# PARTIE III Cartographie des milieux dégradés

# 11

# Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un SIG, cas du bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc)

HASSAN ANYS\*, FERDINAND BONN\* et ABDELAZIZ MERZOUK\*\*

\*Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada JIK 2R1; téléphone : 819-821-7964; télécopieur : 819-821-7238; télex : 05-836149

\*\*Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (I.A.V. Hassan II), B. P. 6202, Rabat, Maroc; téléphone : 212-7-7717-58; télécopieur : 212-7-7798-85

# Résumé

L'érosion hydrique, prise comme processus naturel que l'homme accélère, constitue l'accusé principal de la dégradation du patrimoine agropédologique en plus de la détérioration de la qualité d'eau qu'elle entraîne. Les facteurs topographiques et climatiques associés à la forte croissance démographique font du Maroc un milieu favorable au phénomène de l'érosion (hydrique, éolienne, etc.). Cette étude fait appel à la télédétection et à un système d'information géographique (SIG) pour quantifier les pertes de sols annuelles à l'aide de l'équation universelle de pertes de sol (USLE), la quantité de sédiments qui sera transportée jusqu'au cours d'eau de même que le potentiel érosif pour le bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc). Comme on s'y attendait, le plus grand taux de pertes de sol est localisé dans les régions de sols nus. Toutefois, il est à noter que ce taux de pertes de sol dans ces régions n'est pas seulement dû à l'absence de couvert végétal; en effet, le potentiel érosif, qui fait abstraction de la nature de l'occupation des terres et considère seulement les facteurs physiques du sol, a toujours attribué la plus grande valeur pour les sols nus. On remarque aussi que les pertes de sols importantes (plus que 20 t/ha/an) proviennent uniquement du tiers du secteur d'étude (34,94%); la carte des pertes de sols montre aussi que ces zones sont surtout localisées sur les

berges des cours d'eau. Dans les zones où la quantité de sédiments acheminée jusqu'au cours d'eau est aussi grande que celle perdue à l'origine, on peut conclure que la topographie et la nature du sol sont favorables à l'arrachage des matériaux et leur «livraison» jusqu'au cours d'eau. Cette étude a démontré que la télédétection, de concert avec d'autres sources de données procure des renseignements remarquables et uniques pour la détermination de l'érosion du sol, et de la susceptibilité à l'érosion, à des échelles variant entre 1:50 000 et 1:200 000.

# 1. Introduction

Une étude réalisée par la Food and Agriculture Organisation (F.A.O., 1977) au Maroc a montré que plus de 12 millions d'hectares de terres de cultures et de parcours sont menacés par l'érosion et que les deux tiers des terres actuellement cultivées nécessitent des interventions urgentes et des mesures de conservation sévères. Cette perte produite en amont se traduit par une réduction de la productivité des sols.

Dans une perspective de lutte anti-érosive, la Direction des eaux et forêts et de la conservation du sol au Maroc entreprend des travaux de conservation des eaux et du sol tels que l'aménagement pastoral, le reboisement et la construction de seuils de sédimentation.

Cependant, de tels efforts ne peuvent être efficaces et suffisamment rentables s'ils ne sont pas orientés vers les terres qui présentent la plus grande priorité d'intervention.

Cette étude vise à mettre en oeuvre les plus récentes techniques de cartographie et de calcul pour l'économie du temps et des moyens. En effet, elle fait appel à la télédétection et au système d'information géographique (SIG) pour développer une méthodologie qui permettra de quantifier et cartographier les pertes de sols annuelles, la quantité de sédiments qui sera transportée, à l'échelle de la parcelle, jusqu'au cours d'eau de même que le potentiel érosif pour le bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc). Cette quantification sera faite à l'aide de l'équation universelle de pertes de sol (USLE) (WISCHMEIER and SMITH, 1958) en utilisant des données provenant de diverses sources, à savoir des données de télédétection, un modèle numérique d'élévation, des données cartographiques, des données météorologiques, et des visites sur le terrain.

# 2. Matériel et méthode

# 2.1. Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la région de la haute Chaouia (plateau des phosphates), celleci est séparée de la plaine de Berrechid (basse Chaouia) par une flexure caractérisée dans le paysage par un contact net qui est marqué par une dénivelée de 60 à 100 m.

Le secteur d'étude est le bassin versant d'oued Aricha situé au sud-est de Settat (Maroc). Il couvre une superficie de 13 800 ha et présente un relief très accidenté avec des altitudes qui varient de 400 m à 795 m et des pentes fortes allant de 0 à 40% et parfois plus. Il ressort des données thermiques de la station de Settat que la zone d'étude est caractérisée par un régime thermique contrasté et saisonnier où on distingue de façon très nette une saison fraîche à froide et une saison estivale chaude.

En ce qui a trait à l'utilisation des sols, la zone d'étude est à vocation céréalière, dont le blé et l'orge sont les plus dominants et occupent 66% de la superficie agricole utile (S.A.U.).

# 2.2. Données disponibles

Données cartographiques :

- carte pédologique au 1:100 000 de la région de Settat (Maroc);
- deux cartes topographiques au 1:50 000 qui couvrent la zone d'étude.

Il faut noter aussi que des photographies aériennes à l'échelle 1:17 500 datant de 1982 et couvrant tout notre secteur d'étude sont disponibles.

Image satellitaire:

- image TM de Landsat-5 datant du 2 octobre 1986.

Données de terrain :

- données des températures enregistrées à la station de Settat pour une période de 30 ans (1933 à 1966);
- données pluviométriques mensuelles des 20 dernières années enregistrées à la station de Ben Ahmed, ainsi que l'intensité maximale en 24 heures de période de retour de 2 ans;
  - étude granulométrique de toutes les unités pédologiques de notre secteur d'étude.

# 2.3. Méthodologie

L'équation universelle de pertes de sol a été utilisée, dans plusieurs pays du monde, pour prédire la perte de sol, à long terme, provenant de l'érosion torrentielle, par ruissellement et en nappe (WISCHMEIER and SMITH, 1958).

La moyenne annuelle de pertes de sol par hectare (A) est déterminée à partir de 6 facteurs : l'indice d'érosivité des pluies (R), l'érodabilité propre à chaque sol (K), la longueur de pente (L), le degré de pente (S), la couverture et la gestion des terres (C) et les pratiques de conservation entreprises (P) (WISCHMEIER and SMITH, 1958).

COOK et al. (1985) ont utilisé, sur micro-ordinateur, un modèle comportant l'USLE et le coefficient de transportabilité des matériaux détachés pour désigner les principales surfaces sources en érosion des sols. Le même modèle a ensuite été utilisé par HESSION et SHANHOLTZ (1988) à l'aide d'un système d'information géographique pour estimer le potentiel d'apport en sédiments qui seront transportés à partir des terres agricoles jusqu'au cours d'eau.

Pour ce qui est de notre méthodologie, on a intégré tous les facteurs de l'USLE de même que le facteur de transportabilité des sédiments à l'échelle de la parcelle (DR) dans un SIG créé avec le logiciel PAMAP afin de pouvoir élaborer une carte de pertes de sol, une carte de potentiel érosif et une carte de potentiel de transport de sédiments jusqu'au cours d'eau. Il faut souligner aussi que la carte des indices C a été déterminée indirectement à partir des données de télédétection et de l'indice de végétation TSAVI (Transform Soil Adjusted Vegetation Index) (BARET et al. 1989).

# 2.3.1. Calcul de l'érosivité des pluies (R)

HEUSCH (1970) a développé pour des stations du Maroc une formule empirique qui permet de calculer le facteur d'érosivité des pluies; cette formule est :

$$R = 143 \log (\overline{P} \cdot P_{24}^2 \cdot 10^6) + 89,7$$

 $\overline{P}$  = précipitation moyenne annuelle (mm);

 $P_{24}$  = précipitation maximale en 24 heures, période de retour 20 ans (mm).

Pour le bassin versant d'oued Aricha, les précipitations moyennes annuelles calculées à la base des 20 dernières années sont de 422,8 mm. Les précipitations maximales en 24 heures ayant une période de retour de 20 ans sont de l'ordre de 50 mm d'où :

$$R = 143 \log (422.8 \cdot 50^2 \cdot 10^{-6}) + 89.7 = 97.6.$$

# 2.3.2. Calcul de l'érodabilité des sols (K)

L'érodabilité du sol a été déterminée, pour chaque type de sol, à partir du nomographe établi par WISCHMEIER et SMITH (1978). L'utilisation de ce dernier a nécessité des données de granulométrie, de taux de matière organique, de structure et de perméabilité. Ces données d'analyses ont été tirées de l'étude pédologique effectuée par ABDILLAH (1985) pour les communes rurales de M'Garto et Tlat Loulad de la province de Settat.

La figure 11-1 (voir cahier couleur) présente la carte pédologique numérisée dans PAMAP de même que la valeur de l'indice K pour chaque unité pédologique.

# 2.3.3. Calcul du facteur topographique (LS)

Les deux composantes du facteur topographique, à savoir la longueur de pente (L) et le degré de pente (S), ont été calculées à l'aide du modèle numérique de terrain (M.N.T.) créé à partir de la carte topographique au 1:50 000 ayant une équidistance de 10 m.

À partir du fichier pente on a pu établir les grandes classes de pente et en produire une carte (fig. 11-2, voir cahier couleur).

La longueur de pente (L), pour un point d'un bassin versant, est définie par la S.C.S. (Soil Conservation Studies) (ZING, 1940) comme la distance entre ce point et sa source de ruissellement qui est généralement la crête ou le sommet d'une colline.

Ainsi, le programme de calcul de longueur de pente parcourt le fichier des 8 classes d'orientation en format matriciel et assigne à chaque pixel une valeur correspondant au rang de ce pixel dans la suite de pixels de même orientation à laquelle il appartient. Pour chaque pixel le programme vérifie son orientation, ensuite il vérifie si le pixel suivant a la même orientation, si l'orientation est la même alors le programme assigne au pixel en cours de traitement la valeur du pixel en amont +1, sinon le pixel se voit assigner la valeur 1 sauf si l'orientation du pixel est zéro. Dans ce dernier cas, la valeur 0 est assignée au pixel pour indiquer qu'il s'agit d'un pixel sans orientation (pente nulle).

D'après WISCHMEIER et SMITH (1978), le facteur LS est calculé comme suit :

```
LS = (L/22,15)^m (65,41 \sin^2 S + 4,56 \sin S + 0,065)
```

```
où L = longueur de pente (mètre); S = Degré de pente; et m = 0.2 si S < 1\%; m = 0.3 si 1\% \le S < 3.5\%; m = 0.4 si 3.5\% \le S < 5\%; m = 0.5 si S \ge 5\%.
```

# 2.3.4. Calcul des facteurs de couverture au sol (C) et des pratiques culturales (P)

Afin d'établir une carte des indices «C», il a fallu élaborer une carte d'occupation des terres et assigner à chaque type de couverture au sol une valeur «C» qui lui est propre.

La cartographie de l'occupation des terres a été effectuée à l'aide du logiciel de traitement d'images EASI/PACE de PCI sur une image TM de Landsat-5.

Afin de rendre plus facile la classification thématique de notre image on a calculé l'indice de végétation TSAVI qui nous a permis de mettre plus en relief les différentes classes d'occupation des terres. Notre choix s'est posé sur cet indice parmi de nombreux autres car il est ajusté pour les caractéristiques de la droite des sols nus propre à chaque image afin d'éliminer l'erreur de calcul de l'indice de végétation pour un faible indice foliaire «L.A.I.» (Leaf Area Index) ou un faible couvert végétal qui sont des situations courantes dans notre secteur d'étude.

D'après BARET et al. (1989), le TSAVI se calcule comme suit :

$$TSAVI = \frac{a (R_{nir} - a R_r - b)}{(R_r + a R_{nir} - a b)}.$$

Les résultats de la régression entre les bandes rouge et proche-infrarouge des pixels choisis ont permis de calculer les deux paramètres a et b de la droite des sols nus :

a = 1,30554542

b = -1.84223629

La figure 3 montre le résultat de calcul du TSAVI avec les grandes classes qu'on a pu établir en s'appuyant sur la photo-interprétation (photographies aériennes au 1:17 500) et les valeurs de cet indice.

Il faut noter cependant, que la classe «eau» n'a pu être bien différenciée puisque tous les cours d'eau sont couverts par une végétation verte très dense.

Par conséquent, on a numérisé sur PAMAP les cours d'eau de la carte topographique au 1:50 000 puis on les a superposés au résultat de classification par le TSAVI et la photointerprétation; le résultat final est présenté sur la figure 11-4 (voir cahier couleur).

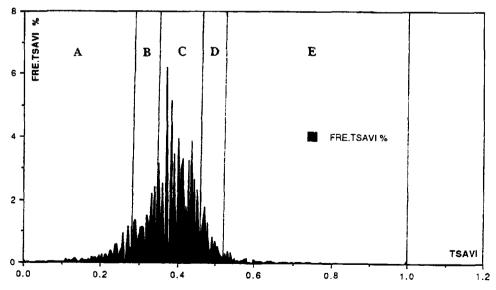


Figure 3. Découpage de l'histogramme du TSAVI; A = sols nus; B = jachère; C = cultures assolées à sec; D = forêt et reboisement peu denses; E = cultures irriguées et végétation dense le long des oueds

La dernière étape de l'élaboration de la carte des indices C est la détermination de ce dernier pour chaque type de couverture au sol et l'assignation de ces valeurs aux zones correspondantes dans l'image TM.

La forêt et le reboisement existant dans notre secteur d'étude, de climat semi-aride, ne comportent pas, ou peu, de broussailles dans les sous-bois. Le facteur C pour cette catégorie d'occupation des terres a été déterminé à partir de la table 10 figurant dans «Agriculture handbook no. 537» (WISCHMEIER and SMITH, 1978).

Pour les autres catégories d'occupation du sol, les valeurs du facteur C ont été tirées des résultats expérimentaux adoptés par OMAKUPT *et al.* (1988) pour les mêmes types d'occupations des terres (tab. I).

Type de cultures	Indice C	Superficie (ha)	Superficie (%)
Cultures irriguées et végétation dense le long des oueds	0,28	164,34	1,19
Forêt et reboisement peu denses	0,39	781,38	5,65
Cultures assollées à sec (céréales, fourrage, etc.)	0,40	10464,14	75,68
Jachère	0,45	2169,70	15,69
Sols nus	1,00	246,51	1,79
Total		13 826,07	

Tableau I. Indice C par thème d'utilisation du sol

# 2.3.5. Calcul du coefficient de transportabilité des sédiments à l'échelle de la parcelle (DR)

Le coefficient de transportabilité des sédiments à l'échelle de la parcelle (DR) a été défini par HESSION et SHANHOLTZ (1988) à l'aide de l'expression suivante :

$$DR = 10 (r/L')$$

où r est la différence d'altitude entre la cellule agricole et la cellule du cours d'eau qui lui est associée et L' est la distance entre ces deux cellules.

Pour le calcul de la distance L', on a utilisé le même programme de calcul de longueur de pente auquel on a appliqué une seule modification. Le programme exécute la même fonction que ce qu'on a décrit dans la section (2.3.3) sauf que les orientations recherchées ont été inversées; en d'autres termes, le programme recherche des orientations du même sens que celui du balayage du fichier en format matriciel.

D'autre part, un nouveau programme a été développé pour le calcul du relief r. Ce programme utilise pour cet effet le fichier des orientations et le modèle numérique d'altitude.

Après avoir calculé le relief (r) et la distance au plus proche cours d'eau (L') ces deux fichiers ont été transférés sur PAMAP afin de calculer le coefficient de transportabilité des sédiments DR.

# 3. Présentation et analyse des résultats

# 3.1. Application du modèle USLE et sa combinaison avec le coefficient DR

Les cinq facteurs actuels (R, K, LS, C et P) furent intégrés au SIG PAMAP et la fonction de modélisation USLE, définie comme le produit de chaque facteur, a été utilisée pour obtenir la carte finale d'érosion des sols. Les valeurs d'érosion sont quantifiées en tonnes par hectare par année (fig. 11-5, voir cahier couleur).

Une autre carte du potentiel érosif, qui met l'accent sur les facteurs physiques du sol (R, K et LS), a été produite en considérant uniquement le produit de ces derniers dans l'USLE (fig. 11-6, voir cahier couleur).

D'autre part, la carte du coefficient DR a été combinée à l'USLE pour élaborer la carte représentant les quantités de sédiments qui seront transportés jusqu'au cours d'eau (fig. 11-7, voir cahier couleur).

# 3.2. Pertes des sols et potentiel érosif

Étant donné que les pertes de sols moyennes varient en fonction de l'occupation des terres, celles-ci sont représentées au tableau II pour chaque type de couverture au sol. Le plus grand taux de pertes de sol est localisé dans les régions de sols nus; toutefois l'existence d'une telle perte de sol n'est pas seulement due à l'absence de couvert végétal; en effet, le potentiel érosif, qui fait abstraction de la nature de l'occupation des terres, a toujours attribué la plus grande valeur pour les sols nus. Par conséquent, ces sols ne sont pas seulement nus, mais se trouvent en plus dans des régions à topographie très accidentée avec un sol de nature favorable à l'érosion.

Pour ce qui est des autres occupations des terres à savoir les cultures irriguées, forêt et reboisement et les cultures assolées à sec, le type de couvert en place est nécessaire pour freiner l'érosion hydrique; en effet, l'abstraction de ce couvert donne des pertes de sols (potentiel érosif) jusqu'à trois fois plus grandes que celles avec ce même couvert.

D'autre part on a pu établir les statistiques pour les cartes de pertes de sols et du potentiel érosif; le résultat de ces statistiques est présenté au tableau III.

Comme on peut le constater un grand pourcentage du secteur d'étude présente une perte de sols inférieure à 10 t/ha/an; ceci ne veut surtout pas dire que ces secteurs sont bien aménagés car ce taux de pertes de sols vient soit du fait que la pente est faible soit du fait que la nature du sol intervient contre l'érosion.

Tableau II. Pertes de sols et potentiel érosif moyens pour chaque thème d'occupation des terres

Couverture au sol	Perte de sol moyenne (t/ha/an)	Potentiel érosif moyen (t/ha/an)	
Cultures irriguées	6,21	22,18	
Forêt et reboisement	7,45	19,10	
Cultures assolées à sec (céréales, etc.)	10,29	25,73	
Jachère	12,34	27,42	
Sols nus	42,35	42,35	

Valeur de classe Superficie dans le cas de perte de sol Superficie dans le cas du potentiel V (t/ha/an) érosif (ha et %) (ha et %) 0≤V<10 5303,30 38.36% 5303,30 38,36% 10≤V<20 3570.66 25.82% 2224,40 16,08% 20<V<30 917,79 6.64% 440.55 3.19% 30≤V<40 1739,05 12,57% 1027,33 7,43% 40≤V<50 12,60% 1988,28 1741,85 14,38% 50≤V≤60 92,39 0.67% 364,79 2,64%

Tableau III. Statistiques des cartes de pertes de sols et du potentiel érosif

On remarque aussi que les pertes de sols importantes (plus que 20 t/ha/an) proviennent uniquement du tiers du secteur d'étude (34,94%); la carte des pertes de sols (fig. 11-5, voir cahier couleur) montre aussi que ces zones sont surtout localisées sur les berges des cours d'eau.

3,34%

2477,42

17,92%

# 3.3. Quantité de sédiments transportés jusqu'au cours d'eau

461,03

La carte des quantités de sédiments acheminés jusqu'au cours d'eau est issue de la carte des pertes de sols à laquelle on a appliqué le coefficient DR. Ce coefficient, compris entre 0 et 1, est fonction surtout de la topographie; il aura des valeurs proches de 1 pour les zones à relief accidenté et des valeurs proches de 0 pour des zones relativement planes.

Ainsi, en comparant la carte des pertes de sols (fig. 11-5, voir cahier couleur) à celle de la quantité de sédiments transportés jusqu'au cours d'eau (fig. 11-7, voir cahier couleur), on observe qu'il existe des régions qui ont une grande perte de sols mais que seule une quantité plus faible de ces sédiments arrivera jusqu'au cours d'eau; ceci est dû au fait que le coefficient DR a une valeur proche de 0. Par conséquent, la nature du sol est très favorable à l'érosion mais ce sol se trouve dans une zone où le relief n'est pas suffisamment accidenté pour que tous les sédiments arrachés parviennent au bas de la pente.

Dans le cas des zones où la quantité de sédiments acheminés jusqu'au cours d'eau est aussi grande que celle perdue à l'origine, on peut seulement conclure que la topographie et la nature du sol sont favorables à l'arrachage des matériaux et leur «livraison» jusqu'au cours d'eau.

On observe aussi, qu'il existe toujours des secteurs, même s'ils représentent un faible pourcentage, qui produiront plus de 60 t/ha/an de sédiments qui vont se retrouver dans le réseau hydrographique. Ces zones sont facilement identifiables sur la carte de transportabilité des sédiments ce qui facilitera l'intervention sur le terrain à leur niveau pour lutter contre cette source de pollution.

# 4. Conclusions

V>60

L'utilisation des données de télédétection pour évaluer des informations sur de grands territoires est plus objective et efficace que la compilation des données de plusieurs efforts individuels. Les données de télédétection et les analyses sur ordinateur ne remplacent pas les levés sur le terrain précis et détaillés. Mais de telles données peuvent aider les scientifiques

et les décideurs à déterminer la portée d'un problème et concentrer les activités là où elles seront plus efficaces.

Cette étude multithématique est un exemple de l'utilisation des données de télédétection combinées à des données ponctuelles (météorologie) et cartographiques (topographie, pédologie); l'intégration des divers éléments étant effectuée à l'aide d'un SIG.

Cette étude a démontré aussi que la télédétection, de concert avec d'autres sources de données, peut procurer des renseignements remarquables et uniques pour la détermination de l'érosion du sol, et de la susceptibilité à l'érosion, à des échelles variant entre 1:50 000 et 1:200 000. En effet, la plus grande échelle avec laquelle on peut produire nos cartes est l'échelle 1:50 000 puisque nous avons utilisé des données TM (résolution 30 m x 30 m) et une carte topographique de base à l'échelle 1:50 000. Quant à la plus petite échelle elle est de 1:200 000 puisqu'avec des échelles plus petites il n'y aurait pas d'intérêt cartographique majeur pour des fins d'aménagement. Notons toutefois que l'échelle des cartes produites dans le présent article a été choisie dans l'unique but de réduire l'espace que ces dernières pourraient occuper avec des échelles plus grandes.

Pour ce qui est de l'imagerie TM, cette dernière s'est avérée appropriée et équivalente à d'autres sources classiques d'information, du moins à la même échelle, pour la cartographie de l'érosion par l'entremise de l'identification du couvert végétal et de l'utilisation des terres. D'autre part, un système d'information géographique, utilisé de concert avec l'équation universelle de pertes de sol permet la caractérisation des régions sujettes à l'érosion de même que certains problèmes de pollution reliés à ce phénomène.

# 5. Remerciements

Nous tenons à remercier l'Agence canadienne pour le développement international (ACDI) (bourse d'études supérieures de l'auteur) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada (subvention OGP0006043) pour avoir financé partiellement les travaux de recherche associés à cette étude.

Nous tenons également à remercier Paul-André Chassé et Jean Daoust pour leur aide lors du traitement des données.

### 6. Références

- ABDILLAH, M. 1985. Cartographie au 1:100 000 et caractérisation des sols dans les communes rurales de M'Garto et Tlat Loulad (province de Settat). Mémoire de 3<sup>e</sup> cycle en agronomie, I.A.V. Hassan II, Rabat, Maroc.
- BARET, F., GUYOT, G. et MAJOR, D. J. 1989. TSAVI: A vegetation index wich minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. International geoscience and remote sensing symposium, vol. 3, p. 1355-1358.
- COOK, D. J., DICKERSON, W. T., RUDRA, R. P. et WALL, G. J. 1985. A microcomputer model for evaluation of conservation systems. American society of agricultural engineers, Paper no. 85-2044, St. Joseph, Michigan, 13 p.
- F.A.O. 1977. Érosion et aménagement des bassins versants dans les pays méditerranéens. Terre, eaux et hommes, vol. 9, nº 30, p. 27-45.

### H. Anys, F. Bonn et A. Merzouk

- HESSION, W. C. and SHANHOLTZ, V. O. 1988. A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution. Journal of soil and water conservation, p. 264 266.
- HEUSH, B. 1970. Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. Société des sciences naturelles et physiques, Maroc, p. 41-54.
- OMAKUPT, M., IMPAT, P., KANCHANAKUL, N. and BUAPRADAPKUL, D. 1988. Soil erosion mapping in the Chiang Mai basin using remote sensing data and geographic information system. Proceeding of the final seminar under the SIDA-Thaïland Landsat project, p. 12-14.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. American geophysical union transactions, 39, p. 285-291.
- WISCHMEIER, W. H. and SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Agriculture Handbook no 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 58 p.
- ZING, A. W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agricultural engineers, 21, p. 59-64.

# 12

# Suivi par télédétection de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger)

SALIFOU KARIMOUNE\*, JEAN ALEXANDRE\*\* et ANDRÉ OZER\*\*\*

\*Faculté de pédagogie, Université de Niamey, B.P. 10963 Niamey, Niger

\*\*Laboratoire de géographie physique, Université de Liège, 7, place du 20-Août, B-4000, Liège, Belgique; téléphone : (32) 41-66-52-67; télécopie : (32) 41-66-57-00

\*\*\*Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Université de Liège, 7, place du 20-Août, B-4000, Liège, Belgique; téléphone : (32) 41-66-54-46; télécopie : (32) 41-66-57-00

# Résumé

Dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF, une étude de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger) a été entreprise par les Universités de Liège et de Niamey. Les méthodes utilisées sont l'interprétation visuelle d'une composition colorée d'une sous-image HRV de SPOT couvrant une partie du secteur d'étude et la confrontation de photographies aériennes numérisées avec l'image satellitaire. Les mêmes traitements (seuillage interactif et classification) ont été appliqués à la sous-image et aux photographies aériennes. La comparaison d'images diachroniques (les photographies aériennes sont de 1957-1958 et de 1975 et l'image satellitaire de 1987) permet d'apprécier et d'estimer la réduction de la couverture végétale et les remaniements éoliens entre 1957-1958 et 1987. La végétation ligneuse, de plus en plus contractée, est circonscrite aux lits des oueds et aux dépressions où la nappe n'est pas très profonde, quoique les eaux de surface aient pratiquement disparu. Quant aux remaniements éoliens, ils affectent la quasi-totalité des sommets des dunes anciennes dépourvues de végétation et fragilisés par les cultures. Une campagne de vérité-terrain a permis de valider la plupart des interprétations.

# 1. Introduction

Dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF sur le thème «Télédétection et désertification», une étude consacrée à la dégradation des milieux de la région de Zinder a été entreprise par les Universités de Niamey et de Liège. Cette étude tente de repérer par télédétection des indices de désertification afin d'en suivre l'évolution dans le temps. Les travaux comportent trois étapes.

La première étape a consisté en l'interprétation de photographies aériennes réalisées par l'Institut géographique national (IGN) de Paris (France) en 1975 (vol NIG 40/600 de marsavril 1975 à l'échelle du 1:60 000). Elle a abouti à l'élaboration d'une carte morphologique. Cette recherche a fait l'objet d'une affiche aux deuxièmes journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF à Thiès (Sénégal) ainsi que d'une publication (KARIMOUNE et al., 1990).

La deuxième étape a été la confrontation des photographies de 1975 avec celles de 1957-1958 (ces dernières réalisées également par l'IGN au cours des missions AOF ND 32 X et ND 32 XVI à l'échelle du 1:50 000). Elle a permis de détecter un certain nombre d'indices de désertification : réduction de la couverture végétale, changement d'état de surface des sables dunaires de certains secteurs, érosion éolienne par déflation, etc. Au cours de cette deuxième phase, l'acquisition d'une image satellitaire HRV de SPOT prise le 22 novembre 1987 nous permet d'avoir une autre vue du secteur d'étude. La comparaison des situations de 1957-1958, 1975 et 1987 souligne l'amplification des indices détectés, en particulier la déflation et la remobilisation des sables dunaires. Les principaux résultats de cette recherche ont été communiqués lors des troisièmes journées scientifiques de l'UREF à Toulouse.

Au cours de la troisième étape, des photos aériennes ont été numérisées et soumises à des traitements permettant, par comparaison de situations diachroniques, une meilleure visualisation de l'évolution des processus de désertification. En outre, une campagne de vérité-terrain a été effectuée qui confirme la plupart des interprétations.

Le but de cette communication est de présenter les résultats de la dernière étape, à savoir les traitements numériques des photos aériennes et la campagne de vérité-terrain.

# 2. Le cadre géographique

L'étude s'intéresse à la région située à l'est de Zinder (Niger méridional) qui est comprise entre 13°20' et 14°30' de latitude nord, 9° et 10°10' de longitude est (fig. 1). Cette région est caractérisée par une pluviométrie annuelle variant du sud au nord, entre 575 mm (Magaria, moyenne 1938-1987) et 260 mm (Tanout, moyenne 1936-1987). Elle s'étend à la fois sur la zone soudano-sahélienne et la zone sahélienne *stricto sensu*. La zone sahélienne est celle qui reçoit entre 150 et 400 mm de précipitations annuelles et la zone soudano-sahélienne, celle dont la pluviométrie annuelle est comprise entre 400 et 600 mm (AUBREVILLE, 1949; LE HOUEROU, 1979). Selon la classification d'AUBREVILLE (1949), ces zones sont caractérisées, en fonction de la pluviométrie, par une végétation de savane et de steppe arborées à arbustives. Nous avons pu observer, sur le terrain, que la composition floristique varie de façon très sensible lorsqu'on va du sud vers le nord. On passe de formations riches en *Accacia albida* (localement appelé gao) avec, dans les dépressions, *Adansonia digitata* (baobabs) et *Hyphaene thebaïca* (palmiers doum), à des formations où dominent les arbustes épineux (*Accacia seyal*, *Accacia radiana*, *Balanites aegyptiaca*, etc.), et des espèces xérophyles comme *Boscia senegalensis*.

Les traits morphologiques marquants de la région sont des reliefs de quartzite de quelques dizaines de mètres d'altitude relative qui forment des barres plus ou moins allongées

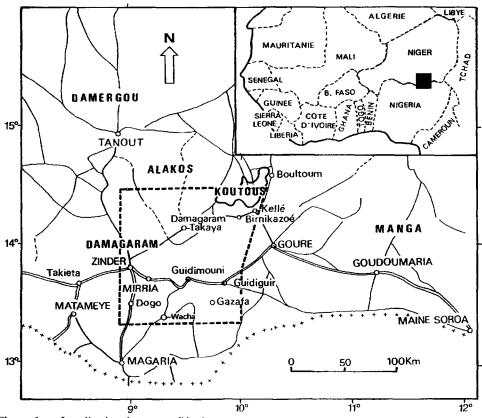


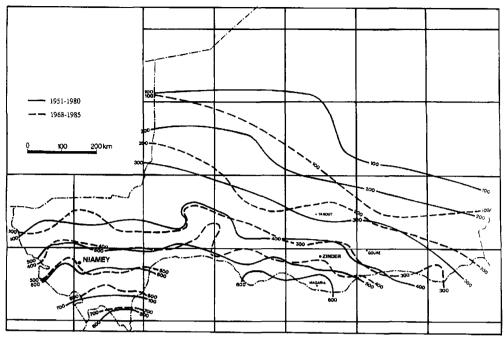
Figure 1. Localisation du secteur d'étude

présentant quelquefois des virgations (GREIGERT et POUGNET, 1967) et, surtout, un modelé dunaire hérité des phases arides du Quaternaire (KARIMOUNE et al., 1990 et 1993).

Depuis une vingtaine d'années, les totaux pluviaux annuels ont fortement diminué, engendrant un net décalage des isohyètes vers le sud (fig. 2). Subséquemment, la couverture végétale déjà fort affectée par la pression humaine, s'est nettement dégradée et la protection des sols s'en est trouvée amoindrie. En outre, les vents efficaces sont devenus plus fréquents (KARIMOUNE et al., 1993). Cette évolution a pour conséquence la remise en mouvement des sables des dunes anciennes et l'érosion éolienne des sols par exportation des sédiments fins. Ce sont là des indices de désertification repérables par télédétection. Leur localisation et le suivi de leur évolution permettent de cerner les secteurs les plus sensibles afin de mieux cibler les zones où des actions de protection et de conservation de l'environnement doivent être envisagées.

# 3. Méthodologie

Dans les premières étapes de notre travail de recherche, nous avons utilisé quelques techniques simples pour mettre en évidence les indices de désertification : l'interprétation de



**Figure 2.** Décalage des isohyètes suite à la réduction de la pluviométrie depuis la fin des années soixante (synthèse d'après MAMADOU, 1989)

couples stéréoscopiques pour les photographies aériennes, l'interprétation analogique de certains traitements numériques (composition colorée, filtrages directionnels, seuillages interactifs) pour l'imagerie satellitaire HRV.

Dans la présente étape, une interprétation visuelle d'une composition colorée de la zone d'intérêt a d'abord été effectuée. Puis une confrontation de l'image satellitaire avec les photographies aériennes de 1957-1958 et de 1975 a été réalisée. Pour ce faire des photographies aériennes ont été numérisées séparément. Ce procédé consiste à les transformer, par balayage, en images numériques à 256 niveaux de gris. Ainsi, on peut les soumettre à un certain nombre de traitements qui ont déjà été appliqués à l'image satellitaire, en particulier au seuillage interactif. La mise en évidence de la couverture végétale peut être obtenue par binarisation des photographies numérisées (DEFOURNY, 1990) ou par un seuillage visant à extraire de l'image une classe végétation (fig. 3). Ensuite les photographies aériennes de 1957-1958 et de 1975 couvrant les mêmes territoires ont été comparées deux à deux. Afin de les rendre superposables, les images acquises aux trois dates (photographies aériennes et imagerie satellitaire) ont été géoréférencées et rectifiées. Des points communs choisis sur une carte au 1:50 000 et sur les trois images ont été utilisés pour l'application d'une rectification linéaire. La taille des pixels des photographies aériennes a été dégradée et ramenée à 20 m de façon à correspondre à celle des pixels de l'image satellitaire. Une classification supervisée ayant pour objectif la mise en évidence de la couverture végétale et des sables remaniés est ensuite appliquée à la partie commune aux trois images. On peut alors suivre l'évolution des deux principaux indices de désertification par comparaison des situations de 1957-1958, 1975 et 1987.

Le deuxième aspect du travail de cette étape est la campagne de vérité-terrain effectuée pour vérifier la validité des interprétations des images.

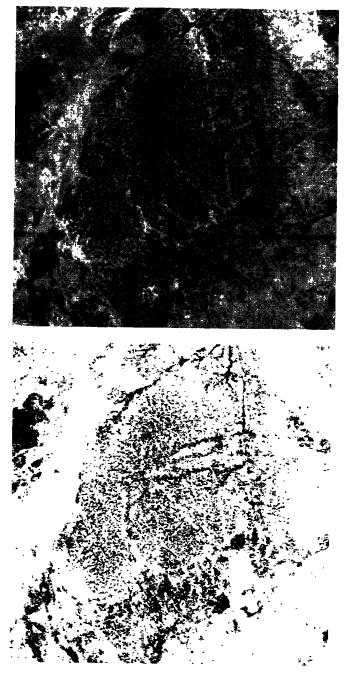


Figure 3. a) amélioration de contraste sur une photographie aérienne de 1958 numérisée (secteur de Makaoratchi); b) mise en évidence de la végétation; à noter que les reliefs quartzitiques localisés à l'ouest de la photographie apparaissent dans la même classe de gris que la végétation

# 4. Résultats

Sur une composition colorée de l'image satellitaire HRV on peut facilement discerner les grands traits de la morphologie (reliefs de quartzite, dépressions et dunes anciennes) ainsi que les remaniements éoliens actuels (sables remobilisés et secteurs de déflation) (fig. 12-4, voir cahier couleur). Mais c'est la confrontation de la situation de 1987 avec celles de 1975 et 1957-1958 qui permet d'apprécier les changements intervenus en une trentaine d'années. Cependant, sur les seuillages, les reliefs de quartzite et divers affleurements rocheux se situent dans la même gamme de gris que la végétation (fig. 3b). Les reliefs les plus importants se situent à la périphérie du secteur considéré. Aussi peut-on les éliminer en utilisant un masque. De cette manière, on peut avoir une meilleure estimation de la densité de la couverture végétale. La comparaison des photographies de 1957-1958 et celles de 1975 souligne la grave dégradation de la couverture végétale entre les deux prises de vue (fig. 12-5 a et b, voir cahier couleur). La confrontation des photographies aériennes avec l'image satellitaire n'est pas assez aisée pour donner une idée de l'évolution du couvert végétal entre 1975 et 1987. Des confusions existent également entre dépressions et végétation d'une part et affleurements de grenaille et de cuirasse latéritiques, d'autre part. Ces affleurements négligeables en 1957-1958 et même en 1975 prennent des proportions importantes en 1987 suite à la déflation de plus en plus efficace qui sévit sous le vent des reliefs résiduels et déblaie les sédiments de couverture. C'est la présence de ces affleurements qui explique l'expansion de la classe «dépressions et végétation» dans la partie centre-nord de l'image satellitaire (fig. 12-5 c, voir cahier couleur). Des tentatives de classification plus fine n'ont pas donné de meilleurs résultats. Si donc la comparaison entre les trois images reste fiable pour les sables remaniés, elle devient plus aléatoire en ce qui concerne la végétation. Pour cet élément du paysage, ne peut être prise en compte que la confrontation entre les photographies aériennes de 1957-1958 et celles de 1975. Bien que les classes ne se recouvrent pas tout à fait, nous en avons tiré les statistiques données au tableau I, le but poursuivi étant la mise en évidence de l'amplification de la remobilisation des sables, indicatrice à la fois de la réduction de la couverture végétale et de l'accentuation de l'efficacité des vents, les deux allant de pair.

Sur la photographie de 1957-1958, la végétation est relativement dense. Le remaniement des sables dunaires n'est que très ponctuel.

En 1975, la végétation se limite à quelques lits d'oued et une grande partie du secteur a été dégagée de ses sédiments fins superficiels, balayés par la déflation. Une partie des sédiments fins exportés s'est déposée contre l'obstacle que constitue le relief de quartzite situé à l'ouest de la zone de déflation. En outre, deux anciennes dunes longitudinales, auparavant peu affectées par les remaniements éoliens ont une réflectance plus forte qui témoigne de la remise en mouvement des sables. Par contre, la grande dune longitudinale qui borde le NO du secteur n'est que faiblement affectée par les remaniements éoliens.

En 1987, le secteur balayé par la déflation s'est élargi, les zones à forte réflectance se sont étendues, en particulier au sommet des dunes longitudinales et autour des villages où on note

**Tableau I.** Évolution de quelques éléments du paysage dans le secteur de Makaoratchi entre 1957-1958 et 1987

	1957-1958	1975	1987
Dépressions et végétation	36%	14%	8%
Sables remaniés	6%	16%	23%
Delta	0,2%	0,24%	0,56%

des auréoles de plus forte luminance suite au piétinement excessif et aux pâturages (fig. 12-4 et 12-5 c, voir cahier couleur).

Le remaniement des sables affecte souvent les champs où les paysans ont enlevé la végétation arbustive et les souches de mil de la saison précédente et ont nettoyé l'herbe sèche, lesquelles constituent les principaux obstacles au transit éolien. La pratique de la jachère a permis à la végétation arbustive et herbacée de se reconstituer assez rapidement sous les conditions climatiques favorables des années antérieures à 1968 et donc de freiner, voire d'annihiler au fil des ans, la remobilisation des sables dans les champs. Ainsi peut s'expliquer la disparition des sables remaniés de la partie supérieure de la photographie aérienne de 1958. Cependant, comme mentionné plus haut (analyse de la situation de 1975), nous pensons plutôt que les vents, de plus en plus efficaces, suite à la réduction de la couverture végétale, ont exporté les sables vers les secteurs situés au sud-ouest. En effet, la comparaison des situations de 1957-1958, de 1975 et de 1987 (fig. 12-5 a, b et c, voir cahier couleur) permet de suivre le déplacement des sables remaniés qui sont nettement plus répandus dans la partie sud-ouest de l'image de 1987 par rapport aux vues antérieures.

L'extension plus importante des dépressions dans la partie sud-est de l'image de 1987 est sans doute liée au développement assez spectaculaire, autour des zones marécageuses, des cultures de contre-saison depuis le début des années 80. L'accroissement des superficies des zones humides peut également s'expliquer par l'intensification du ruissellement qui, même pour des précipitations relativement faibles, apporte dans les dépressions des quantités appréciables d'eau. Cette intensification de l'écoulement au détriment de l'infiltration est liée d'une part à la réduction de la couverture végétale et d'autre part à des affleurements de plus en plus étendus, suite à la déflation, d'horizons imperméables. Elle engendre d'ailleurs une érosion de plus en plus sévère des sols attestée par l'augmentation considérable du volume des deltas, notamment entre 1975 et 1987 (fig. 12-5 a, b et c, voir cahier couleur, et tab. I).

Les résultats de ces interprétations ont été par la suite vérifiés lors d'une première campagne de vérité-terrain menée en janvier 1991.

# 5. L'apport de la campagne de vérité-terrain

Les travaux de terrain sont indispensables pour confirmer, nuancer ou corriger les interprétations de télédétection. Ils doivent, dans certains cas, se doubler d'enquêtes auprès des populations.

Ainsi, pour avoir des informations sur l'évolution de la couverture végétale et des plans d'eau, avons-nous interrogé des paysans rencontrés dans notre secteur d'étude. Tous les témoignages concordent pour dire que la végétation était très dense avant la sécheresse de 1968-1973. «Une véritable forêt» couvrait, notamment, le secteur de Makaoratchi. Les dépressions étaient de grandes mares permanentes, voire des lacs. Depuis une vingtaine d'années, la «forêt» a pratiquement disparu, les lacs se sont asséchés, les oueds à écoulement saisonnier ont cessé de fonctionner. Aujourd'hui, des puits sont creusés dans les lits des oueds pour l'alimentation en eau, et, au fond de certains lacs, l'argile est exploitée pour la fabrication des briques servant à la construction des habitations. Les secteurs où la végétation a fortement diminué sont soumis à d'intenses processus de déflation. Cette vigueur de l'activité éolienne est attestée par l'anémomorphisme des arbustes (fig. 12-6, voir cahier couleur).

La déflation amène l'affleurement d'étendues de cuirasse et d'épandages de grenailles latéritiques qui constituent de véritables regs (fig. 12-7, voir cahier couleur). Ces éléments du paysage correspondent aux teintes sombres, gris foncé sur la composition colorée de l'image satellitaire (fig. 12-4, voir cahier couleur). L'un des linéaments détectés sur les images est un

ancien cours d'eau dont le lit, constitué par de la grenaille latéritique indurée, est aujourd'hui en inversion de relief. Il mesure au moins 60 m de large sur quelques kilomètres de longueur.

La déflation exhume en outre un glaçage ancien qui bloque l'infiltration des eaux de pluie et favorise l'écoulement superficiel, en nappe. La puissance des processus éoliens est telle qu'il ne subsiste de sédiments fins, dans les secteurs de déflation, qu'autour des arbustes qui constituent ainsi des îlots surélevés par rapport aux surfaces environnantes couvertes de grenailles. Un micromodelé éolien existe aussi dans les champs où les limites, en relief, sont soulignées par des accumulations ou des reliques de sédiments fins, alors que les parties cultivables sont en creux.

Nous avons pu constater également que les sommets des dunes sont effectivement soumis aux remaniements éoliens, surtout lorsque les paysans ont préparé leurs champs de façon précoce. Ces remaniements n'intéressent en général que les couches superficielles des sables dunaires. Mais cela donne lieu néanmoins à une suralimentation des zones frontales des dunes et à l'ensablement des cuvettes ou des routes lorsque celles-ci passent au pied des édifices dunaires (fig. 12-8, voir cahier couleur). Les remaniements peuvent aussi avoir des caractères beaucoup plus importants et provoquer le creusement de caoudeyres de plusieurs dizaines de mètres de diamètre ou la formation de dunes d'obstacles (fig. 12-9, voir cahier couleur) lorsqu'un écran de végétation s'oppose au transit éolien. Les alluvions sableuses des oueds sont aussi remobilisées par le vent qui peut les modeler en petites dunes. Il faut noter qu'elles sont issues de sables dunaires repris par les oueds pendant la saison des pluies. C'est pour cette raison que les sables dunaires remaniés et les alluvions des oueds ont la même réflectance sur les images traitées.

# 6. Conclusion

Comme nous l'avons souligné dans les communications précédentes (KARIMOUNE et al., 1990, KARIMOUNE et al., 1993), la dégradation des milieux est très sensible dans la région de Zinder. Les secteurs les plus affectés sont ceux situés dans la partie septentrionale ou zone sahélienne. Dans la partie méridionale ou zone soudano-sahélienne, de grandes surfaces situées sous le vent des reliefs de quartzite et autres massifs rocheux sont dénudées parce que leur végétation a fortement diminué, remplacée par des arbustes xérophiles. Cette réduction de la couverture végétale est elle-même liée à la diminution de la pluviosité et à l'action anthropique. En effet, la préparation précoce des champs, la coupe du bois pour divers besoins ménagers et l'augmentation du cheptel jouent un rôle important dans la fragilisation des sols et des paysages. Les actions visant à restaurer les milieux devront en tenir compte.

Pour mieux caractériser les sables mobiles, nous avons commencé à faire en laboratoire, des mesures radiométriques sur des échantillons prélevés lors de la campagne de terrain. Puis, dans une étape prochaine, nous comptons faire des mesures *in situ* avec un spectro-radiomètre à haute résolution dont les bandes seront étalonnées sur celles de TM. L'analyse d'une image TM en voie d'acquisition et ces mesures devraient nous permettre de mieux cerner l'évolution de la désertification dans la région de Zinder.

# 7. Remerciements

Nous nous devons de remercier l'AUPELF-UREF qui nous a accordé les subsides nécessaires pour mener à bien nos recherches, ainsi que le laboratoire de télédétection de la Faculté des

sciences agronomiques de Gembloux (service de S. Dautrebande) et celui de l'Université de Liège-SURFACES (J.-P. Donnay) pour leur aide précieuse dans la numérisation des photographies aériennes et le traitement des images, M. B. Mahamane Sany, doyen de la Faculté de pédagogie de l'Université de Niamey, pour le soutien logistique lors de la campagne de vérité-terrain.

# 8. Références

- AUBREVILLE, A. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques et coloniales, Paris, 351 p.
- DEFOURNY, P. 1990. Méthode d'évaluation quantitative de la végétation ligneuse en région soudanosahélienne à partir de données Landsat TM (Burkina Faso). *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.M (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse, Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 63-74.
- GREIGERT, J. et POUGNET, R. 1967. Notice explicative sur la carte géologique de la République du Niger au 1:2 000 000, Édition du Bureau de recherches géologiques et minières, Paris, 62 p.
- KARIMOUNE, S., OZER, A. et ERPICUM, M. 1990. Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. in Lafrance, P. et Dubois, J.-M. M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Journées scientifiques de Thiès, 21-24 novembre 1989, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 145-161.
- KARIMOUNE, S., DONNAY, J.-P. et OZER, A. 1993. Désertification dans le sud nigérien. Interprétation d'une image SPOT. *in* Dubois, J.-M. M. et Blasco, F. Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Éditions AUPELF-UREF et les Presses de l'Université du Québec, p. 77-106.
- LE HOUEROU, H. N. 1979. Écologie et désertification en Afrique. Travaux de l'Institut de géographie de Reims, nº 39-40, p. 5-26.
- MAMADOU, D. 1989. Les dates favorables des semis au Niger : exemple de la culture du mil. Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement : agrométéorologie. Fondation universitaire luxembourgeoise, Arlon, 34 p et annexes.



# 13

# Télédétection appliquée à la zone côtière et suivi de l'environnement côtier au Congo : cas de l'érosion dans les gorges de Diosso

JEAN TCHICAYA\* et LÉONARD SITOU\*\*

\*Laboratoire de photogrammétrie et de télédétection, Centre de recherche géographique et de production cartographique (CERGEC), B.P. 125, Brazzaville, République du Congo; téléphone : (212) 81-07-80

\*\*Laboratoire de géographie physique, Département de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, Université Marien Ngouabi, B.P. 2642, Brazzaville, République du Congo; téléphone : (212) 82-52-67

# Résumé

Cette étude montre l'intérêt de l'utilisation des données iconographiques dans les études des phénomènes morphodynamiques et les préoccupations environnementales. L'objectif principal de notre étude est de suivre le phénomène érosif dans l'espace et le temps au niveau du cirque de Diosso d'une part et d'autre part de retracer la dynamique spatiotemporelle du cirque, ceci à partir des données iconographiques, complétées par des observations de terrain. L'analyse de ces données et les travaux de terrain nous ont permis de reconstituer les évolutions qualitative et quantitative du cirque de Diosso, y compris sa zone côtière, entre 1890 et 1983. Les mesures ont porté concrètement sur l'évolution spatiotemporelle du cirque, le recul de la paroi bordière du cirque et du trait de côte à l'exutoire du cirque, l'amenuisement des arêtes et des pics à l'intérieur du cirque, l'évolution de la végétation, et le recul de la paroi du cirque qui devient menaçant pour la route nationale n° 5 et les habitations. Les résultats obtenus permettent de conclure que les données iconographiques sont des outils efficaces pour l'étude des phénomènes morphodynamiques.

# 1. Introduction

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur les applications de la télédétection aéroportée et spatiale en zone côtière congolaise.

L'objectif de la recherche est d'évaluer concrètement les possibilités des outils de télédétection dans l'analyse et le suivi de la dynamique du milieu naturel en général et particulièrement des phénomènes d'érosion.

L'étude a porté sur le cirque de Diosso, une des multiples excavations creusées par l'érosion dans la région côtière du Congo. Les cirques d'érosion et le recul du trait de côte où débouchent la plupart de ces amphithéâtres, sont une menace sérieuse pour les habitations et les routes dans la région, notamment la route nationale n° 5. Notre travail a consisté à quantifier cette érosion régressive afin de fournir aux autorités des données pouvant orienter leur action dans le cadre d'un réaménagement du réseau routier. Les données iconographiques ont été les outils de travail. Elles ont été complétées par les observations de terrain.

# 2. Localisation et description du site

Le cirque de Diosso se trouve à environ 30 km au nord de la ville de Pointe-Noire, dans un secteur où s'est développée, dans les formations sédimentaires du bassin côtier, une multitude de cirques de toute taille (fig. 1). Le cirque de Diosso est le plus spectaculaire et le plus actif (fig. 13-2, voir cahier couleur). Il s'ouvre dans la baie de Loango, par une petite bande littorale dont le trait de côte est affecté par l'érosion côtière. Ce cirque en forme d'amphithéâtre mesure environ 2,5 km de diamètre. La paroi de son enceinte très polylobée et escarpée mesure 80 m de profondeur moyenne. Les différents lobes sont séparés par des arêtes au sommet étroit et découpé qui plongent à l'intérieur. Ce cirque a été choisi pour plusieurs raisons : il s'agit en premier lieu de l'un de ceux qui menacent le plus la route nationale n° 5 qui traverse la région; en second lieu, il est facile d'accès et il figure sur de nombreuses cartes et jeux de photographies aériennes. Les résultats de ce travail serviront de base à un autre travail destiné à cerner l'âge de ce cirque, les conditions de son déclenchement, et les moyens d'endiguement du phénomène.

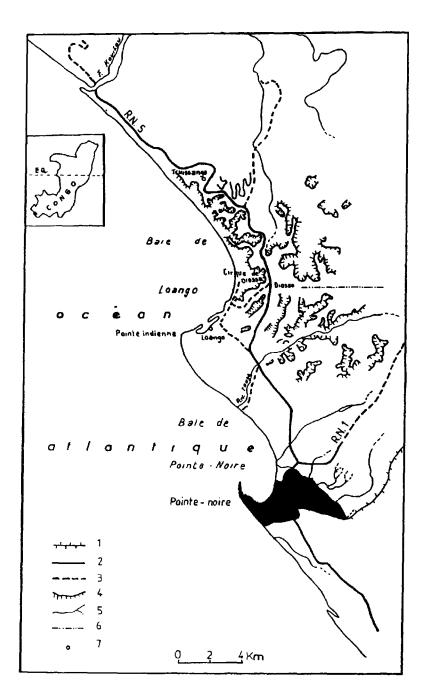
# 3. Matériel et méthode

### 3.1. Choix des documents

Pour effectuer ce travail nous avons exploité deux types de documents : les cartes topographiques et les photographies aériennes. Nous avons travaillé sur des cartes anciennes de la période qui n'est pas couverte par les photographies aériennes. Celles-ci ont été choisies en tenant compte de deux critères (UPOLI, 1987 et 1988) à savoir :

- une échelle supérieure ou égale à 1:100 000;
- une carte dont l'interprétation doit nécessairement montrer des changements vis-à-vis d'une édition ancienne.

Pour les photographies aériennes, seules celles ayant une échelle supérieure ou égale à 1:50 000 ont été retenues et nous avons tenu compte de l'amplitude du temps (résolution



**Figure 1**. Carte de localisation; 1 : voie ferrée; 2 : route bitumée; 3 : route en terre; 4 : talus ou parois des cirques; 5 : cours d'eau; 6 : ligne de crête; 7 : village

temporelle) entre les différentes missions de photographies aériennes, pour une meilleure visualisation des changements.

C'est ainsi que les documents suivants ont été exploités :

- la carte du Congo-Français au 1:80 000 de 1890 feuille nº 21;
- la carte de prospection pétrolière de la région du Kouilou au 1:100 000 de 1931;
- la mission de prises de vue aérienne SB-32-bis au 1:50 000 de 1951;
- la mission de prises de vue aérienne SB-33-1bis au 1:50 000 de 1960;
- la mission de prises de vue aérienne 66 AE 331 / 125 au 1:12 500 de 1966;
- la mission de prises de vue aérienne 81 Cong 24 / 300 au 1:30 000 de 1981;
- la mission de prises de vue aérienne 83 Cong au 1:8 500 de 1983.

Toutes ces missions sont en noir et blanc.

# 3.2. Exploitation et analyse des données

En dehors des observations de terrain, l'étude est fondée sur la comparaison des données iconographiques (cartes et photographies aériennes). Les étapes de l'exploitation sont les suivantes :

- l'interprétation directe des cartes;
- la photo-interprétation classique pour une vue générale du cirque;
- la restitution photogrammétrique pour quantifier les évolutions. Celle-ci a été faite à l'échelle des photos à l'aide d'un appareil de restitution (un stéréotopographe Poivillier SOM type D3), ce qui nous a permis d'exploiter chaque couple de clichés en le replaçant dans une position identique à celle occupée au moment de la prise de vue. La démarche utilisée est la méthode classique de restitution qui passe par les différentes phases de l'orientation :
- · l'orientation interne : elle permet de reconstituer pour chaque cliché sa gerbe perspective, cela correspond à repositionner le sommet perspectif par rapport au cliché comme sur la chambre de prise de vue;
- · l'orientation relative : c'est la formation du modèle stéréoscopique ou modèle spatial. Elle consiste à orienter l'une par rapport à l'autre les deux gerbes reconstituées lors de l'orientation interne, de manière que tout rayon de l'une coupe le rayon homologue de l'autre;
- · l'orientation absolue : elle consiste à mettre le modèle spatial à l'échelle et de l'orienter dans l'espace-terrain à l'aide de quatre points identifiables sur les clichés et connus en coordonnées terrain. Cette opération a pour but de déterminer et de corriger les dénivelées relatives entre les coordonnées modèles (machine) et les coordonnées terrain sur les quatre points (points de calage ou points d'appui);
- et enfin les réductions et agrandissements au pantographe (avec une précision de 1/10 mm) pour ramener toutes les données à une même échelle, afin de les rendre facilement comparables en les superposant. Pour éviter les déformations, on a sélectionné des points de calage connus en X et Y repérables sur toutes les données, encadrant le cirque et sa zone côtière à l'extérieur.

Pour suivre les changements morphologiques au niveau du cirque, il nous a fallu comparer toutes les données entre elles. L'analyse et le suivi de ces évolutions ont porté sur deux aspects : l'aspect qualitatif et l'aspect quantitatif. Pour cela, deux cartes définissant la forme du cirque et sa zone côtière ont été retenues comme base du travail. Il s'agit de la carte de 1890 pour la morphologie générale du cirque et de celle de 1951 pour la réalisation des cartes d'évolutions et la quantification de ces évolutions.

Le travail de laboratoire a été complété par les campagnes de terrain qui ont permis de comprendre les mécanismes et les processus de l'érosion dans le cirque de Diosso et au niveau du trait de côte.

# 4. Les résultats

# 4.1. Les résultats qualitatifs

L'analyse du schéma d'ensemble sur la configuration du cirque montre d'importants changements entre 1890 et 1931 (fig. 3). Les modifications sensibles sont à relever au niveau de la paroi bordière.

En 1890, le cirque de Diosso est en effet caractérisé par un seul grand lobe.

En 1931, 41 ans après, plusieurs petits lobes naissent, donnant une allure festonnée au contour général du cirque.

L'interprétation des jeux de photographies aériennes montre que la morphologie générale du cirque n'a pas subi d'évolution notable entre 1951 et 1983. Les lobes observés en 1951 sont presque ceux de 1983, donnant toujours au contour du cirque une allure très festonnée. Durant cette période, ces lobes ont été seulement agrandis. Le développement de ces lobes et l'irrégularité du contour général du cirque peuvent être observés sur les schémas géomorphologiques issus de la restitution photogrammétrique des différentes missions de photographies aériennes (fig. 4).

Les résultats qualitatifs sont aussi obtenus par les observations de terrain. De ces investigations, il ressort que le cirque de Diosso est le résultat d'une coalescence de plusieurs cirques élémentaires. L'origine de ces petits cirques est à la fois fluviale et pluviale (VENNETIER, 1968). Les mécanismes de la dynamique actuelle sont les mouvements de masse sous forme d'affaissement brusque ou de glissement lent, ceux-ci s'observent aussi bien le long de la paroi bordière qu'au niveau des flancs des arêtes centrales (SITOU et TCHICAYA, 1991). Le cirque de Diosso est drainé, en effet, par un réseau de petits ruisseaux nés à la base de la paroi et dont le plus important est le ruisseau de Matombi qui mesure environ 2,5 km de long avec une profondeur qui atteint rarement 1 m. Les rivières creusent le pied de la paroi et créent des encoches qui sont à l'origine des effondrements. Les affaissements sont accélérés par l'imbilition, les eaux de pluie et du matériel en porte à faux (fig. 13-5, voir cahier couleur). Ils sont annoncés par des fentes de détente qu'on observe sur le plateau au bord de la lèvre du cirque. La prise en charge et l'évacuation des matériaux écroulés sont assurées par les eaux de ruissellement et des écoulements concentrés dans les thalwegs.

L'érosion régressive fait ainsi évoluer le cirque en faisant reculer la paroi bordière et en amenuisant les arêtes centrales et les pics (fig. 13-6, voir cahier couleur).

# 4.2. Les résultats quantitatifs

Les cartes de 1890 et 1931, trop schématiques, ont empêché de suivre l'évolution quantitative du cirque avant 1951. La superposition des croquis de l'interprétation de ces deux cartes a révélé en effet plusieurs contradictions parmi lesquelles un net décalage entre les deux documents (fig. 7). Ce qui nous a conduit à abandonner la comparaison des données issues des photographies aériennes avec ces cartes. La quantification de l'érosion régressive tant au niveau de la paroi bordière que celui du trait de côte n'a été obtenue que par la superposition des croquis d'interprétation des photographies aériennes.

# 4.2.1. Le recul de la paroi

Entre 1951 et 1983, l'évolution des parois du cirque a été importante. Elle varie entre 2,5 et 90 m selon les endroits, soit une vitesse moyenne de 0,2 m/an sur les zones peu érodées et une vitesse moyenne de 2,5 m/an sur les zones plus érodées (fig. 8).

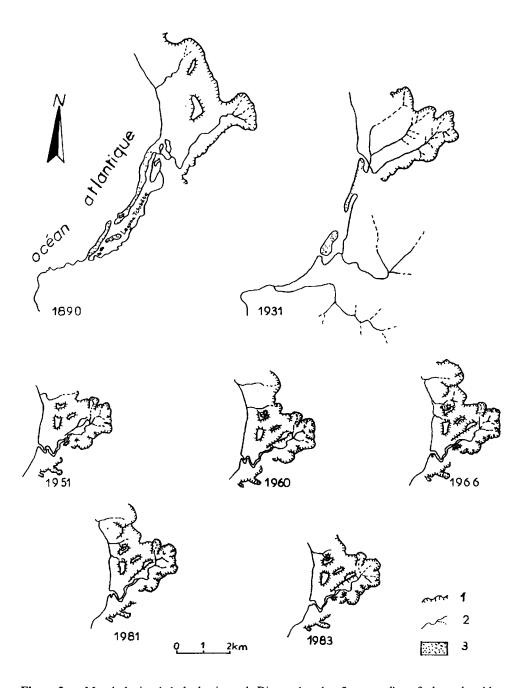


Figure 3. Morphologie générale du cirque de Diosso; 1 : talus; 2 : cours d'eau; 3 : banc de sable

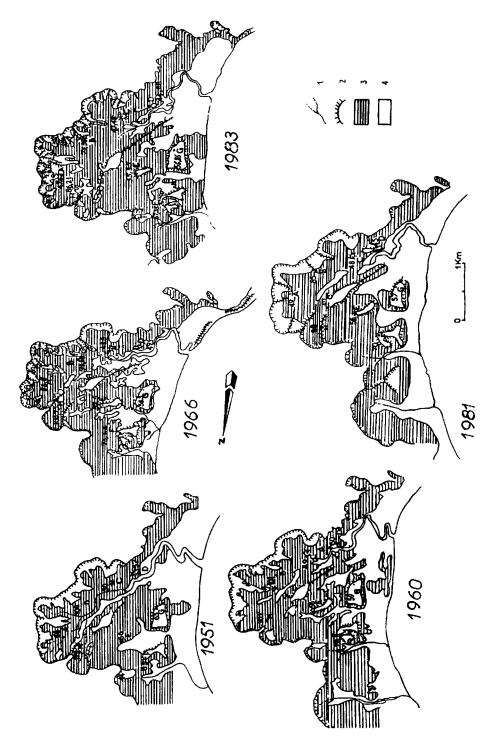


Figure 4. Limites de la forêt dans le cirque de Diosso en 1951, 1960, 1966, 1981 et 1983; 1: cours d'eau; 2: talus; 3: zone de forêt; 4: sol nu

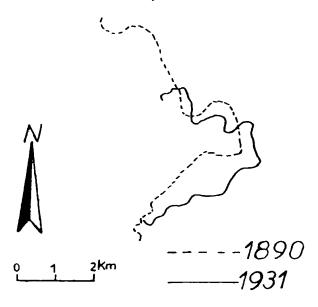


Figure 7. Évolution de la paroi bordière du cirque de Diosso entre 1890 et 1931

L'évolution de cette paroi a été également quantifiée en estimant la surface des matériaux disparus entre 1951 et 1983 (tab. I). Suivant les résultats consignés sur le tableau I, on note une progression plus accélérée entre 1981 et 1983 et une situation presque linéaire pendant les autres périodes allant de 1951 à 1983, avec une vitesse moyenne de 1,276 ha/an alors qu'elle est de 7,031 ha/an entre 1981 et 1983.

Cette évolution de la paroi a été particulièrement quantifiée sur le lobe le plus avancé du cirque vers la route nationale n° 5 (tab. II). Il y a eu un recul de 74 m en 37 ans, soit une vitesse moyenne de 2,27 m/an. Nous avons estimé le temps pour lequel le cirque de Diosso pourrait atteindre ou couper la nationale n° 5 (fig. 9); ce temps se situe autour de 8 ans, avec la vitesse moyenne de 2,27 m/an.

### 4.2.2. Le recul du trait de côte

La ligne de rivage (trait de côte) a reculé de 175 à 350 m par endroits entre 1951 et 1983, soit une vitesse moyenne de 10,94 m/an sur les sites les plus touchés (fig. 8 et 9). Cependant, les mesures effectuées sur le terrain en 1988 (tab. III) et des enquêtes menées auprès des riverains indiquent une vitesse actuelle plus grande. En effet, en 1988, celle-ci a été de 1,92 m/mois, soit une vitesse moyenne annuelle de 23,76 m/an (fig. 10 et fig. 13-11, voir cahier couleur).

# 4.2.3. L'amenuisement des pics et arêtes centrales

L'évolution du cirque de Diosso a été également appréciée à l'intérieur de celui-ci, par le suivi de l'amenuisement des pics et des arêtes centrales (tab. IV). Les pics et arêtes ont perdu entre 2,52 et 28,62 m, soit une moyenne de 15,57 m en 32 ans, avec une vitesse moyenne de 0,486 m/an. Dans l'ensemble, cinq points (A, B, E, F et H) ont dépassé cette moyenne de 15,57 m entre 1951 et 1983, alors que les autres points n'ont pas dépassé même la moitié de cette moyenne (C, D et G). Pendant ces différentes périodes entre 1951 et 1983, chaque point a eu sa propre évolution. Le point E par exemple, qui s'amenuise de 14,5 m entre 1951 et 1966, soit

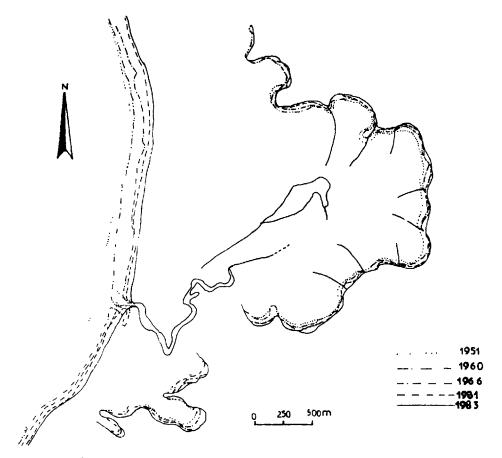


Figure 8. Évolution de la paroi bordière du cirque de Diosso et du trait de côte de son exutoire ente 1951 et 1983

une vitesse de 0,96 m/an, voit son altitude décroître de 2,15 m seulement entre 1966 et 1983 avec une vitesse moyenne de 0,126 m/an tandis que le point H a eu évolution inverse pendant la même période (tab. V).

### 4.2.4. L'évolution de la végétation

L'analyse des cartes issues de photographies aériennes montre bien une progression nette du couvert végétal dans le secteur nord. La reconquête forestière dans le nord tend à réduire la dynamique érosive sur ce secteur. Le sud par contre, dont la forêt est souvent défrichée, et l'est dénudé font encore l'objet d'attaques érosives assez intenses.

L'analyse des cartes issues des photographies aériennes, nous a révélé trois périodes d'évolution des surfaces nues sur la paroi bordière du côté est et sud-est (tab. VI et fig. 12): deux périodes régressives entre 1951 et 1966 d'une part, et entre 1981 et 1983 d'autre part, celles-ci correspondent à une reconquête de la végétation sur ces surfaces nues. Une période progressive entre 1966 et 1981 qui correspondait à une diminution de la végétation. Dans l'ensemble on constate une nette régression des surfaces nues entre 1951 et 1983.

# J. Tchicaya et L. Sitou

Tableau I. Évolution des surfaces des matériaux disparus à différentes périodes

Période	Surfaces des matériaux disparus (ha)	Vitesse moyenne (ha/an)
1951-1960 (9 ans)	10,979	1,220
1960-1966 (6 ans)	9,312	1,550
1966-1981 (15 ans)	18,625	1,241
1981-1983 (2 ans)	14,063	7,031
1951-1983 (32 ans)	40,770	1,270

**Tableau II**. Évolution du lobe le plus avancé du cirque de Diosso vers la route nationale n° 5 au point d'observation A

Année	Longueur (m)	Période	Vitesse de recul (m/an)
1931	100	1931-1951	3
1951	40	1951-1960	0,277
1960	37,50	1960-1966	1,076
1966	31,15	1966-1981	0,740
1981	20	1981-1983	1,50
1983	17	1983-1988	1,200

**Tableau III.** Observation de l'érosion côtière dans la baie de Loango au Congo (TCHICAYA et MAKAYA, 1988)

Date	Période	Recul (m)	Vitesse (m/mois)
08-02-1988			
07-03-1988	08-02-198807-03-1988	2,66	2,66
06-06-1988	07-03-198806-06-1988	7,24	2,41
12-07-1988	06-06-1988—12-07-1988	0	0
	08-02-198812-07-1988	9,90	1,98

Tableau IV. Évolution des pics et arêtes dans le cirque de Diosso; les altitudes sont présentées en mètres

Pics et arêtes	1951	1960	1966	1981	1983
A	65	56	53,50	49	47,62
В	108	101	98,88	85	79,38
С	50	49	48,50	48	47,48
D	52	50	49,00	45	44,68
Е	72	58	57,50	56	55,35
F	83	78	75,64	70	67,35
G	61	58	57,50	57	56,85
Н	112	107	103,75	88	86,21

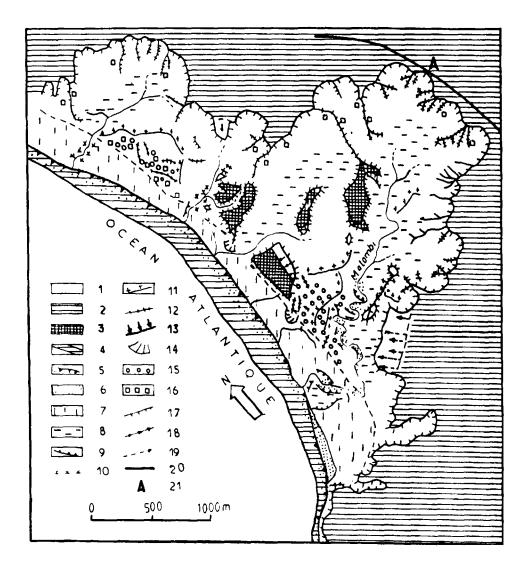


Figure 9. Carte géomorphologique du cirque de Diosso; 1 : secteur à forte pente, paroi abrupte du cirque; 2 : plateau de Diosso; 3 : replat en lambeaux de plateau; 4 : partie érodée de 1951 (érosion côtière); 5 : trait de côte et plage en 1983; 6 : sable en zone humide; 7 : remblaiement fini-kibanquin; 8 : secteur plan de dépôts actuels; 9 : berge rafraîchie par érosion; 10 : zone de marécage; 11 : sommet arrondi d'interfluve; 12 : arête vive; 13 : surface inclinée avec ligne de rupture de pente; 14 : cône de déjection; 15 : nappe de débris en surface; 16 : blocs de cuirasse démantelée; 17 : paroi verticale et subverticale; 18 : ravine profonde et récente; 19 : ravine superficielle; 20 : route nationale n° 5; 21 : point d'observation sur le lobe le plus avancé vers la route

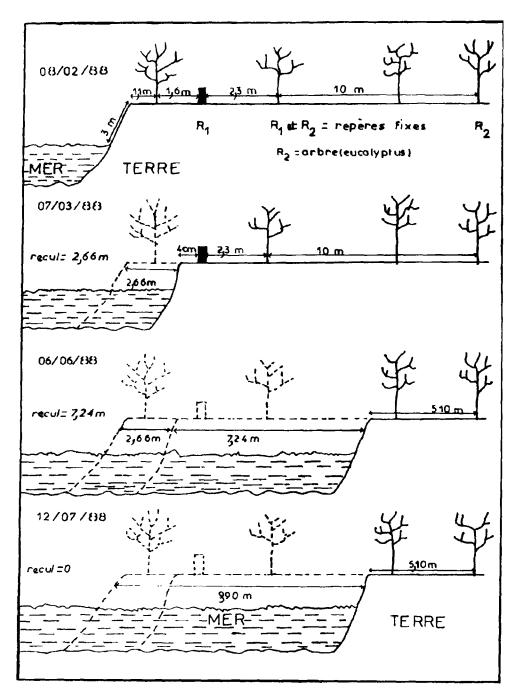


Figure 10. Observation de l'érosion côtière dans la baie de Loango

**Tableau V**. Évolution des pics et arêtes dans le cirque de Diosso par périodes; les amenuisements sont donnés en mètres

Pics et arêtes	1951-1960	1960-1966	1966-1981	1981-1983	1951-1983
A	-9	-2,50	-4,50	-1,38	-17,38
В	-7	-2,12	-13,88	-5,62	-28,62
С	-1	0,00	-1,00	-0,52	-2,52
D	-2	-1,00	-4,00	-0,32	-7,32
Е	-14	-0,50	-1,50	-0,65	-16,65
F	-5	-4,36	-5,64	-2,65	-17,65
G	-2	-0,50	-0,50	-0,15	-3,15
Н	-5	-3,25	-15,75	-1,79	-25,79

Tableau VI. Évolution des surfaces nues sur la paroi bordière du cirque de Diosso à l'est et au

Année	Surfaces nues (ha)	Période	Progression ou régression (ha)	Vitesse (ha/an)
1951	51,625	1951-1960	-5,180	-0,576
1960	46,440	1960-1966	-0,377	-0,550
1966	45,063	1966-1981	3,803	0,253
1981	58,875	1981-1983	-10,720	-5,360
1983	48,155	1951-1983	-3,470	-0,108

### 5. Discussion et conclusion

Les résultats présentés ici montrent que le cirque de Diosso subit une évolution très active. Les reculs moyens constatés, de l'ordre de 3 m/an, sont des ordres de grandeur qui permettent de faire des extrapolations sur le plan de la dynamique passée ou encore de faire des prospectives à court terme.

Cette étude montre donc que la photographie aérienne est un outil efficace pour l'étude de la morphodynamique. Les prises de vue aériennes à grande échelle nous ont fourni des informations sur les aspects morphologiques et les activités humaines à l'intérieur du cirque. La restitution photogrammétrique donne des résultats d'une grande précision dans la quantification des formes de détail tel que les cirques d'érosion et le trait de côte.

Cependant, nous n'avons pas encore effectué la même étude avec les images satellitaires. Il est donc difficile pour l'heure de faire des comparaisons fiables entre la télédétection aéroportée et satellitaire sur notre étude. Nous pensons toutefois que pour ce type de travail basé sur les formes de détail, la photographie aérienne demeure un outil très efficace d'investigation. Dans la zone côtière congolaise, les missions de photographies aériennes datent des années 1950. C'est la seule documentation ancienne pour l'étude de la dynamique de ces années. C'est un atout que ne possède pas la télédétection satellitaire, vu son caractère assez récent. La photographie aérienne présente néanmoins des handicaps sérieux qu'il convient de mentionner ici. Il s'agit principalement de la faiblesse de la répétitivité des missions (4-5 ans en moyenne pour les missions les plus rapprochées). Le coût assez élevé des

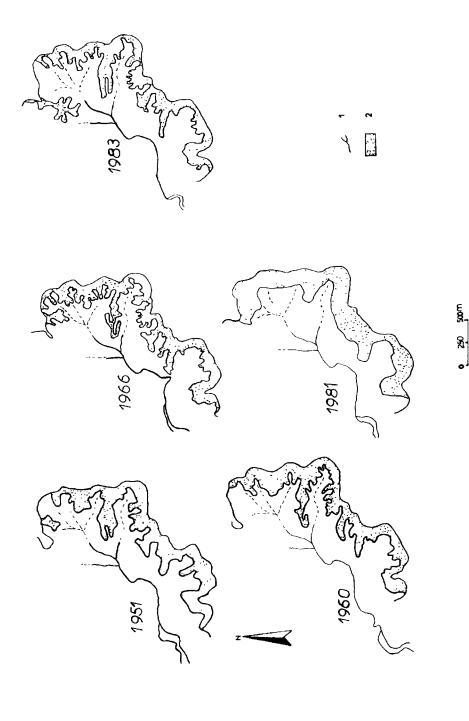


Figure 12. Évolution des surfaces nues sur la paroi bordière du côté est et sud-est du cirque de Diosso; 1 : cours d'eau; 2 : surfaces nues

campagnes de prises de vue aériennes limite, dans le temps et l'espace, le nombre de missions effectuées. La télédétection satellitaire présente à ces points un grand avantage qui réside surtout sur la grande répétitivité des images. SPOT et Landsat par exemple enregistrent les mêmes secteurs tous les 26 jours pour le premier et tous les 18 jours pour le second. Cette répétitivité permet de mieux suivre l'évolution des paysages et d'établir, dans le cadre de la quantification, des vitesses moyennes plus précises. Il faut dire que, dans le cadre de la prospective, les processus d'évolution des formes sont très importants à connaître car ce sont eux qui orientent toute intervention dans le domaine de la protection. Cette étude nous a en effet permis de noter que l'évolution du cirque de Diosso se fait parfois brusquement de façon catastrophique, avec une très grande irrégularité. D'où l'intérêt d'avoir des images très rapprochées dans le temps qui permettent de mieux suivre l'évolution des paysages et surtout de faire des corrélations plus fiables pour chaque changement. Les images des satellites tels que SPOT et Landsat, qui possèdent une haute résolution, doivent avoir un grand intérêt scientifique pour une telle étude.

Il paraît donc judicieux, à défaut d'une multiplication des missions de photographies aériennes très coûteuses, d'utiliser l'imagerie satellitaire à haute résolution.

La fragilité des écosystèmes de notre zone côtière nécessite, au demeurant, la mise en place d'un système d'information géographique, pour une bonne gestion de notre environnement côtier.

# 6. Références

- SITOU, L. et TCHICAYA, J. 1991. L'érosion en cirque dans la région côtière du Congo. Bulletin de la Société géographique de Liège, n° spécial, Hommage au Prof. Jean Alexandre, Afrique Centrale : Géomorphologie et géologie récente, p. 77-91.
- TCHICAYA, J. et MAKAYA, J. F. 1988. Rapport technique sur l'observation de l'environnement côtier au Congo. Direction générale de la recherche scientifique du Congo, 20 p.
- UPOLI, W. 1987. Mapping coastal changes from historical documents and aerial photographs. Journal I.T.C., 1987-2, p. 139-144.
- UPOLI, W. 1988. Mapping coastal evolution in Sri Lanka, using aerial photographs. Journal I.T.C., 1988-2, p. 188-195.
- VENNETIER, P. 1968. Pointe-Noire et la façade maritime du Congo-Brazzaville. Mémoire, ORSTOM, p. 11-80.

# 14

# Télédétection par satellite et catastrophe écologique dans la région de Sudètes (Europe Centrale)

# TOMASZ ZAWILA-NIEDZWIECKI

Centre polonais de télédétection (OPOLIS), Institut de géodésie et de cartographie, 2/4, rue Jasna, 00-950 Varsovie, Pologne; téléphone : (48) 22-27-76-13; télécopie : (48) 22-27-03-28

# Résumé

La Pologne est l'un des pays les plus pollués du monde. Cela résulte non seulement des émissions locales mais également des pollutions transportées sur de grandes distances, surtout de Tchécoslovaquie et d'Allemagne. En raison des dimensions et de la vitesse de la dégradation du milieu dans les montagnes des Sudètes, on a décidé que, pour l'inventaire de l'état de forêt, on aurait recours à des images satellitaires. Pendant la première étape des travaux, on a testé l'aptitude des images recueillies par les capteurs de Landsat, de SPOT et de Cosmos. On a constaté qu'en cas de forêts dégradées les meilleurs résultats sont obtenus grâce aux images Thematic Mapper qui servent le mieux à l'établissement d'une carte d'état de forêts. En recourant à l'imagerie TM, on a délimité sur le terrain en question trois classes d'état de la santé des forêts d'épicéas (*Picea abies*) et cinq classes supplémentaires caractérisant la forêt. L'interprétation hybride des images TM a permis d'évaluer les pertes d'accroissement des peuplements sur le terrain de la catastrophe écologique dans les Sudètes.

# 1. Introduction

Depuis plusieurs années, on observe dans les forêts européennes l'accroissement des dégâts occasionnés par la pollution industrielle de l'air. Cette situation est particulièrement grave en

Europe Centrale où on dénote la plus abondante émission de soufre (Allemagne : 3 millions de tonnes par an, Pologne : 2 millions de tonnes par an). Les plus exposées au danger sont les forêts de montagne, tout spécialement dans les monts des Sudètes où se trouvent des espèces sensibles à la pollution atmosphérique : sapins, épicéas, hêtres. En Pologne on craint que, d'ici l'an 2000, le déboisement de la surface située à plus de 1000 m au-dessus du niveau de la mer puisse se produire.

Les changements brusques de l'environnement nécessitent la mise en place de nouvelles méthodes d'évaluation de l'état de forêt. C'est la raison d'un intérêt constant pour la télédétection de la part des services forestiers polonais. Ces dernières années, on a entrepris des essais en vue de tirer profit des images satellitaires pour l'évaluation de la dégradation des forêts dans une région écologiquement sinistrée, telle la partie polonaise des Sudètes Occidentales. Le terrain en question, couvert de forêts d'épicéa (*Picea abies*), est l'un des plus pollués dans le monde sous l'effet d'émissions locales et étrangères; 75% des polluants y parvenant sont transportés par le vent de l'étranger, surtout de Tchécoslovaquie et d'Allemagne.

La mauvaise condition des forêts dans les monts des Sudètes est prouvée par les résultats des inventaires forestiers consécutifs. En 1988 on a constaté que seulement 4% des arbres pouvaient être considérés comme sains, 24% légèrement atteints, 50% atteints et 20% fortement atteints. Une situation particulièrement grave a lieu dans le district de Swieradow (env. 10 000 ha de surface boisée) où, sur un terrain qui en couvre 20%, la forêt n'existe plus et, quant au reste, 55% des arbres sont atteints et 45% fortement atteints.

Les dimensions de la catastrophe écologique dans les monts des Sudètes étaient à l'origine de la mise à profit des images satellitaires en vue d'évaluation de l'état de forêts et des changements s'y produisant.

# 2. Matériel et méthodes

Au cours de la première étape de recherches, on a testé l'aptitude de l'imagerie TM de Landsat, HRV de SPOT et Cosmos pour l'inventaire forestier. Les images sus-mentionnées différent surtout par le mode d'enregistrement des données. Les systèmes américain et français s'appuient sur l'enregistrement par capteur avec la notation numérique et le système russe sur l'enregistrement photographique. Qui plus est, le capteur TM enregistre sept bandes spectrales, le capteur HRV de SPOT trois bandes spectrales et une bande panchromatique et enfin le satellite Cosmos produit des photographies en bandes panchromatique et infrarouge couleurs.

Les photographies infrarouges couleurs de Cosmos sont effectuées à l'aide d'une caméra à distance focale de 1000 mm et 300 mm sur un film négatif à deux couches (SN-10), enregistrant le rayonnement électromagnétique de la bande de 0,57-0,80 µm. Ces photos se caractérisent par une faible correction optique. Les déformations dues à la distorsion et à la contraction irrégulière de la pellicule peuvent dépasser 300 m sur le terrain. Ainsi, on a affaire à une forte disproportion entre la capacité de résolution (5-10 m) et la déformation géométrique qui n'influe pas sur la valeur informative de l'image mais qui peut, toutefois, rendre plus difficile la localisation dans le terrain de certaines informations.

Parmi les trois systèmes satellitaires sus-mentionnés la plus grande résolution caractérise les images effectuées par le satellite Cosmos (5-10 m) et SPOT (10 et 20 m) en devançant de beaucoup les images TM (30 m). Aussi bien les images HRV de SPOT que Cosmos rendent possible la formation du modèle stéréoscopique.

Les moyens d'analyse des images satellitaires en question sont déterminés par les

techniques concernant leur acquisition. Les images TM et HRV inscrites de façon numérique sont soumises à des traitements numériques car le matériel standard ne se prête pas à des analyses forestières détaillées. On a eu donc recours à une interprétation hybride basée sur l'interprétation visuelle des compositions colorées, préparées numériquement, et des classification dirigées. On a étudié aussi des histogrammes multidimentionnels et des corrélations de canaux. Les photographies infrarouges couleurs Cosmos, sous forme de diapositives et d'épreuves couleurs sur papier, ont été interprétées visuellement (mono- et stéréoscopique).

Les résultats des classifications numériques et des interprétations visuelles ont été comparés avec les cartes de la santé des forêts, préparées à partir de données aériennes infrarouges couleurs, et avec les cartes topographiques.

# 3. Résultats

Le trait spécifique des images Cosmos, du point de vue de l'analyse de la végétation, consiste en une nette distinction entre les forêts de conifères, de feuillus, les coupes-rases et les jeunes peuplements. Les espèces de conifères et de feuillus sont visibles comme des objets ayant des réponses spectrales totalement différentes, ainsi que sur d'autres pellicules infrarouges couleurs (par exemple Kodak IR 2442) sont différenciés les arbres sains et morts (IRACKA, 1989). La possibilité de la stratification de la santé des forêts sur les photographies effectuées sur le film SN-10 est limitée à cause de sa construction de même qu'à cause des effets de l'atmosphère masquant des changements subtils dans les couronnes des arbres.

Les images acquises grâce à tous les satellites envisagés ci-dessus peuvent être employées pour la cartographie forestière et la surveillance des forêts saines. Par contre, en cas de forêts atteintes et dégradées, on obtient des résultats nettement meilleurs au moyen d'images Thematic Mapper (BYCHAWSKI, 1988). Le manque d'enregistrement des canaux de l'infrarouge moyen propre aux satellites SPOT et Cosmos constitue un défaut important dans la mise en pratique de ces images pour des recherches relatives à l'environnement.

En procédant à l'élaboration thématique de l'image Thematic Mapper de la région des Sudètes, on a choisi, pour les analyses détaillées les canaux qui reflètent le mieux les changements de l'état des arbres visualisés par la diminution de pigments et d'eau dans les feuilles et la réduction de l'appareil d'assimilation. À la suite des analyses de l'image TM des Sudètes, prenant en considération les histogrammes et les corrélations des canaux, on a constaté qu'une gamme assez large d'informations relatives à la forêt figurait dans TM1. Il n'empêche que son utilité reste limitée à cause des effets atmosphériques apparaissant dans la bande spectrale enregistrée par ce canal. Le canal TM3 est intimement corrélé avec TM1 (r = 0.92), ce premier est cependant moins susceptible aux effets atmosphériques, tout particulièrement, lorsque l'image est prise en été. Une forte corrélation existe également entre TM5 et TM7 (r = 0.95) ce qui permet de constater que ces deux canaux aussi enregistrent un champ d'informations sur la forêt assez semblable, bien que TM7 recèle une moindre dynamique des tons de gris. Par contre TM5 et TM4 manifestent une gamme d'informations assez proches concernant les types de forêts et les classes d'âge, mais TM5 est encore en mesure de fournir des données relatives à la condition de la forêt et à l'humidité des sites forestiers.

Les analyses détaillées des compositions colorées des combinaisons variées des canaux TM ont montré que les bandes consécutives recèlent des informations permettant la distinction des éléments de la forêt. Ainsi, TM3 se prête le mieux à la distinction des peuplements de

conifères, dans TM4 les plus visibles sont les peuplements mélangés, de feuillus et la prairie, par contre TM5 et TM7 peuvent servir à la distinction des déforestations au sol nu et des pertes d'aiguilles dans les forêts de conifères.

En ce qui concerne le ratio TM4/TM3, il est surtout utile pour une nette différenciation entre les peuplements mélangés et de feuillus et les jeunes épicéas, de même que pour une bonne distinction des prairies et des reboisements. À son tour, le ratio TM5/TM4 est particulièrement apte à distinguer les peuplements d'épicéas endommagés. Il s'en suit que, pour des analyses minutieuses de la forêt dans le mont des Sudètes, on avait eu recours à TM3, TM4, TM5 et TM7 aussi bien qu'à la composition colorée, formée avec les canaux TM5/TM4, TM4/TM3 et TM7, qui s'est avérée être la plus utile. À la base d'une telle composition on a distingué des classes (fig. 1) qui ont été définies en profitant des résultats de l'inventaire forestier établi à partir des photographies aériennes infrarouges couleurs. Les classes distinguées sont les suivantes : 1) peuplements d'épicéas atteints; cette classe est constituée d'épicéas d'âge moyen de 70 ans, à la classe de qualité du site forestier I-II (sur une échelle de cinq degrés), avec une densité de 703 arbres/ha dont 7% sont morts et 12% mourants; 2) peuplements d'épicéas sérieusement atteints; cette classe est constituée d'épicéas d'âge moyen 90 ans, à la classe de qualité du site forestier II-IV, avec une densité de 513 arbres/ha dont 78% sont morts et 12% mourants; 3) peuplements morts; 4) peuplements de feuillus et mélangés; 5) jeunes épicéas; 6) coupes rases avec végétation; 7) coupes rases avec sol nu.

En comparant le résultat de l'interprétation des images TM avec les photographies aériennes, on peut constater que les catégories sus-mentionnées ont été définies d'une manière correcte. Pratiquement, sur l'image satellitaire, il n'y a qu'un élément qui déforme l'état réel du terrain. C'est qu'en interprétant l'image TM on a inclus les pins de montagne (*Pinus mugho*) au peuplement mort. Cela est dû au fait que les pins de montagne ont une réponse spectrale semblable à celle d'un peuplement mort. Cette limitation n'a cependant qu'une importance secondaire car les pins de montagne recouvrent de petites superficies.

La comparaison des résultats de l'interprétation des images satellitaires avec des cartes topographiques anciennes a permis de présenter la distribution des surfaces touchées par la déforestation, pendant les années 1947-1984 (fig. 2). Ils occupent 23% du territoire en question et se manifestent depuis 650 m au-dessus de la mer (POLAWSKI et ZAWILANIEDZWIECKI, 1987).

# 4. Discussion

Les résultats de l'évaluation de l'état des forêts sur de grandes surfaces (y compris à partir des images satellitaires) se prêtent à être présentés à des échelles différentes, selon les besoins. Les possibilités de la technique satellitaire de même que les besoins de l'inventaire relatif aux grandes surfaces optent pour une échelle qui rend possible une présentation synthétique des phénomènes qui se produisent dans la forêt. La résolution de l'image TM permet la présentation cartographique de la forêt même à l'échelle 1:25 000. En cas d'analyses régionales ou globales, par exemple en vue de surveiller les changements de la végétation, il est possible d'élaborer, à la base des images TM, des cartes à de petites échelles qui donnent un panorama général de l'état du milieu forestier.

Dans ce travail, on a pris pour carte de base la carte topographique à l'échelle 1:25 000 dans laquelle on a inscrit les classes d'interprétation délimitées auparavant. Comme présenté cidessus, parmi les peuplements d'épicéas vivants situés dans la région de catastrophe écologique dans les Sudètes, on a distingué deux classes d'état de santé. Les peuplements se caractérisant

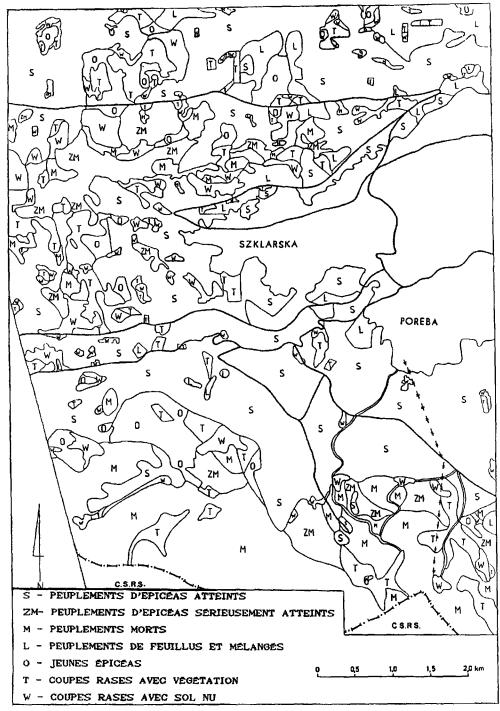


Figure 1. Le résultat de l'interpretation de la composition colorée d'image Thematic Mapper

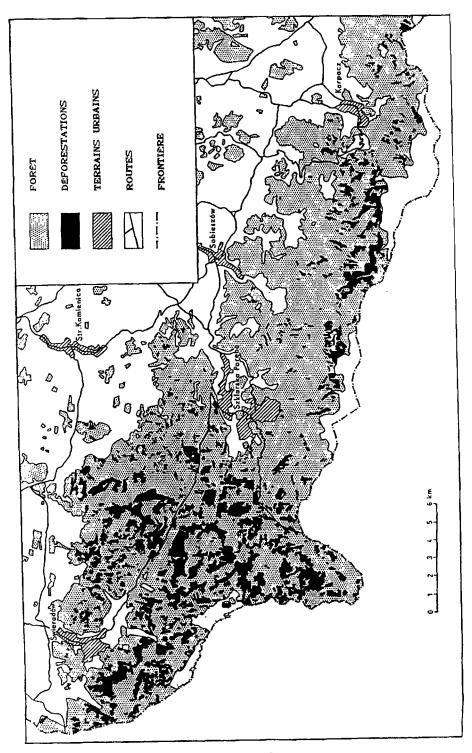


Figure 2. Les déforestations dans la région des Sudètes pendant les années 1947-1984

par une meilleure condition sont un peu moins âgés (la moyenne d'âge est de 70 ans) en comparaison avec les peuplements se caractérisant par une moins bonne condition (moyenne de 90 ans), ils ont une plus grande densité (respectivement 703 et 513 arbres/ha) et ils se distinguent par des proportions moins élevées d'arbres morts (respectivement 7% et 78%). La délimitation de ces classes peut fournir des informations précieuses pour la planification des activités économiques et de sauvetage en désignant les peuplements nécessitant en priorité une intervention urgente. Ce qui est important du point de vue de l'économie forestière c'est également la possibilité de la distinction des peuplements appartenant à des classes d'âge plus ou moins avancé, d'autant plus que les jeunes épicéas sont plus résistants aux facteurs stressants que les épicéas plus âgés. Par contre, l'image TM ne permet pas de différencier les reboisements et les terrains couverts d'herbes et de broussailles. En revanche, il est avantageux de pouvoir distinguer les terrains de sol nu. Ce fait est surtout important en montagne, donnant la possibilité de désigner les terrains menacés par l'érosion.

# 5. Conclusion

L'utilisation d'images satellitaires a permis de déterminer la répartition des dégâts dans la région occidentale des Sudètes. La zone étudiée s'étend sur 32 000 ha dont 23% sont couverts d'épicéas atteints, 21% d'épicéas sérieusement atteints et 6% d'épicéas mourants ou morts. Il n'y a aucun peuplement sai.i; même les je nes sujets qui occupent 12% de la zone étudiée sont légèrement atteints. La zone de déboiser ent qui a été exclue de la production de bois, couvre une superficie de 7 360 ha (23%). Près d'un cinquième de la zone étudiée était recouvert d'arbres qu'il a fallu enlever avant qu'ils ne parviennent à la maturité.

En profitant des résultats des travaux sus-présentés et des études menées à l'Institut de recherches forestières de Varsovie, on a essayé d'évaluer les pertes d'accroissement annuel du volume de bois dans les forêts des Sudètes. Les études de l'Institut de recherches forestières révèlent que les pertes d'accroissement annuel du volume de bois des peuplements touchés par la pollution atmosphérique s'établissent comme suit : atteinte physiologique : 10%; atteinte légère : 25%; atteinte moyenne : 50%; atteinte grave : 75%. Pour évaluer les pertes annuelles en fonction de ces données et des résultats de l'analyse d'images satellitaires sus-mentionnée, on peut distinguer quatre catégories de forêts dans la région étudiée des monts des Sudètes (tab. I) (CIOLKOSZ et ZAWILA-NIEDZWIECKI, 1990).

**Tableau I.** Pertes annuelles d'accroissement du volume de bois dans les quatre catégories de forêts distinguées sur l'image satellitaire de la région des Sudètes

Catégorie	Zone (ha)	Accroissement annuel potentiel (m <sup>3</sup> )	Indice des pertes d'accroissement	Estimation de pertes totales d'accroissement de volume (m³)
Légèrement atteinte	3 840	13 000	0,10	1 000
Atteinte	7 360	24 000	0,25	6 000
Fortement atteinte	6 720	22 000	0,50	11 000
Mourante ou morte	3 840	6 000	0,75 - 1,00	5 000- 6 000
Totaux	21 760	65 000	0,431 (moyenne)	23 000- 24 000

### T. Zawila-Niedzwiecki

Si l'on prend en considération dans ces calculs la perte d'accroissement de volume de bois occasionnée par la coupe des massifs mourants avant l'âge normal d'exploitation la perte sur ces 32 000 hectares serait selon les estimations d'environ 45 000 m³/an, soit une perte moyenne de volume d'accroissement d'environ 1,4 m³/ha/an, contre une moyenne de 0,6 m³/ha/an pour les forêts polonaises touchées par les émissions industrielles. Ces calculs ne tiennent pas compte de la perte d'accroissement de bois de feuillus et des forêts mélangées, car la baisse du nombre de feuillus est plus difficile à déterminer par la télédétection que la baisse du nombre de conifères.

# 6. Références

- BYCHAWSKI, W. 1988. Évaluation de l'état de forêt sur de grandes surfaces à la base des images par satellites à haute résolution. Institut de géodésie et de cartographie, Varsovie, 60 p.
- CIOLKOSZ, A. et ZAWILA-NIEDZWIECKI, T. 1990. Télédétection et limitation de la productivité des forêts en Pologne. Nature et ressources, vol. 26, nº 1, p. 41-44.
- IRACKA, M. 1989. Évaluation des informations comprises dans les images effectuées par des satellites de la 3<sup>e</sup> génération pour les besoins de la valorisation des surfaces forestières. Bulletin de l'Institut de géodésie et de cartographie, Varsovie, vol. 34, nº 1, p. 5-13.
- POLAWSKI, Z. F. et ZAWILA-NIEDZWIECKI, T. 1987. Évaluation de l'état de forêt dans la région des Sudètes à la base de la télédétection. Sylwan, nº 5, p. 49-60.