

INDÉPENDAMMENT DES CONTRASTES OMBRE LUMIÈRE,  
 LES STRUCTURES GÉOLOGIQUES DANS LES RÉGIONS MONTAGNEUSES

Catherine MERING\*  
 et  
 Jean-François PARROT\*\*

RÉSUMÉ

En région montagneuse, l'analyse numérique peut permettre de suivre dans les zones d'ombre les traits structuraux que dessinent dans les zones éclairées les unités lithologiques. Pour ce faire, nous avons choisi de rendre comparables les rapports des valeurs des pixels qui limitent deux unités lithologiques dans une zone d'ombre aux rapports des valeurs des pixels qui limitent ces deux mêmes unités dans une zone éclairée. Pour atteindre ce but, on applique aux valeurs des pixels consécutifs la fonction suivante, soit dans la direction des lignes, soit dans celle des colonnes :

$$g[ID(K), ID(K+1)] = \frac{\text{Log}(\text{sup}(ID(K), ID(K+1)) + M_1) \cdot M_2}{\text{Log}(\text{inf}(ID(K), ID(K+1)) + M_1)} - M_2$$

ID (K) et ID (K+1) correspondent aux valeurs brutes de deux pixels K et K+1 consécutifs. M<sub>1</sub> et M<sub>2</sub> sont des constantes positives. M<sub>2</sub>, fixée à 500, permet de se déplacer dans le domaine [0,255], l'information élémentaire étant codée sur un octet. M<sub>1</sub> est une valeur empirique destinée à modifier l'échelle des valeurs résultantes selon la problématique envisagée. Les différents essais effectués sur une région test du Ladakh ont conduit à lui attribuer une valeur égale à 20 applicable à l'image de cette région.

En fait, les structures n'apparaissent vraiment que si l'on utilise une fonction f définie à partir de la fonction g et ne prenant en compte que les valeurs de réflectance dont le gradient en ligne est positif. Cette fonction qui filtre très sévèrement les valeurs, répond à la formulation suivante :

(a) si ID(K) ≥ ID(K+1)  
 $f [ID(K), ID(K+1)] = \frac{\text{Log}(ID(K) + M_1) \cdot M_2}{\text{Log}(ID(K+1) + M_1)} - M_2$

(b) si ID(K) < ID(K+1)  
 $f [ID(K), ID(K+1)] = 0$

A l'issue de ce traitement numérique fait, soit de gauche à droite dans la direction que définissent les lignes de l'image, soit de haut en bas selon les colonnes, on obtient un document cartographique dont toutes les ombres ont été supprimées (partant, le relief) et où ne subsistent que les traits structuraux et le réseau hydrographique. Il est alors possible de mettre en évidence, ainsi que l'illustre l'étude d'une zone test centrée sur les nappes de la Shillakong dans le Ladakh (Inde), non seulement les directions structurales dessinées par les unités lithologiques, mais encore les plis qui affectent cet ensemble.

Une étude comparative des résultats obtenus par d'autres méthodes telles que le filtre gradient, le filtre de Sobel ou le ratioing, montre que la fonction proposée répond mieux au problème que pose la reconnaissance dans les zones d'ombre d'une région montagneuse des unités reconnues dans les zones éclairées, et qu'elle se révèle un bon indicateur des directions structurales dans des régions de ce type.

\* Bureau de Télédétection, SSC. ORSTOM, 70 route d'Aulnay - F. 93140 BONDY  
 \*\* Laboratoire de Géologie, SSC. ORSTOM, 70 route d'Aulnay - F. 93140 BONDY



Fonds Documentaire IRD  
 Cote : Bx25327 Ex: 1

point in feature  
 nt values, the  
 alues of the

types of image

lan Operate

trast and en-  
 nctions of  
 c represent on  
 ocesses di faces  
 n different dire-

22610

ate this at  
 the India satellite  
 cameras ating

the choice of image  
 ations.

## INTRODUCTION

Dans le cadre des méthodes de traitement numérique des scènes Landsat, certains filtres, tels que le filtre gradient et notamment le filtre de Sobel (PRATT, 1978), cherchent à faire ressortir tous les types de frontières existant entre les différentes plages homogènes que comportent ces scènes. Les plages homogènes correspondent à des plages numériques regroupant des pixels dont l'écart entre leurs valeurs brutes de réflectance est nul ou faible. Ces méthodes mettent donc en évidence les éventuels sauts de valeur entre les réflectances moyennes de deux plages contiguës et homogènes. Parfaitement adaptées aux problèmes rencontrés dans des régions planes, ces méthodes se révèlent décevantes dans le cas des régions montagneuses où se superpose l'influence des contrastes ombre-lumière entraînant alors la formation de nouvelles frontières se surimposant à celles qui proviennent des structures géologiques. Les transformations numériques mises en œuvre par ces filtres ne sont pas de nature à permettre de suivre les frontières entre deux mêmes unités dans des zones géographiques aussi contrastées.

A l'exception de la zone intertropicale où la direction de l'éclairement change en fonction de la date de la prise de vue (le soleil, qui est dans le quadrant SE en hiver, passe au quadrant NE en été), ce sont généralement toujours les mêmes versants qui sont dans l'ombre en raison du caractère héliosynchrone du passage du satellite à une latitude donnée. Mais, même si dans la zone intertropicale, les versants septentrionaux et méridionaux peuvent être tour à tour éclairés, en revanche les versants occidentaux de la plus grande partie du globe sont toujours dans l'ombre (à l'exception d'une zone située au-dessus de  $75^{\circ}$  N environ où le soleil se trouve dans le quadrant SW). La méthode du ratioing (MAURIN et RIGUIDEL, 1978) tente de répondre en partie à ce problème en donnant, par le biais des rapports entre canaux qu'il implique, une vision «éclairée» des zones sombres de l'image d'origine. A ce titre, le ratioing peut être considéré comme une méthode d'approche complémentaire aux segmentations numériques pilotées sur les différents canaux (ORSTOM, 1978 ; LOINTIER et PIEYNS, 1981). Toutefois, les indications qu'il fournit dans les zones d'ombre ne se raccordent pas toujours ou se raccordent mal à celles qui ressortent pour les versants éclairés, de méthodes plus traditionnelles.

C'est parce que toutes ces méthodes ne permettaient pas en fait de suivre dans les zones d'ombre les indications structurales fournies par deux plages homogènes dans une zone éclairée, que la méthode décrite ici a été mise au point. Nous avons notamment cherché à faire en sorte que les frontières entre ces plages, pouvant par exemple correspondre au point de vue géologique aux limites entre deux unités ou deux formations lithologiques, puissent se suivre indifféremment dans les deux zones.

## PRINCIPE ET DESCRIPTIF DE LA MÉTHODE

Dans les scènes numérisées Landsat (EROS Data Center) correspondant à une vue prise au-dessus de régions montagneuses, les contrastes entre ombre et lumière sont fortement accentués par le relief. Comme on peut l'observer sur les différents canaux de la zone test prise dans l'Himalaya du Ladakh (vue Landsat 81.115.04.555 du 15 novembre 1972), la valeur brute des pixels des zones d'ombre n'excède pas, selon les canaux, 15 ou 20 ; corrélativement, dans les zones éclairées, les valeurs brutes des pixels de l'image varient de 16/21 à 127 (63 pour le canal 7). Naturellement, la valeur de ce seuil peut varier selon l'angle de l'élévation solaire qui, dans le cas présent, n'est que de  $32^{\circ}$  à la date de prise de vue (cet angle peut atteindre  $54^{\circ}$  environ au solstice d'été).

Quoi qu'il en soit, si l'on désire retrouver sur une même échelle numérique les unités lithologiques qui traversent indifféremment les zones sombres et éclairées, il convient de modifier l'échelle globale des valeurs de réflectance. Or, si le passage d'une unité lithologique à une autre unité différant de la précédente par le niveau moyen de sa réflectance est marqué par l'existence d'un «saut» dans la radiométrie d'un pixel au pixel voisin, l'importance de ce «saut» varie selon l'éclairement. Faible dans le cas des zones d'ombre, la différence entre les valeurs brutes des pixels situés aux limites de deux plages homogènes contiguës est nettement plus élevée dans les zones éclairées pour un même passage entre deux mêmes unités. En revanche, les rapports entre les valeurs brutes des pixels obtenus aux limites de ces deux mêmes plages homogènes sont beaucoup plus élevés dans les zones d'ombre qu'ils ne le sont dans les zones éclairées. Dans ce cas, la valeur des rapports qui indiquent l'existence d'une limite entre deux unités lithologiques distinctes au plan de leur réflectance, change lorsque l'on passe d'une zone éclairée à une zone sombre.

Il faut donc chercher à mettre au même niveau numérique les valeurs des rapports rencontrés dans ces deux genres de zones, en modifiant et adaptant les valeurs brutes des pixels en fonction du but à atteindre. Celui-ci consiste en fait à tendre de rendre identiques aux rapports des valeurs des pixels limitant deux plages homogènes et contiguës dans une zone d'ombre, les rapports des valeurs des pixels limitant ces deux mêmes plages dans une zone éclairée. En d'autres termes, dans un canal donné,

les valeurs des rapports qui matérialisent les limites entre deux unités lithologiques doivent être identiques indépendamment de l'éclairement.

La transformation des valeurs brutes des pixels d'une image peut être obtenue en effectuant, dans un premier temps, le rapport des logarithmes des valeurs de ces pixels. En effet, le logarithme népérien est une fonction continue et monotone dont la courbe représentative, dans un repère orthonormé est située sous la première bissectrice. On tend ainsi à rééquilibrer les rapports obtenus dans les deux types de zones.

Afin de pouvoir constituer une image superposable à l'image d'origine à partir des valeurs transformées, et compte tenu des moyens de traitement d'images numériques dont nous disposons actuellement (l'information élémentaire Landsat est codée sur un octet), il faut faire en sorte que l'échelle des valeurs transformées varie de 1 à 256.

La fonction à utiliser doit donc être une application de l'intervalle [1,256] sur lui-même.

Par ailleurs, les différents rapports possibles entre les logarithmes des valeurs brutes des pixels se répartissant entre deux séries de valeurs, la première comprise entre 1 et 255, la seconde entre 0 et 1, on obtient deux types de transformations suivant la nature de l'inégalité rencontrée entre les valeurs de deux pixels juxtaposés. Nous avons pris le parti de ne retenir que les rapports supérieurs à 1 en calculant ces rapports dans un seul sens, à savoir de la gauche vers la droite dans la direction que définissent les lignes, ou bien de haut en bas selon les colonnes.

Ce résultat peut être obtenu selon deux modalités voisines mais différentes :

- dans un cas, les rapports entre les valeurs des pixels sont faits en appliquant la fonction suivante :

$$g[ID(K), ID(K+1)] = \frac{\text{Log}(\text{sup}(ID(K), ID(K+1)) + M_1) \cdot M_2}{\text{Log}(\text{inf}(ID(K), ID(K+1)) + M_1)} - M_2$$

ID(K) et ID(K+1) correspondent aux valeurs brutes des réflectances de deux pixels K et K+1 consécutifs dans un même sens (soit sur une même ligne, soit sur une même colonne).  $M_2$  et  $M_1$  sont des constantes positives.  $M_2$  sert à la précision du calcul des valeurs (elle est égale à 500).  $M_2$  permet de se déplacer dans le domaine [0,255]. Il est évident que l'on doit corriger les valeurs brutes faibles des pixels avant d'appliquer la fonction Log, puisque cette fonction n'est pas définie pour des valeurs négatives ou nulles. La constante  $M_1$  a donc été définie empiriquement pour traiter l'image à analyser. Selon le canal d'origine, la «meilleure constante»  $M_1$  se situe entre 20 et 30 ; la «meilleure constante» est celle qui est le mieux adaptée au but recherché, à savoir suivre les structures quel que soit l'éclairement, en tout cas pour la région test étudiée.

- dans le deuxième cas, les rapports entre les valeurs des pixels consécutifs sur une ligne ou une colonne sont définis selon la fonction f suivante :

$$\text{si } ID(K) \geq ID(K+1) \\ f[ID(K), ID(K+1)] = \frac{\text{Log}(ID(K) + M_1) \cdot M_2}{\text{Log}(ID(K+1) + M_1)} - M_2$$

si  $ID(K) < ID(K+1)$

$$f[ID(K), ID(K+1)] = 0$$

Les variables et les constantes de cette fonction sont identiques à celles qui ont été définies dans le cas de la fonction g.

Comme on peut le constater, la fonction f filtre beaucoup plus sévèrement les valeurs rencontrées que la fonction g pour laquelle les rapports des valeurs de réflectance de tout couple de pixels voisins ne sont nuls que si ces deux valeurs sont identiques.

## DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS FOURNIS PAR CES DEUX FONCTIONS

Les cinq schémas de la figure 1 illustrent les résultats que l'on peut théoriquement attendre de l'application de l'une ou l'autre de ces deux fonctions à l'un des canaux d'une scène numérique.

- (a) Le premier schéma correspond à une scène où une couche verticale à réflectance faible et de direction est-ouest va d'un thalweg de direction nord-sud à un autre thalweg de même direction en passant par une ligne de crête également nord-sud.

En regard de la grille des valeurs brutes dans un canal des pixels de cette vue, est porté le résultat d'une segmentation numérique pilotée.

Fig. 1 — Schémas théoriques illustrant les propriétés de la méthode.

47	48	16	17	16	18	21	22	53	51	48	49	48	50	49	51	19	21	23
48	49	17	19	18	19	19	21	51	50	49	50	50	51	50	52	20	18	21
50	50	17	18	17	18	20	21	50	50	49	50	52	51	49	51	19	19	18
30	29	6	6	7	8	9	11	31	32	30	30	32	30	30	29	7	7	6
29	27	6	6	8	9	10	11	32	29	30	29	30	31	29	30	7	6	6
31	28	6	7	8	10	9	11	31	30	29	31	32	33	28	29	6	6	7
50	49	18	19	21	22	19	20	51	52	53	50	51	52	53	50	17	18	19
52	51	19	20	22	20	20	20	52	53	50	49	53	50	50	49	18	19	20

A. Valeurs brutes des pixels d'une scène théorique et résultat d'une «dégradation numérique» effectuée sur cette scène.

2	89	4	4	7	10	3	74	3	5	2	2	3	2	3	82	7	6
2	86	7	4	4	0	7	74	2	2	2	0	2	2	3	80	7	10
0	88	4	4	4	7	3	70	0	2	2	3	2	3	3	82	0	4
3	97	0	6	6	5	10	72	2	5	0	5	5	0	3	90	0	6
5	90	0	11	5	5	5	75	8	3	3	3	3	5	3	93	6	0
8	94	6	6	10	5	10	72	3	3	5	2	2	13	3	97	0	6
2	82	4	7	3	10	3	78	2	2	5	2	2	2	5	88	4	4
2	82	3	7	7	0	0	79	2	5	2	7	5	0	2	82	4	3

B. Utilisation de la fonction g dans la direction des lignes.

2	2	4	7	7	4	7	3	3	2	2	2	3	2	2	3	3	10	6
3	2	0	4	4	4	3	0	2	0	0	0	3	0	2	3	3	4	10
43	46	54	58	48	46	48	41	40	38	41	43	41	45	41	47	56	56	58
3	5	0	0	6	5	5	0	2	8	0	3	5	3	3	3	0	6	0
5	3	0	6	0	5	5	0	2	3	3	5	5	5	3	3	6	0	6
40	47	58	56	57	49	44	37	42	47	51	38	40	39	54	46	54	58	56
3	3	4	3	3	7	3	0	2	2	5	2	3	3	5	2	4	4	3

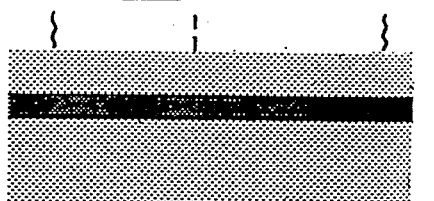
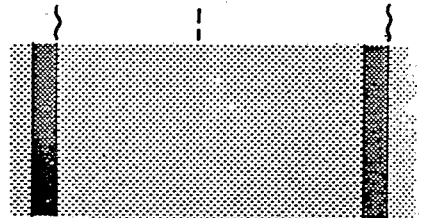
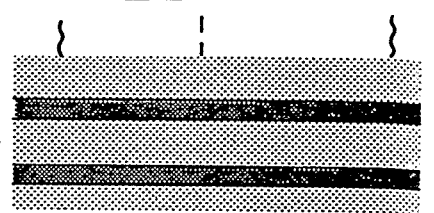
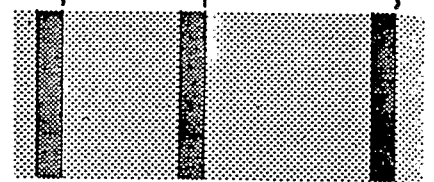
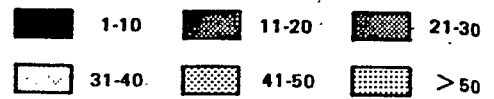
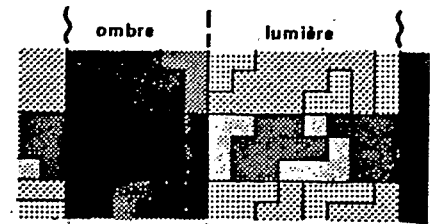
C. Utilisation de la fonction g dans la direction des colonnes.

0	89	0	4	0	0	0	0	3	5	0	2	0	2	0	82	0	0
0	86	0	4	0	0	0	0	2	2	0	0	0	2	0	80	7	0
0	88	0	4	0	0	0	0	0	2	0	0	2	3	0	82	0	4
3	97	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	3	90	0	6
5	90	0	0	0	0	0	0	8	0	3	0	0	5	0	93	6	0
8	94	0	0	0	5	0	0	3	3	0	0	0	13	0	97	0	0
2	82	0	0	0	10	0	0	0	0	5	0	0	0	5	88	0	0
2	82	0	0	7	0	0	0	0	5	2	0	5	0	2	82	0	0

D. Utilisation de la fonction f de gauche à droite sur les lignes.

0	0	0	0	0	0	7	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	10	6	
0	0	0	4	4	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	3	3	0	10
43	46	54	58	48	46	48	41	40	38	41	43	41	45	41	47	56	56	58	
3	5	0	0	0	0	0	0	0	8	0	3	5	0	3	0	0	6	0	
0	0	0	0	0	0	5	0	2	0	3	0	0	0	3	3	6	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	7	0	0	0	0	5	2	0	3	5	2	0	0	0	0	

E. Utilisation de la fonction f de haut en bas sur les colonnes.



~ thalweg --- ligne de crête



- (b) Dans le deuxième schéma de la figure 1, les rapports entre les valeurs des pixels rencontrées dans le 1er schéma sont calculés selon la direction des lignes, en appliquant la fonction g. Dans l'image située en regard de la grille des rapports calculés, les rapports élevés matérialisent la ligne de crête et les thalwegs, c'est-à-dire le partage entre zone d'ombre et zone éclairée.

- (c) Dans le troisième schéma, les rapports entre les valeurs des pixels sont faits comme précédemment, mais selon les colonnes ; sur l'image correspondant à cette transformation, seuls ressortent des traits horizontaux figurant les limites nord et sud de la couche géologique de direction N90 ; ces limites, pour un seuil de réflectance donné se suivent parfaitement dans les deux zones.

On constate ainsi que toute limite entre deux plages homogènes disparaît si elle est parallèle à la direction dans laquelle sont effectués les rapports entre pixels. Les directions horizontales s'estompent pour des rapports calculés selon les lignes ; inversement, les directions verticales disparaissent pour des rapports calculés selon les colonnes. L'expérience montre de plus que ceci est valable pour des directions faisant un angle faible de part et d'autre de la verticale ou de l'horizontale suivant la direction de la transformation retenue.

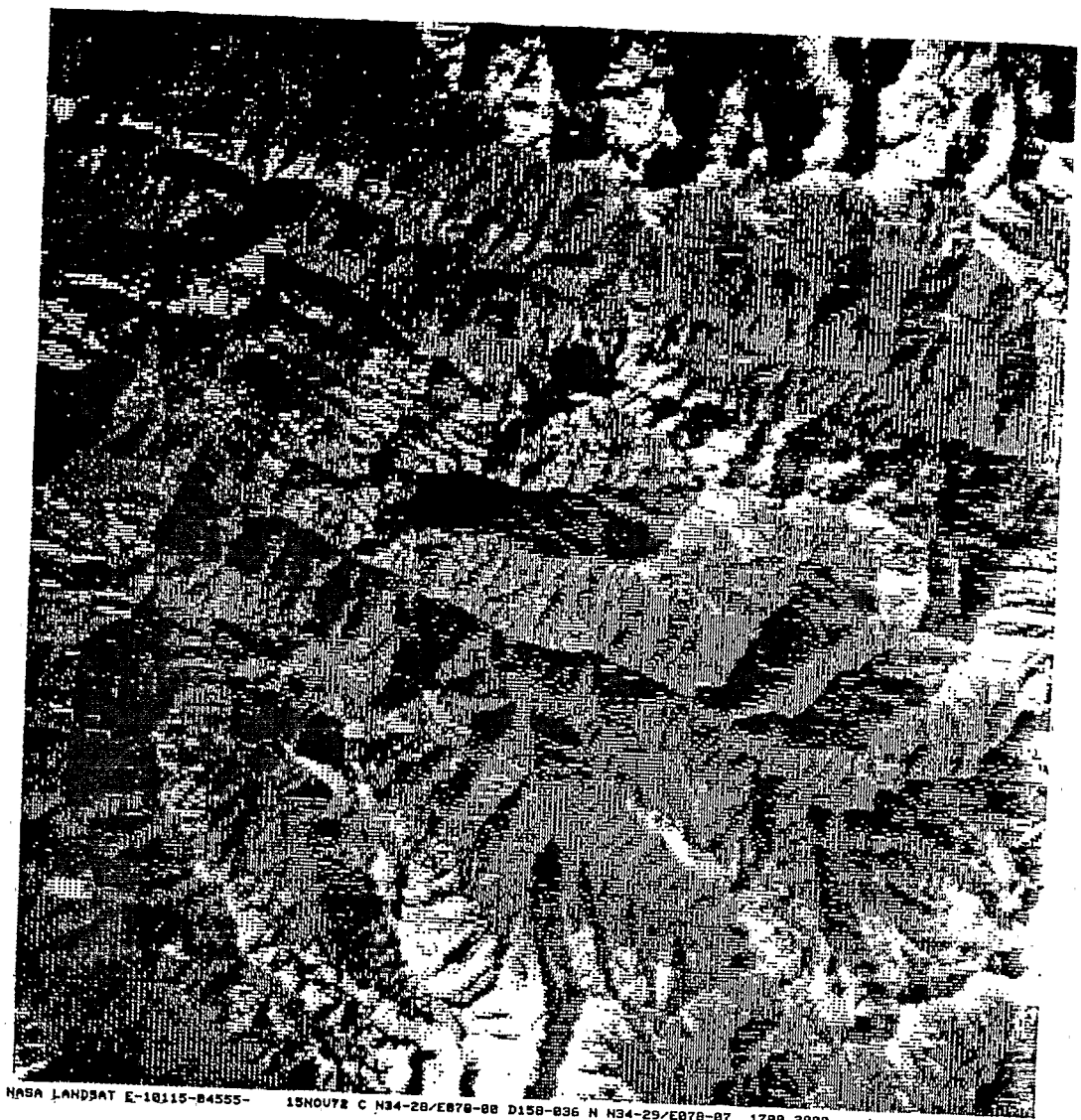
L'illustration qui vient d'être faite sur les deuxième et troisième schémas de la figure 1, des résultats obtenus à l'aide de la fonction g, est destinée à faire ressortir tout d'abord la nécessité d'effectuer deux traitements, l'un selon les lignes, l'autre selon les colonnes. Elle doit également rendre plus explicite les raisons du choix de la fonction f, raisons qui sont détaillées dans les paragraphes suivants à l'aide des résultats que fournit cette fonction sur la même vue théorique.

- (d) Sur les documents obtenus en appliquant cette fois la fonction f définie précédemment, les directions autres que celles qui correspondent aux structures géologiques sont essentiellement dues au réseau hydrographique car les lignes de crêtes sont systématiquement gommées par la méthode utilisée. Le quatrième schéma de la figure 1 en donne la raison. En effet, nous avons vu plus haut qu'en allant d'un pixel K à un pixel K+1, le rapport des valeurs modifiées de ces pixels est considéré comme nul si la réflectance du pixel K+1 est supérieure à celle du pixel K. Or, dans la région étudiée, la prise de vue est toujours faite aux alentours de 5 heures GMT, soit 10 h 30 à l'heure locale d'hiver et 9 h 30 à l'heure locale d'été ; partant, l'élévation solaire varie de 28° au solstice d'hiver à 54° au solstice d'été, et l'azimut passe pour sa part de 154°N en hiver à 111°N en été. Nous voyons que, dans ces conditions, et quelle que soit la date de prise de vue, seuls les versants orientaux et méridionaux sont éclairés. Ainsi, le passage d'un pixel K présentant une valeur de réflectance inférieure à celle du pixel K+1 qui lui fait suite, se rencontre chaque fois que l'on atteint une ligne de crête lorsque l'on effectue les rapports des valeurs des pixels, que ce soit de gauche à droite dans la direction des lignes, ou de haut en bas dans celle des colonnes. Dans ce cas, le rapport est par définition égal à zéro et les lignes de crêtes disparaissent (cf. schéma 4 de la figure 1).

- (e) De plus, comme l'illustre le cinquième schéma de la figure 1, il en va de même lorsque l'on passe d'une couche géologique plus sombre à une couche géologique plus claire ; ainsi, lors du calcul des rapports entre les valeurs des pixels dans un même sens, une couche géologique sombre située dans un contexte plus clair ou inversement une couche claire dans un contexte plus sombre, ne seront-elles matérialisées que par l'une de leurs deux bordures. La fonction f ne met en évidence que l'une de ces deux bordures, car elle ne prend en compte que les valeurs présentant un gradient positif en ligne et en colonne ; ceci présente l'avantage de faire ressortir les lignes structurales que dessinent des couches géologiques dont la largeur minimale est de l'ordre de deux, voire même dans certains cas d'un seul pixel. En revanche, lorsque cette condition n'existe pas (cf. fonction g), la matérialisation de l'ensemble des bordures des unités lithologiques de faible largeur ne permet pas, dans bien des cas, de faire ressortir les traits structuraux dessinés par des successions lithologiques fines, puisqu'il peut alors y avoir coalescence de tous les traits matérialisant ces bordures.

*Le fait de ne prendre en compte, à l'aide de la fonction f, que les rapports correspondant à des couples de pixels dont les valeurs de réflectance présentent un gradient positif, est donc une condition essentielle de la mise en évidence des traits structuraux d'une région donnée.*

Les documents obtenus par la méthode décrite ici soulignent donc essentiellement les grandes lignes du réseau hydrographique et les grandes lignes structurales. Signalons d'ailleurs que le passage entre ombre et lumière étant fortement tranché dans les thalwegs, les rapports calculés dans ce cas sont nettement plus élevés que lors du passage d'une unité lithologique à une autre. Il est ainsi possible d'obtenir des documents ne prenant en compte que les directions du réseau hydrographique (fig. 3).



NASA LANDSAT E-10115-B4555- 15NOV78 C N34-28/E078-08 D158-036 N N34-29/E078-07 1700 2000 1 488 6

0 5 km

Laboratoire  
Analyse  
Numerique  
Image  
ORSTOM

Fig. 2 — Image obtenue par «segmentation numérique» pilotée sur le canal 6.



NASA LANDSAT E-18115-84555- 15N0U72 C N34-28/E078-88 D158-836 H N34-29/E078-87 1700 2000 1 480 9

0 5 km



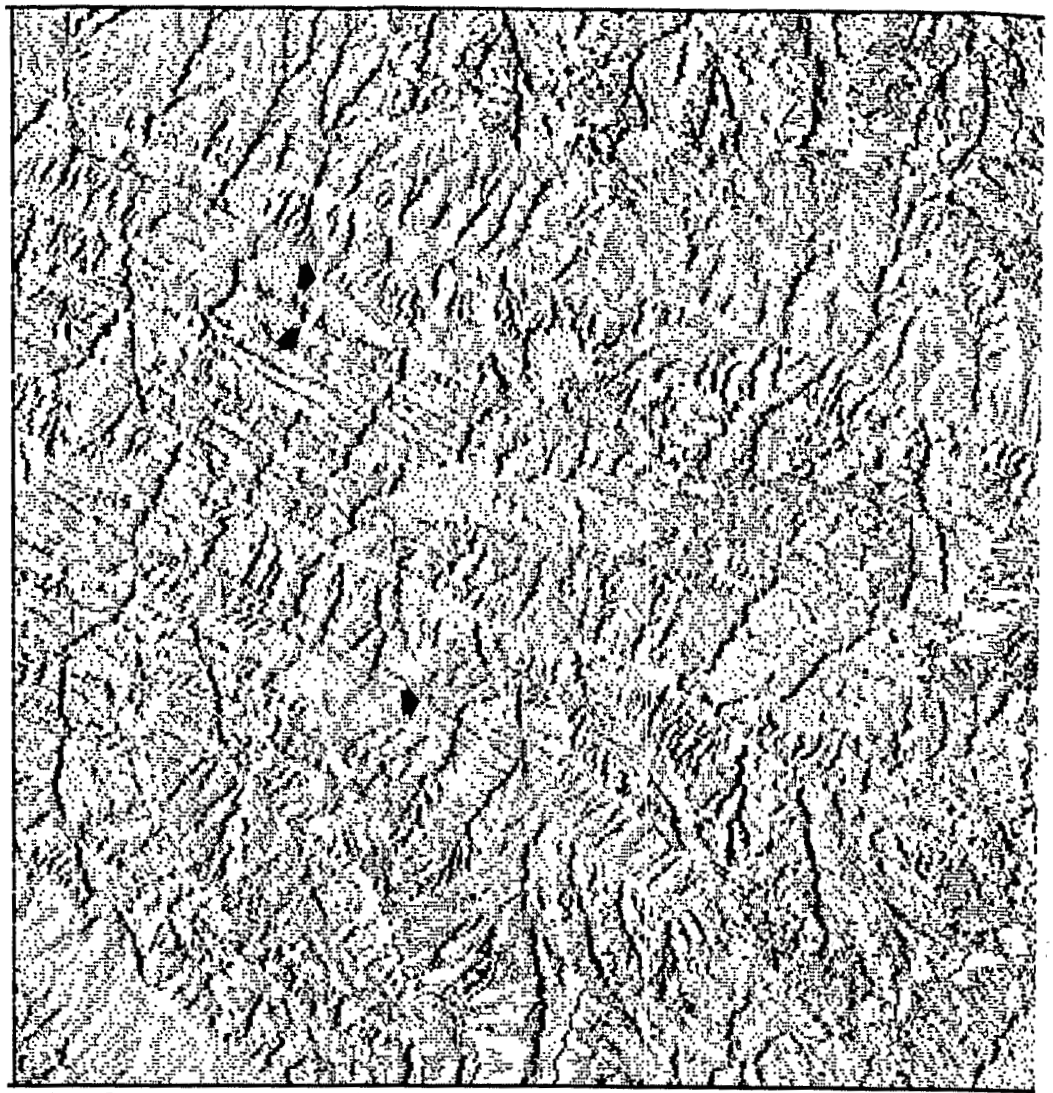
1 480 6

Laboratoire  
 Analyse  
 Numérique  
 Image  
 ORSTOM

Laboratoire  
 Analyse  
 Numérique  
 Image  
 ORSTOM

Fig. 3 - Visualisation du réseau hydrographique par surimpression du résultat obtenu par traitement (fonction f) selon les lignes et de celui obtenu par traitement selon les colonnes. Seules ont été retenues les classes numériques correspondant essentiellement au réseau hydrographique.





NASA LANDSAT E-10115-04555- 15NOV72 C N34-28/E079-00 D150-036 N N34-29/E078-07 1700 2000 1 400 9

0 5 km

Laboratoire  
Analyse  
Numerique  
Image  
ORSTOM

Fig. 4 — Visualisation des structures après traitement de l'image en appliquant la fonction  $f$  de gauche à droite dans la direction des lignes. Les flèches précisent la position de quelques charnières de plis.





MASA LANDSAT E-10115-04555- 15NOV72 C N34-20/E070-00 D150-036 N N34-29/E070-07 1700 2000 1 400 0

0 5 km

Laboratoire  
analyse  
numérique  
image  
ORSTOM

Laboratoire  
analyse  
numérique  
image  
ORSTOM

ction f de gauche  
quelques charnières

Fig. 5 — Visualisation des structures après traitement de l'image en appliquant la fonction f de haut en bas dans la direction des colonnes. Les flèches précisent la position de quelques charnières de plis.

## APPLICATION DE LA FONCTION F A LA RÉGION TEST DU LADAKH

L'application de la fonction  $f$  à la région du Ladakh occidental (fig. 2) sur laquelle la méthode a été testée et mise au point, peut conduire à une interprétation structurale des ensembles lithologiques rencontrés. Comme l'illustrent les figures 4 et 5, on observe, dans l'unité de la Shillakong (FUCHS, 1979 ; BASSOULET *et al.*, 1980) sur laquelle est centrée cette étude, le style tectonique qui affecte les différents ensembles constituant cette unité : vastes plis hectométriques qui caractérisent les calcaires triasico-liasiques de Kioto, plis pincés et/ou multiphasés que présentent les calcaires bariolés de la série de Fatula (Crétacé supérieur). En effet, si l'on prend le soin de repérer les directions inhérentes au réseau hydrographique dont les valeurs transformées sont, comme nous l'avons vu, parmi les plus élevées, il est possible d'isoler les directions ne relevant que des structures géologiques proprement dites. On constate alors que l'on peut non seulement suivre ces structures indépendamment de l'orientation des versants, mais encore mettre en évidence les charnières de plis qu'elles dessinent.

### CONCLUSION

La fonction  $f$  proposée qui filtre très sévèrement les nombreuses informations que comportent les documents Landsat, et dont l'application selon les lignes et les colonnes ne requiert pas de gros moyens, conduit à des documents cartographiques où ne subsistent plus que le réseau hydrographique et les directions structurales. Ces documents permettent donc de suivre, dans les zones montagneuses, certaines limites entre les unités lithologiques, indépendamment des contrastes ombre-lumière. On peut ainsi mettre en évidence dans des régions d'accès difficile la plupart des directions structurales en faisant en grande partie disparaître les effets dus au relief.

### BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BASSOULET J.P., COLCHEN M., JUTEAU Th., MARCOUX J. et MASCLE G. (1980) — L'édifice des nappes du Zaskar (Ladakh-Himalaya). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 290, D : 389-392.
- FUCHS G. (1979) — On the geology of the western Ladakh. *Jb. Geol.*, B-A, Vienne, 122 (2) : 513-540.
- LOINTIER M. et PIEYNS S. (1981) — Méthodologie de constitution d'une base de données d'occupation du sol par Télédétection. *Init. Doc. Tech. ORSTOM*, 47, Télédétection, 4, 91 p.
- MAURIN A.F. et RIGUIDEL M.J. (1978) — Éléments de morphologie. Généralités. *C.F.P., Notes et Mem.*, 14, 134 p.
- ORSTOM (1978) — Analyse multivariable. Procédure «Loterie». Application à l'analyse multispectrale en Télédétection. *Init. Doc. Tech. ORSTOM*, 39, Télédétection, 2, 78 p.
- PRATT W.K. (1978) — Digital image processing. *J. Willey and Sons*. Edit. New York, 750 p.