (m <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /h)	Débit spéc. (m <sup>3</sup> /h/m)	Produc. (m <sup>3</sup> /h/m)	Ntf (nb/km <sup>2</sup> )	Nintf (nb/km <sup>2</sup> )	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 basin. 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**

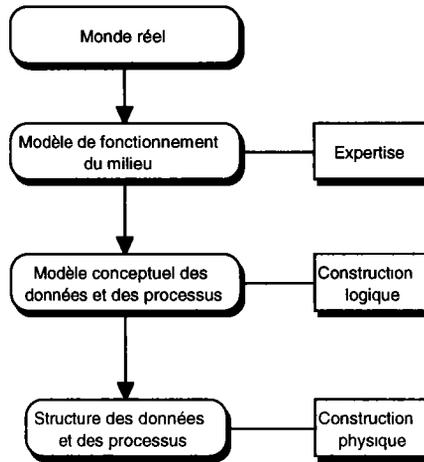
Les différents concepts présentés précédemment de façon fort succincte trouvent aujourd'hui une application à travers la conception d'outils adaptés, permettant leur mise en pratique. Ainsi, les développements effectués dans le domaine des SIRS et des SGBD ouvrent de nouvelles perspectives.

### **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.

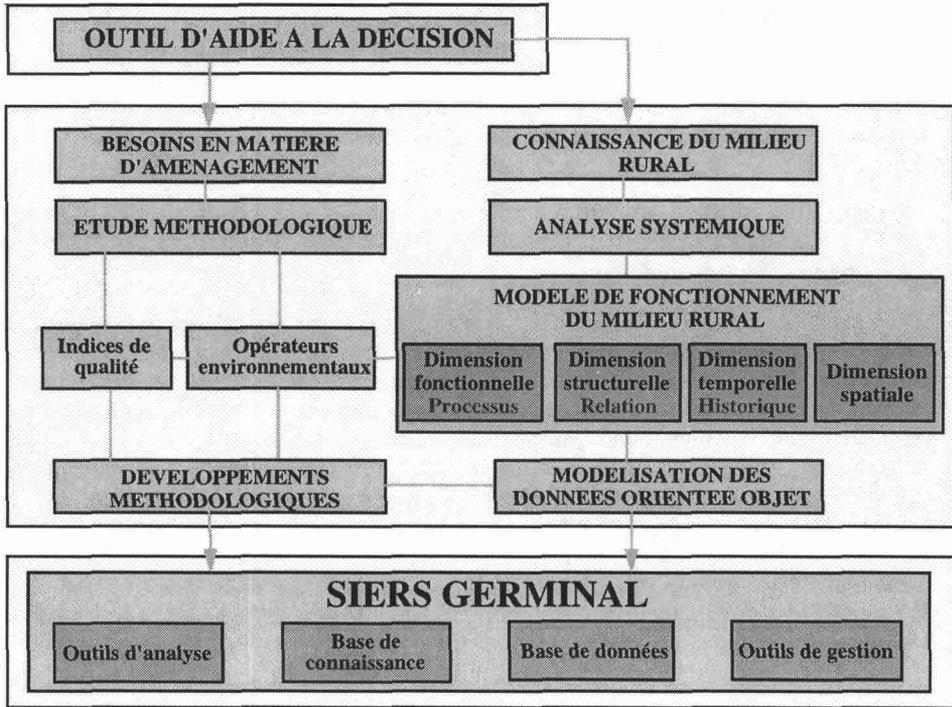


Figure 2. Approche méthodologique du projet GERMINAL

#### 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.

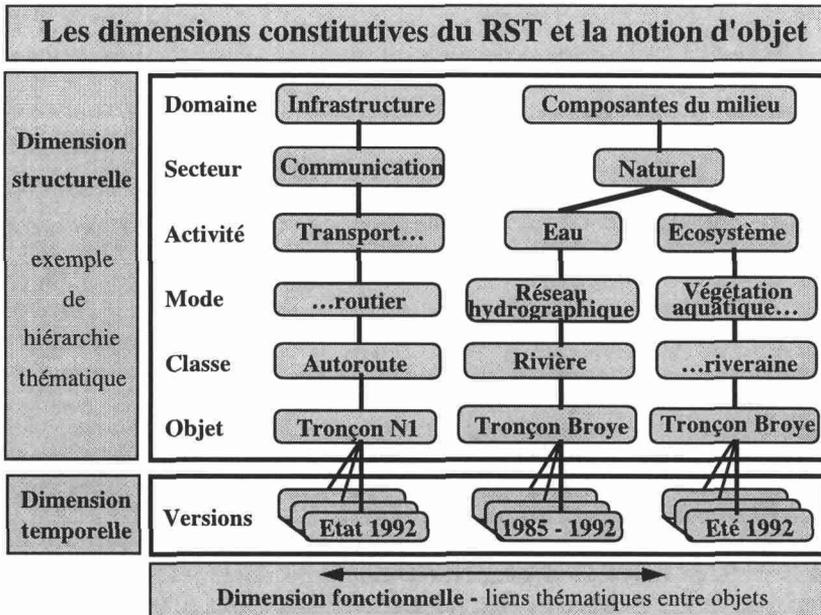


Figure 3. Les dimensions constitutives d'une RST et la notion d'objet

#### 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.

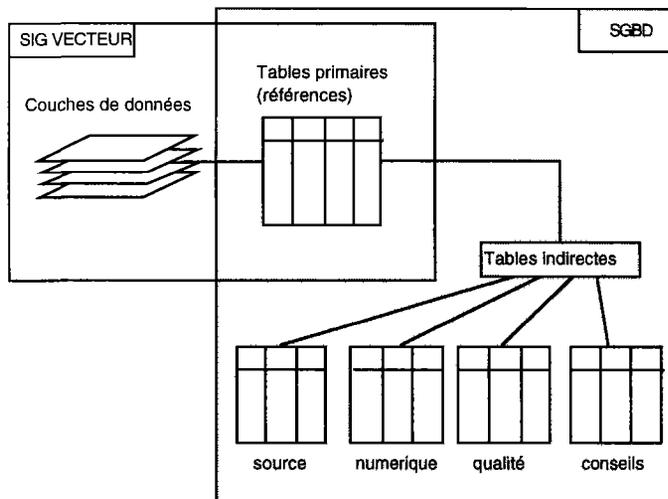


Figure 4. La structure de l'application au sein du SIRS GERMINAL

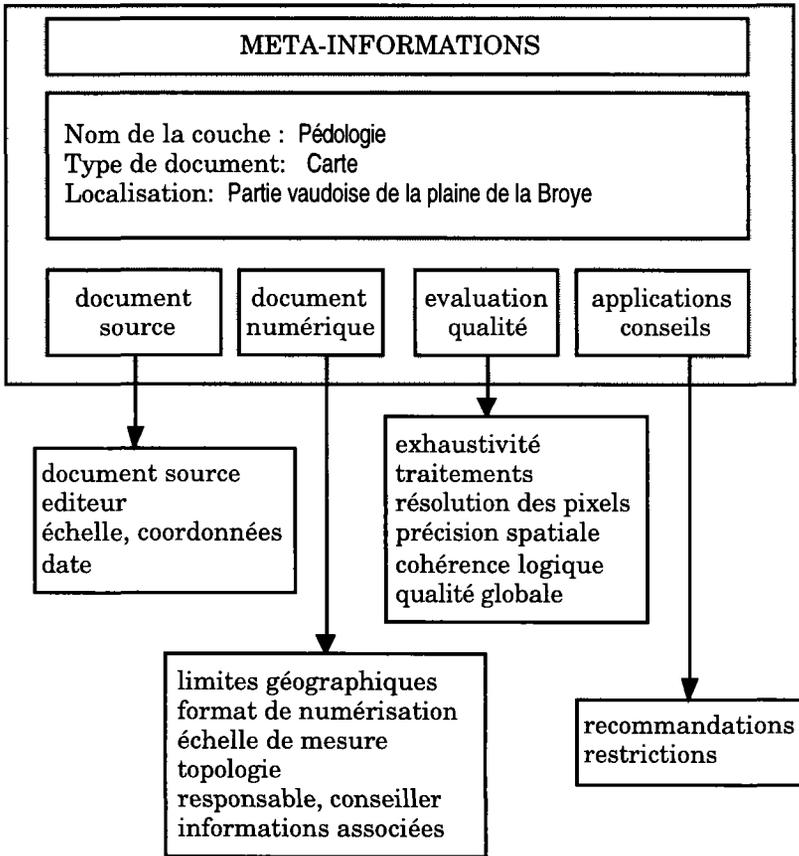


Figure 5. Organisation des menus de l'interface utilisateur de l'application

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 SÉGUIS

*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 km<sup>2</sup> 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'éclairement 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



## 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.

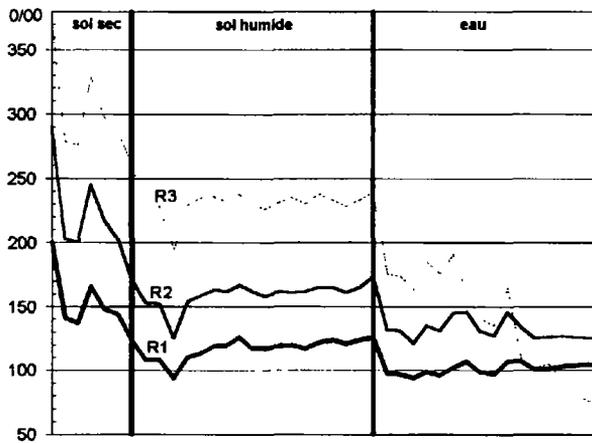


Figure 2. Réflectances des bordures de mare

## 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.

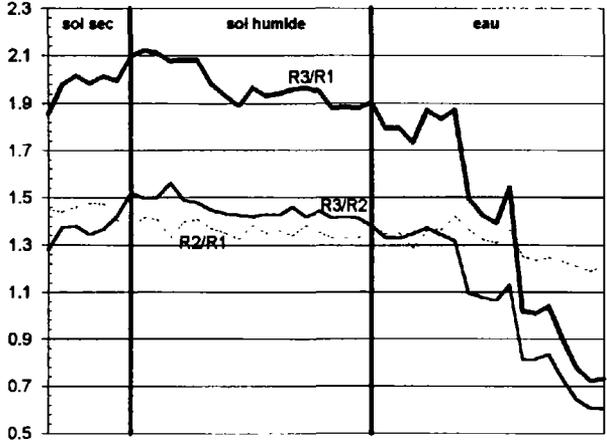


Figure 3. Rapports de réflectances des bordures de mare

Les interactions entre réflectance  $R$  et profondeur  $z$ , pour un canal  $\lambda$ , 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;

$K_{\lambda}$  réflectance du sol humide saturé  $R_0$  moins la réflectance du fond;

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

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

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;

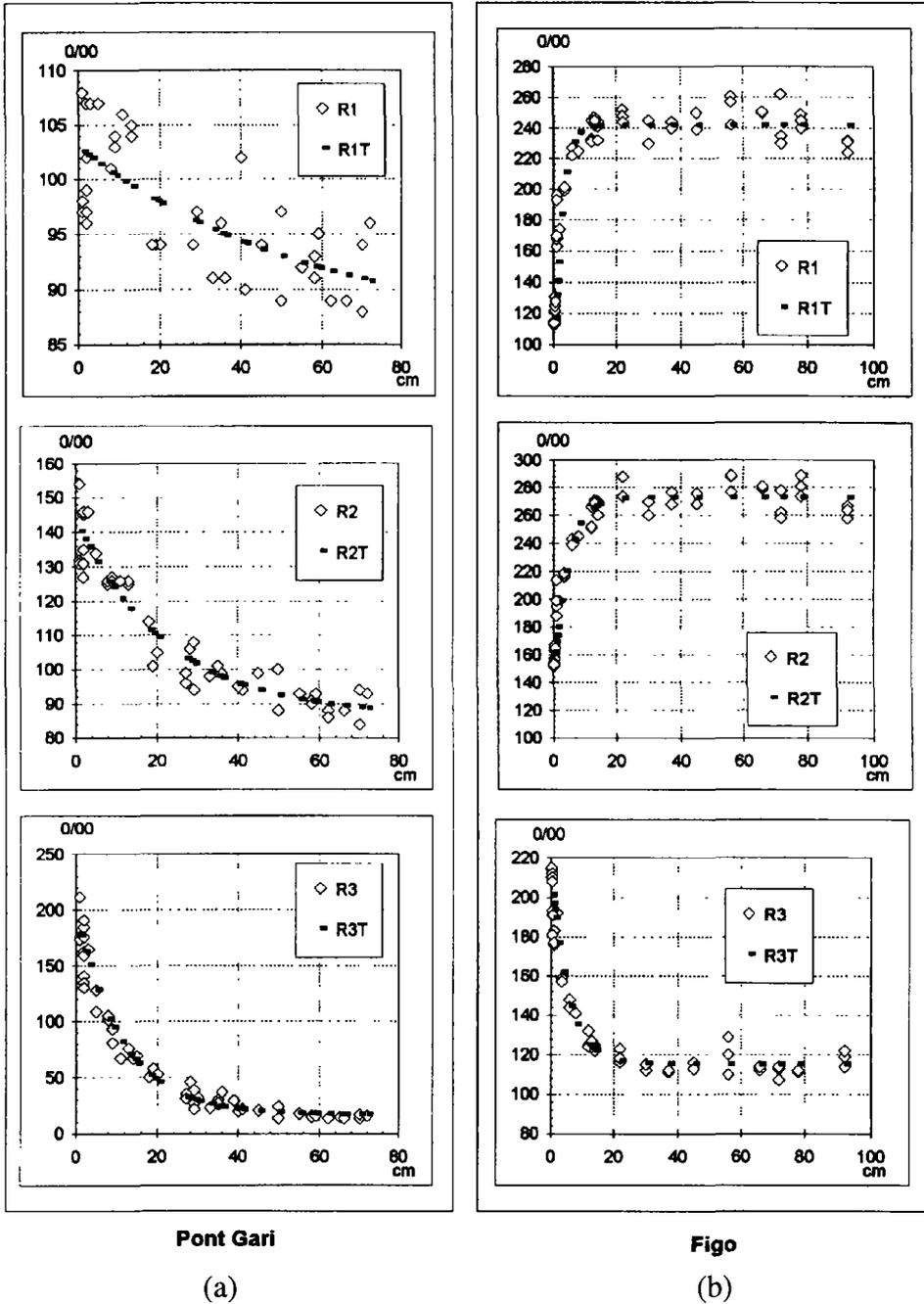


Figure 4. Effets de la profondeur sur la réflectance : a) mare du Pont Gari; b) mare de Figo

**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  $C_\lambda$  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  $3 \text{ m}^{-1}$  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 ( $C_\lambda$ ) et la réflectance de l'eau profonde ( $R_{\rho}$ ).

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 :

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

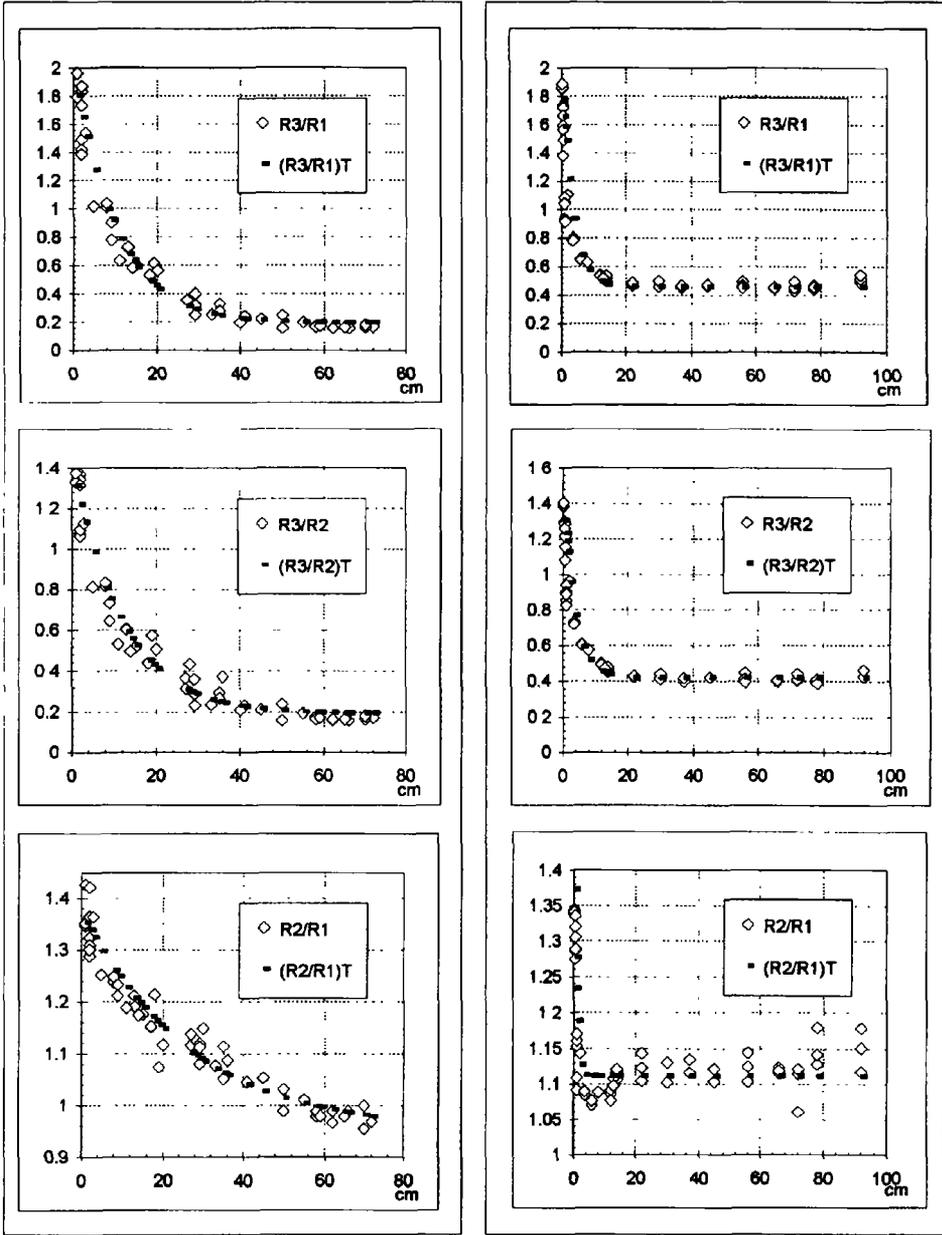
$$R2 = 0,70 C + 78,07 \quad r^2 = 0,96$$

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

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

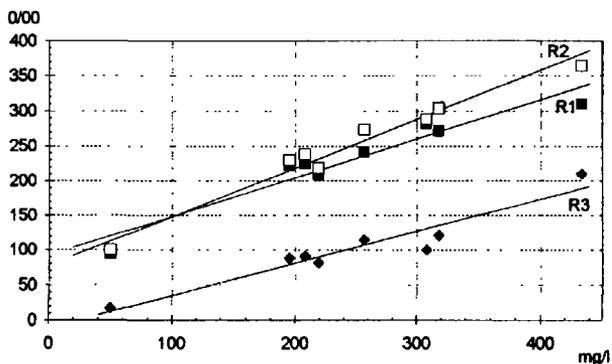


Figure 6. Réflectance de l'eau profonde et concentration

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.

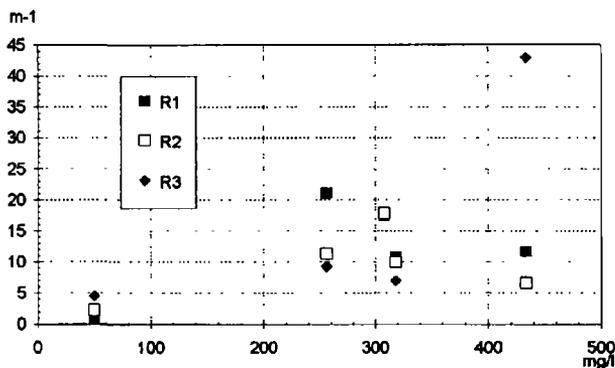


Figure 7. Coefficient d'atténuation et concentration

### 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.

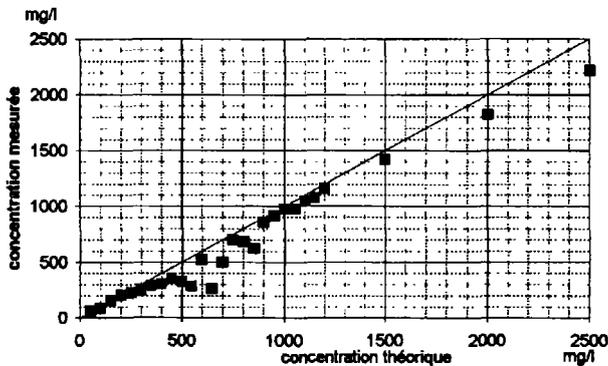
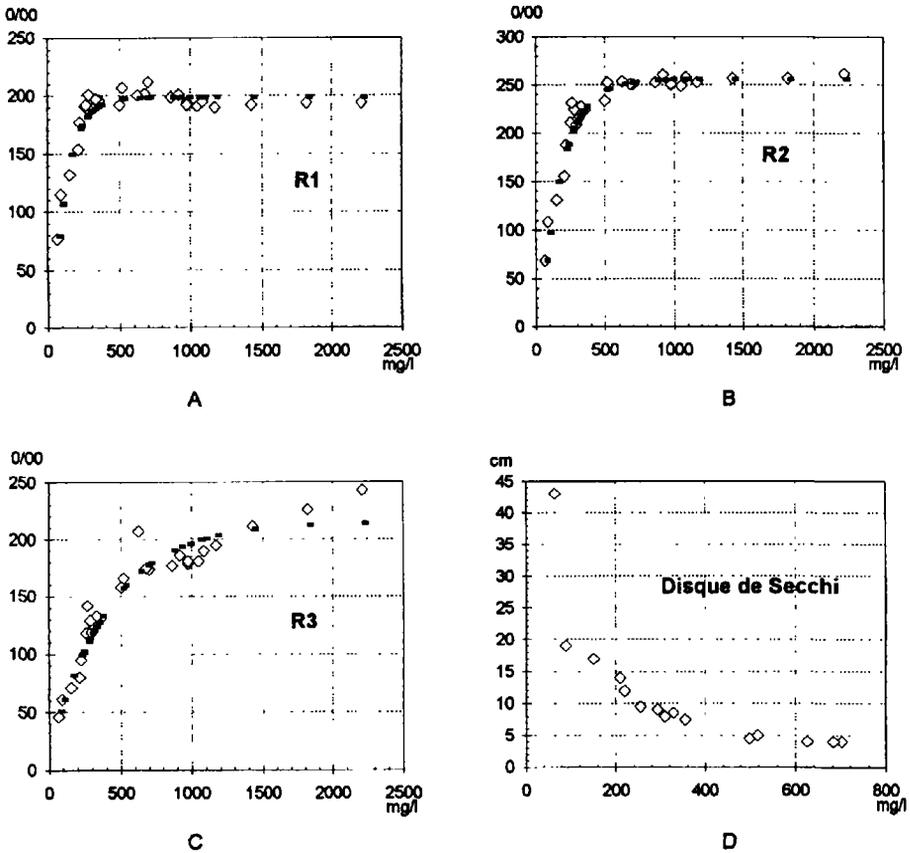


Figure 8. Concentration théorique souhaitée et concentration mesurée dans le fût

#### 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  $A_{\lambda}$  et  $B_{\lambda}$  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  $S_{\lambda}$  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

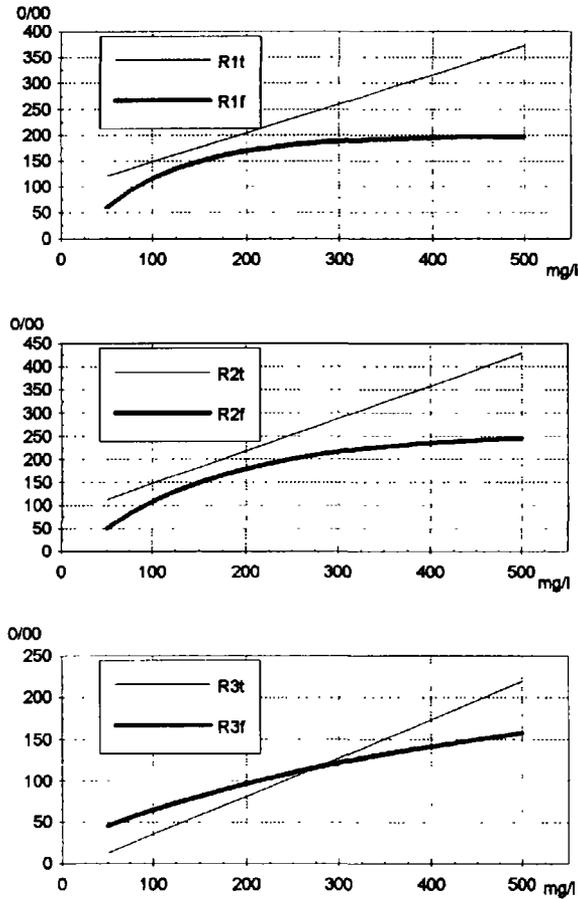
Un disque mobile de diamètre légèrement inférieur à celui du fût permet de simuler différentes épaisseurs de tranche d'eau entre 2 et 90 cm environ pour des concentrations analogues à celles rencontrées sur le fleuve (de 38 à 416 mg/l). Pour chaque concentration, des relations du type de l'équation (1) ont été déterminées. Les coefficients d'atténuation  $C_{\lambda}$  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 :

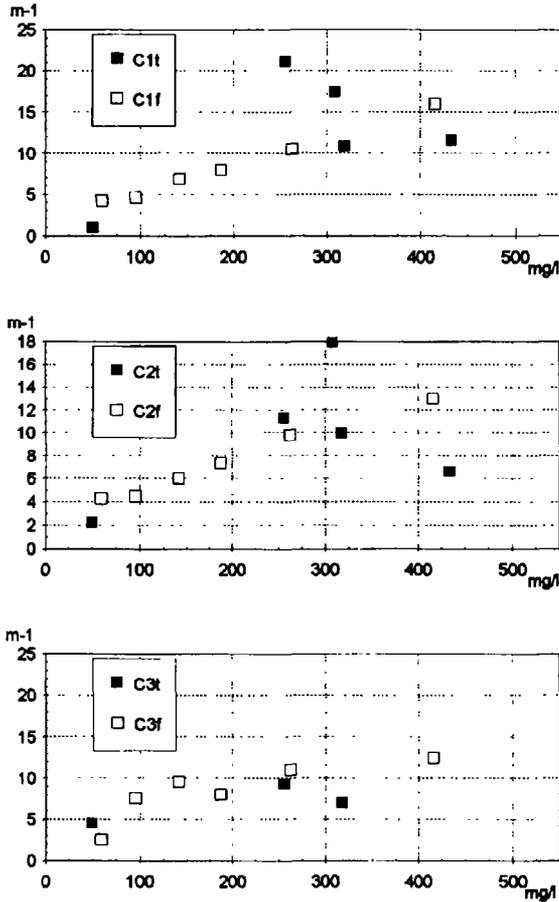
- la réflectance du sol saturé en bordure de mare;
- la réflectance de l'eau profonde (d'épaisseur supérieure à la limite de pénétration de la lumière);
- le coefficient d'atténuation.

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.