

**L'UTILISATION DE L'IMAGE SATELLITE SPOT
POUR L'ETUDE DU KARST MONTENEGRIN**

**UPORABA SATELITSKIH POSNETKOV SPOT PRI ŠTUDIJU
ČRNOGORSKEGA KRASA**

C H R I S T I A N E G A C H E L I N - R I B A U L T

Résumé

UDC 551.44 (497.16):778.3

Gachelin-Ribault, Christiane: L'utilisation de l'image satellite SPOT pour l'étude du karst Monténégrin

L'analyse d'une image satellite à haute résolution est du plus haut intérêt pour l'étude de montagnes et plateaux profondément karstifiés et souvent difficiles d'accès. L'exemple du haut karst monténégrin développé entre les Bouches de Kotor et le lac de Scutari est symbolique à cet égard. Nous souhaitons montrer ici de quelle manière, à partir d'une scène SPOT multi-spectrale tirée sur papier à l'échelle du 1:100.000 et de plusieurs traitements sur écran de la donnée numérique, l'image satellite devient un outil indispensable pour la Recherche. Les traitements numériques de l'image ont été réalisés par un spécialiste. Nous entrons le moins possible dans les techniques pour nous intéresser aux résultats obtenus.

Mots clés: image satellite SPOT, karst, Monténégro

Izvilleček

UDC 551.44 (497.16):778.3

Gachelin-Ribault, Christiane: Uporaba satelitskih posnetkov SPOT pri študiju črnogorskega krasa

Uporaba dobro ločljivih satelitskih slik je izredno pomembna za študij težko dostopnih, globoko zakrasedlih gora in planot. Pravi primer je visoki črnogorski kras med Kotorskim zalivom in Skadarskim jezerom. Članek želi predstaviti način uporabe multispektralnega satelitskega posnetka SPOT na papirju, v merilu 1:100.000 in različne numerične obdelave na ekranu, kar uvršča satelitske posnetke med nujne pripomočke pri raziskavah. Numerične obdelave slike je izdelal specialist, zato se bom izognila tehničnim podatkom in se raje posvetila dobljenim rezultatom.

Ključne besede: satelitski posnetek SPOT, kras, Črna gora

Address-Naslov

Christiane GACHELIN-RIBAUT
Laboratoire de Géomorphologie et
d'Etude du Quaternaire
Université des Sciences et
Techniques de Lille

I. LE TRAITEMENT D'UNE IMAGE SPOT: UNE PREMIERE APPROCHE

Une étude approfondie supposerait l'acquisition de plusieurs images prises en différentes saisons et l'analyse de deux types d'images: multispectrales (résolution 20 mètres) et panchromatiques (résolution 10 mètres). La sélection des images s'effectue en fonction des centres d'intérêt et des buts recherchés.

1. Le choix de l'image

Nous avons choisi l'image multispectrale dont les traitements couleur permettent une bonne analyse des paysages et des nuances de la couverture végétale.

L'image a été prise en été, le 31 août 1987, à Sh44 TU et couvre un carré de 60 kilomètres de côté. A partir d'une ligne Risanj - Titograd qui marque le bord Nord de la prise de vue, elle comprend un vaste ensemble de montagnes calcaires qui s'étendent depuis le massif du Lovćen (1749 mètres) jusqu'à la Rumija (1593 mètres) et dominent la région littorale. Vers le Sud-Est, les altitudes s'abaissent et le karst s'émiette en pitons qui viennent progressivement s'envoyer dans les eaux du lac de Scutari.

Les traitements couleur sur écran peuvent faire ressortir les différentes composantes du paysage karstique. La résolution étant de 20 mètres, les lapiés et formes de petite dimension ne peuvent apparaître. Par contre, on peut distinguer avec netteté les dolines et dépressions fermées, les surfaces dénudées, mamelonnées, les escarpements, les nuances de la couverture végétale.

L'image rend par ailleurs possible une bonne lecture de tous les accidents cassants, qu'il s'agisse de grandes failles et linéaments ou d'une fissuration des calcaires beaucoup plus fine. C'est peut-être là son intérêt majeur. En effet, les travaux scientifiques soulignent depuis longtemps, avec une insistance de plus en plus marquée au cours des dernières années, le rôle de la fracturation dans la localisation des formes d'érosion qu'il s'agisse du karst, des formes fluviales ou glaciaires. Par ailleurs, l'étude des grandes failles actives de la planète repose maintenant de plus en plus sur l'imagerie satellite. Ainsi une équipe de géologues travaille depuis quelques années sur les images SPOT panchromatiques pour étudier le mouvement des failles décrochantes actives en Chine sur

la bordure Nord du plateau tibétain. Le Monténégro étant une région sismique, il serait intéressant d'analyser de manière approfondie les systèmes de failles qui recoupent à l'emporte pièce les grands accidents tectoniques tertiaires contemporains de l'édification des Dinarides.

2. Le choix des traitements

Les détecteurs photo-électriques du satellite SPOT effectuent 3 mesures: la première dans le canal vert (XS1), la deuxième dans le canal rouge (XS2) et la troisième dans le canal infrarouge (XS3). A partir de ces mesures, deux compositions colorées ont été réalisées:

- le traitement n°1 est une composition colorée réalisée à partir des trois canaux. La végétation y apparaît en rouge, rouge d'autant plus vif que l'activité chlorophyllienne y est intense. Ainsi les feuillus de l'étage montagnards et les roselières des zones humides apparaissent en rouge vif tandis que les oliviers et arbustes méditerranéens de la frange littorale sont d'un rouge plus foncé. Le monde minéral, les roches dénudées apparaissent en blanc ou un bleu pâle (couleur cyan), l'eau en noir. Les espaces cultivés sont en général dans les tons bruns, en raison de la sécheresse estivale.

- le traitement n°2 est une autre composition colorée plus riche en nuances. Elle est réalisée à partir de trois données: le canal XS1 de SPOT, l'indice de végétation accroît les nuances entre les différentes formations végétales et accentue l'opposition entre ce qui est végétal et non végétal. Il est calculé selon la formule suivante:

$$IV = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

R = Valeur Rouge - PIR = valeur proche infra-rouge

L'indice de brillance correspond à la formule:

$$IB = \sqrt{PIR^2 + R^2}$$

Sur cette composition, la végétation apparaît dans une gamme de couleurs allant du jaune au rouge et par conséquent plus riche que pour la première composition colorée.

Grâce à ces deux traitements, les creux des dolines, les fissures du karst qui piègent le sol, l'humidité, concentrent la végétation, se remarquent avec netteté sur l'image.

L'analyse et l'interprétation d'une image à haute résolution seront d'autant plus fines qu'elles pourront être complétées ou vérifiées par des documents cartographiques et des observations de terrain.

II. LES PARTICULARITÉS DU KARST MONTÉNÉGRIN

1. Une originalité certaine au sein du domaine méditerranéen

Les karsts du Monténégro occidental offrent un certain nombre de particularités qui donnent à cette région un caractère original.

La première raison est climatique:

- la côte et les montagnes proches du littoral sont particulièrement arrosées (5 mètres par an à Crkvice dans le massif de l'Orjen) ce qui rend possible une évolution actuelle du karst.

- au cours des périodes froides quaternaires, les climats étaient également humides et des formes glaciaires et nivales ont été reconnues à une altitude relativement modeste.

La deuxième raison est paléogéographique:

- a - ce karst correspond à d'épaisses assises calcaires datant du Mésozoïque. Après la sédimentation des flysch éocènes et le paroxysme orogénique qui se situe à la charnière éocène-oligocène dans cette parties des Dinarides, la région a échappé aux transgressions marines miocènes et pliocènes. Une longue période de karstification a donc pu se développer au Tertiaire sous des climats chauds.

- b - une tectonique plioquaternaire est responsable des volumes actuels. Le soulèvement se poursuit dans les massifs montagneux et les plus élevés tandis que la région du lac de Scutari, une partie des Bouches de Kotor et du littoral ont tendance à subsidence.

- c - le domaine du Haut Karst est uniformément calcaire tandis que dans la région littorale apparaissent d'autres roches: flysch et marnes en position déprimée tandis que les calcaires forment les corniches et les points hauts. En quelques endroits, dans la zone de Budva, affleurent des diabases et radiolarites tandis que les calcaires, de sédimentation plus pélagique peuvent être des calcaires en plaquettes à silex.

- d - la tectogénèse tertiaire a été beaucoup plus intense dans la région littorale où plis et chevauchements se sont concentrés. La charpente de l'édifice tertiaire reste en place, mais connaît de nombreuses fissures, bien visibles sur l'image SPOT. Ces dernières commandent probablement l'évolution actuelle du karst, tandis que la longue période de karstification explique les modelés et l'absence à peu près totale de drainage superficiel et notamment de grandes vallées.

2. La reconnaissance des types de paysage karstiques sur l' image SPOT

Ces particularités expliquent les oppositions régionales. On peut reconnaître en gros quatre domaines correspondant à quatre types de paysage.

Le domaine montagnard au-dessus de 1000 mètres d'altitude. Il se développe largement au Nord et au Nord-Ouest de l'image, entre les Bouches de Kotor et Cetinje. Il se prolonge ensuite, en se rétrécissant, jusqu'à la Rumija.

Un paysage de plateaux mamelonnés entre Cetinje et le lac de Scutari, avec des altitudes moins élevées (inférieures à 900 mètres) et s'abaissant vers le SE.

La dépression du lac de Scutari où quelques pitons rocheux dominent une vaste zone humide entourant le lac lui-même.

La région littorale, plus ou moins large, offrant un paysage de chainons peu élevés, tranchés par la mer en falaises et séparés par de petites plaines littorales bordant de larges baies.

a - le domaine montagnard

Il comprend sur la carte trois types de paysages.

- **de grands escarpements dénudés** associés à des fronts de chevauchements. Le plus impressionnant se développe au-dessus des Bouches de Kotor. A la base, le chevauchement du calcaire sur le flysch forme une limite nette dépourvu de grands glaciis et de grands cônes d'accumulation.

- **quelques sommets en forme de pitons**, tels le Lovćen, dominant une topographie d'ensemble plus calme mais très irrégulière dans le détail. Ce paysage couvert d'une forêt de feuillus assez continue, conserve une empreinte glaciaire importante.

- **de vastes espaces où le calcaire affleure à nu**. Ces espaces apparaissent très nettement sur l'image et correspondent probablement à des champs de lapiés dénudés. Des couleurs plus foncées soulignent des prairies ou des champs cultivés le plus souvent dans des dépressions karstiques ou nivo-karstiques pour les plus élevées. Les dolines et dépressions fermées apparaissent comme de petites taches nombreuses et de toutes dimensions. Le poljé de Cetinje est de loin la plus vaste.

b - Les plateaux mamelonnés apparaissent de manière progressive. Au Nord et à l'Est de Cetinje, l'évolution des couleurs sur l'image montre la transformation à la fois des formes du relief et de la couverture végétale. Les arbres se réfugient dans les dolines et dans les creux tandis que les parties en saillie sont couvertes d'une végétation très maigre.

c - Les milieux humides du lac de Scutari

Aux abords du lac de Scutari, apparaissent des vallées drainées, en particulier celle de la Morača, ainsi qu'une plaine marécageuse où les pitons calcaires forment des hums. Les couleurs les plus vives correspondent aux roselières.

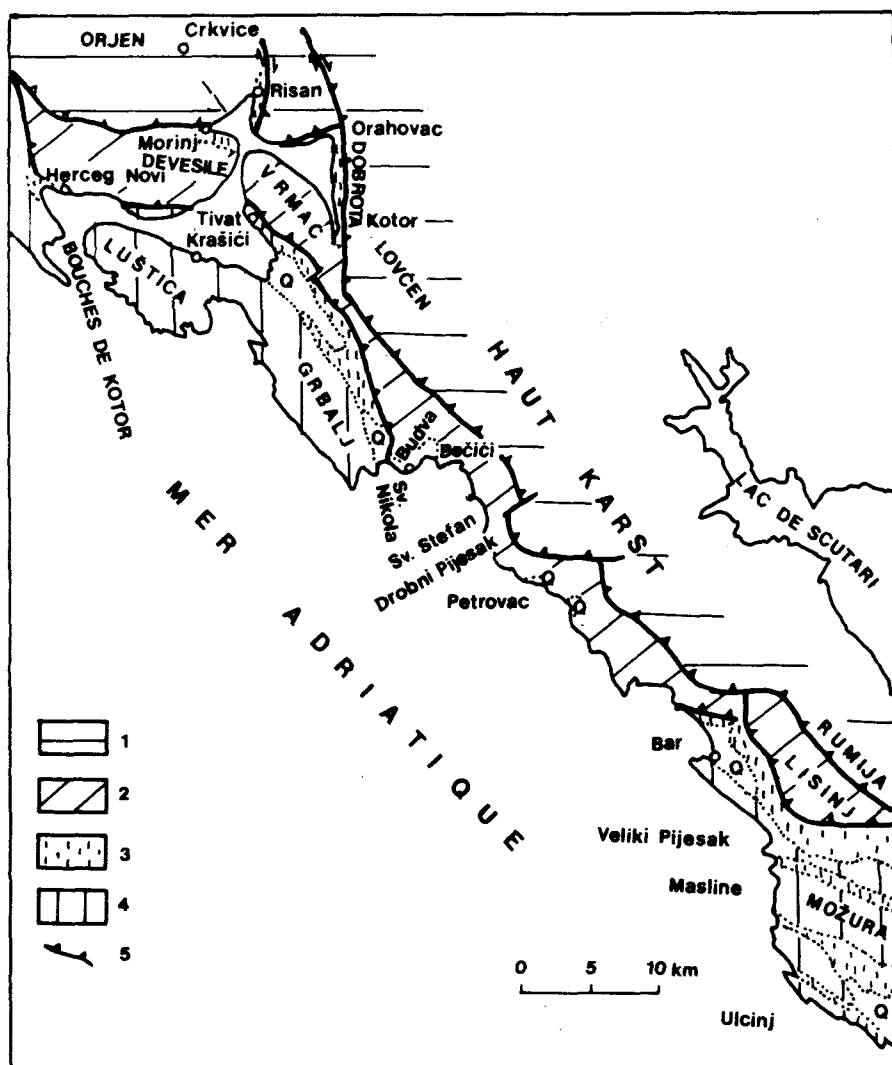


Fig. 1: Le littoral monténégrin: les unités structurales

1 - Haut Karst: calcaires néritiques du Trias au Crétacé, 2 - Zone de Budva: facies pélagique du Trias au Crétacé, 3 - Flysch (Eocène-Oligocène), 4 - Calcaires néritiques de la zone dalmate (Crétacé-Eocène), 5 - Chevauchements D'après la Carte Géologique de Yougoslavie, 1:500.000, Savezni geološki zavod 1970

Sl. 1: Strukturne enote črnogorskega primorja

1 - Visoki kras: neritični apnenec (trias do kreda), 2 - okolica Budve: pelagični facies (trias do kreda), 3 - fliš (eocen-oligocen), 4 - neritični apnenec dalmatinskega območja (kreda-eocen), 5 - narivi

Po Geološka karta SFRJ, 1:500.000, Savezni geološki zavod 1970

d - Le domaine littoral

Le domaine littoral offre une variété de paysages qui ne sera pas analysée en détail. L'image montre bien dans les nuances des couleurs qu'il s'agit d'un milieu bio-climatique différent qui s'arrête brusquement au pied des escarpements du Haut Karst. Les affleurements de flysch ravinés en badlands se remarquent au Sud de la baie de Tivat et au Sud de Bar.

III. LA FRACTURATION DU KARST

L'image permet de distinguer essentiellement trois types de fractures:

- **la fissuration** fine, très importante et visible par simple lecture sur l'image
- **les failles** soulignées par un escarpement ou une discontinuité dans les couleurs
- **les grands linéaments** dont le tracé repose sur une interprétation puisqu'ils se reconnaissent à des alignements parfois discontinus d'accidents linéaires orientés dans la même direction: fractures, escarpements, alignement de dolines ou de végétation plus dense.

1. La fissuration des calcaires et des failles

Elle est particulièrement visible et importante sur le Haut Karst, beaucoup moins évidente dans la région littorale. Elle forme des réseaux de cassures parallèles et rectilignes se poursuivant sur quelques kilomètres et recoupées obliquement par des cassures identiques (cf carte). En générale l'une des deux directions est dominante. Un tel ensemble est particulièrement net entre Cetinje et le Lovćen. Dans ce secteur les dolines sont très nombreuses et s'alignent dans le sens des fractures les plus importantes, d'orientation Nord-Est-Sud-Ouest.

La dépression karstique la plus importante, le poljé de Cetinje, est délimitée par un réseau de failles et de fractures qui ont influencé ses formes et peut-être sa localisation.

2. Les grands linéaments

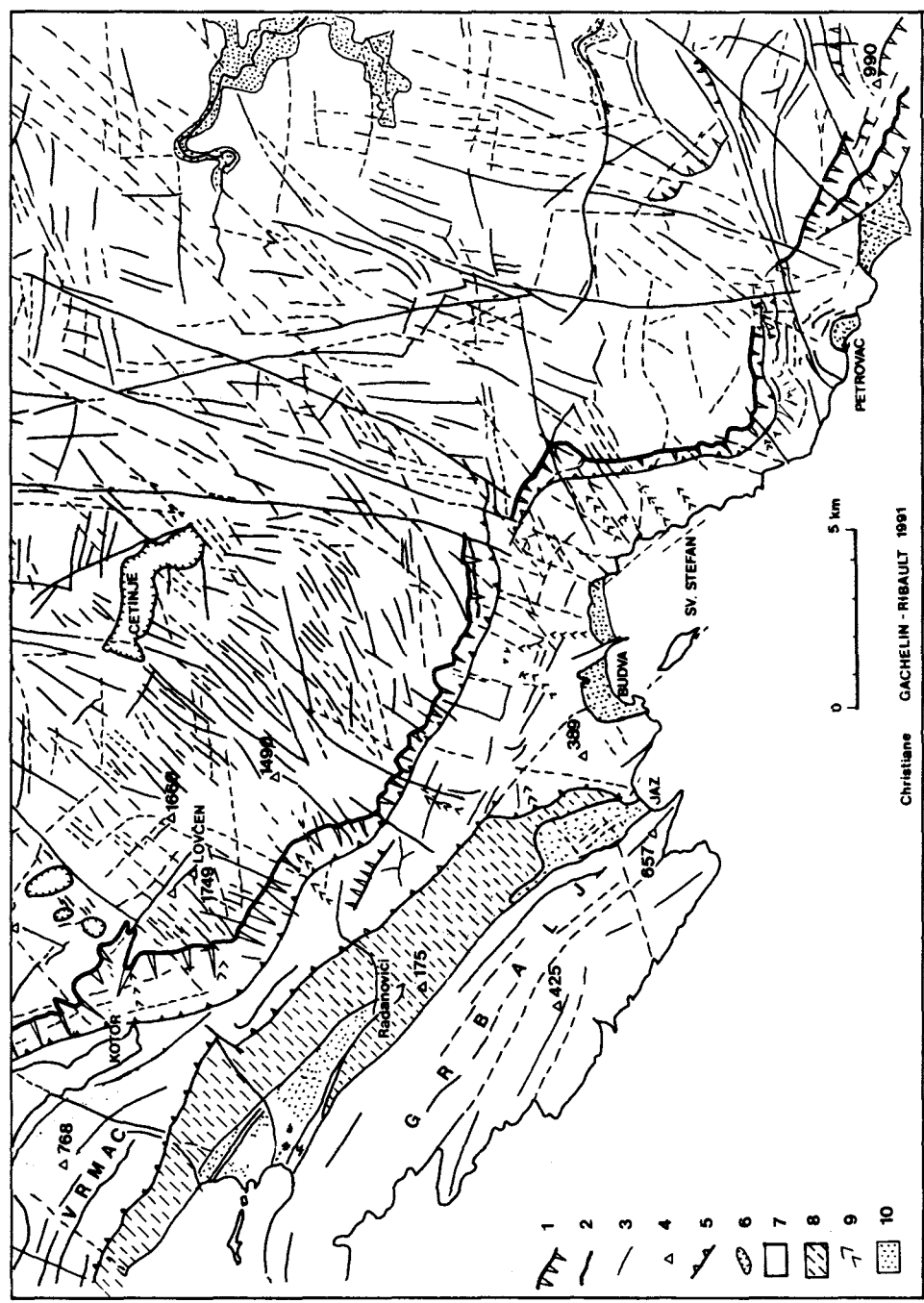
ont un tracé parfois rectiligne, parfois légèrement arqué et des directions variées indifférentes aux plis et chevauchement dinarique

Fig. 2: La fracturation du Monténégro Occidental. Interprétation de l'image SPOT du 31-8-1987

1 - escarpement important, 2 - ligne de crête, 3 - fracture, faille, linéament, 4 - sommet, 5 - chevauchement tertiaire, 6 - poljé, ouvala, grande dépression fermée, 7 - plateaux et montagnes calcaires, 8 - dépressions et collines dans le flysch, 9 - ravins, 10 - plaine et remblaiement quaternaire

Sl. 2: Prelomi na zahodu Črne gore. Interpretacija posnetka SPOT z 31.8.1987

1 - strmo pobočje, 2 - linija grebena, 3 - prelom, razpoka, brazda, 4 - vrh, 5 - terciarni nariv, 6 - polje, uvala, velika zaprta depresija, 7 - planote in apneniški hrbti, 8 - depresije in griči na flišu, 9 - globel, grapa, 10 - uravnavna in kvartarni sedimenti



qu'elles recoupent obliquement ou perpendiculairement. A la différence de la fissuration de détail, ces linéaments ne sont jamais parallèles entre eux. Ils se rapprochent et parfois se croisent en quelques points, particulièrement au fond des Bouches de Kotor, à Orahovac, à Budva, Petrovac et Bar. Ces linéaments forment parfois sur l'image des fissures ouvertes, creusant un sillon rectiligne qui traverse indifféremment les accidents mineurs ou majeurs du relief. Une analyse plus précise montrerait sans doute que certains d'entre eux ont joué en décrochement.

CONCLUSION

Cette présentation d'une image SPOT n'est pas, il s'en faut, exhaustive. Mais ce n'était pas le but recherché qui était de montrer l'utilisation possible d'une image satellite à haute résolution pour l'étude d'une région karstique. Confrontée à des observations de terrain et à des documents cartographiques, elle apparaît aujourd'hui comme un outil précieux pour l'analyse des formes de surface. Elle met en évidence le rôle de la fissuration et de tous les accidents cassants, parfois difficilement identifiables sur le terrain, dans l'impressionnant chaos de formes dues à la dissolution des calcaires telles qu'elles apparaissent dans les régions aussi profondément karstifiées que "l'hyperkarst" monténégrin.