

SAGATELE : système d'aide à la gestion et à l'aménagement du territoire pour la lutte contre l'érosion

Mohamed Rached BOUSSEMA¹, Jean-Jacques CHEVALLIER², Jacynthe POULIOT²

1. Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale (Equipe associée à l'UREF EA.41), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie.

2. Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Québec, Canada.

Résumé

Cette étude présente le fruit d'une collaboration scientifique menée conjointement entre le Laboratoire de Télédétection et Systèmes d'Information à Référence Spatiale (LTSIRS) et le Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval, avec le concours de la Direction de la Conservation des Eaux et du Sol au Ministère de l'Agriculture et l'appui financier du Centre de recherche pour le développement international du Canada (CRDI).

Cette collaboration débouche sur la réalisation d'un prototype logiciel appelé SAGATELE dont le développement, basé sur le logiciel ARC/INFO, s'est effectué selon la technique du double prototypage : un premier prototype rapide faisant suite à un inventaire des données et permettant le dialogue avec les utilisateurs, un deuxième prototype évolutif en fonction des priorités établis lors de la première étape. L'utilisation du prototype se fait à l'aide d'un menu qui se subdivise en trois sous-menus principaux : un menu de consultation libre de la base de données à l'aide d'ARCVIEW, un menu aboutissant à fixer les urgences au niveau des sous-bassins versants, et un menu constituant l'outil d'aide à la planification des aménagements sur le cours d'eau ou sur le bassin versant.

Ce travail montre ainsi comment à l'aide d'ARC/INFO, un SIG est utilisé pour intégrer, analyser et synthétiser des quantités de plus en plus volumineuses d'informations et fournir des résultats visuels significatifs pour le gestionnaire et l'aménageur des bassins versants. SAGATELE peut constituer un excellent outil pour le suivi de la dégradation des sols et la gestion des terres pour un développement durable.

Abstract

The paper describes a prototype information and decision system (SAGATELE) developed in the context of a project funded by the International Research and Development Agency of Canada (IDRC) and involved the National School of Engineering in Tunis (ENIT), the Geomatics Research Centre at Laval University and the Soil and Water Conservation Division (DCES) of the Tunisian Ministry of Agriculture. The system developed using ARC/INFO assists in the identification of the zones which require an urgent intervention in order to prevent erosion. We present an overview of the methodology used to reach that purpose. A first step fixes the management priorities by the identification of zones where intervention has a high priority. The other step establishes the management scenarios for the slopes and water courses in each sub-watershed. We show how using ARC/INFO, a GIS is used to integrate, analyze and synthesize ever increasing amounts of environmental information and provide meaningful visual results for the ecosystem manager. The main advantage of the model is its ability to provide an integrated approach for erosion management in a particular watershed. SAGATELE could be an efficient tool if used in arid and semi arid countries with similar soil management problems.

Introduction

En Tunisie, l'agriculture constitue l'une des principales ressources de l'économie nationale, représente plus de la moitié du PNB et emploie plus de 60 % de la population. Comme pour de nombreux pays arides et semi-arides, l'érosion des sols y constitue un fléau pouvant hypothéquer son avenir car un sol érodé est définitivement perdu. En plus de l'érosion, d'autres problèmes majeurs affectent ces régions tels que l'envasement des barrages réduisant ainsi leurs durées de vie et la diminution des nappes souterraines.

D'après de nombreuses études réalisées, différents facteurs rendent les sols tunisiens particulièrement vulnérables à l'érosion. Ces facteurs sont :

- climatiques : l'agressivité et l'irrégularité des précipitations provoquant des crues brutales et épisodiques ;
- édaphiques : la Tunisie possède peu de sols évolués et riches en humus en raison de l'action de l'érosion qui contribue à créer continuellement des sols jeunes alluviaux ou colluviaux ou directement issus de la roche mère qui est à prédominance marneuse ou argileuse ;
- topographiques : le relief de la Tunisie, bien que peu élevé présente en général des terrains à pentes raides qui accélèrent considérablement le phénomène de l'érosion ;
- socio-économiques : la couverture végétale de la Tunisie a été profondément transformée par l'Homme, dont le mode de vie connaît lui aussi des transformations considérables. En effet, le défrichement de la végétation naturelle, la mise en culture de

terrains de parcours et la pratique de procédés cultureux inadéquats ont favorisé l'intensification des phénomènes d'érosion et des transports solides vers l'aval.

Une politique de conservation des eaux et du sol est mise en place depuis quelques années. Un organe de mise en oeuvre de cette politique est créé au sein du Ministère de l'Agriculture en la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols (DCES). Cette politique a reçu l'appui de certaines instances internationales. Les résultats parfois spectaculaires présentent néanmoins des insuffisances. Cette politique de CES se base sur des travaux sous forme d'aménagements ou d'ouvrages CES. Certains de ces ouvrages tels que les aménagements des versants permettent d'atténuer les conséquences de l'érosion, d'améliorer le bilan hydrique des sols et de favoriser le couvert végétal. Seulement, cette politique doit être bien définie, concrétisée de manière efficace et assurant un suivi continu. Elle s'appuie sur une bonne connaissance des conditions à la fois naturelles (géomorphologie, géologie, écologie, pédologie, etc.) et sociales (niveau de vie, activités socio-économiques, etc.) du milieu afin que les aménagements intégrés soient techniquement réalisables, socialement acceptables et économiquement rentables. Pour ce faire, un besoin énorme en information se fait ressentir à la fois en quantité et en diversité de point de vue acquisition et gestion. L'analyse de cette information permet de prendre des décisions.

Le développement d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) efficace et adapté au but ci-dessus nécessite l'intégration en une méthodologie cohérente des techniques d'acquisition et de tenue à jour des données, de leur structuration et de leur application au diverses activités CES.

Cette étude présente le fruit d'une collaboration scientifique menée conjointement entre le Laboratoire de Télédétection et Systèmes d'Information à Référence Spatiale (LTSIRS) et le Centre de Recherche en Géomatique de l'Université de Laval, avec le concours de la Direction de la Conservation des Eaux et du Sol au Ministère de l'Agriculture et l'appui financier du Centre de Recherche pour le Développement International du Canada (CRDI). Les détails organisationnels sont présentés dans BOUSSEMA *et al.* (1992), CHEVALLIER *et al.* (1993) et POULIOT *et al.* (1993). La zone-pilote choisie pour le projet correspond au bassin versant du Merguellil situé en Tunisie centrale (Fig. 1), entre les longitudes 7°55 E et 8°35 E et les latitudes 39°60 N et 39°78 N. Elle couvre environ 154 000 ha. Les apports solides du Merguellil sont estimés à 5.5 million de m³/an, la pluviométrie annuelle entre 200 et 400 mm répartie entre 40 et 70 jours.

Après cette introduction, on présente un survol des travaux effectués, puis de manière plus approfondie les travaux de télédétection et d'intégration de données multi-sources et leur application au sous-bassin Redjel qui est un affluent du Merguellil.

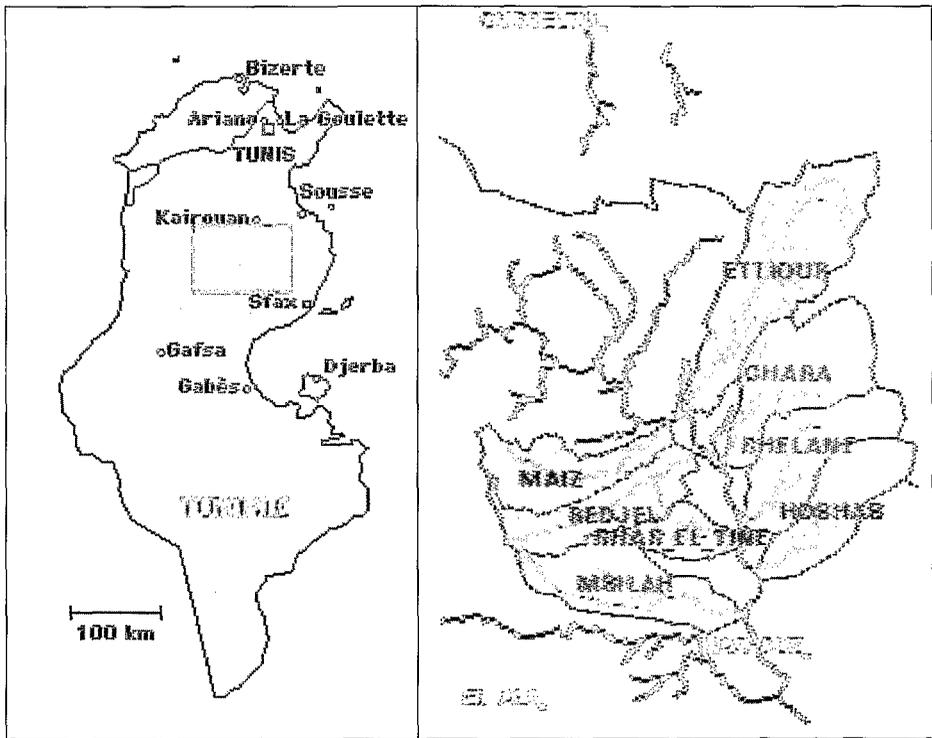


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et limites des sous-bassins versants du Merguellil.

Objectifs

Le projet présentait à la fois un haut degré d'incertitude (quels sont les besoins réels, ceux qui pourraient être satisfaits ?) et une grande complexité (de par les multiples intervenants, la diversité des aspects à considérer, les problèmes aussi bien d'acquisition et de traitement que de gestion ou d'exploitation des données). Par conséquent, les défis sont nombreux. Outre la nécessité de réaliser un SIG qui permet de sélectionner les zones critiques, de concevoir des ouvrages de protection anti-érosives, d'étudier le comportement hydrographique du bassin versant, etc., le projet doit moderniser les outils d'acquisition et de gestion des données, et les intégrer aux activités des ingénieurs et décideurs CES.

Les objectifs particuliers comportent les aspects suivants :

- la formulation d'une méthode de planification d'aménagements de CES intégrés ;
- la mise sur pied d'une méthodologie de développement et d'utilisation conjointe des techniques des SIG et de la télédétection pour les études de génie rural ;
- l'amélioration des connaissances relatives aux mécanismes de captage, de transformation et d'intégration des données nécessaires aux études techniques.

Méthodologie

La méthode s'appuie sur la technique du double prototypage (BEDARD, 1989) consistant en :

- un premier prototype rapide permettant de lever les plus grands facteurs d'incertitudes relatifs au projet ;
- un prototype évolutif permettant de réaliser le futur système par modules successifs.

Le prototype rapide touche deux niveaux de décision : l'identification des zones prioritaires affectées par l'érosion et l'étude de l'aménagement intégré.

La première étape permet de se faire une idée de l'état du territoire, d'évaluer les besoins en interventions, de proposer des variantes d'aménagement et de simuler leurs impacts. Elle a démarré par l'inventaire détaillé et l'analyse du potentiel de la documentation de base susceptible d'être utilisée, en particulier des données de télédétection (Landsat/SPOT) et des données cartographiques, photographiques ou autres disponibles dans les divers organismes concernés.

Cet inventaire et l'expression des besoins en données de base ont abouti à la mise au point d'un modèle conceptuel de données (MCD) et dictionnaire ayant servi de base au développement du prototype rapide. Celui-ci a été présenté en novembre 1992 aux différents intervenants lors d'une journée d'information qui a permis de valider les objectifs du projet, de définir le contenu et les étapes du développement du prototype évolutif.

Ensuite, vu la complexité du développement d'une telle application, le travail est poursuivi sous la forme d'un développement par étapes (prototypage évolutif), faisant croître l'application d'un stade initial très limité jusqu'à une version recouvrant l'ensemble des besoins identifiés. Il a permis d'enrichir progressivement la base de données et les fonctionnalités offertes aux utilisateurs. Du point de vue technologique, la plate-forme choisie comporte le logiciel SIG ARC/INFO et le logiciel de traitement d'images ERDAS, installés sur une station de travail SUN Sparc 10.

Données utilisées

Le tableau 1 montre les différentes données du milieu physique qui interviennent dans le processus d'aménagement. Chacun des thèmes recueillis a fait l'objet d'une couverture spécifique dans ARC/INFO. On remarque la variété de données : ponctuelles pour le modèle numérique de terrain (MNT), pixels pour les images satellites, unités cartographiques pour la pédologie, interpolation pour les zones de pente, rendant plus complexe l'intégration dans le SIG.

Tableau 1. Données utilisées.

Données de base	Mode d'acquisition	Source	Echelle	Date
Type de sol	Numérisation	Carte pédologique	1:500 000	1973
Modèle numérique de terrain (MNT)	Restitution numérique	Photographies aériennes	1:80 000	1985
Zones de pente	Analyse	MNT	Maille 50 m	1985
Couverture végétale	Analyse	Indice de végétation (TM)	Maille 20 m	1987
Occupation du sol (vérité terrain)	Restitution numérique	Photographies aériennes	1:25 000	1988
Occupation du sol	Analyse	Images Spot et TM	Maille 20 m	1991 et 1987
Degré d'affectation par l'érosion	Numérisation	Carte d'érosion	1:200 000	1978
Routes-cours d'eau	Restitution	Photographies aériennes	1:80 000	1985
Aménagements existants (vérité terrain)	Restitution numérique	Photographies aériennes	1:25 000	1988
Unités lithologiques affleurantes	Numérisation	Levé géologique direct	1:20 000	1994
Réseau hydrographique	Numérisation	Photographies aériennes	1:12 500	1963 et 1989

Méthode de planification proposée

L'application développée a reçu le nom de *Système d'Aide à la Gestion et à l'Aménagement du Territoire pour la Lutte contre l'Erosion* (SAGATELE). La particularité essentielle de cette application réside dans le fait qu'elle n'a pas été développée, comme la très grande majorité des applications SIG, en fonction du besoin en saisie, gestion ou traitement de données; destinée à des ingénieurs et planificateurs, elle devait viser à assister ces personnes dans leur activité courante, et donc s'intégrer aussi harmonieusement à leur méthode de travail. Dans cette perspective, il a donc été nécessaire de s'attaquer tout d'abord à une analyse et une reformulation des méthodes de planification des interventions CES (CHEVALLIER, 1994).

On a pu prendre conscience de la très grande influence qu'aurait à terme la disponibilité de données numériques sur la manière d'aborder une problématique CES; la discussion s'est bien vite concentrée sur la formulation de ce que devrait (ou du moins pourrait) être la méthode de travail des ingénieurs s'ils disposaient de toutes les informations sur l'état physique du territoire, ainsi que sur ses aspects socio-économiques.

L'ensemble de la réflexion a visé essentiellement à passer d'un stade *d'aménagement ponctuel*, sans possibilité de contrôle de l'impact des aménagements sur l'ensemble du

territoire, à une démarche intégrée s'appliquant à des unités cohérentes (sous-bassins hydrographiques), considérées et aménagées dans leur ensemble.

La démarche retenue comporte deux niveaux successifs de décision :

- la détermination des priorités d'aménagement ;
- la conception de plans d'aménagement intégrés.

La première étape consiste à fixer les priorités d'aménagement du bassin versant par la délimitation de zones jugées prioritaires face aux problèmes de l'érosion. La détermination des priorités est basée sur une méthode dite paramétrique permettant de hiérarchiser les phénomènes à l'origine de l'érosion.

La figure 2 présente les facteurs sélectionnés pour cette première étape; pour l'instant, une méthode de combinaison spatiale et de reclassification successive de ces diverses couches d'informations permet de guider l'opérateur vers l'identification des sous-bassins versants prioritaires. La reclassification est réalisée en associant un poids, fonction du potentiel érosif, à chaque attribut descriptif des couches impliquées dans l'analyse (Tableaux 2, 3 et 4).

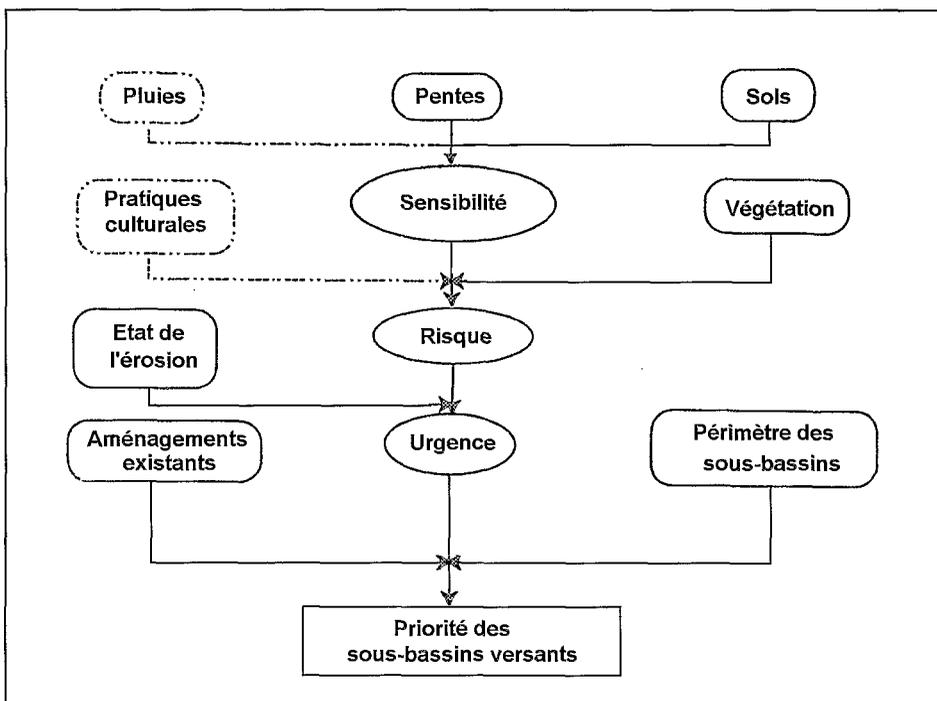


Figure 2. Détermination des priorités d'aménagement.

Tableau 2. Poids attribués aux classes de type de sol et aux classes de pente.

Type de sol	Poids	Pente			
		< 5%	5-10%	10-20%	>20%
		1	4	8	10
Sols d'apport fluvial	10	11	14	18	20
Sols d'apport modaux sur sable éolien	9	10	13	17	19
Sols calcimorphes, lithosols et/ou régosols	5	6	9	13	15
Sols calcimorphes et sols rouges méditerranéens	3	4	7	11	13
Sols calcimorphes et sols vertiques - grès	4	5	8	12	14
Sols calcimorphes et sols vertiques - sable, argile	5	6	9	13	15
Sols calcimorphes et sols vertiques - marnes	4	5	8	12	14
Sols calcimorphes et sols vertiques - marnes et calcaires	4	5	8	12	14
Sols calcimorphes et sols vertiques - marnes, argiles et grès	4	5	8	12	14
Sols bruns et brun-rouges	6	7	10	14	16

Tableau 3. Poids attribués aux classes de sensibilité et à l'indice de végétation.

Sensibilité	Poids	Indice de végétation			Nul
		Elevé	Moyen	Bas	
		1	4	8	10
Négligeable	1	2	5	9	11
Faible	4	5	8	12	14
Modérée	8	9	12	16	18
Elevée	10	11	14	18	20

Tableau 4. Poids attribués aux classes de risque et à l'état actuel de l'érosion.

Erosion actuelle	Poids	Risque à l'érosion		
		Faible	Moyen	Elevé
		1	5	10
Non affectée	2	3	7	12
Peu affectée	4	5	9	14
Moyennement affectée	8	9	13	18
Très affectée	10	11	15	20

Ainsi, le tableau 2 a permis de produire une carte de sensibilité du sol à l'érosion par l'utilisation conjointe de la carte pédologique et de la carte des zones de pente. Les différents seuils ont été déterminés par les ingénieurs de la DCES et par un pédologue spécialiste des problèmes d'érosion.

Le produit final de cette analyse se traduit par une carte d'urgence du bassin versant du Merguellil qui a servi à établir la priorité d'intervention de chaque sous-bassin versant (tableau 5).

Tableau 5. Degré d'urgence pour chaque sous-bassin versant.

Sous-bassin	Terre affectée (%)	Priorité
Maïz	100	Elevée
Redjel	75	Elevée
Ettiour	50	Moyenne
Msilah	70	Moyenne
Rhar el Tine	0	Basse
Haffouz	10	Basse
Hoshas	90	Elevée
Chara	60	Moyenne

L'étape suivante consiste en l'établissement de plans d'aménagement des versants et des cours d'eau à l'échelle du sous-bassin versant. Ces deux types d'aménagement ont été volontairement distingués car ils impliquent des prises de décision et phénomènes différents. En effet, l'aménagement des versants s'effectue sur une zone prioritaire d'intervention délimitée lors de la première étape et oblige l'ingénieur à sélectionner la technique la plus appropriée suivant les caractéristiques physiques, sociales et économiques de la région. L'aménagement des cours d'eau, quant à lui, consiste à rechercher la meilleure localisation pour un ouvrage type qui servira à la recharge de la nappe, à la création de points d'eau, etc. La combinaison de ces deux types d'aménagement conduit à la création d'étapes qui, ordonnées dans le temps, serviront à la construction de scénarios d'aménagement qui seront évalués selon des critères de nature diverse (surface aménagée, coût, etc.).

Etude du ravinement

Dans ce qui suit, on présente un exemple d'utilisation de SAGATELE et de sa base de données géographiques. Le tableau 5 montre que le sous-bassin de l'oued Redjel a une priorité élevée. Nous avons essayé de le caractériser davantage en procédant à une étude diachronique cherchant à étudier les relations entre le substratum géologique et la densité du réseau hydrographique entre 1963 et 1989. Cette étude diachronique du ravinement entre ces deux dates a permis d'analyser l'évolution de l'intensité de l'érosion en fonction de la nature lithologique des terrains affleurants dans le bassin versant en question. Les résultats sont présentés dans les tableaux 6 et 7 et la planche 5.

Tableau 6. Longueur totale des ravins par formation géologique dans le bassin versant d'oued Redjel en 1963 et 1989 (SFAR FELFOUL et al., 1994)

N°	Type de formation	Superficie (ha)	Longueur des ravins (m)	
			1963	1989
1	Oligocène inférieur à moyen	481,2	30931	49478
2	Aquitaniens basal	302,8	30766	47473
3	Aquitaniens moyen	139,1	10544	20446
4	Argiles rouges	3,1	0	30
5	Calcaire lacustre	0,3	0	0
6	Quaternaire ancien encroûté	11,7	553	927
7	Quaternaire récent	351,2	24320	34027
8	Alluvions récents	18,8	538	1062

Tableau 7. Evolution de la densité du ravinement par formation géologique dans le bassin versant d'Oued Redjel entre 1963 et 1989 (SFAR FELFOUL et al., 1994)

N°	Type de formation	1963	1989	%
1	Oligocène inférieur à moyen	64,3	102,8	59,8
2	Aquitaniens basal	101,6	156,8	54,3
3	Aquitaniens moyen	75,8	146,9	93,7
4	Argiles rouges	0	9,5	-
5	Calcaire lacustre	0	0	-
6	Quaternaire ancien encroûté	47,2	79	67,4
7	Quaternaire récent	69,2	96,9	40
8	Alluvions récents	28,6	56,4	97,2

Il ressort de ces données que le ravinement est important dans la plupart des unités géologiques étudiées. Les argiles rouges de la formation Messiouita, le calcaire lacustre ainsi que le quaternaire ancien encroûté et les alluvions récents ne sont pas bien représentés dans notre bassin versant ce qui fait que les résultats du ravinement de ces unités ne sont pas représentatifs.

Dans les autres unités qui couvrent des superficies variant entre 139,1 et 481,2 ha nous avons trouvé des densités de ravinement différentes suivant l'unité géologique. Cette densité est importante dans l'Aquitaniens basal à moyen avec respectivement 156,8 et 146,9 m/ha de ravins. Elle est suivie de près par l'Oligocène inférieur à moyen et le Quaternaire récent avec respectivement 102,8 et 96,9 m/ha. La susceptibilité à l'érosion ravinante a été déterminée par le taux d'évolution des ravins dans les différentes unités géologiques entre 1963 et 1989 (tableau 7).

On peut ainsi en déduire, par exemple, que :

- le taux de développement des ravins en une courte période de 26 ans a dépassé les 40 % pour toutes les unités géologiques avec des pointes de 93,7 % ;
- la physionomie des ravins et l'aspect de leur développement est tributaire de la nature lithologique du terrain ;
- le cours d'eau principal n'a pas subi de grands changements excepté en certains points localisés où il s'est élargi. Il ne fait donc que véhiculer les sédiments provenant de l'érosion des ravins.

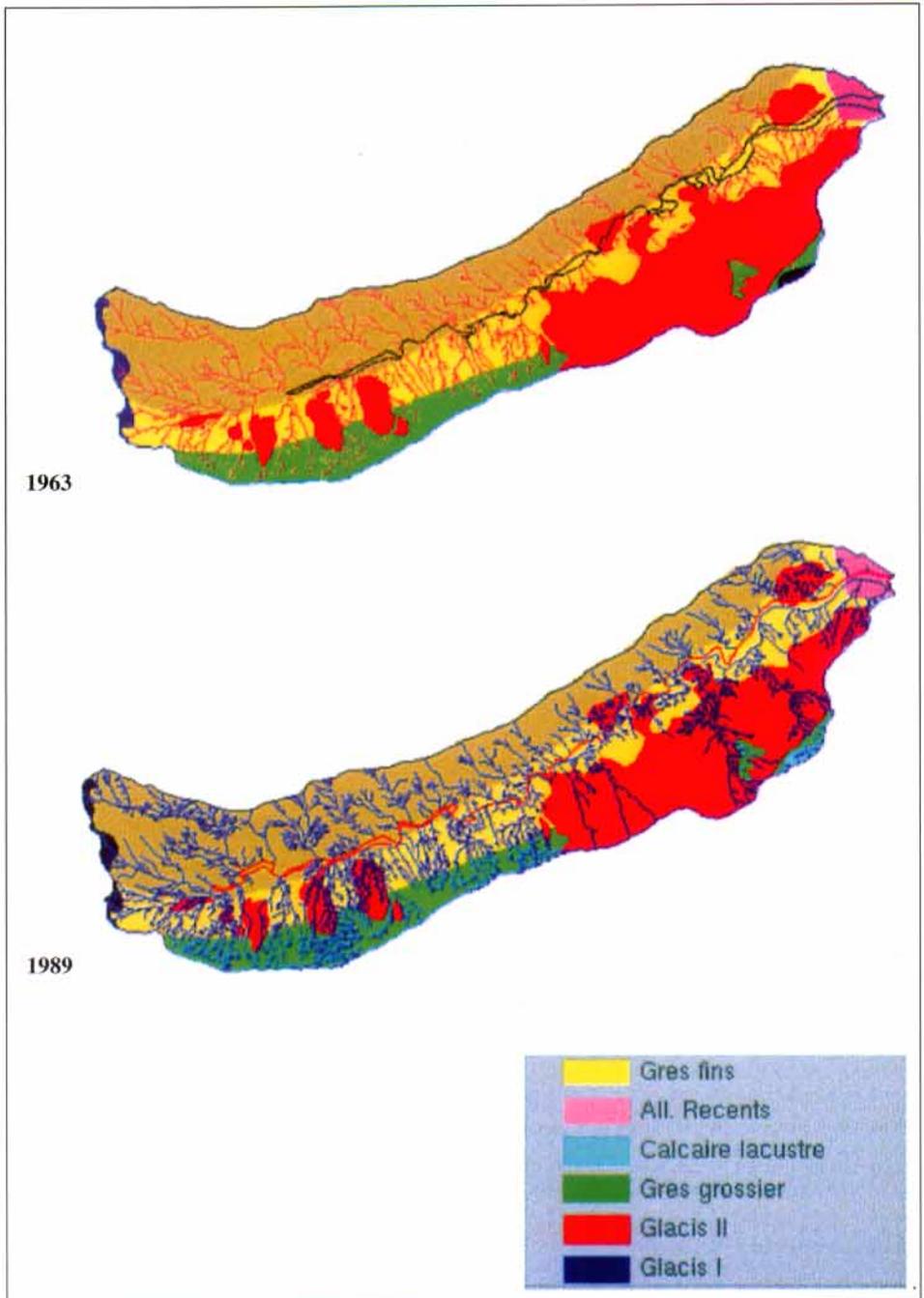


Planche 5. Réseau hydrographique par unité géologique en 1963 et 1989 (p. 227).

Conclusion

Ce projet exploite des technologies comme les SIG, la télédétection, la photogrammétrie, le GPS, la cartographie, etc. Il permet d'aborder concrètement les problèmes d'intégration de données multi-sources et propose ainsi des solutions concrètes devant servir les besoins de la DCEs. Une bonne validation et compréhension du prototype et de ses objectifs est nécessaire.

Dans le cadre de ce projet, les problèmes d'intégration de données multi-sources ont été concrètement abordés et des solutions concrètes ont été proposées pour servir les besoins de la DCEs. La méthodologie employée permet une analyse systématique et une évaluation intégrée de l'ensemble du territoire considéré.

Remerciements

L'ENIT et l'Université Laval tiennent à remercier le CRDI pour son support financier.

Bibliographie

- BEDARD Y. (1989). « Information Engineering for the Development of Spatial Information Systems: a Research Agenda », URISA '89, 27th Congress of the Urban and Regional Information Systems Association, Boston Mass., URISA.
- BOUSSEMA M.R., RAIS S., KALLALA A., CHEVALLIER J.J., THOMSON K.P.B., POULIOT J. (1992). « Système d'information à référence spatiale basé sur des données de télédétection pour la conservation des eaux et des sols (cas du bassin versant de l'oued Merguellil en Tunisie) », GIS/SIG 94, Ottawa, 24-26 mars, pp 868-876.
- CHEVALLIER J.J., POULIOT J., THOMSON K.P.B., BOUSSEMA M.R., (1993). « Systèmes d'aide à la décision à référence spatiale (SADRS) pour les pays en développement: le projet CRDI », Université Laval, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, GIS/SIG 93, Ottawa, Canada.
- CHEVALLIER J.J., POULIOT J., THOMSON K.P.B., BOUSSEMA M.R. (1994). « Systèmes d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie) », Colloque Tuniso-Canadien sur les SIG, Hammamet, 1-2 novembre.
- POULIOT J., THOMSON K.P.B., CHEVALLIER J.J., BOUSSEMA M.R. (1993). « Utilisation des données satellites comme aide à l'identification des zones à haut risque d'érosion », 16^{ème} symposium canadien sur la télédétection, Sherbrooke, juin, pp. 515-520.
- SFAR FELFOUL M., SNANE M.H., BOUSSEMA M.R. (1994). « Intégration de certains facteurs biophysiques dans l'espace pour l'étude du ravinement dans le sous-bassin versant d'oued Redjel dans la région de Haffouz », Colloque Tuniso-Canadien sur les SIG, Hammamet, 1-2 novembre.