

ESSAI DE CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES A
L'EROSION DANS LE BASSIN DE BOUDINAR
(RIF NORD-ORIENTAL MAROCAIN)
Utilisation combinée d'un SIG et de la télédétection



Pascale COUPRIE

MEMOIRE DE D.U. DE 3^{ème} CYCLE

Sous la direction de G. DE NONI et R. CHAUME (LCSC)

Session de juin 1998

Montpellier

Fonds Documentaire IRD



010033769

Fonds Documentaire IRD
Cote : A* 33769 Ex :

A* 33769

BIBLIOTHEQUE LCSC

Université Paul Valéry
Montpellier III

ORSTOM
Laboratoire d'étude du comportement
des sols cultivés

**ESSAI DE CARTOGRAPHIE DES ZONES SENSIBLES
A L'EROSION DANS LE BASSIN DE BOUDINAR
(RIF NORD-ORIENTAL MAROCAIN)
Utilisation combinée d'un SIG et de la télédétection**

COUPRIE Pascale

⇒ Mémoire de D.U. de 3ème cycle préparé sous la responsabilité de
Mr Joseph SCHULTZ en collaboration avec le laboratoire d'étude du
comportement des sols cultivés de l'ORSTOM.

⇒ Note obtenue :

Session de juin 1998

Fonds Documentaire IRD
Cote : A* 33769 Ex :

Notice analytique

FILIERE : Diplôme Universitaire de 3^{ème} cycle en cartographie

AUTEUR	NOM		PRENOM	
	COUPRIE		Pascale	
TITRE	Essai de cartographie des zones sensibles à l'érosion dans le bassin de Boudinar (Rif nord-oriental marocain). Utilisation combinée d'un SIG et de la télédétection			
UNIVERSITE PAUL VALERY	Nom et prénom du directeur de mémoire		Stage sous convention: organisme et lieu	Nom et prénom du maître de stage
	CHAUME Régine DE NONI Georges		ORSTOM (Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés)	SCHULTZ Joseph
COLLATION	Nb. de pages	Nb. de volumes	Nb. d'annexes	Nb. de réf. biblio.
	50	1	1	24
MOTS-CLES	Rif nord-oriental marocain, bassin de Boudinar, cartographie, érosion des sols, SIG, télédétection			
TERRAIN D'ETUDE OU D'APPLICATION	Rif nord-oriental marocain, partie du bassin versant de Boudinar			Année universitaire : 1997-1998
<p>RESUME</p> <p>Le bassin de Boudinar est le siège d'une dynamique érosive importante. Cette dernière résulte de l'interaction entre différents paramètres. La structure, elle marque la région par un relief vigoureux et des pentes très accusées. La lithologie est dominée par des substrats différents (schistes en montagne, marneux et détritiques à l'intérieur du bassin). Les pluies se concentrent sur quelques jours en saison humide ; leurs actions sont agressives. L'abandon des versants par les hommes et le manque d'entretien permet la recrudescence de l'érosion. L'objectif est de réaliser une carte de sensibilité à l'érosion en utilisant les outils SIG et la télédétection.</p>				

Remerciements

Le présent rapport clôt le stage pratique de 4 mois effectué au sein du Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés du centre ORSTOM de Montpellier.

Je tiens ainsi à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail :

Régine CHAUME, directeur de recherche, pour son encadrement technique et sa disponibilité ;

Nicolas SABY co-stagiaire, pour sa bonne humeur, sa grande patience, sa collaboration permanente et sa compétence en matière de SIG et de télédétection ;

Georges DE NONI, directeur du laboratoire (LCSC) pour sa sympathie et pour m'avoir permis de réaliser ce mémoire au sein du laboratoire ;

L'ensemble du laboratoire (LCSC), chercheurs, thésards et stagiaires pour leurs encouragements et leur grande sympathie.

Carole, Laure, Philippe et Vanessa collègues du D.U. pour leur soutien et leur gentillesse.

Sommaire

Notice analytique -----	p. 1
Remerciements -----	p. 2
Sommaire -----	p. 3
Introduction -----	p. 4
Première partie : le bassin de Boudinar ----	p. 5
1. Situation géographique -----	p. 7
2. L'érosion dans le bassin de Boudinar -----	p. 7
Seconde partie : matériel et méthode ----	p. 16
1. Objectifs et principes -----	p. 17
2. Données et moyens techniques -----	p. 20
3. Traitement des données sur TeraVue -----	p. 23
4. Conception du projet SIG -----	p. 27
Troisième partie : résultats -----	p. 32
1. Présentation -----	p. 33
2. Analyse et interprétation de l'image finale -----	p. 36
3. Valorisation des résultats -----	p. 39
Conclusion -----	p. 43
Bibliographie -----	p. 44
Table des tableaux -----	p. 46
Table des figures -----	p. 47
Table des photos -----	p. 48
Tables des matières -----	p. 49
Annexes -----	p. 51

Introduction

Le bassin de Boudinar qui se situe dans une région de transition entre le Rif central élevé et humide et les vastes bassins et plaines arides de l'est, est un espace fragile.

Il est le siège d'une dynamique érosive importante. Cette dernière résulte de l'interaction entre différents paramètres :

- la structure du relief marqué par des paysages aux versants vigoureux et aux pentes très accusées (pour la plupart elles sont supérieures à 30%) ;
- la lithologie, dominée par des substrats différents et peu résistants ;
- les excès du climat (la concentration et agressivité des pluies, la sécheresse de la dernière décennie) jouent un rôle important dans le déclenchement des processus d'érosion tels que le ravinement, le décapage ou les mouvements de masse ;
- des facteurs anthropiques, tels que l'abandon des versants par les hommes, les pratiques culturelles inadéquates et le manque d'entretien permettant la recrudescence de l'érosion.

Depuis plusieurs années, ces phénomènes érosifs sont étudiés par de nombreux chercheurs français et marocains, en collaboration avec le laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC) de l'ORSTOM.

L'objectif de cette étude est de réaliser une carte de sensibilité des sols à l'érosion en utilisant la télédétection et le croisement des couches d'informations telles que la lithologie, la pente et l'occupation du sol en utilisant la méthode de l'arbre de décision.

Ce rapport s'articule autour de trois parties bien distinctes présentant tout d'abord le cadre de l'étude puis les méthodes utilisées pour le traitement des données, enfin la partie résultats nous permet d'apprécier la sensibilité des sols à l'érosion.

Première partie

Le bassin de Boudinar

1. Situation géographique (voir figure n°1)

✓ Le bassin versant de Boudinar se situe dans une région de transition entre le Rif central élevé et humide et les vastes bassins et plaines arides qui s'étendent à l'est.

De forme triangulaire, largement ouvert sur la mer qu'il borde sur 20 km, il s'enfonce à l'intérieur des terres sur une profondeur aussi grande. Il s'agit d'une région relativement basse ne dépassant pas 300 ou 400 m d'altitude, dominée à l'ouest par les crêtes du massif Tamsamane, au sud par celles des Bni-Touzine qui sont comprises entre 1400 et 1000 m à l'est enfin par les hauteurs du massif métamorphique des Bni-Saïd qui se maintiennent encore autour de 1000 m. Les plaines sont à peu près inexistantes ; elles sont au contraire de bas plateaux, horizontaux ou inclinés, largement étalés ou morcelés par des réseaux de petites vallées (G. Maurer, 1968). Sa surface, couvrant 34 500 hectares, est drainée par l'Irhzar Amekrane et ses affluents.

✓ La zone d'étude choisie fait partie du bassin de Boudinar et appartient au Rif oriental marocain. Elle couvre une zone de 250 km² environ.

Les altitudes sont comprises entre 900 et 1200 m à l'ouest et culminent à plus de 1400 m au sud. Cet espace montagneux est entaillé par de nombreux cours d'eau. Il en résulte des pentes raides (photo n°1) et une forte opposition entre les versants. Ceux exposés au sud et au sud-est sont courts et raides, ils ne portent pas de couverture d'altération contrairement à ceux orientés au nord et au nord-ouest (photo n°2).

A l'intérieur du bassin, le relief est constitué de plateaux disséqués correspondant à des niveaux du quaternaire ancien, le plus haut se trouve à une altitude variant entre 350 400 m, les niveaux portent des sols rouges épais.

2. L'érosion dans le bassin de Boudinar

On constate une dynamique de surface très active qui se manifeste par des processus variés (mouvements de masse, ravinement, suffosion, décapage). Ces processus affectent de manière plus ou moins grave plus de 80% de la surface du bassin (H.EL Abbassi, 1998).

2.1. Les formes d'érosion

Les différentes formes d'ablation observées sont de trois types : le décapage, le ravinement et les mouvements de masse.

PHOTO 1 Vue en direction du sud-ouest. La photo comprend toute la partie occidentale du secteur étudié. C'est une zone montagneuse profondément disséquée par le réseau hydrographique. Les sommets culminent à plus de 1100 m au centre de la montagne. Les substrats géologiques sont essentiellement schisteux. Les croupes au premier plan correspondent à des accumulations détritiques quaternaires. Au centre, la vallée de l'oued principal.



PHOTO 2 Versant exposé au nord. Substrat schisteux altéré couvert d'une formation détritique rouge. Ces versants sont exploités par les hommes (notez l'importance des aménagements: talus et cordons de pierres sèches). De nombreux ravins et de mouvement de masse affectent ces versants courts et plus raides dépourvus de couverture d'altération. Au fond, à gauche, partie sud des plateaux (notez l'importance de la présence humaine densité moyenne dans ce secteur : 300 hab/km²).

- Le décapage (érosion en nappe)

Il est lié au ruissellement diffus, plus ou moins intense. Il se traduit par l'apparition d'une mosaïque de sols de teintes variées qui se juxtaposent dans l'espace et par la concentration superficielle d'éléments grossiers sous forme de pavage, des sols amincis maintenus par une végétation très ouverte.

- Le ravinement (photo n°3)

Il est l'œuvre du ruissellement concentré. Deux cas de ravinements concentrés¹ se présentent :

✓ ravinement concentré linéaire : l'incision est linéaire et est due à la seule action des eaux de ruissellement.

✓ ravinement concentré avec élargissement des ravins : l'évolution se fait sous l'action combinée du ruissellement et de phénomènes annexes tels que les micro-éboulements des berges des ravines..

- Les mouvements de masse (photo n°4)

✓ les glissements superficiels : il s'agit d'arrachements mineurs qui n'affectent que la couverture détritique, sans faire apparaître le soubassement rocheux.

✓ la suffosion : ce sont des mouvements de masse qui résultent de phénomènes de soutirages dus à un écoulement hypodermique. Ils se présentent dans le paysage sous forme de cavités plus ou moins profondes (0,5 à 1,5 m), ou bien sous forme de tassement favorisés par un appel au vide.

✓ les coulées boueuses : elles ne s'amorcent que lorsque les matériaux affectés atteignent leur limite de liquidité, par suite d'une forte saturation en eau. Les matériaux arrachés et mobilisés subissent de grandes déformations et s'écoulent vers le bas des versants, où ils constituent des bourrelets de taille diverses, laissant une cicatrice d'arrachement au niveau de la zone de départ.

2.2. Répartition spatiale des formes d'érosion

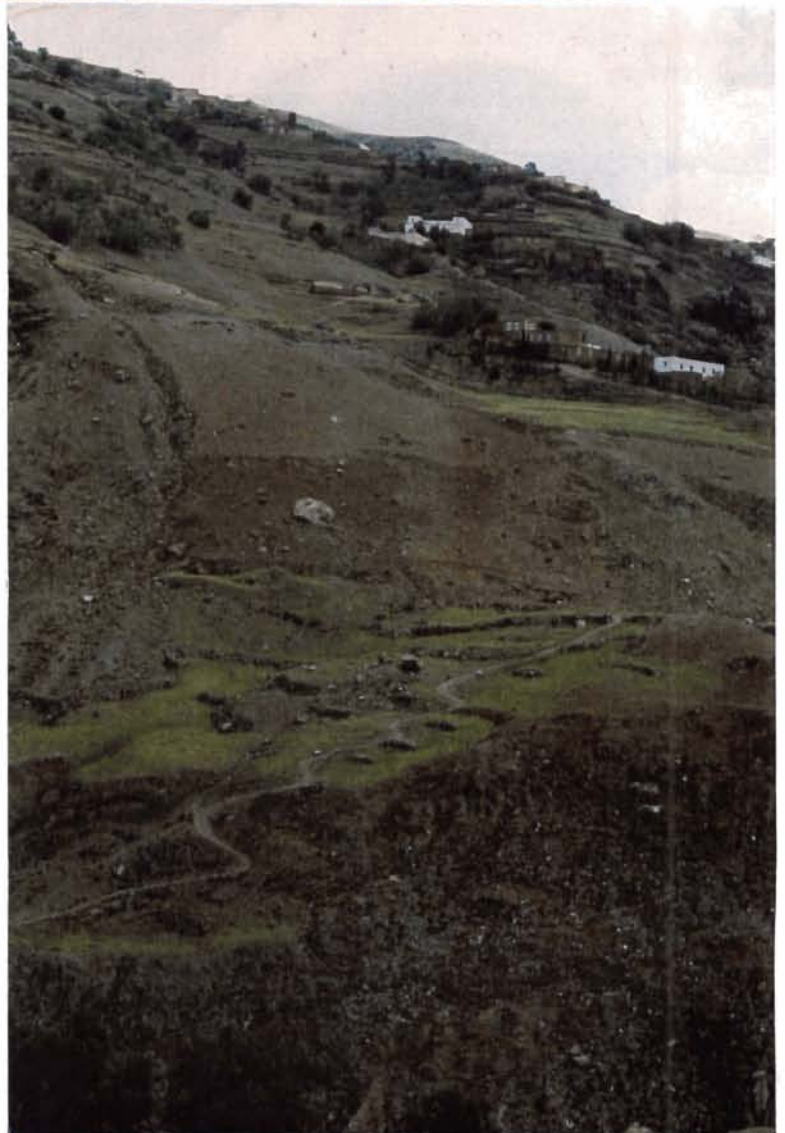
La répartition spatiale des processus d'érosion est très inégale. Elle obéit à des conditions qui président à leur genèse et à leur développement. Ainsi, le ravinement est très fréquent dans le matériel néogène et marno-schisteux de Boudinar, dans les formations superficielles quaternaires qui drapent les versants situés au NW-SW, dans les montagnes des Beni-Touzine, des Tamsamane, et des Beni Saïd (H. EL Abbassi, 1997).

¹ Les entailles s'organisent en un système hiérarchisé.

PHOTO 3 substrat conglomératique (gorges traversées par l'oued principal) débarrassé de couverture détritique réduite à des placages discontinus. Evolution par ravinement et par décapage intense affectant couverture d'altération issue des schistes



PHOTO 4 mouvement de masse affectant un versant taillé dans les schistes



Le décapage affecte tous les versants secs exposés au S-E et au S-W, les versants dépourvus de couverture détritique meuble et les versants de raccordement entre les niveaux quaternaires. Les mouvements de masse sont plus circonscrits dans l'espace, on les rencontre essentiellement dans les montagnes des Beni-Touzine et des Tamsamane (H.EL Abbassi).

2.3. L'environnement et les causes

2.3.1. Une lithologie peu résistante

Ces reliefs sont taillés dans des substrats de lithologie différents. Dans la montagne, il s'agit surtout de schistes armés parfois de bancs calcaires et gréseux et de marno-schistes. A l'intérieur du bassin, les faciès sont marneux au nord (photo n° 5) et détritiques au sud.

Ces roches sont en général peu résistantes tel que les schistes ou très tendres tels que les marnes et marno-schistes. Leurs propriétés physico-chimiques sont peu favorables à leur stabilité : perméabilité faible, limites mécaniques souvent basses, teneurs élevées en éléments dispersants, cortège minéralogique riche en familles gonflantes (H.EL Abbassi).

2.3.2. Un climat méditerranéen

Les excès du climat jouent un rôle fondamental dans le déclenchement des processus d'évolution actuelle. De type méditerranéen, il se distingue par la succession de deux saisons contrastées : il comporte une période humide généralement courte centrée sur l'automne et l'hiver et une longue saison sèche.

Pendant la saison sèche, le bassin se trouve sous l'influence d'anticyclones qui naissent sur le continent surchauffé.

La période fraîche connaît une circulation atmosphérique plus complexe qui se manifeste par une grande fréquence des temps cycloniques perturbés, en alternance avec des situations anticycloniques plus stables accompagnées de journées ensoleillées et fraîches.

Les précipitations et températures

Les précipitations agissent par leur durée, leur intensité et leur fréquence.

Dans ce milieu elles sont rares, irrégulières et agressives ; elles tombent souvent sous forme d'averses orageuses de courte durée et espacées,

Les données pluviométriques et thermiques, moyennes et mensuelles de la station de Boudinar qui permettent d'illustrer nos propos à travers le diagramme ombrothermique ci-dessous.



PHOTO 5 Longues croupes constituant le haut niveau à l'intérieur du bassin. Les versants sont taillés dans des marnes du Miocène supérieur. Leur profil est régulier et les pentes sont modérées. Une couverture détritique épaisse de 1 à 2 m recouvre les marnes. Au premier plan un ravin récent : au centre un niveau du quaternaire récent bordant le lit d'un oued. Toutes les parcelles allongées du haut en bas sont travaillées au tracteur.

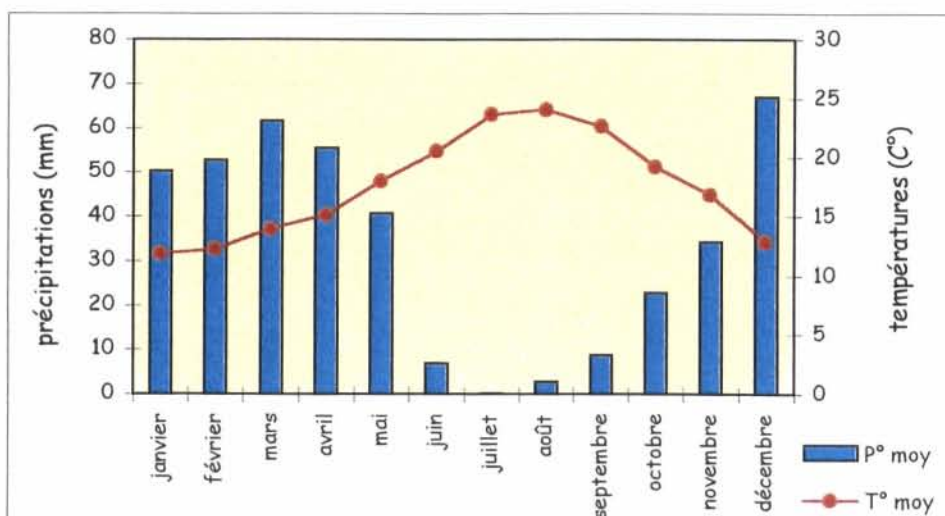


Figure n°2 : diagramme ombrothermique de la station de Boudinar

L'analyse du graphique montre les observations suivantes :

Pour les précipitations

- Concentration des pluies au printemps et en hiver.
- Au printemps, avril est le mois le plus pluvieux.
- En hiver, les précipitations se concentrent souvent au mois de mars, et en automne, en novembre ou décembre. Elles sont très faibles voire absente pendant la période estivale.

Les périodes critiques d'érosion des sols se situent donc en hiver et au printemps, périodes qui s'accompagnent d'un ravinement intense des sols et de mouvements de masse.

Pour les températures

- La moyenne annuelle est de 17,4°C, ce qui indique un climat doux. Ce sont les minima et maxima qu'il faut prendre en compte car ils conditionnent la vie du couvert végétal et déterminent le comportement des roches et des dépôts, surtout quand ils sont dépourvus d'écran protecteur.
- Les températures maximales sont aux mois de juillet et août (23,7°C et 24,1°C).

Ces températures élevées ont des conséquences importantes sur le milieu car elles s'accompagnent d'évaporation intense. Les réserves hydriques diminuent et de nombreuses sources et oueds tarissent. Ceci entraîne l'arrêt de la végétation et laisse le sol à nu qui subit de fortes tensions se traduisant par des réseaux de fentes de retrait. Elles entraînent également la dessiccation des formations superficielles.

- Les températures minimales sont douces (les températures les plus basses sont au mois de janvier avec 11,9°C). En montagne, les températures sont plus froides. Les chutes de neiges sont fréquentes en hiver sur les sommets situés à plus de 900 m d'altitude, les gelées sont presque constantes au cours de cette période.
- La saison fraîche voit les réserves hydriques se reconstituer et la végétation redémarrer.

La prépondérance de pentes raides et la présence de stocks de matériaux facilement mobilisables constituent avec la médiocrité du couvert végétal des facteurs d'aggravation de cette évolution de l'érosion.

2.3.3. Histoire agraire et actions anthropiques

L'homme est un agent important dans l'évolution des milieux de cette région. L'occupation de ce territoire s'est réalisée après une longue histoire, souvent mouvementée, pendant laquelle des liens étroits se sont tissés entre la population autochtone et son milieu naturel. Ces liens se sont concrétisés par un équilibre dynamique entre les besoins de la population et les potentialités de ce milieu semi-aride à aride à contexte écologique très fragile.

Cette région se caractérise, sur le plan humain, par la présence d'une population dense, (les densités atteignent partout 100 hab/km²), composée de vieux cultivateurs sédentaires.

La population s'organise en plusieurs tribus qui occupent un espace morcelé.

Depuis quelques décennies, les sociétés locales font face à de nombreuses transformations qui bouleversent leur fonctionnement. Et, en raison des rapports très étroits que ces sociétés entretiennent avec le milieu naturel, ces mutations se répercutent directement sur celui-ci. Les mécanismes qui régissent ces transformations sont essentiellement d'origine anthropique. En effet, la pression de la population locale, au nombre toujours croissant, sur des ressources en eau et en sol très limitées, et souvent dans un état de dégradation très avancé, s'est soldée par une situation de crise qui a poussé une grande partie de cette population à l'émigration. Ce phénomène, très ancien dans la région, est devenu, avec le temps, un facteur qui joue un rôle moteur dans le processus de transformation des sociétés et de leur milieu naturel.

L'émigration, devenant désormais collective, a provoqué une réelle déprise rurale entraînant l'abandon des aménagements et de nombreuses parcelles cultivées et le développement d'une dynamique érosive sévère.

De plus, la sécheresse, devenant plus importante, surtout vers la fin des années 70 et le début des années 80, a accentué le déclin des réserves hydriques. La surface irriguée a connu une grande régression, les aménagements qui lui sont liés (canaux, réservoirs et terrasses) ne sont plus entretenus et se détériorent (H.EL Abbassi).

Enfin, les pratiques culturales sont inadéquates car elles consistent essentiellement en labours dans le sens de plus grande pente.

Ce phénomène se développe actuellement dans le piémont, sur les versants du niveau supérieur. Plusieurs facteurs y concourent : le partage des parcelles entre les héritiers devient de plus en plus important et conduit à l'extension de la micro-propriété, souvent étroite et allongée le long du versant, ce qui ne facilite pas le labour suivant les courbes de niveau surtout si les parcelles à côté sont cultivées. Un changement important dans le cadre socio-économique est dû à l'ouverture sur l'Europe. Cet argent crée une nonchalance chez les jeunes qui acceptent que rarement de travailler dans les champs. Cette situation est renforcée par l'introduction et l'augmentation du nombre de tracteurs. La taille des parcelles est trop petite pour ces engins qui sont obligés de labourer dans le sens de la pente, de haut en bas, ce qui accroît le risque de ravinement et de décapage intense débarrassant le substrat marneux stérile de sa couverture détritique plus fertile. Les versants à forte déclivité commencent, depuis quelques années, à être abandonnés, surtout lorsqu'ils sont loin des maisons de leur propriétaire (H.EL Abbassi).

Seconde partie

Matériel et méthode

1. Objectifs et principes

1.1. Objectif de l'étude

Il s'agit de réaliser la cartographie des zones sensibles à l'érosion du bassin de Boudinar à partir de l'interprétation de données satellites SPOT et du croisement des couches d'information à l'aide d'un logiciel de SIG.

1.2. La télédétection : science et technique de la détection à distance

La télédétection se définit comme «l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (J.O. du 12 décembre 1980 et Commission Ministérielle de la terminologie de la télédétection aéro-spatiale COMITAS 1988).

Le terme recouvre à la fois la télédétection photogrammétrique et la télédétection satellitale : dans le premier cas les ondes électro-magnétiques impressionnent une émulsion chimique, dans le second cas, c'est un capteur (radiomètre, radar...) qui les enregistre et les code ; par exemple SPOT code les mesures sur 8 octets soit 256 valeurs radiométriques possibles (de 0 à 255). Ces valeurs quantifient, pour chacune des bandes spectrales mesurées, l'intensité de l'énergie électromagnétique réfléchie par la surface terrestre ayant atteint le capteur en orbite. Cette intensité appelée luminance, est donnée dans chaque canal (XS1, XS2 et XS3 pour SPOT).

Méthodologie d'utilisation de la télédétection en pédologie

L'interprétation de l'imagerie spatiale en pédologie se heurte aux mêmes problèmes que ceux rencontrés avec les photographies aériennes. L'image obtenue est le résultat de l'énergie réfléchie sur les différents objets à la surface du sol et captée par le satellite. Cette surface est recouverte bien souvent par la végétation spontanée ou les cultures. En outre, même si la surface du sol est nue, des sols différents peuvent avoir des luminances identiques. A l'inverse, des sols indentiques peuvent avoir des luminances différentes. Les quantités d'énergie réfléchies ou émises dépendent, d'une part, des conditions d'éclairement, d'autre part, de l'état de surface du sol, enfin de son environnement. Ainsi, un même sol peut avoir dans le temps plusieurs signatures spectrales.

On peut noter que toute donnée de télédétection est un instantané qui fournit les informations sur les objets au temps T c'est à dire au moment de la saisie. Ainsi, le classement des éléments observés à chaque date de prises de données dépend des cycles naturels et des pratiques culturales.

1.3. Les Systèmes d'Information Géographique

Un Système d'Information Géographique est conçu pour répondre à toutes les questions pouvant avoir une implication géographique. La société française de photogrammétrie et de télédétection a proposé, en octobre 1989, la définition suivante : un SIG est un « Système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace ».

Le Système d'Information Géographique ne se contente pas de stocker une masse d'information de manière passive, il permet de traiter, d'en extraire des données particulières, de croiser entre elles des données de nature ou d'origine différentes, de vérifier une hypothèse, et par exemple, grâce à des sémantiques appropriées (formes, couleurs) de mettre en évidence une caractéristique ou une loi.

Les SIG ont tous les usages des cartes puisqu'ils sont capables d'en produire ;

Ils permettent également :

- ✓ d'établir des cartographies rapides et de mettre en place des processus de choix spatiaux interactifs.
- ✓ de réunir dans un même système des données issues de sources différentes et de les combiner entre elles.
- ✓ de réagir rapidement après des événements ou des catastrophes ayant un impact sur le territoire.

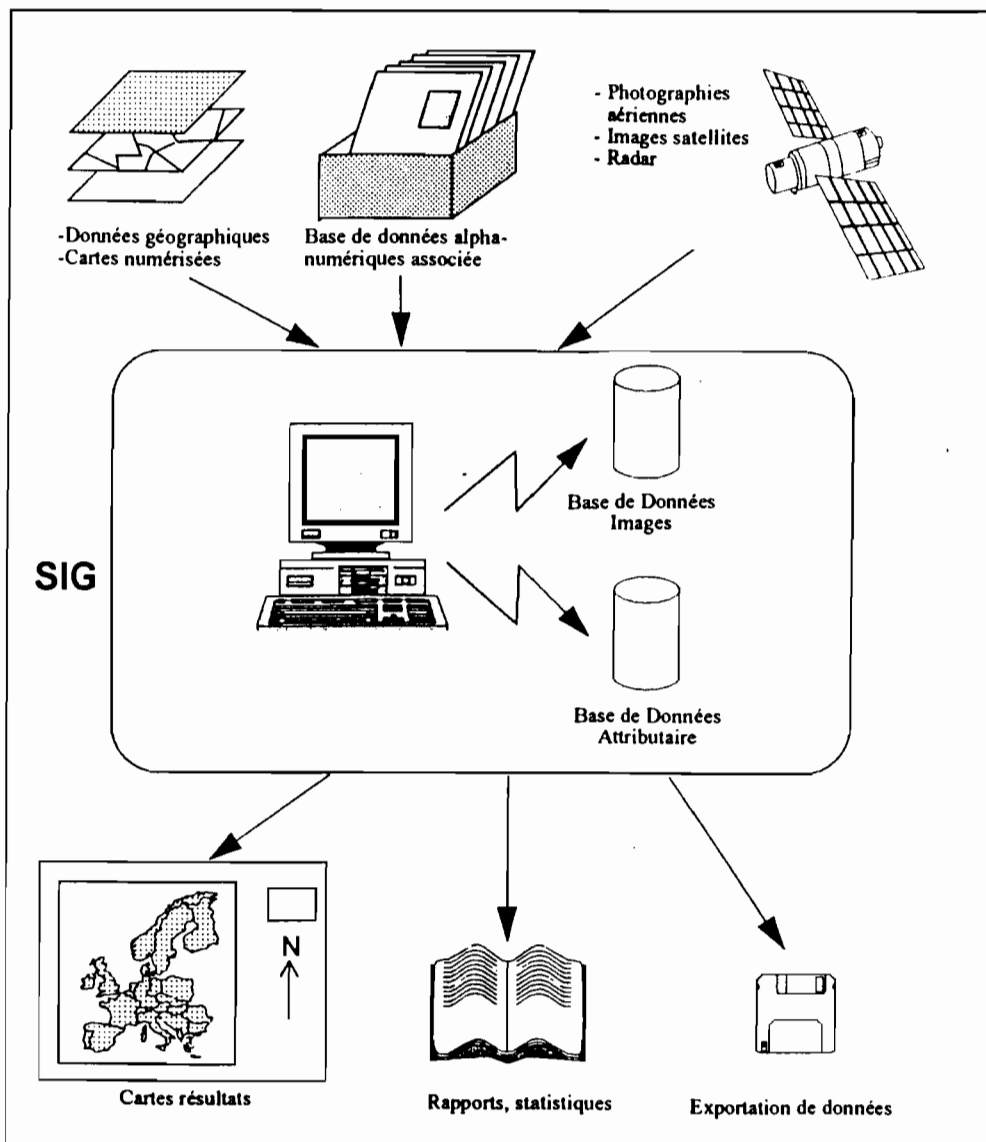


Figure n°3 : schéma d'un Système d'Information Géographique

2. Données et moyens techniques

2.1. Données satellitales et cartographiques

2.1.1. Les données SPOT

SPOT est un satellite équipé de détecteurs ou radiomètres disposés en ligne (instrument de mesure HRV) qui enregistre en continu au fur et à mesure de son déplacement orbital les valeurs physiques réfléchies par les surfaces terrestres.

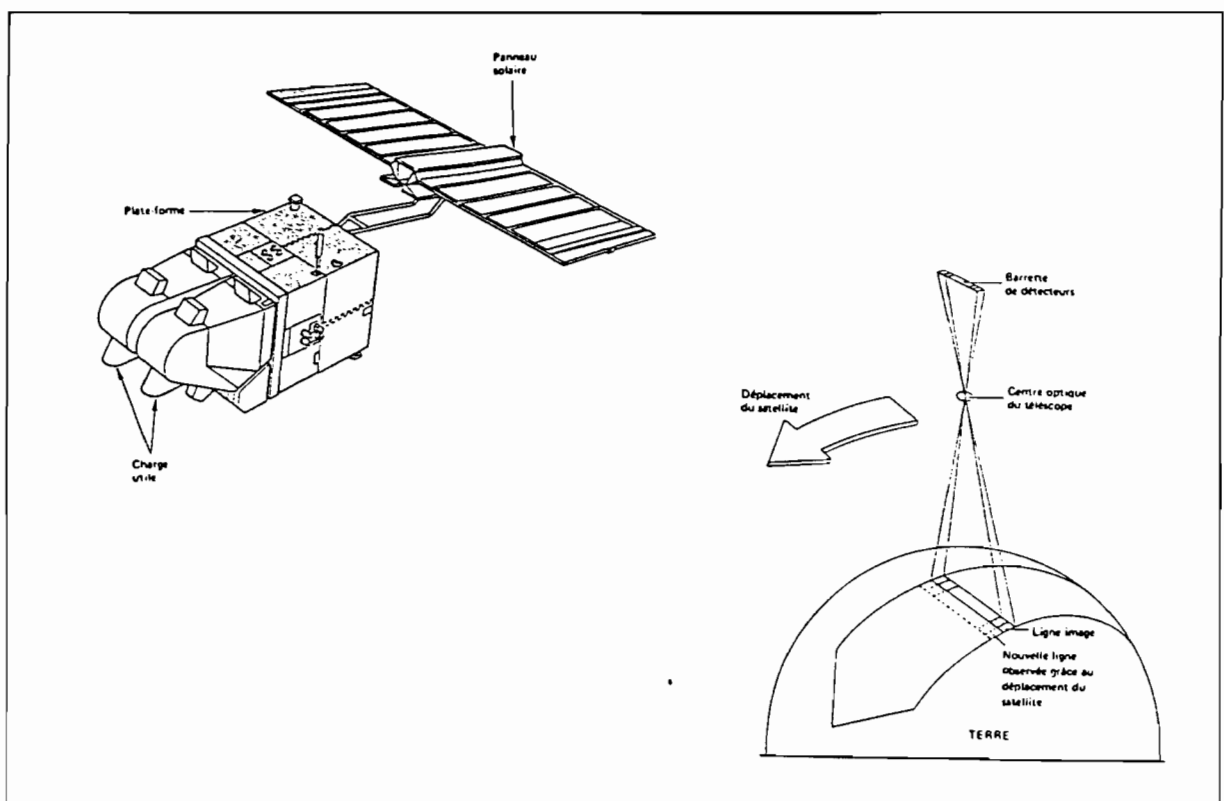


Figure n°4 : vue d'ensemble du satellite SPOT et mode d'enregistrement d'une image
(source : guide des utilisateurs de données SPOT)

Le système SPOT dispose d'un référencement géographique propre : la Grille de Référence Spot GRS. C'est un cadrillage composé de noeuds situés à l'intersection de colonnes K et de lignes J. Les repères K-J attribués à toute scène nouvelle constituent l'un des éléments des données descriptives d'une image. L'ensemble des terres émergées du globe sont référencées par le système GRS. Le découpage du Maroc est représenté par la figure n°5.

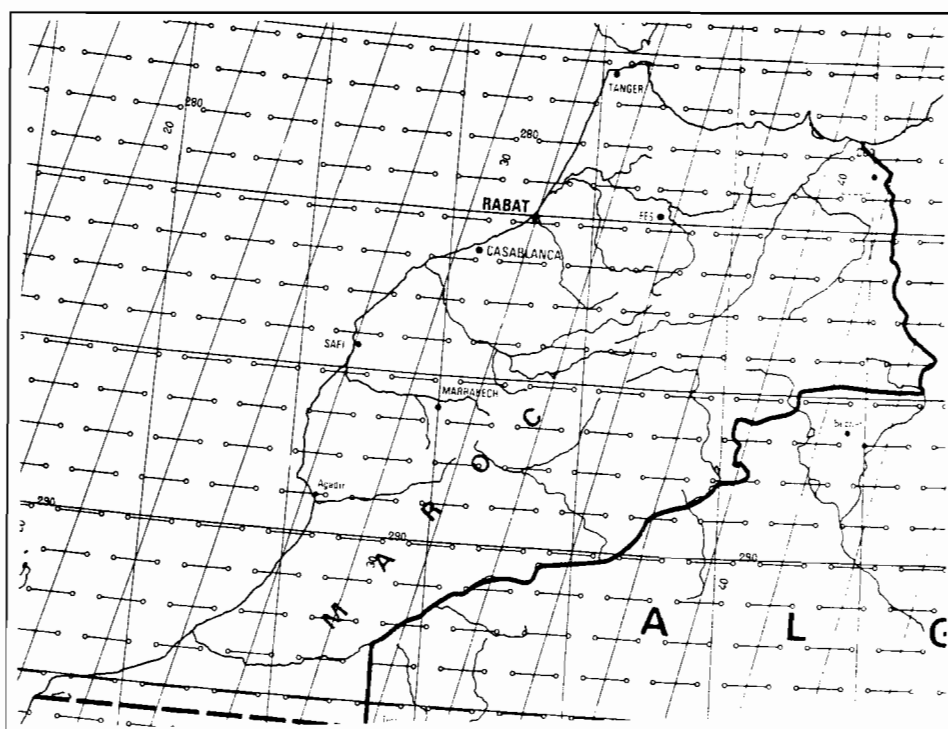


Figure n°5 : extrait de la grille de référence SPOT : Maroc

Une image SPOT multispectrale a été sélectionnée pour la réalisation de l'étude. Elle est localisée par la colonne K numérotée 038 et la ligne J numérotée 280.

Référence en K-J	Date de prise de vue	Latitude/Longitude centre de la scène	Angle d'incidence α
038-280	04/04/95	3°37'3" W 34°52'42" N	R 25,5°

Tableau n°1 : image SPOT XS sélectionnée

En mode multispectral, le balayage à détecteurs fixes génère trois canaux composés de lignes et de colonnes où le pixel, point élémentaire de la mesure, est de 20 m x 20 m au sol. Les canaux XS1, XS2 et XS3 contiennent les enregistrements des ondes électromagnétiques réfléchies par la surface terrestre dans les bandes spectrales suivantes :

Ondes électromagnétiques réfléchies par les surfaces naturelles	Canal d'enregistrement	Longueur d'onde (μm) correspondante
Vert	XS1	0,50 \Rightarrow 0,59
Rouge	XS2	0,61 \Rightarrow 0,68
Proche infra-rouge	XS3	0,79 \Rightarrow 0,89

Tableau n°2 : bandes spectrales captées par SPOT XS.

2.1.2. Les documents cartographiques

Les cartes du Maroc sont difficile à trouver ; mais nous avons pu obtenir une photocopie celle de Boudinar au 1/50 000.

La zone d'étude couvre une surface de 250 km². Les cartes thématiques dont nous disposons représentent cette zone, elles ont été réalisées par Hassan El Abbassi à partir de relevés sur le terrain. Ces documents récents (1995) représentent l'occupation des sols, les familles lithologiques et la dégradation des sols. Elles sont réalisées dans logiciel de SIG Alliance¹.

2.2. Les moyens informatiques

Le laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés (LCSC) dispose d'équipements spécifiques aux traitements d'images satellites et de photographies aériennes.

- PC pentium 200 et 200 MMX : 2 postes dédiés au traitement d'images,
- Scaneur format A4 couleur HP,
- Graveur de CD-Rom HP,
- Imprimantes HP 870 Cxi couleur format A4 et EPSON Stylus 1520 couleur format A3 et A2.

Sur PC, TeraVue² est un logiciel complet de gestion et de traitement d'images multispectrales et Alliance, un SIG qui associe au sein d'un dispositif unique, les images satellitaires et aériennes, les données cartographiques vectorisées ou scannées et les paramètres exogènes issues des bases de données géographiques et urbaines.

¹ Alliance : vendu par la société ICARE International (imagerie cartographie études)

² TeraVue : vendu par les éditions de la Boyère

3. Traitement des données sur TeraVue

3.1. Correction géométrique et extraction d'une imagerie

- **Correction géométrique**

Les données numériques acquises par le satellite SPOT sont traitées par le logiciel TeraVue pour les travaux de correction et d'analyse.

Pour le rétablissement des données numériques dans un format et une géométrie conformes à une projection cartographique ou à une autre image, la méthode classique des points d'appui ou amers est employée ici. Elle s'appuie sur un modèle mathématique de déformation qui établit une relation entre les coordonnées cartographiques du système de projection utilisé.

La démarche d'analyse et d'interprétation des informations numériques est testée sur une imagerie créée par extraction et recalée géographiquement. La figure n°6 précise sa position par rapport à l'image entière.

- **Extraction**

Le traitement d'images entières de satellites sur CD-Rom peut prendre beaucoup de temps sur les PC , nous avons donc réalisé une extraction de notre zone d'étude.

L'imagerie créée couvre 250 km² et correspond à 748 lignes et 552 colonnes de pixels d'une résolution de 20 mètres. Le programme effectue l'extraction des différents canaux.

3.2. Préparation de l'image à la visualisation

Un canal comme XS1, XS2 ou XS3 est une matrice de n pixels affectés de 256 valeurs possibles (comptes numériques). La visualisation d'un canal se fait donc grâce à une palette de 256 niveaux de gris. Pour faciliter la visu-interprétation et la rendre plus fidèle à la réalité terrain, il existe un ensemble de techniques d'amélioration de la qualité des images, fondées sur les caractéristiques de la vision humaine.

3.2.1. Amélioration du contraste de l'image

Il est à préciser que c'est sur l'imagerie représentant la zone d'étude que nous avons réalisé les traitements et non sur l'image entière.

Un étalage de dynamique sur l'ensemble fut d'abord effectué sur chacun des trois canaux par visualisation des histogrammes des comptes numériques. Cette technique

Figure n°6

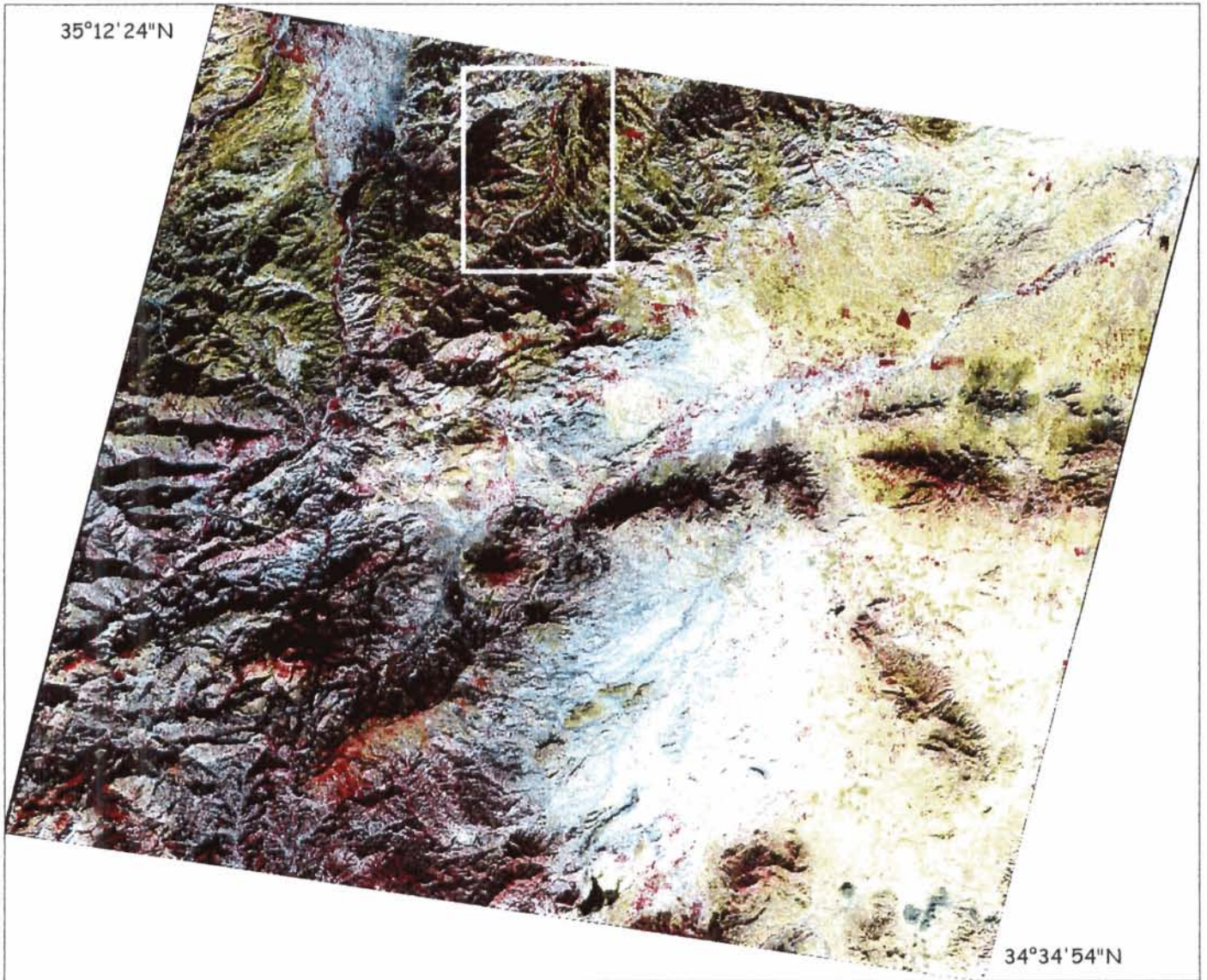
LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE SUR L'IMAGE RECALEE
DE LA SCENE SPOT REFERENCEE KJ 038-280

Composition colorée des 3 canaux X51, X52 et X53

4 avril 1995

3°55'43"W

35°12'24"N



34°34'54"N

échelle 1/500 000

3°16'47"W

a consisté à appliquer une transformation linéaire à l'amplitude du signal de chacun des pixels pour que l'ensemble des amplitudes occupe de façon plus optimale l'échelle de gris :

	Borne inférieure du canal	Borne supérieure du canal
XS1	45	175
XS2	25	185
XS3	20	134

Tableau n°3 : bornes inférieures et supérieures de l'étalement linéaire des canaux bruts

L'intervalle radiométrique de l'image est plus justement occupé. Cette nouvelle visualisation permet un premier travail d'ordre thématique rapporté à la spécificité du canal visualisé : la densité de niveau de gris a une valeur différente d'un canal à l'autre, ce qui traduit les caractéristiques de la signature spectrale des divers objets géographiques dans chacun des trois canaux.

L'oeil humain ne perçoit en intensité qu'une dizaine de niveaux de gris, alors qu'il peut distinguer des centaines de couleurs différentes, et l'examen simultané des variations de niveaux de gris sur 2 ou 3 canaux est difficile.

3.2.2. Création d'une composition colorée

La modification de dynamique décrite permet soit une meilleure visualisation à l'écran, soit la création de nouveaux canaux améliorés. Une composition colorée est une combinaison de ces canaux. Une couleur primaire différente (bleu,vert,rouge) est donnée à chaque canal.

Pour l'instrument HRV³ de SPOT, il s'agit respectivement des canaux : XS1, XS2, XS3 et les radiométries enregistrées par chacun de ces canaux sont codées sur 8 octets, soit 256 valeurs possibles de 0 à 255. Le principe de la visualisation d'un canal repose sur l'association d'un niveau de gris à un compte radiométrique. Il existe donc 256 niveaux de gris différents dans la table de codage associée à l'image. Pour visualiser les trois canaux simultanément, 256 teintes d'une couleur donnée est associé à chaque canal.

³ HRV : high resolution in the visible (20m de résolution)

	Longueur d'onde	Couleur affectée
X51	Vert	Bleu
X52	Rouge	Vert
X53	Proche Infra-rouge	Rouge

Tableau n°4 : glissement des couleurs respectant l'ordre logique des canaux

3.3. Indice de végétation

Certains traitements demandent de procéder au calcul d'un néo-canal obtenu par combinaison de plusieurs canaux selon une formule mathématique. C'est le cas du calcul de l'indice de végétation qui varie de -1 à 1.

La détermination du taux de recouvrement du sol par la végétation est un des indicateurs fondamentaux pour pouvoir mesurer le taux de protection des sols vis-à-vis des pluies et du ruissellement.

L'indice de végétation propose une lecture où la végétation active occupe la plage des fortes valeurs numériques et où les sols nus sont codés sur les valeurs les plus proche de 0.

Il donne la possibilité de quantifier l'activité chlorophyllienne, la densité du couvert végétal et par déduction les sols nus.

Comme plus de 90% de l'information spectrale sur un couvert végétal sont contenus dans les bandes rouge et proche infra-rouge, ce sont ces deux bandes qui sont le plus souvent combinées.

Parmi les différents indices, celui qui est la plus fréquemment utilisé est la différence normalisée (NDVI) qui s'écrit :

$$NDVI^4 = (\text{proche infra-rouge} - \text{rouge}) / (\text{proche infra-rouge} + \text{rouge})$$

Le NDVI est très largement utilisé en raison de sa grande simplicité ; il présente toutefois l'inconvénient d'être très dépendant des propriétés optiques du sol sous-jacent. C'est pourquoi d'autres indices sont proposés pour réduire les perturbations dues au sol, comme le SAVI.

$$SAVI^5 = ((\text{proche infra-rouge} - \text{rouge}) / (\text{proche infra-rouge} + \text{rouge})) \times (1+L)$$

La constante L est introduite pour minimiser l'effet brillance du sol. Il est suggéré d'utiliser 0,25 pour un couvert végétal dense et 0,5 pour un couvert intermédiaire.

⁴ NDVI : Normalized different vegetation index (proposé par Rouse et al. 1973).

⁵ SAVI : Soil adjusted vegetation index

4. Conception du projet

Construction de la base

Conception de la base

Constitution de la base

Analyse de la base

Analyse spatiale

Intérogation et analyse
Thématique

Restitution de la base

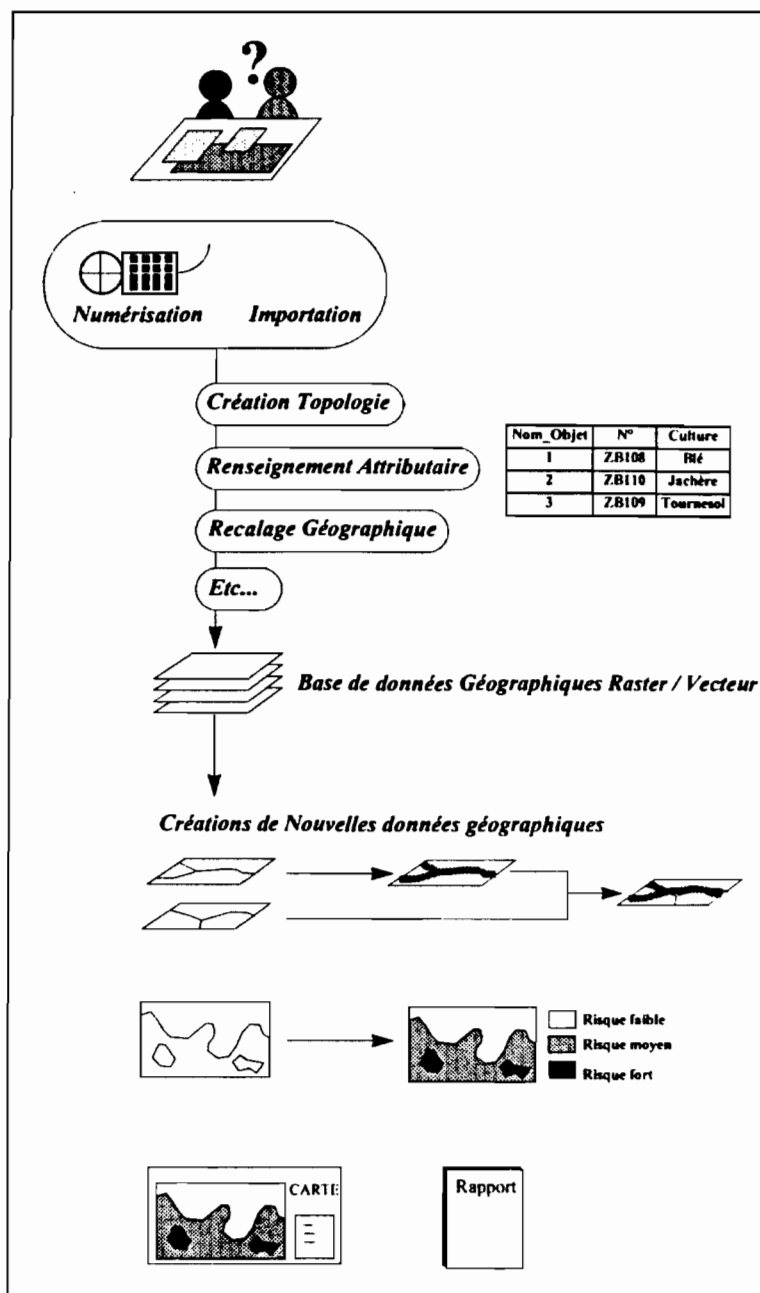


Figure n°7 : les différentes phases d'un projet SIG

4.1. Les données

4.1.1. Le modèle numérique de terrain (MNT)

Il a été réalisé sur le logiciel Alliance à partir du fond topographique de la carte de Boudinar au 1/50 000, la démarche est la suivante :

- ✓ numérisation de la zone d'étude au 1 /50 000,
- ✓ digitalisation à l'écran des courbes de niveau tous les 50 m. Nous avons choisi une équidistance de 50 m car nous n'avons pas la carte originale mais une photocopie de celle-ci qui n'est pas assez nette pour pouvoir distinguer les courbes équidistantes de 10 m (voir figure n°8),
- ✓ association d'une table d'attributs "altitude" aux courbes de niveaux,
- ✓ il a été effectué au pas de 50 m,
- ✓ ce MNT a été utilisé pour réaliser la carte des pentes.

4.1.2. Les pentes

La carte des pentes a été réalisée à partir du MNT, elle s'exprime en pourcentage et comporte quatre classes :

- ✓ de 0 à 5%
- ✓ de 6 à 15%
- ✓ de 16 à 30%
- ✓ supérieur à 31%

4.1.3. L'occupation du sol

La carte de l'occupation du sol est issue des campagnes de terrain réalisées par Hassan El Abbassi. Elle regroupe aussi les systèmes d'exploitation du sol.

Les classes d'occupation du sol sont les suivantes :

- ✓ culture à l'araire,
- ✓ culture au tracteur,
- ✓ parcours,
- ✓ forêt,
- ✓ oued,
- ✓ arboriculture,
- ✓ culture irriguée,
- ✓ culture sur versant aménagé.

4.1.4. La lithologie

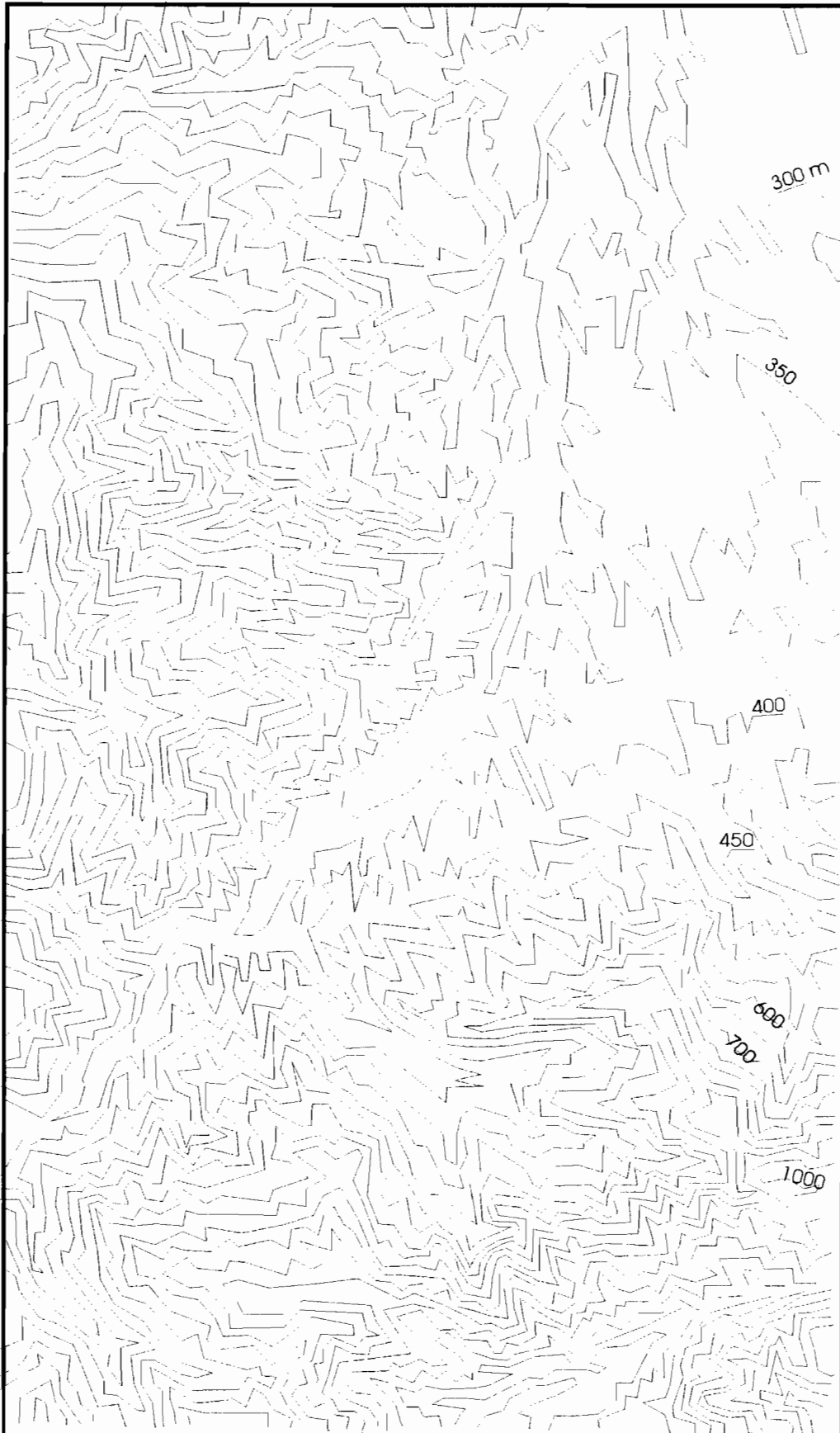
La carte de la lithologie de la zone d'étude a été également fournie par Hassan El Abbassi. Les classes au nombre de quatre sont les suivantes :

- ✓ dépôts détritiques,
- ✓ schistes et marnes,

Figure n°8

RELEVÉ ALTITUDINAL DE LA ZONE D'ETUDE

Support pour la réalisation du modèle numérique de terrain



Source : division de la carte -Rabat-

échelle : 1/70 000

- ✓ marnes,
- ✓ schistes.

4.2. Combinaison des facteurs par arbre de décision

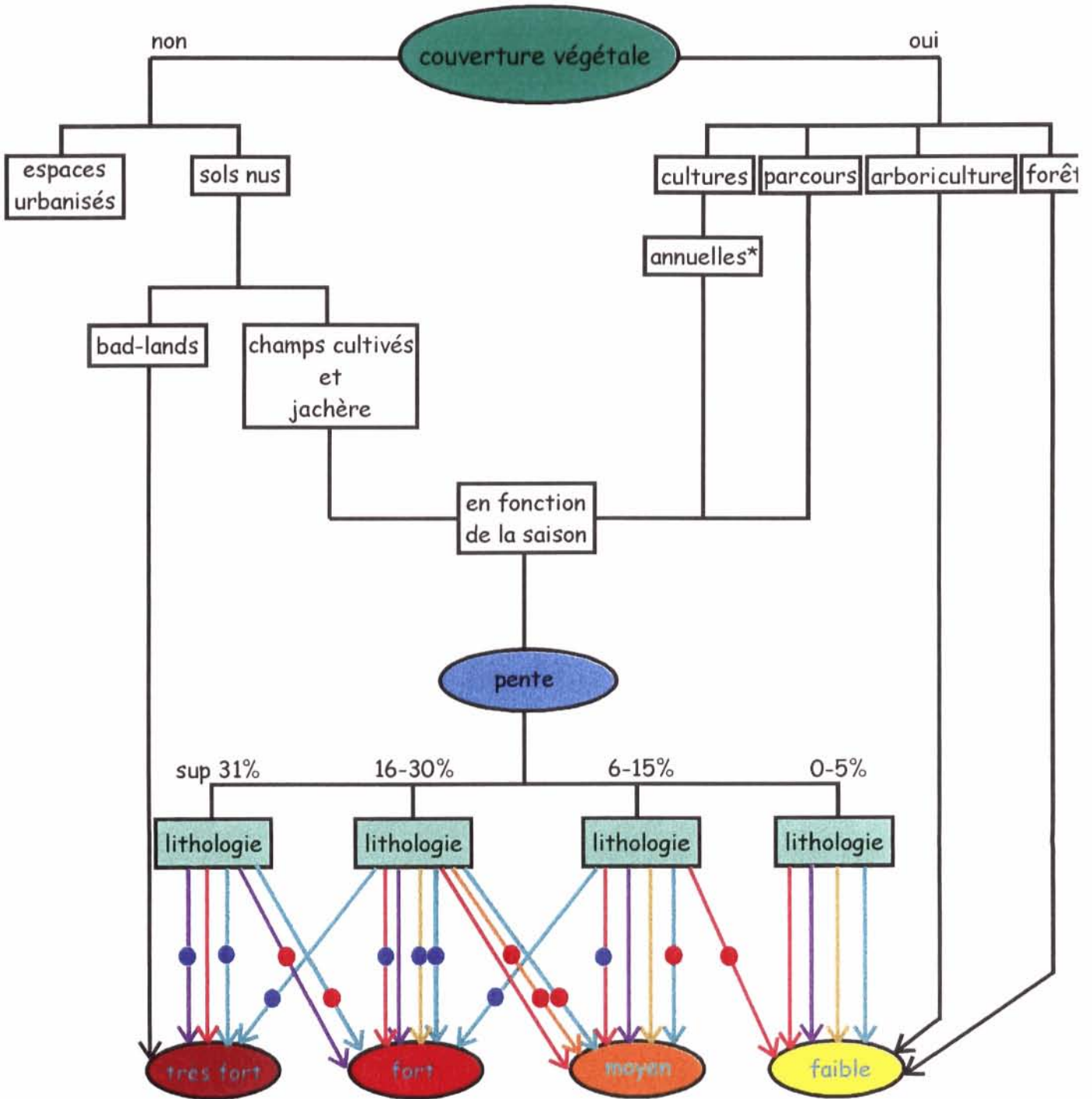
Une fois les plans et les intervalles de classes choisis pour chacun des facteurs de sensibilité, la question qui se pose est celle du choix de la méthode de combinaison ou de jonction des facteurs. De nombreuses méthodes existent. Le plus souvent, la méthode utilisée est la plus simple : c'est la méthode de pondération ou l'arbre de décision. La méthode de pondération a été écartée car elle pose le problème délicat du choix des coefficients de pondération. L'arbre de décision permet de ne pas introduire de coefficients de pondération.

Cet arbre va aider à définir le niveau de sensibilité à l'érosion. Il est fonction de trois paramètres :

- ✓ couverture végétale,
- ✓ pente,
- ✓ lithologie.

La lecture de l'arbre de décision (figure n°9) se fait de haut en bas et de droite à gauche selon l'alternative observée sur l'image et selon sa relation avec le facteur pente et la lithologie.

ARBRE DE DECISION



Types de formation

marnes →

dépôts détritiques →

schistes et marnes →

schistes →

● printemps et hiver

● automne et été

* céréales et légumineuses (cultures qui protègent mal le sol)

Troisième partie

Résultats

1. Présentation

A partir de l'image SPOT recalée, nous avons extrait une imagerie correspondant à la zone d'étude. C'est sur cette extraction que nous avons réalisé les divers traitements énoncés dans la seconde partie (à savoir : amélioration du contraste, création de la composition colorée et indice de végétation).

1.1. L'interprétation de la composition colorée

On l'appelle composition colorée en fausses couleurs. Comme il est expliqué en seconde partie, c'est un simple glissement des couleurs respectant l'ordre chronologique des canaux. La composition colorée est représentée par la figure n°10.

Schématiquement, elle fait ressortir des grands types d'occupation du sol :

- ✓ la végétation apparaît en rouge : plus l'activité photosynthétique est intense plus les valeurs radiométriques enregistrées par le canal XS3 sont élevées. Les valeurs de XS1 et XS2 sont beaucoup plus faibles ainsi le rouge prédomine lors de l'association au vert et au bleu.

- ✓ les minéraux apparaissent en gris bleuté : ceci s'explique par la prédominance des canaux XS1 et XS2 lors de la visualisation.

- ✓ On peut penser que les sols nus ou les parcours apparaissent en vert, leurs valeurs radiométriques enregistrés dans les trois canaux sont à peu près identiques.

1.2. L'indice de végétation

Il est calculé à partir des valeurs de réflectance dans le rouge et dans le proche infrarouge.

Nous avons pu identifier chaque indice sur la carte et ainsi le représenter en couleur. La figure n°11 fait ressortir une prédominance d'indices compris entre 0,11 et 0,25 que nous avons interprété en tant que sols nus ou parcours. Nous constatons que ces derniers occupent environ 70% de la surface de la zone d'étude. Comme annoncé dans la première partie, 70% à 80% de la zone est soumise à l'érosion.

De plus, on constate qu'environ 15% de la surface correspond à des indices très près de 0 : (0,01 à 0,1). Nous pouvons les interpréter en tant qu'affleurement rocheux apparaissant en gris sur la carte. Ils sont répartis surtout dans le secteur nord-ouest de la carte.

Enfin les indices compris entre 0,26 et 0,73 traduisent la présence de végétation plus dense. On les trouve près de l'oued, il correspondent aux zones irriguées, on les retrouve également en zone de montagne où l'on pratique l'arboriculture ou dans des zones de forêt.

Figure n°10

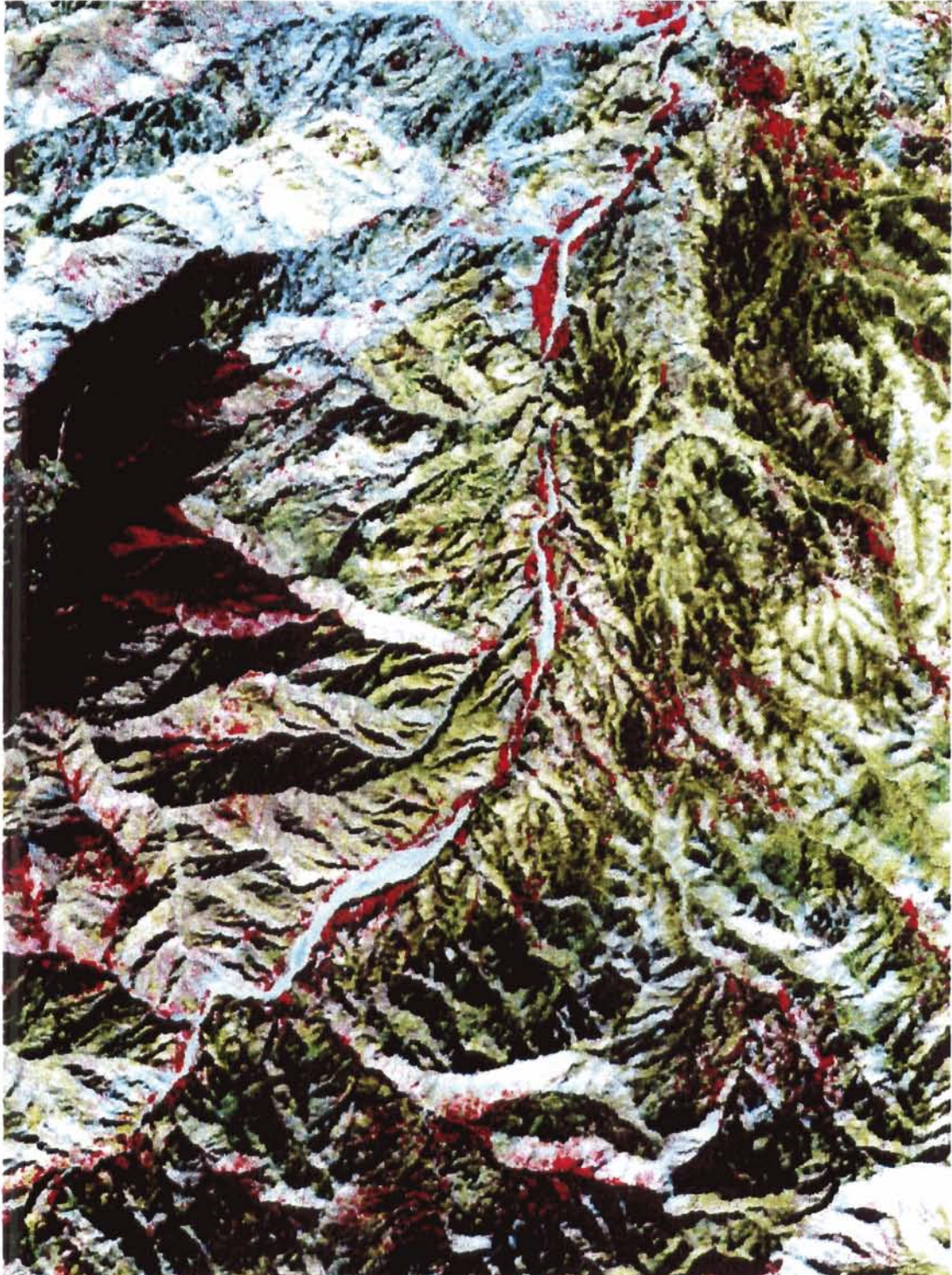
COMPOSITION COLOREE

Extraction de l'image Spot référencée KJ 038-280

3°43' 4"W

4 avril 1995

35°10' 46"N



35°0' 20"N

échelle : 1/80 000

3°37' 30"W

INDICE DE VEGETATION (NDVI)

Extraction de l'image Spot référencée KJ 038-280

Projection conique conforme de Lambert Nord-Maroc

4 avril 1995

3°43' 4"W

35°10' 46"N






35°0' 20"N

échelle 1/80 000

3°37' 30"W

Légende

-  roche affleurante (0.01<indice<0.1)
-  sols nus ou parcours (0.11<indice<0.25)
-  couvert végétal (0.26<indice<0.73)

Nous interprétons la couverture végétale à un moment précis de l'année (avril 1995). Il serait intéressant d'obtenir des images à d'autres moments de l'année afin de pouvoir comparer les données, ce qui n'est pas toujours possible à cause du prix élevé des données SPOT.

1.3. Le modèle numérique de terrain (MNT) (voir figure n°12)

Il est réalisé à partir du fond topographique de la carte de Boudinar au 1/50 000, il nous permet de visualiser l'importance du relief.

Le MNT fait apparaître des altitudes comprises entre 200 m dans le piémont et 1350 m en montagne.

Les altitudes les plus élevées se situent à l'ouest et au sud de la zone d'étude représentées respectivement par l'annonce des massifs de Tamsamane et Bni-Touzine.

Il est l'élément principal pour l'élaboration de la carte des pentes.

1.4. La carte des pentes

La carte des pentes (figure n°13) est générée à partir du MNT. On constate qu'elle produit des erreurs, à l'endroit des courbes de niveau, que nous n'avons pas pu expliquer. Ces artefacts peuvent gêner l'interprétation de la carte car ils sont recensés dans la classe "pas d'information".

Il ressort de cette carte une prédominance de fortes pentes (supérieures à 30%) représentées en rouge sur la carte. Celles-ci se concentrent dans la zone de montagne sur une lithologie schisteuse où l'érosion est très active.

Les pentes moyennes et faibles (de 0 à 30%) sont concentrées dans le piémont sur une lithologie marneuse et sur des dépôts détritiques.

Elle est un élément important pour comprendre le travail de l'érosion sur des pentes à forte déclivité.

2. Analyse et interprétation de l'image finale

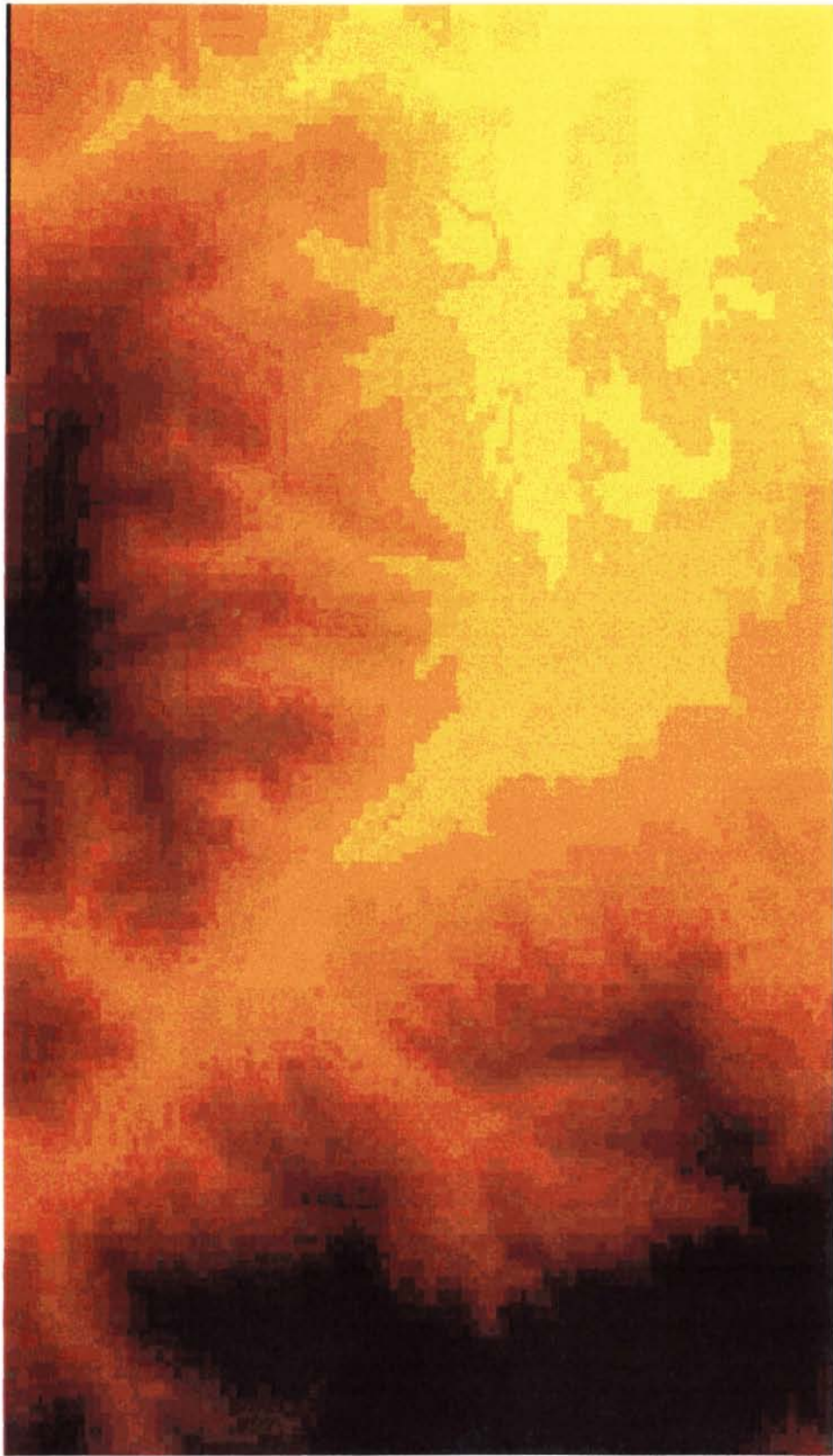
C'est l'image indispensable pour visualiser la sensibilité des terrains à l'érosion.

Les traitements des couches d'information auraient dû être réalisés sur Alliance, mais des problèmes techniques nous ont obligé à utiliser TeraVue, le logiciel de traitement d'image. Nous avons tout de même suivi le raisonnement de l'arbre de décision, mais en utilisant une gymnastique informatique différente.

Nous avons croisé les couches deux à deux en croisant tout d'abord la carte des pentes et celle de l'occupation du sol enfin le résultat des deux a été croisé avec la lithologie.

Figure n°12

MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (pas de 40 mètres)



échelle : 1/70 000



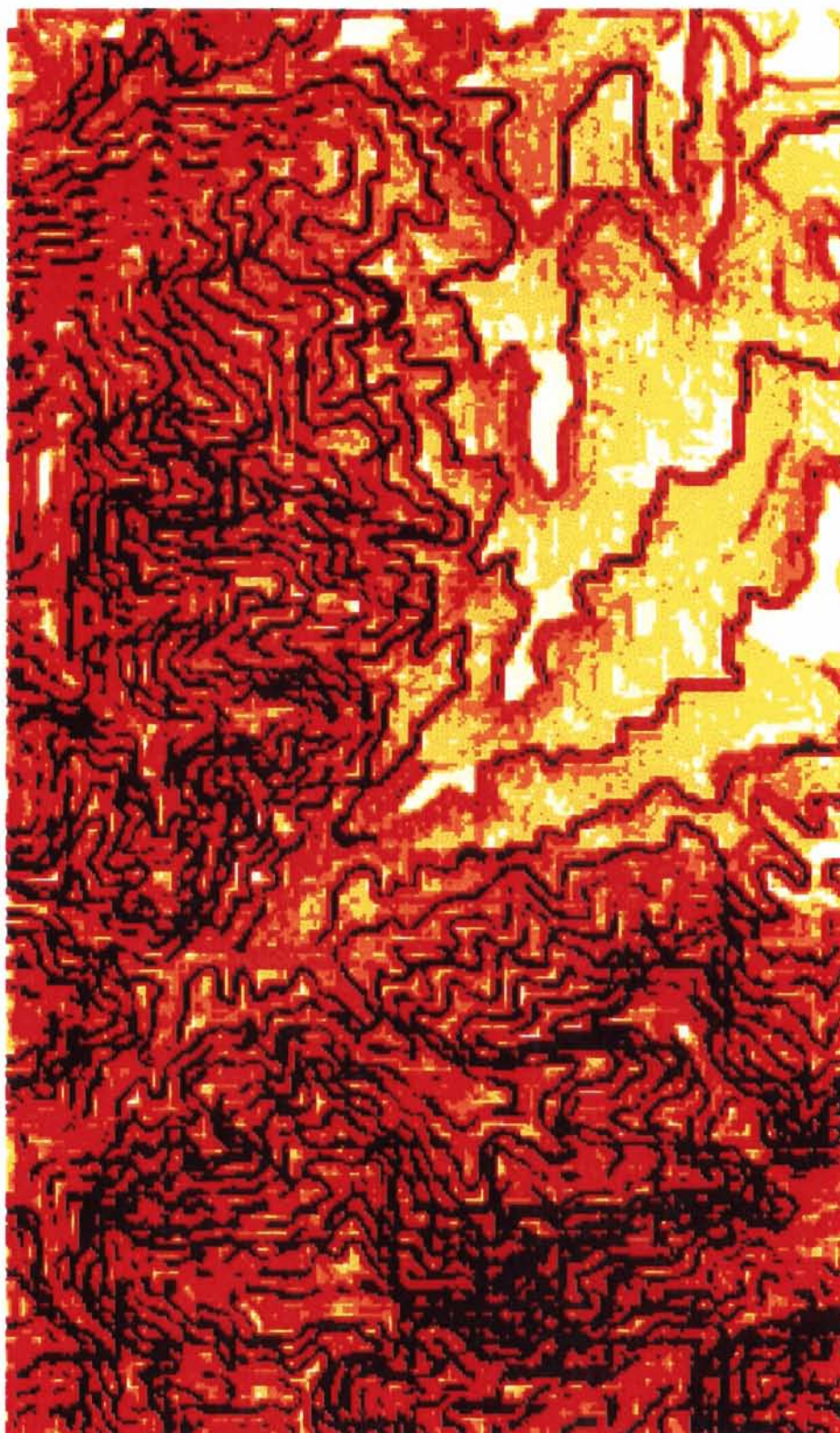
200 m

37

1350 m






Figure n°13

CARTE DES PENTES



Légende

échelle 1/ 70 000

-  inf à 5%
-  de 6 à 15%
-  de 16 à 30%
-  sup à 31%
-  pas d'information

2.1. Carte de sensibilité à l'érosion

La cartographie des zones sensibles à l'érosion est représentée à travers la figure n°14 mais qui ne précise pas s'il s'agit de ravinement, de décapage ou de mouvement de masse. Tous les types de roches rencontrés dans le bassin sont affectés par l'érosion.

La carte fait ressortir une majorité de zones où la sensibilité à l'érosion est forte à très forte. Celle-ci est concentrée dans des zones à pentes accusées ce qui est le cas en montagne.

A l'inverse, le piémont connaît une faible sensibilité à l'érosion où les pentes sont douces voire moyennes.

Cette carte fait également ressortir l'individualité des zones où l'on pratique l'arboriculture et l'irrigation, elles sont peu atteintes par l'érosion.

On peut penser que les parties marginales du bassin sont soumises à une forte érosion car elles ne sont pas entretenues; ou que des zones récemment délaissées par les hommes connaissent une recrudescence de l'érosion.

On constate aussi que dans les zones bien entretenues, les cicatrices d'érosion sont estompées à chaque travail de la terre.

2.2. Comparaison entre données de terrain et carte de sensibilité

La figure n°15 propose une cartographie exacte au 1/70 000 des zones d'érosion avec un gradient d'érosion qui s'étale de faible à très grave.

Cette carte a été réalisée par H. EL Abbassi lors de ses campagnes de terrain.

On constate que la zonation de l'érosion est surtout marquée par la prédominance de l'érosion grave (zones de montagne)

Les zones basses sont affectées par une érosion faible à moyenne.

La carte de sensibilité est assez fidèle à celle réalisée sur le terrain, on retrouve les grandes zones à fortes et très forte érosion en montagne sur lithologie schisteuse et celle de faibles et moyenne érosion dans le piémont.

On peut en déduire que la méthode de l'arbre de décision est convainquante pour réaliser ce type de travail et s'avère même indispensable.

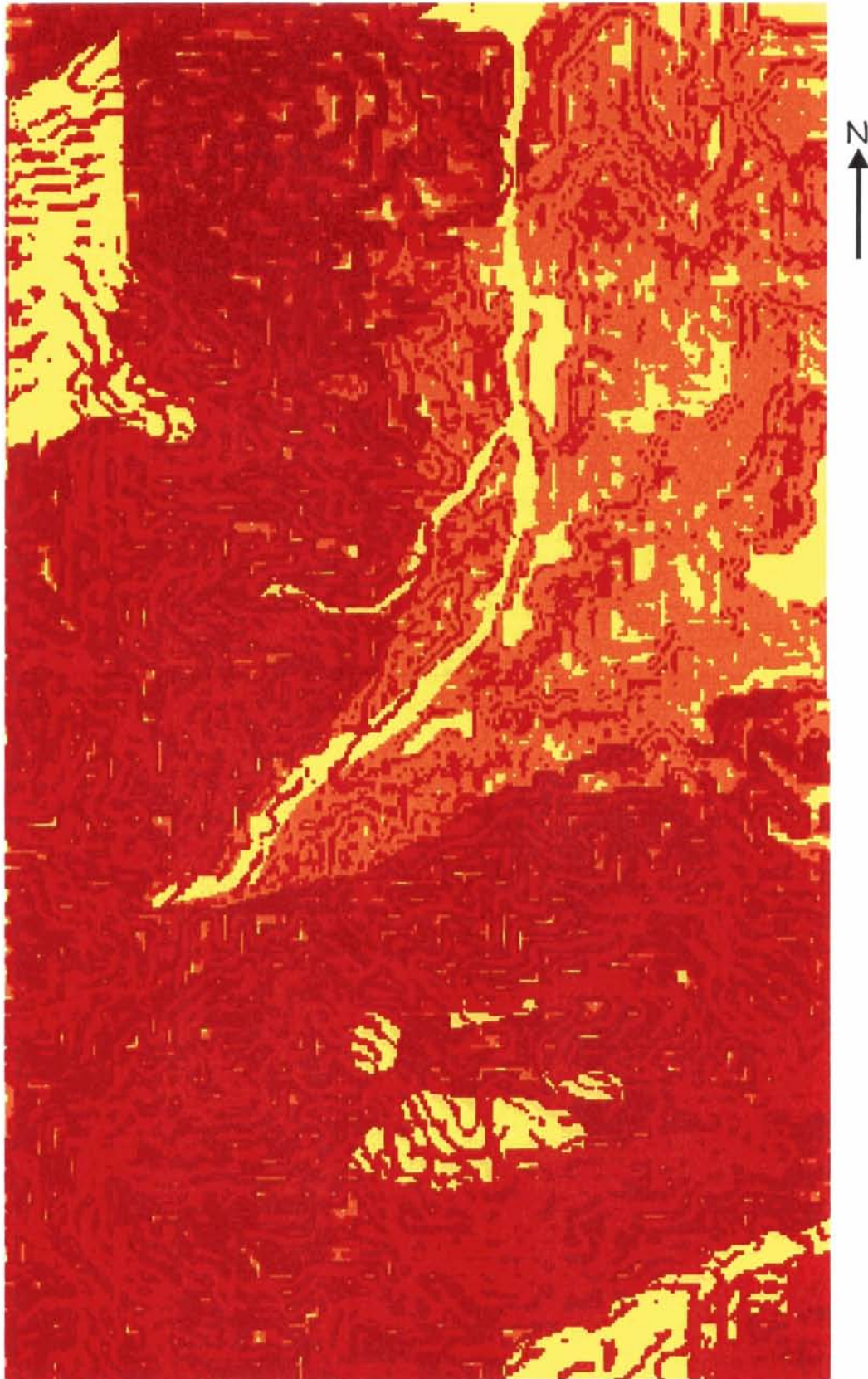
3. Valorisation des résultats

Vers une technique de conservation des sols et des eaux

Le danger que font peser ces processus sur les potentialités du sol, déjà très limitées, est donc énorme. Les populations locales réagissent face à cette menace par des comportements qui se matérialisent sur le terrain par de nombreuses

Figure n°14

CARTE DE SENSIBILITE A L'EROSION



échelle : 1/70 000

Légende

 faible

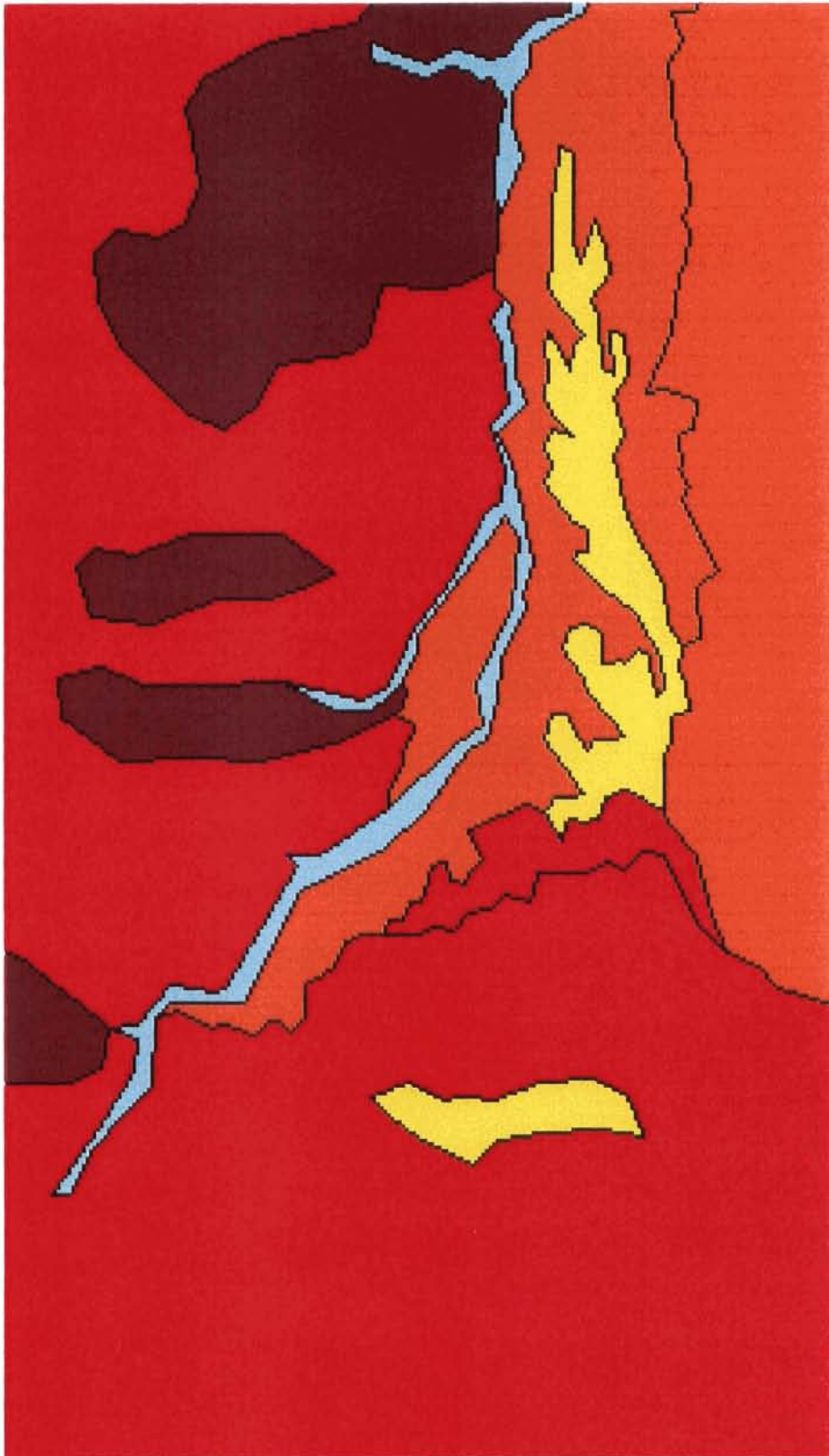
 fort

 moyen

 très fort





Figure n°15

CARTE D'EROSION (vérité terrain)



Légende

échelle 1/70 000

-  érosion faible
-  érosion moyenne
-  érosion grave
-  érosion très grave
-  oued

techniques mises en place pour préserver le sol d'une dégradation totale (H. EL Abbassi, 1998).

Le choix des aménagements doit se faire en fonction des situations auxquelles ils sont adaptés, ils ne seront pas les mêmes dans le piémont où en montagne. Cependant, ces deux types de milieux ne sont pas homogènes, tant au niveau de leurs potentialités naturelles écologiques, qui déterminent leurs potentialités agricoles par conséquent leur exploitation, que par leurs comportements géodynamiques de surface, qui déterminent la nature et l'ampleur de leur évolution qui dégrade leurs ressources en sols et en eau (H. EL Abbassi).

Les versants ne présentent ni les mêmes caractéristiques (potentialités en sols et réserves hydriques), ni les mêmes problèmes au niveau de leur aménagement.

Les techniques d'aménagement du milieu dans le bassin de Boudinar sont nombreuses et variées, elles sont destinées à jouer plusieurs rôles : conservation des eaux et des sols, extension des zones agricoles, valorisation des terrains dégradés. Leur mise en place et leur évolution sont commandées par plusieurs facteurs physiques (types de matériaux, forme de surface, sécheresse) et humains (pression démographique, contexte socio-économique, émigration) (H. EL abbassi).

Conclusion

Si la réalisation d'une carte de sensibilité des sols à l'érosion présentée dans ce rapport est une réponse à l'objectif du stage entrepris, des travaux futurs peuvent être envisagés dans le domaine de l'information géographique pour aller dans le sens d'une gestion plus efficace des processus d'érosion qui dégradent le milieu naturel.

De plus l'utilisation combinée d'un Système d'Information Géographique et de la télédétection est un outil efficace d'identification et de diagnostic. Elle permet en effet de définir avec précision des indicateurs de l'état de surface. Mais il est tout de même nécessaire d'avoir une bonne connaissance du terrain.

La cartographie actuelle est informatique et repose sur l'infographie, la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique.

Depuis quelques années, la cartographie bénéficie d'un vif intérêt et particulièrement dans ces applications à l'environnement, l'aménagement où à la gestion des ressources naturelles, elle est un excellent support d'aide à la décision.

Bibliographie

AVENARD (Jean-Michel), 1989-90, « Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion) », Cahier ORSTOM, série pédologie, vol. 25, pp. 119-129.

BEGUIN (Michèle), PUMAIN (Denise), 1994, La représentation des données géographiques, Paris, Armand Colin, 192 p.

CHEYLAN (Jean-Paul) et al, 1993, « Facettes de SIG », Mappemonde, n°4.

COMITAS (Commission ministérielle de la terminologie de la télédétection aérospatiale), 1988, « Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale », bulletin SFPT, n°112, 63 p.

DELAUNAY (Daniel), 1991, « Les outils d'information géographique : l'outil d'une recherche transdisciplinaire », Mappemonde, n°3, pp.43-45.

DUBUCQ (Michel), 1986, « Télédétection spatiale et érosion des sols, étude bibliographique », Cahier ORSTOM, série pédologie, vol. 22, n°2, pp.247-258.

EL ABBASSI (Hassan), 1987, Essai sur la dynamique des milieux dans le bassin de Boudinar (Rif oriental, Maroc), thèse de 3^{ème} cycle, Strasbourg I, 215p.

EL ABBASSI (Hassan), 1997, « Quelques aspects des transformations récentes dans les campagnes du Rif oriental marocain : mécanismes, formes et incidences sur le milieu », Annales de géographie, n°597, pp. 479-501.

EL ABBASSI (Hassan), 1997, « Les techniques traditionnelles de conservation des eaux et des sols dans le bassin de Boudinar, Rif oriental marocain », article non publié.

EL ABBASSI (Hassan), 1997, « La place de l'homme dans les processus d'évolution des milieux dans les montagnes et les bassins du Rif oriental marocain », à paraître.

HOOGMOED (Willem), STROOSNIJDER (Léo), 1996, « Evaluation des risques d'érosion sur un bassin versant dégradé utilisant le SIG et la simulation », Réseau érosion ORTOM, bulletin 16, pp. 391-401.

ICARE INTERNATIONAL, 1995, « Utilisation d'un système d'information géographique pour l'aménagement rural : problématique environnementale »

KOURI (L.), VOGT (H), 1996, « Détermination de la sensibilité des terrains au ravinement au moyen de système d'information géographique, bassin versant de l'oued Mina, Tell oranais ,Algérie », Réseau érosion ORTOM, bulletin 16, pp.412-438.

LAMACHERE (Jean-Marie), GUILLET (François), « Télédétection, états de surface et cartographie des risques d'érosion en zone Soudano-Sahélienne », Réseau érosion ORTOM, bulletin 16, pp.375-390.

LE LANDAIS (F), FABRE (G), 1996, « Plan d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'oued Ouergha, Maroc », Réseau érosion ORTOM, bulletin 16, pp. 439-443.

GDTA, 1991, Bases physiques de la télédétection, Les cahiers pédagogiques du GDTA, cahier B1, 86 p.

GDTA, 1991, Visualisation d'image numérique, Les cahiers pédagogiques du GDTA, cahier M1, 77 p.

MAURER (Gérard), 1968, Les montagnes du Rif Central, Etude géomorphologique, thèse de 3^{ème} cycle, Paris, 500 p.

MAURER (Gérard), 1996, « L'homme et les montagnes atlasiques du Magreb », Annales de géographie, n°587, pp.47-72.

MERZOUK (A), FENJIRO (I), LAOUINA (A), 1996, « Cartographie de l'évolution des formes d'érosion dans le Rif occidental, Maroc, étude multidate utilisant un SIG-Bassin versant » Réseau érosion ORTOM, bulletin 16, pp. 444-456.

POLIDORI (Laurent), 1995, « Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain », bulletin SFPT, n°39, pp. 10-19.

ROBIN (Marc), 1995, La télédétection, Nathan université.

TRIBAK (Abdellatif), 1997, « Quelques exemples de mouvements de terrain dans le Prérif oriental (Maroc), Méditerranée, n°1.2, p. 61-65.

VIDAL (Frank), GOND (Valéry), 1991, « Un modèle numérique de terrain issu d'un logiciel de télédétection » , Mappemonde, n°2, pp. 19-21.

Table des tableaux

Tableau n°1 : image SPOT XS sélectionnée

Tableau n°2 : bandes spectrales captées par SPOT XS

Tableau n°3 : bornes inférieures et supérieures de l'étalement linéaire des canaux bruts

Tableau n°4 : glissement des couleurs respectant l'ordre logique des canaux

Table des figures

Figure n°1 : situation du bassin de Boudinar

Figure n°2 : diagramme ombrothermique de la station de Boudinar

Figure n°3 : schéma d'un Système d'Information Géographique

Figure n°4 : vue d'ensemble du satellite SPOT et mode d'enregistrement d'une image

Figure n°5 : extrait de la grille de référence SPOT : Maroc

Figure n°6 : localisation de la zone d'étude sur l'image recalée de la scène SPOT référencée KJ 038-280

Figure n°7 : les différentes phases d'un projet SIG

Figure n°8 : relevé altitudinal de la zone d'étude

Figure n°9 : arbre de décision

Figure n°10 : composition colorée

Figure n° 11 : indice de végétation (NDVI)

Figure n°12 : modèle numérique de terrain

Figure n°13 : carte des pentes

Figure n°14 : carte de sensibilité à l'érosion

Figure n°15 : carte d'érosion (vérité terrain)

Table des photos

Photo de couverture : mouvement de masse dans les marnes gypseuses

Photo n°1 : partie occidentale du secteur étudié

Photo n°2 : versant nord, schisteux affecté par des ravins et des mouvements de masse

Photo n°3 : substrat conglomératique débarrassé de couverture détritique réduite à des placages discontinus. Evolution par ravinement et par décapage intense affectant couverture d'altération issue des schistes.

Photo n°4 : mouvement de masse affectant un versant taillé dans les schistes

Photo n°5 : longues croupes constituant le haut niveau à l'intérieur du bassin. Les versants sont taillés dans des marnes du Miocène supérieur.

Table des matières

Notice analytique -----	p. 1
Remerciements -----	p. 2
Sommaire -----	p. 3
Introduction -----	p. 4
Première partie : le bassin de Boudinar ----	p. 5
1. Situation géographique -----	p.7
2. L'érosion dans le bassin de Boudinar -----	p.7
2.1. Les formes d'érosion -----	p. 7
2.2. Répartition spatiale des formes d'érosion -----	p. 9
2.3. L'environnement et les causes -----	p.11
2.3.1. <i>Une lithologie peu résistante</i> -----	<i>p.11</i>
2.3.2. <i>Un climat méditerranéen</i> -----	<i>p.11</i>
2.3.3. <i>Histoire agraire et actions anthropiques</i> -----	<i>p. 14</i>
Seconde partie : matériel et méthode ----	p. 16
1. Objectifs et principes -----	p.17
1.1 Objectifs de l'étude -----	p. 17
1.1. La télédétection : science et technique de l'information à distance	p.17
1.2. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) -----	p. 18
2. Données et moyens techniques -----	p.20
2.1. Données satellitaires et cartographiques -----	p. 20
2.1.1. <i>Les données SPOT</i> -----	<i>p. 20</i>
2.1.2. <i>Les documents cartographiques</i> -----	<i>p. 22</i>
2.2. Les moyens informatiques -----	p. 22
3. Traitement des données sur TeraVue -----	p.23
3.1. Correction géométrique et extraction d'une imagerie -----	p. 23
3.2. Préparation de l'image à la visualisation -----	p. 23

3.2.1. Amélioration du contraste de l'image -----	p. 23
3.2.2. Création d'une composition colorée -----	p. 25
3.3. Indice de végétation -----	p. 26
4. Conception du projet SIG -----	p. 27
4.1. Les données -----	p. 28
4.1.1. Le modèle numérique de terrain (MNT) -----	p. 28
4.1.2. Les pentes -----	p. 28
4.1.3. L'occupation du sol -----	p. 28
4.1.4. La lithologie -----	p. 28
4.2. Combinaison des facteurs par arbre de décision -----	p. 30

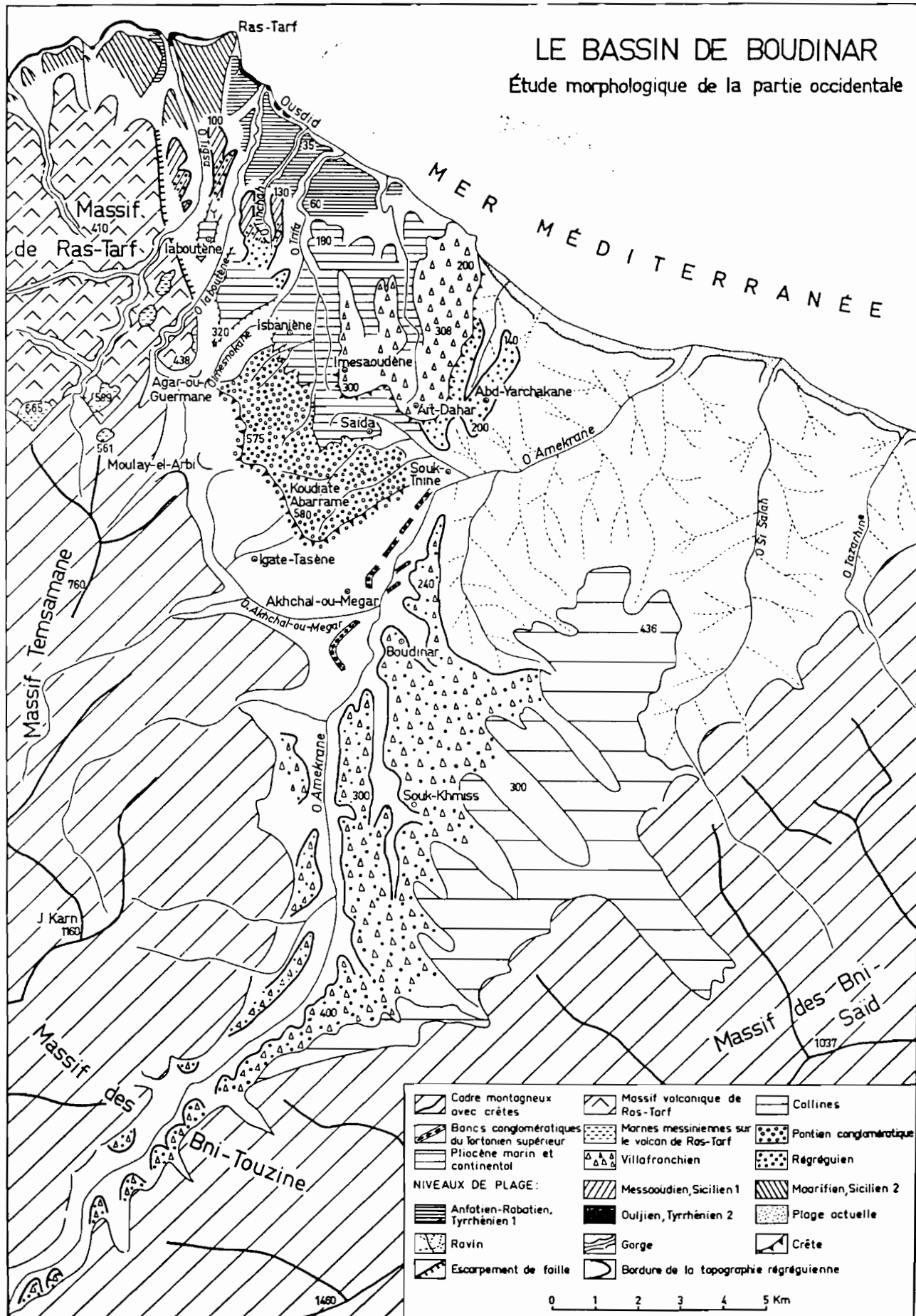
Troisième partie : résultats ----- p. 32

1. Présentation -----	p. 33
1.1. L'interprétation de la composition colorée -----	p. 33
1.2. L'indice de végétation -----	p. 33
1.3. Le modèle numérique de terrain -----	p. 36
1.4. La carte des pentes -----	p. 36
2. Analyse et interprétation de l'image finale -----	p. 36
2.1. Carte de sensibilité à l'érosion -----	p. 39
2.2. Comparaison entre vérité terrain et carte de sensibilité -----	p. 39
3. Valorisation des résultats -----	p. 39
Conclusion -----	p. 43
Bibliographie -----	p. 44
Table des tableaux -----	p. 46
Table des figures -----	p. 47
Table des photos -----	p. 48
Tables des matières -----	p. 49
Annexes -----	p. 51

Annexes

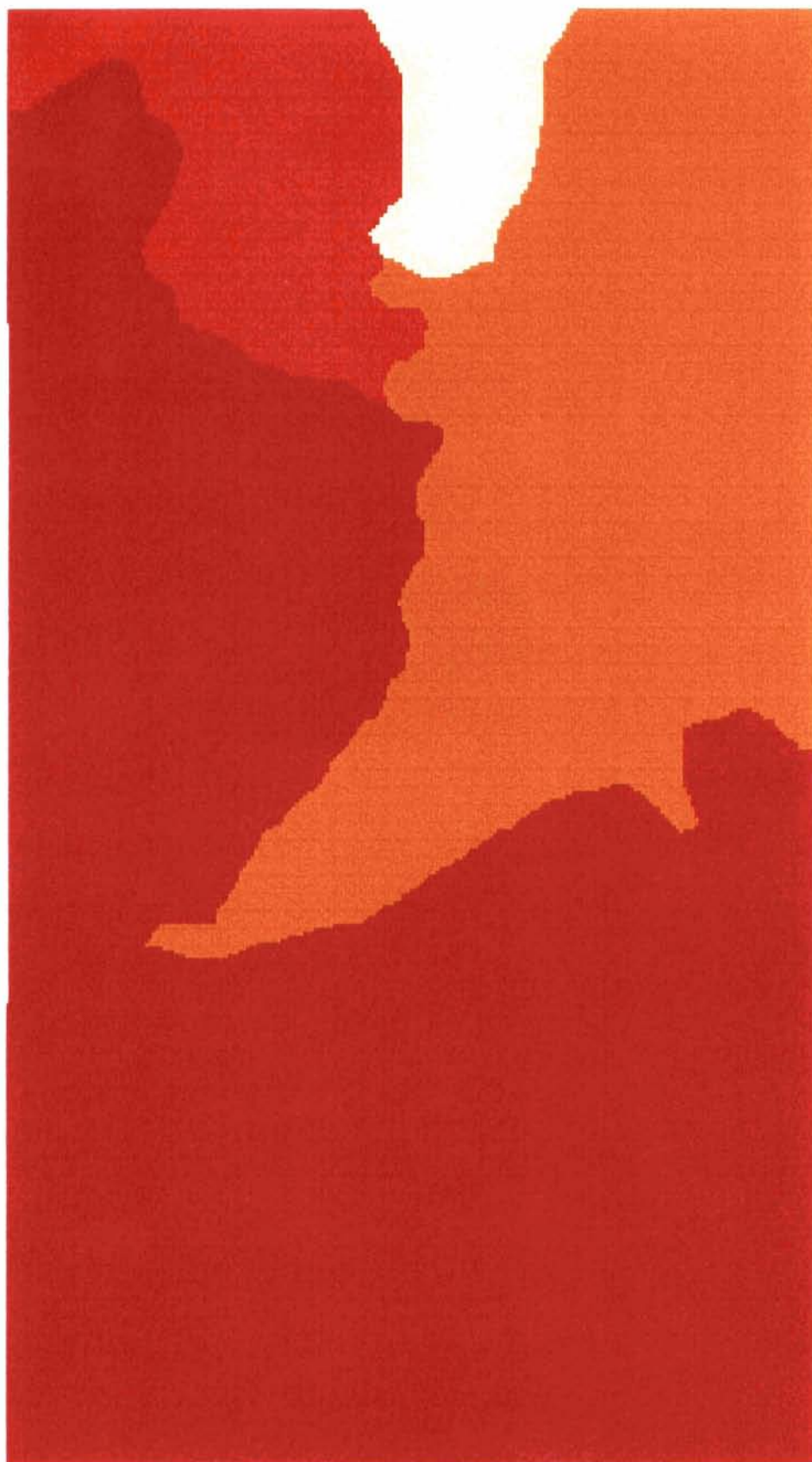
LE BASSIN DE BOUDINAR

Étude morphologique de la partie occidentale



Source : Maurer G.


LITHOLOGIE DU BASSIN DE BOUDINAR




Légende

échelle 1/70 000

 marnes

 schistes et marnes

 dépôts détritiques

 schistes