PARTIE I Bassins versants et érosion hydrique

1

Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien à l'aide de la télédétection satellitaire

AICHOUCHE BELHADJ-AISSA et YOUCEF SMARA

Laboratoire de traitement d'images, Institut d'électronique, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, B.P. 32, El-Alia Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie; téléphone : +213 (2) 75-12-85 (poste 806); télécopieur : +213 (2) 75-94-57

Résumé

L'analyse et l'évaluation des ressources en eau et leur gestion est nécessaire, plus particulièrement dans les zones arides et semi-arides. L'objectif de cet article est de présenter une étude sur la mise en évidence du réseau hydrographique et des phénomènes associés dans des régions situées sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien, et ceci à l'aide de la télédétection satellitaire et des missions sur le terrain. Les méthodes adoptées, basées sur les techniques de traitement d'images et d'analyse de données, sont élaborées en fonction des caractéristiques des indicateurs liés au réseau hydrographique tels que les zones humides, le couvert végétal, les structures de drainage et le sens des écoulements sur le piémont de l'Atlas saharien. Les résultats obtenus, sur des zones représentatives du thème recherché, permettent de faire ressortir les phénomènes hydrographiques dans l'Atlas saharien lui-même, ainsi que le système de drainage et de ruissellement, et leurs effets sur les ressources en eau et la mise en valeur des terres dans la région.

1. Introduction

Parmi les ressources naturelles supportant les besoins humains et le développement économique, l'eau occupe une place privilégiée, autant en ce qui concerne sa quantité que sa qualité. Ceci est particulièrement vrai pour les zones arides et semi-arides pour trois raisons essentielles :

- climatique : pluviométrie très limitée et irrégulière;
- anthropogénique : fort développement démographique et migration;
- économique : manque de moyens pour la gestion des ressources en eau.

En général, une distinction doit être faite entre les précipitations et les ressources en eau. En effet, les précipitations peuvent être considérées comme un potentiel de ces dernières pour les activités humaines et les besoins naturels; mais, seule une partie des précipitations contribue aux ressources en eau dans l'environnement.

Cependant, dans les zones arides et semi-arides, vu la faible quantité de précipitations, ces dernières forment la majeure partie des ressources en eau de l'environnement, lesquelles alimentent essentiellement les nappes souterraines, les écoulements, les différents types de sols et le couvert végétal (fig. 1). Tout changement affectant les caractéristiques de surface, dues aux raisons naturelles ou aux charges anthropiques, a des conséquences directes au plan des ressources en eau utilisables. La gestion et le suivi du système hydrologique pour les besoins précités deviennent alors nécessaires. Un des moyens efficaces pour ceci est l'utilisation et l'exploitation des données-images de télédétection.

Dans cet article, nous présentons une méthodologie relative à la mise en oeuvre de techniques de télédétection pour la mise en évidence du système hydrologique et les phénomènes associés sur une région du piémont sud de l'Atlas saharien, et ce à partir de données satellitaires TM de Landsat.

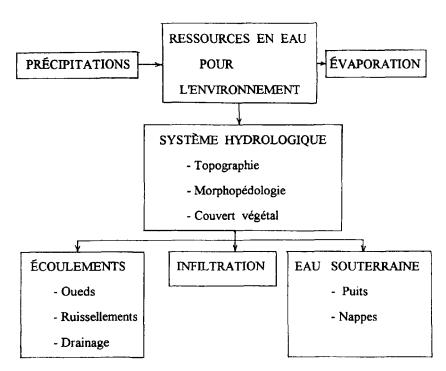


Figure 1. Synoptique décrivant le processus relationnel entre les précipitations et les ressources en eau

2. Caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude correspond à un milieu de transition entre les hautes plaines et le Sahara. Cette frange intermédiaire, relevant d'un climat et de dynamiques aride et subdésertique, vit encore sous l'influence de l'Atlas saharien. L'économie de cette région dépend essentiellement de l'eau, des crues, des sols cultivables et des phénomènes éoliens. Dans cette région, la sécheresse est un caractère dominant, particulièrement en été. En effet, les précipitations sont très irrégulières, se manifestant sous forme d'averses orageuses souvent brutales. Partout, la moyenne du total des pluies est inférieure à 200 mm/an comme l'indique l'exemple de la ville d'El-Abiod-Sidi-Cheikh. Cependant, l'année 1991 a été une année très humide et la région a connu de très grandes crues d'oueds comme nous l'ont confirmé les habitants de la région lors d'une mission sur le terrain (fig. 2) (DEWOLF et al., 1992).

Après un transit variable en fonction du débit et de l'absorption des sols, les écoulements débouchent dans les puits et les dayas, ces dernières permettant alors des cultures irriguées occasionnelles.

La présente étude a été faite sur des zones pilotes qui représentent bien le thème recherché. Ces zones, contenues dans la scène 196/37 de TM qui a été acquise le 1^{er} janvier 1989 (fig. 1-3, voir cahier couleur) sont la zone du sud de Laghouat (zone 1) et la zone de Brézina (zone 2).

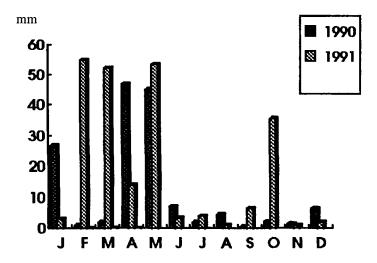


Figure 2. Pluviométrie sur El-Abiod-Sidi-Cheikh pour les années 1990 et 1991

3. Mise en évidence des phénomènes hydriques par télédétection

La télédétection permet de donner, à courts intervalles de temps, des observations synoptiques du réseau hydrographique. Cependant, contrairement à d'autres phénomènes, telles que les formes géologiques et la végétation qui sont bien détectables par la télédétection, l'information concernant les ressources en eau, et plus particulièrement dans

les zones arides, ne peut être extraite directement à partir des images satellitaires. Afin d'utiliser effectivement la télédétection pour le thème étudié, l'accent doit être mis sur les indicateurs hydrogéologiques et la connaissance des ensembles hydrogéologiques. Ceuxci incluent les éléments suivants :

- formes de structures (linéaments, fractures géologiques, vallées, deltas, etc.);
- géomorphologie (forme des sols, surfaces d'érosion, etc.);
- systèmes de drainage;
- présence de couvert végétal.

Les caractéristiques de certaines formes, tel que le réseau de drainage, peuvent être facilement détectables avec des conditions de prise de vue adéquates. En effet, un faible angle d'élévation du soleil, qui est possible pendant la période allant du 1^{er} novembre au 15 février environ dans l'hémisphère nord, permet de rehausser la topographie et donc d'accentuer les formes hydrographiques.

D'autre part, on sait que l'absorption du rayonnement électromagnétique par la végétation est élevée dans le visible, contrairement à celle obtenue dans le proche infrarouge, correspondant respectivement aux canaux TM3 et TM4. Les méthodes de calcul d'indices appliquées sur ces données permettent alors de faire ressortir les zones de couvert végétal, lequel est un indicateur privilégié des ressources en eau.

Par ailleurs, plusieurs études ont été faites sur l'utilisation de la télédétection infrarouge thermique pour la détermination des zones humides. MOORE et MYERS (1972) ont montré qu'il existe une corrélation entre la radiométrie de température et la présence d'eau en sous-surface (profondeur de 1,5 à 4,5 m). EZRA et al. (1982) ont, pour leur part, utilisé effectivement les techniques thermiques de télédétection pour la distinction des zones humides en milieu semi-aride dans un environnement d'agriculture irriguée.

Parallèlement à cela, les structures de la surface, tel que les linéaments, sont des indicateurs favorables de ressources en eau et de leur dynamique, laquelle dépend principalement de la topographie. Au plan des reliefs, le réseau hydrographique est lié aux fractures des linéaments (DU WENCAI and YE DELIAO, 1993).

La région étudiée présente un relief dont la dénivellation est d'environ 600 m (de 1 500 m dans l'Atlas saharien à environ 900 m au bas du piémont). Un exemple de ce relief est donné par l'oued Seggueur (environs de Brézina) situé autour de 1 350 m d'altitude et la Dayet El Anz située, elle, aux environs de 850 m.

4. Méthodologie adoptée

La méthodologie adoptée pour la mise en évidence du réseau hydrographique s'appuie sur les constatations précédentes et consiste en la mise en oeuvre de techniques de traitement d'images et d'analyse de données tel que :

- l'analyse en composantes principales:
- le calcul d'indices;
- le filtrage des données;
- les compositions colorées.

4.1. Analyse en composantes principales

À partir de combinaisons linéaires des données d'entrée X, l'analyse en composantes principales (A.C.P.) permet de donner une nouvelle représentation de néo-canaux Y de

Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien

l'espace des images multibandes :

$$Y = G \cdot X$$

où G est la transformation linéaire définie à partir des valeurs propres issues de la diagonalisation de la matrice variance-covariance des données d'entrée.

Une décorrélation complète des nouveaux canaux est obtenue et la nouvelle distribution de la variance de ces canaux fait que nous obtenons une réduction de données. En effet, le premier néo-canal occupe près de 80 % de la variance totale des données-images et présente le maximum de contraste, alors que le deuxième néo-canal, lui, représente les structures linéaires et, parmi elles, les réseaux de drainage, les lits d'oueds, etc.

4.2. Calcul d'indices

L'indice de végétation classique est calculé à partir des canaux TM3 et TM4 par la formule suivante :

$$IV = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3).$$

Cet indice permet de mettre en évidence les zones de végétation. À partir de l'image résultante obtenue sur la zone pilote du sud de Laghouat (fig. 4), nous pouvons remarquer que la végétation est située au niveau des écoulements des oueds et des dépressions humides localisées (dayas).

D'autre part, des combinaisons sur les néo-canaux obtenus par l'analyse en composantes principales peuvent permettre de rehausser les zones de végétation, particulièrement dans cette région où le couvert végétal occupe un faible pourcentage de superficie et présente des formes souvent linéaires. L'exemple du calcul d'indice est basé sur la formule suivante :

$$IV(ACP) = (CP1 - CP2)/(CP1 + CP2)$$

où CP1 et CP2 sont respectivement le 1^{er} axe et le 2^e axe issus de l'analyse en composantes principales.

Les images résultantes de ce traitement mettent en valeur le couvert végétal qui est, dans les zones arides, un indicateur fiable de la présence d'humidité (fig. 5 et 6).

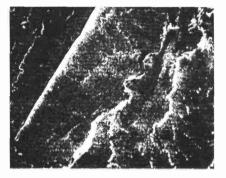


Figure 4. Mise en évidence du réseau hydrographique par le calcul de l'indice de végétation classique sur la zone du sud de Laghouat

A. Belhadj-Aissa et Y. Smara

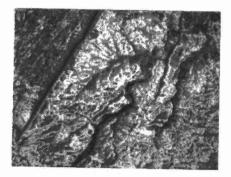


Figure 5. Mise en évidence du réseau hydrographique et des zones de cultures, par le calcul d'indice sur des canaux A.C.P., sur la zone du sud de Laghouat



Figure 6. Mise en évidence du réseau hydrographique et des zones de cultures, par le calcul d'indice sur des canaux A.C.P., sur la région de Brézina (Dayet El Anz)

4.3. Filtrage des données

Dans le but de rehausser les structures linéaires correspondant au réseau de drainage et aux lits d'oueds, le filtre laplacien défini par le masque de taille 3x3 suivant :

-1 0 -1 0 5 0 -1 0 -1

a été appliqué sur l'image correspondant au 2° canal issu de l'A.C.P. L'image résultante présente, effectivement, une grande netteté au niveau du réseau de drainage (fig. 7).

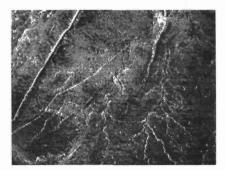


Figure 7. Rehaussement du système de drainage, par l'utilisation du filtre laplacien sur le 2° canal A.C.P., sur la zone du sud de Laghouat

4.4. Compositions colorées

Les compositions colorées consistent à attribuer un canal par couleur fondamentale. Celles que nous avons effectuées ont consisté en un choix judicieux sur les canaux à composer. Plusieurs compositions colorées ont été élaborées avec différents canaux et dans différentes conditions de l'étalement de la dynamique des images. Une combinaison intéressante de canaux a été retenue pour sa mise en évidence du réseau hydrographique dans l'Atlas saharien et du couvert végétal sur le piémont. Elle a consisté en la composition des canaux TM4, TM5 et le canal TM6 (thermique) ayant subi au préalable un traitement de filtrage moyen local (masque 3x3). L'image résultante permet de distinguer les oueds Redad, Melah, Tassina et Seggueur, lesquels correspondent à des formations géologiques au niveau de l'Atlas saharien (fig. 1-8 et 1-9, voir cahier couleur).

5. Conclusion

Les méthodes présentées dans cet article ne sont pas exhaustives. Néanmoins, elles sont bien adaptées à l'étude de la zone du piémont qui, sur le plan hydrologique, est constituée de trois thèmes essentiels à savoir les structures des oueds liées aux linéaments de l'Atlas, le système de drainage sur le piémont et le couvert végétal alimenté par le ruissellement des eaux issues de l'Atlas.

Ainsi, la télédétection satellitaire peut fournir une information très utile concernant les linéaments, l'occupation des sols, la végétation et le système de drainage. Ceux-ci sont des indicateurs des phénomènes hydrogéologiques et de l'occurrence des ressources en eau. Cependant, l'efficacité de la recherche de ces phénomènes est relative et son succès dépend de la bonne interprétation des indicateurs précités. Les traitements effectués sur les images de télédétection en vue de l'extraction de ces indicateurs nous ont permis d'obtenir des résultats cohérents avec les documents existants. Cependant, il est bien évident que, localement, des caractéristiques hydrologiques significatives soient de trop petite dimension (puits, etc.) pour être visibles sur des images satellitaires. Dans ce cas, des études approfondies sur le terrain, aussi bien qualitatives que quantitatives, deviennent nécessaires pour une cartographie complète du système hydrographique et des ressources en eau de la région.

A. Belhadj-Aissa et Y. Smara

Pour les perspectives futures, l'acquisition et l'utilisation d'images à plus haute résolution de cette région (de type SPOT panchromatique, par exemple) permettrait une détection plus fine des linéaments, du tracé des oueds et du système de drainage. D'autre part, l'exploitation de combinaisons de données satellitaires optiques (TM de Landsat et HRV de SPOT) avec des données radar, permettra de rehausser grandement le réseau hydrographique (YÉZOU et al., 1993).

6. Remerciements

Le travail présenté dans cet article est, en fait, une partie d'un projet plus global qui concerne un observatoire des évolutions, tant naturelles qu'anthropiques, sur le piémont de l'Atlas saharien, étudié conjointement avec le Laboratoire de géographie physique de l'Université de Paris VII. Nous tenons à remercier Y. Dewolf et F. Joly ainsi que Y. Callot et A. Simonin pour leur collaboration efficace sur le plan de l'interprétation des phénomènes étudiés sur le terrain. Par ailleurs, nous remercions vivement J.-P. Gilg, H. Geroyannis, P. Bildgen et toute l'équipe du Laboratoire de télédétection du Centre d'analyse et de mathématiques sociales de l'École des hautes études en sciences sociales pour les moyens mis à notre disposition pour le traitement des images et pour leurs précieux conseils.

7. Références

- DEWOLF, Y., JOLY, F., CALLOT, Y. et SIMONIN, A. 1992. Rapport technique interne de mission effectuée sur la zone Laghouat-Brézina (Algérie). Université de Paris VII, 15 p.
- DU WENCAI and YE DELIAO 1993. Methods for recognizing and extracting groundwater information from remote sensing. International symposium of operationalization of remote sensing, Enschede, April 1993, p. 105-111.
- EZRA, C. C., BONN, F. and ESTES. J. E. 1982. The feasability of thermal inertia mapping for detection of perched water tables in semi-arid irrigated lands. First thematic conference: Remote sensing of arid and semi-arid lands. Cairo, January 1982, p. 120-128.
- MOORE, D. G., and MYERS, V. I. 1972. Environmental factors affecting thermal ground water mapping. Remote sensing instruments. South Dakota State University, Brookings, 10 p.
- YÉZOU, H., BESNUS, Y., ROLET, J., PION, J. C. and AING, A. 1993. Merging Seasat and SPOT imagery for study of geological structures over a temperate agricultural region. Remote Sensing of Environment, nº 43, p. 265-279.

2

Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un système d'information géographique (rivière Eaton, Québec)

HÉDIA CHAKROUN 1, FERDINAND BONN 1 et JEAN-PIERRE FORTIN 2

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1; téléphone: +1 (819) 821-7964; télécopieur: +1 (819) 821-7944

² Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Carrefour Molson, 2800, rue Einstein, Québec, Québec, Canada, G1X 4N8; téléphone: +1 (418) 654-2591; télécopieur: +1 (418) 654-2600

Résumé

L'énergie de base responsable de l'érosion hydrique est issue principalement de l'impact de la pluie et du ruissellement. Plusieurs études menées à l'échelle parcellaire ont pris en considération ces deux facteurs; cependant, pour faire une bonne estimation de l'érosion et de la sédimentation résultant de l'écoulement et du ruissellement, il faut considérer le bassin versant dans son intégrité. La variabilité des facteurs responsables des pertes de sol est prise en considération par l'utilisation de modèles du type distribué. L'objectif de cette étude est de modéliser les pertes de sol à l'échelle d'un bassin versant pour une période de temps pouvant aller de l'événement pluvieux à des dizaines d'années. La méthodologie proposée est appliquée au bassin versant de la rivière Eaton (Québec) de près de 200 km² de superficie; elle consiste à effectuer une prédiction de perte de sol basée conjointement sur un modèle hydrologique et sur un modèle d'érosion. Le modèle hydrologique retenu est appelé HYDROTEL et il est conçu pour être compatible avec les données de la télédétection; le modèle d'érosion est l'équation universelle de perte de sol modifiée

(Modified Universal Soil Loss Equation: MUSLE) qui est une version transformée de l'équation universelle de perte de sol (USLE). La simulation hydrologique permet de fournir des cartes relatives au ruissellement dans chaque maille du bassin et qui sont à la base de la détermination du coefficient d'érosion causé par le ruissellement. Le facteur érosif de ruissellement et les facteurs érosifs relatifs à la topographie, à la couverture du sol et aux mesures anti-érosives sont intégrés dans un système d'information géographique (SIG) qui permet de fournir des cartes et des statistiques relatives aux pertes de sol dans le site de l'étude.

1. Introduction

De par la diversité des facteurs affectant l'érosion, la quantification des pertes de sol a été menée durant de nombreuses années à l'échelle parcellaire. L'utilisation des simulateurs de pluie et des parcelles aménagées en fonction des besoins de ces études a permis la proposition decertaines lois valables pour les conditions expérimentales. Jusqu'à maintenant, rares sont les études qui ont essayé d'extrapoler et de vérifier la validité de ces lois à grande échelle. La difficulté majeure, qui réside dans le changement d'échelle, est de représenter les facteurs et les mécanismes responsables de l'érosion avec une précision et une homogénéité équitable sur tout le territoire d'étude.

2. Prospection de la modélisation de l'érosion à l'échelle régionale : la contribution des données satellitaires et des SIG

Les méthodes de modélisation de l'érosion traitant le bassin versant comme un système distribué nécessitent, comme toute modélisation environnementale à grande échelle, une énorme quantité de données manipulées par des systèmes de calcul puissants. Quelque soit le modèle de perte de sol choisi, les facteurs décrivant le processus devraient être les mêmes; on peut les diviser en deux catégories :

- des facteurs de premier ordre qui sont des facteurs physiques décrivant le relief, l'occupation du sol et les différents types d'aménagement;
- des facteurs de second ordre qui sont issus de la combinaison des conditions climatiques et des caractéristiques physiques régissant ainsi le ruissellement et le comportement hydrologique du bassin versant.

La détermination des facteurs de premier ordre à l'échelle régionale a été de plus en plus raffinée par l'utilisation des images satellitaires ainsi que par les modèles numériques de terrain (MNT). Ces données numériques sont facilement intégrées, sous forme de niveaux d'information, à des SIG dans lesquels le territoire est divisé en mailles régulières. Quant aux facteurs de second ordre, ils n'ont pas connu la même évolution que les précédents. Ceci est dû principalement au fait que les modèles d'érosion développés jusqu'à présent et prenant en considération le ruissellement, ne peuvent tenir compte de façon satisfaisante de l'hétérogénéité des caractéristiques physiques du bassin versant et de la variabilité spatiale des données météorologiques. Ainsi, une détermination adéquate des facteurs d'érosion de second ordre suppose un modèle hydrologique distribué tout comme le modèle d'érosion. Les modèles qui considèrent la variabilité spatiale du bassin sont rares, exception faite des deux modèles récemment développés. Le premier modèle est ANSWERS

(Areal Non-point Source Watershed Environemental Response Simulation, BEASLEY and HUGGINS, 1982) et estime la répartition des sédiments transportés dans le temps et dans l'espace en utilisant des mailles régulières facilitant ainsi l'intégration des données géo-référencées et télédétectées. Le second modèle est AGNPS (Agricultural Non-Point Source, YOUNG et al., 1987) qui est intégré à un large projet d'érosion appelé WEPP (Water Erosion Prediction Project, LAFLEN et al., 1991) et qui vise à mettre au point une technologie généralisée de prédiction de l'érosion.

3. Spatialisation des facteurs du modèle d'érosion de la MUSLE

3.1. Site de l'étude

Le site choisi pour l'application de notre méthodologie est l'un des bassins versants de la rivière Eaton. Il est situé dans la province géologique des Appalaches qui est un relief majeur traversant tout le sud-est du Québec (Canada). Sa superficie approximative est de 192 km² et son relief est relativement accentué avec un réseau hydrographique dense (fig. 1).

3.2. Modèle d'érosion

Le principe de l'USLE est maintenu dans cette étude du fait de son adaptabilité aux données multisources, issues des images satellitaires et des bases de données numériques, et de la facilité d'intégrer ces données, sous forme de couches d'information, à un SIG.

La MUSLE (FOSTER et al., 1973) est un modèle qui intègre le comportement hydrologique du bassin versant, permettant ainsi de spatialiser les facteurs de second ordre. La modification par rapport à l'USLE consiste à remplacer l'indice d'érosivité simple calculé d'une manière uniforme sur tout le territoire d'étude par un indice d'érosivité ayant des termes séparés pour le ruissellement et pour les précipitations. L'expression générale de la MUSLE est :

$$A_{or} = R_m K LS C P$$

où A_{or} est la quantité de perte de sol durant l'orage, R_m est l'indice d'érosivité modifié, K est le facteur d'érodabilité des sols, LS est le facteur érosif topographique, C est le facteur relatif à la couverture du sol par la végétation et P le facteur des mesures anti-érosives (HESSION and SHANHOLTZ, 1988).

3.3. Spatialisation des facteurs de premier ordre

Les facteurs d'érosion de premier ordre sont reliés à la couverture du sol, à la composition et la structure du sol, et à la topographie du terrain.

3.3.1. Facteurs de l'occupation du sol

Le modèle utilisé pour l'estimation de l'érosion prend en considération l'effet de la couverture du sol par le facteur C, qui varie d'une classe d'occupation du sol à une autre, et le facteur P relatif aux pratiques anti-érosion.

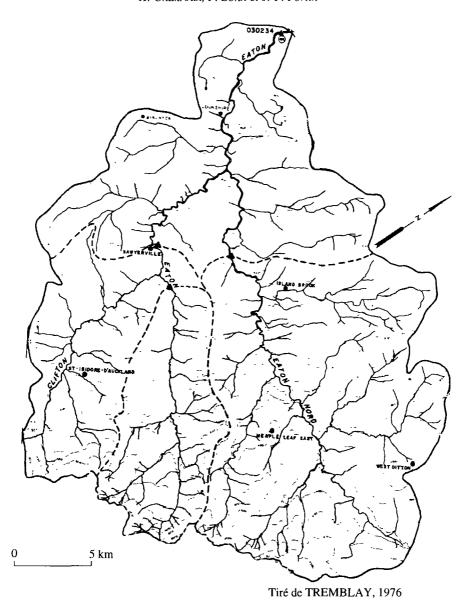


Figure 1. Localisation géographique de la rivière Eaton

On a utilisé une image du capteur TM du satellite Landsat-5 pour extraire de l'information relative aux différentes classes d'occupation du sol. L'image a été corrigée géométriquement et radiométriquement, et classifiée par voie supervisée au moyen du système de traitement d'images EASI/PACE de PCI. Les classes d'occupation de sol du bassin versant d'étude sont données sur le tableau 1 et illustrées par la figure 2-2 (voir cahier couleur).

3.3.2. Facteur d'érodabilité

La numérisation de la carte pédologique permet la création d'un niveau polygonal qu'on transforme en un niveau matriciel dans le SIG PAMAP; à chaque type de sol on associe l'indice d'érodabilité correspondant (tab. 2).

Tableau 1. C	Classes d'	occupation	du sol dans	le bassin d'étude
--------------	------------	------------	-------------	-------------------

Classe d'occupation du sol	facteur P	facteur C	Superficie (ha)	Superficie (%)
Eau	1,00	0,000	1 260,18	7,11%
Cultures	1,00	0,030	6 977,25	39,35%
Terrains en friche	1,00	1,000	380,97	2,15%
Forêt de feuillus	0,50	0,003	4 317,75	24,35%
Forêt de conifères	0,50	0,003	2 102,13	11,85%
Forêt mélangée	0,50	0,003	2 694,69	15,20%

Tableau 2. Types de sol dans le bassin d'étude

Type de sol	facteur K	Superficie (ha)	Superficie (%)
Rst: roches	0,00	548,46	3,01
M: sable fin de Milby	0,04	225,00	1,24
Ua: sol alluvionnaire non classé	0,06	162,99	0,90
Ca: terre franche de Calais	0,07	137,97	0,76
Gl: terre franche de Greensboro	0,09	11 449,44	62,87
Dcl: terre franche sablonneuse	0,21	5 672,16	31,15
Dg: terre franche graveleuse	0,31	14,13	0,08

3.3.3 Facteurs topographiques

Le modèle numérique d'altitude (MNA) relatif au bassin versant est généré à partir des courbes de niveau issues d'une carte topographique au 1: 250 000 et numérisée dans le système PAMAP. Le fichier des altitudes est créé en utilisant la méthode de la différence finie avec une résolution égale à 30 m (fig. 2-3, voir cahier couleur). La détermination des pentes θ et des orientations se fait automatiquement dans le SIG. La longueur de pente λ , qui est définie comme étant la distance d'un point du bassin versant à la source de ruissellement, est dérivée à partir des orientations moyennant un programme qui attribue à un pixel ayant la même orientation que le pixel précédent le rang de ce dernier plus un. Une illustration des longueurs de pente est donnée par la figure 2-4 (voir cahier couleur). L'expression du facteur érosif topographique est :

$$LS = (\lambda/22,15)^{m} (65,41 \sin^{2}(\theta) + 4,56 \sin(\theta) + 0,065)$$

où m est un coefficient de longueur de pente variant en fonction de la valeur de la pente.

3.4. Spatialisation de l'indice d'érosivité modifié

3.4.1. Expression de l'indice d'érosivité R

Pour un orage donné, l'expression de R_m, telle qu'elle a été suggérée par FOSTER et al. (1977), est :

$$R_m = 0.5 EI_{30} + 3.5 V_u \sigma_{pu}^{1/3}$$

où I₃₀ est l'intensité maximale de la pluie enregistrée pendant 30 minutes de l'orage, et E est l'énergie engendrée par l'orage et ayant pour expression :

$$E = \sum_{k=1}^{k=p} (e_k . \Delta(V_k))$$

où e_k est l'énergie engendrée par la quantité de pluie tombée durant le kième pas de temps et $D(\Delta_k)$ est la hauteur de la pluie pour le kième pas enregistré au moyen d'un pluviographe divisé en p parties. L'expression de l'énergie de la pluie est donnée par (FOSTER et al., 1981):

$$e_k = 0.119 + 0.0873 \log_{10}(I_k)$$
 pour $I_k < 76 \text{ mm/h}$
 $e_k = 0.283$ pour $I_k > 76 \text{ mm/h}$

où I, est l'intensité de la pluie pendant le kième pas exprimée en mm/h.

L'érosivité de ruissellement est fonction de V_u et de σ_{pu} , qui représentent respectivement le volume total de ruissellement exprimé en mm et le volume de ruissellement de pointe exprimé en mm/h. Ces deux paramètres hydrologiques sont déterminés d'une manière distribuée sur tout le bassin versant par le modèle HYDROTEL (version 2.1) (FORTIN et al., 1991) qui calcule les lames de ruissellement disponibles au transfert d'une maille à l'autre.

3.4.2. Simulation de l'écoulement avec HYDROTEL

HYDROTEL appartient à la nouvelle génération des modèles hydrologiques distribués qui simulent et prédisent l'évolution du cycle de l'eau tout en optimisant l'utilisation des données de la télédétection et des MNT. Deux logiciels complémentaires à HYDROTEL permettent de traiter les données de base en vue d'extraire de l'information nécessaire à la simulation hydrologique : ce sont les logiciels IMATEL et PHYSITEL (version 2.0). La structure spatiale d'HYDROTEL est donnée par la figure 5.

IMATEL effectue le traitement d'images acquises par télédétection et peut être remplacé par n'importe quel autre logiciel de traitement d'images pourvu que les résultats de traitement soient compatibles avec HYDROTEL. PHYSITEL sert à la structuration des données physiques du bassin versant et ce en préparant la banque de données topographiques du territoire nécessaire au modèle selon les dimensions des mailles choisies pour un bassin en particulier. PHYSITEL est ainsi comparable à n'importe quel autre SIG avec en plus la capacité d'effectuer des tâches spécifiques à une modélisation hydrologique.

Le MNA du bassin d'étude est traité par PHYSITEL en vue d'éliminer les extrêmes locaux qui constituent des singularités pouvant empêcher le processus de la simulation de

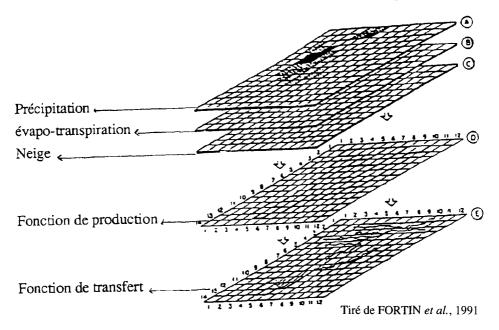


Figure 5. Structure spatiale du modèle HYDROTEL

l'écoulement. La détermination automatique du contour du bassin versant et du réseau de drainage est une opération qui est faite au moyen d'un algorithme récursif qui, connaissant la localisation de l'exutoire, utilise les orientations pour délimiter le bassin. Un traitement spécial des zones planes consiste à créer un écoulement artificiel pour qu'elles n'engendrent pas de rupture dans l'écoulement, de sorte qu'elles soient vidées vers la maille la plus basse qui se trouve en bordure. Le traitement du réseau de drainage permet d'aboutir à des ensembles homogènes constituant des petits sous-bassins ou des unités hydrologiques homogènes (UHH). On a choisi une résolution de 400 m pour le processus d'intégration.

L'image classifiée a été intégrée spatialement par PHYSITEL selon des grilles de 100 m de résolution. Elle a été traitée en vue de générer, à partir de son format matriciel, un fichier comportant le nombre de pixels relatifs à chacune des classes dans chacune des mailles, ce qui permet de déduire la superficie de chacune des classes dans la maille considérée.

La modélisation des divers processus du bilan hydrologique peut se faire à l'aide d'équations plus ou moins complexes et précises selon la disponibilité des données. Le caractère modulaire d'HYDROTEL permet de répartir la simulation hydrologique en un certain nombre d'étapes; pour chaque étape, on a plus d'un choix de méthode de calcul. De plus, dans chacun des modules, il est possible de choisir d'utiliser des paramètres d'optimisation selon les besoins et selon les résultats de la simulation.

On a choisi une période de simulation allant du 6 septembre au 3 octobre 1973 avec un pas de simulation de 24 heures. La résolution des mailles du bassin versant est choisie égale à 1 000 m. Le résultat de la simulation est donné par des quantités de ruissellement calculées à chaque pas de temps et dans chacune des mailles du bassin versant.

Le calcul du facteur d'érosivité liée au ruissellement nécessite la détermination du volume cumulé ruisselé sur chacune des mailles le long de la période de la simulation et du ruissellement de pointe.

4. Intégration des facteurs d'érosion au SIG

Chacun des facteurs d'érosion est représenté par un niveau d'information dans le SIG; le module de modélisation permet de calculer les pertes de sol selon le modèle de la MUSLE et pour la période de la simulation. Le facteur d'érosivité des précipitations (Σ EI₃₀) a été calculé à partir des données des pluviomètres et des pluviographes situés dans deux stations météorologiques du bassin versant. Pour le sous-bassin traversé par un affluent, la rivière Clifton, la valeur de l'érosivité des précipitations calculée à partir des données de la station de Saint-Isidore-d'Auckland est de 135 MJ·mm/ha·h et, pour celui traversé par la rivière Eaton, elle est calculée à partir des données de la station de Sawyerville et elle est de 93 MJ·mm/ha·h. Les pertes de sol ainsi cartographiées sont illustrées sur la figure 2-6 (voir cahier couleur). Le tableau 3 résume le taux d'érosion prédit pour la période de la simulation.

Tableau 3.	Pertes de sol selon le modèle de la MUSLE pour la période du 6 septembre au
	3 octobre 1973 dans le bassin d'étude

Classes de sol érodé	Superficie (ha)	Superficie (%)
De 0 à 1 kg/ha	1625,76	9,95
De 1 à 10 kg/ha	1 190,43	7,29
De 10 à 100 kg/ha	5 778,27	35,38
De 100 à 1 000 kg/ha	5 249,52	32,14
Plus que 1 000 kg/ha	2 488,77	15,24

5. Discussion et conclusion

L'objectif principal de notre étude était de mettre au point une méthodologie de prédiction des pertes de sol basée conjointement sur un modèle hydrologique distribué et sur un modèle de perte de sol tout en optimisant l'utilisation des moyens de la télédétection, des MNT et des SIG. Ainsi, notre étude est à caractère plus méthodologique qu'expérimental, les résultats auxquels on a abouti ne sont qu'une illustration de notre démarche.

La méthodologie est ainsi mise au point et la base de données relative au bassin d'étude est formée. Il serait intéressant d'améliorer cette étude et ce en procédant aux opérations suivantes :

- introduire un volet expérimental qui servira de base pour la calibration et la validation de n'importe quel modèle de prédiction utilisé éventuellement dans l'étude;
- améliorer la simulation hydrologique avec les modèles HYDROTEL et PHYSITEL en raffinant la résolution dans la mesure du possible tout en prenant en considération la variabilité spatiale des paramètres hydrologiques;
- effectuer une étude comparative de prédiction de perte de sol et de transport de sédiments en utilisant l'un des modèles distribués qui tiennent compte du comportement hydrologique du bassin versant, tel que les modèles ANSWERS ou AGNPS;
- utiliser différents scénarios relatifs aux facteurs non standards, tel que les facteurs d'occupation du sol ou des pratiques culturales pour prédire l'impact de la variation combinée de ces facteurs sur la stabilité du bassin d'étude.

Cette étude de modélisation de l'érosion à l'échelle du bassin versant de la rivière Eaton peut avoir une multitude d'applications; en effet, la base de données construite est sujette à des manipulations faciles au sein du SIG. Il est possible de vérifier la validité de certaines lois, préétablies à l'échelle parcellaire, à l'échelle du bassin versant. On pourra, par exemple, déterminer l'importance relative de l'érosivité de la pluie responsable de l'érosion entre les rigoles et de l'érosivité du ruissellement responsable de l'érosion dans les rigoles. De même, avec la base de données disponible sur le bassin d'étude, il est possible d'utiliser des modèles de pollution diffuse faisant intervenir, entre autres, les concentrations en éléments chimiques dans les lames d'eau ruisselées suite à un orage.

6. Références

- BEASLEY, D. B. and HUGGINS, L. F. 1982. ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation. User's manual. EPA-90519-82-001, U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, 54 p.
- FORTIN, J.-P., VILLENEUVE, J.-P., BENOIT, J., BLANCHETTE, C., MONTMINY, M., PROULX, H., MOUSSA, R. and BOCQUILLON, C. 1991. HYDROTEL 2.1 User's guide. Scientific report, INRS-Eau, n° 286, 171 p.
- FOSTER, G. R., MEYER, L. D. and ONSTAD, C. A. 1973. Erosion equation derived from modelling principles. ASAE paper no 73-2550, ASAE, St-Joseph, Michigan 49085.
- FOSTER, G. R., MEYER, L. D. and ONSTAD, C. A. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Transactions on the ASAE, vol. 20, nº 4, p. 683-687.
- FOSTER, G. R., MCCOOL, D. K., RENARD, K. G. and MOLDENHANER, N. C. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 36, nº 6, p. 355-359.
- HESSION, W. C. and SHANHOLTZ, V. O. 1988. A geographic information system for targeting non-point source agriculture pollution. Journal of Soil and Water Conservation, May-June 1988, p. 264-266.
- LAFLEN, J. M., LEONARD, J. L. and FOSTER, G. R. 1991. WEPP, a new generation of erosion prediction technology. Journal of Soil and Water Conservation, Jan.-Feb. 1991, p. 34-38.
- TREMBLAY, R. 1976. Bassin représentatif de la rivière Eaton : traits caractéristiques du régime d'écoulement 1966-1973. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service de l'hydrométrie (D.H.Q.-9), Québec, 69 p.
- YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D. and ANDERSON, W. P. 1987. AGNPS, agricultural non-point source pollution model: a new watershed analysis tool. Conservation resource 35, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 77 p.

Contribution de la télédétection à l'optimisation et à la maintenance d'un réseau d'assainissement des eaux : application à la ville d'Oran (Algérie)

YOUCEF MESSAR et NADIA MESSAR

Centre national des techniques spatiales (CNTS), Laboratoire de télédétection, B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie; téléphone : +213 (6) 37-22-17; télécopieur : +213 (6) 37-84-54

Résumé

La connaissance et la maintenance du fonctionnement d'un réseau d'assainissement des eaux nécessitent la prise en compte du coefficient de ruissellement. Cet article présente une méthode automatique de calcul de ce coefficient, sur les données HRV de SPOT de la ville d'Oran. Cette étude nécessite la délimitation des bassins versants, ainsi que la quantification des surfaces perméables et imperméables. À cet effet, deux classifications sont utilisées. Une étude comparative indique une marge d'erreur de 5,2 % par rapport aux résultats calculés sur la mosaïque de photographies aériennes. Par contre, elle est de 6,2 % par rapport à l'estimation du Service hydraulique d'Oran. Ces résultats montrent la fiabilité de l'outil télédétection dans le calcul de ce coefficient.

1. Introduction

En milieu urbain, les réseaux d'assainissement des eaux sont comparables à tous les autres ouvrages du patrimoine d'une ville. Comme tous les biens d'équipement, ces réseaux nécessitent des coûts d'investissements importants qui, d'ailleurs, peuvent atteindre ceux de la voirie. Par conséquent, les améliorations et les réparations périodiques sont indispensables.

La connaissance et la maintenance du fonctionnement de ces réseaux, ainsi que le calcul des nouveaux ouvrages nécessitent la prise en compte du coefficient de ruissellement.

Jusqu'à présent, ce coefficient est obtenu par procédé empirique, généralement par planimétrie sur photographies aériennes. C'est pourquoi, nous tenterons dans cet article un calcul de ce coefficient d'une manière automatique et ce, en utilisant l'imagerie HRV de SPOT.

2. Coefficient de ruissellement

En zone urbaine, le développement des surfaces imperméables est un descripteur significatif de ce milieu. En localisant ces surfaces, il devient possible de traduire la densification urbaine et, par conséquent, de déterminer la surface de la partie du bassin versant sur laquelle les eaux pluviales ruisselleront.

Le coefficient de ruissellement n'est autre qu'un rapport du volume d'eau retenu après ruissellement d'une surface donnée sur le volume tombé sur cette même surface.

Lorsque le bassin versant comporte des surfaces S_1 , S_2 , S_3 , etc., dont les coefficients de ruissellement sont C_1 , C_2 , C_3 , etc., le coefficient de ruissellement résultant est :

$$CR = \sum C_1 \cdot S_1 / \sum S_1$$

Il est aussi défini, en milieu urbain, comme le taux d'imperméabilité du bassin versant. Le bassin versant est défini comme une surface au sol déversant ses eaux de ruissellement vers un même point. D'où CR = surface imperméable/surface totale du bassin versant.

3. Méthode d'évaluation des débits maximaux

Toute étude d'un réseau d'assainissement des eaux nécessite, à l'étape initiale, la détermination des débits pluviaux et des eaux usées à évacuer. Le problème de l'évaluation des débits pluviaux dans les bassins versants a fait, depuis longtemps, l'objet de nombreuses études théoriques et, en ce qui concerne les usages des ingénieurs en hydrologie urbaine, on peut citer deux méthodes principales d'évaluation des débits pluviaux (BOURRIER, 1981).

La première méthode, la plus ancienne, est la méthode dite «rationnelle», dont la formule de base est très simple, mais elle devient beaucoup plus complexe à utiliser «manuellement» si on intègre tous les correctifs et si on procède à une décomposition analytique fine.

La deuxième, la plus utilisée, est nommée méthode superficielle de CAQUOT. Elle permet de calculer, en un certain nombre de points du système d'écoulement, des débits maxima pour un orage donné. Ces débits sont donnés par la formule suivante :

$$O(F) = K^{1/u} \cdot P^{v/u} \cdot C^{1/u} \cdot A^{w/u}$$

οù

F = fréquence de dépassement (quantité d'eau déversée / t);

t = durée de la pluie maximale périodique en min (5 < t < 20);

K,u,v,w = constantes function de a(F) et b(F) sachant que :

$$i(t,F) = a(F) + t^{b(F)}$$

οù

i(t,F) = intensité maximale de la pluie de durée t et de fréquence de dépassement F;

P = pente du bassin versant;

C = coefficient de ruissellement du bassin versant tel que :

C = A/A':

οù

A = surface totale du bassin versant;

A' = surface artificialisée.

Les limites d'applications sont :

- le coefficient de ruissellement : $0.2 \le CR \le 1$;
- la surface totale : $A \le 200$ ha.

4. Cartographie des surfaces perméables

4.1. Mise en évidence des surfaces perméables

En milieu urbain, nous considérons comme surfaces imperméables tous les espaces artificialisés (béton, toits, goudron, terrasses, etc.). À l'opposé de ces surfaces, nous retrouvons les surfaces perméables qui regroupent les espaces couverts de végétation, ainsi que les terrains nus.

Pour quantifier le coefficient de ruissellement dans chacun des bassins versants, il faut quantifier les surfaces perméables avec un maximum de précision.

Quelques études déjà réalisées en milieu urbain (CUSSOL et al., 1987) ont montré la finesse de discrimination du rapport perméable/imperméable par l'indice de végétation (végétation/minéral) et de brillance (sols nus/artificialisé+végétation). Nous allons alors quantifier ces deux thèmes (végétation et sols nus), qui caractérisent les surfaces perméables sur l'image HRV de SPOT du 06-05-1986. Il faut noter que cette date se situe au début de la période de fin d'activité chlorophyllienne. L'idéal pour nos calculs aurait été d'avoir une image datant de fin mars.

Les documents disponibles pour ce travail sont :

- la carte topographique au 1: 25 000 de la wilaya d'Oran;
- la mosaïque de photographies aériennes à l'échelle du 1: 25 000;
- la scène HRV de SPOT datant du 06-05-1986.

4.2. Délimitation des bassins versants sur la carte topographique au 1: 25 000

La délimitation des bassins versants considérés comme des surfaces d'influence aux points caractéristiques a été réalisée en utilisant uniquement le critère topographique (CHENE, 1986). Les critères «limites de propriétés» et «bissectrice» n'ont pas été utilisés, vu la petitesse de l'échelle. Nous avons obtenu 22 bassins versants d'ordre 1, numérotés de 1 à 22 qui ont été reportés sur la mosaïque de photographies aériennes à la même échelle. Le fichier topographique «bassins versants» a été rastérisé pour pouvoir le superposer aux images classées et ce, pour réaliser un calcul statistique local au niveau de chaque bassin versant.

La superposition du fichier «bassins versants» à l'image satellitaire a été réalisée après calage de cette dernière à la carte topographique. La technique du plus proche voisin est

judicieusement choisie pour son caractère lequel n'altère pas la qualité radiométrique de l'image d'origine. Ce filtre interpolateur est aussi conservateur d'informations quantitatives dans la mesure où nous nous intéressons à quantifier les espaces en végétation ainsi que les terrains nus. La superposition a été réalisée avec 21 points d'appui répartis de manière uniforme sur la zone d'étude.

4.3. Mise en évidence des surfaces en végétation

Les deux thèmes, surfaces couvertes de végétation et autres, ont des signatures spectrales distinctes. Par seuillage sur l'histogramme de l'indice de végétation, nous obtenons une image mettant en relief les deux thèmes (DARTEYRE et DUBUCQ, 1988). Le seuil a été déterminé en utilisant la mosaïque de photographies aériennes ainsi que les vérités-terrains connues *a priori*.

Nous tenons à signaler que l'indice de végétation a été calculé après masquage de l'eau et des pixels mixtes qui ont parfois des réponses similaires à la végétation.

Pour estimer la précision et la validation des résultats obtenus, il nous est apparu nécessaire de vérifier la rigueur de la correspondance entre l'unité cartographique ainsi délimitée et son thème. Pour cela, nous nous sommes servis de la mosaïque et des renseignements de l'enquête sur le terrain. La technique de validation sur photographies aériennes consiste à étudier la correspondance sur une grille à maillage demi-centimétrique (par planimètre numérique).

Le tableau 1 illustre les résultats obtenus sur 5 bassins versants pris comme échantillons (10, 14, 16, 20 et 22).

Bassin versant	Image HRV de SPOT (surface en ha)	Photographies (surface en ha)	Décalage (%)
10	5,31	6,46	17,80
14	27,12	29,64	8,51
16	4,44	6,24	28,85
20	21,72	24,35	10,80
22	8 40	9.5	11.58

Tableau 1. Quantification des surfaces en végétation sur les cinq bassins versants pris comme échantillons

Nous constatons que les résultats sur la mosaïque sont légèrement (parfois nettement) supérieurs à ceux calculés sur l'image. Ceci nous paraît très logique pour les deux raisons suivantes :

- la date de prise de vue, en mars 1982 pour les photographies aériennes, correspond à une période de très forte activité chlorophyllienne, contrairement à celle de l'image HRV de SPOT (6 mai) où le végétal commence à perdre ses pigments de chlorophylle (période de dessèchement);
- certaines surfaces couvertes de végétation sur les photographies aériennes de mars 1982, sont devenues des zones d'habitations ou de chantiers en mai 1986. Par conséquent, il serait plus adéquat de travailler avec des documents pris à la même date.

4.4. Mise en évidence des terrains nus

Nous avons utilisé la même philosophie que les espaces couverts de végétation pour quantifier les terrains nus. Les zones «nuages» (en végétation) situées à l'ouest de la ville ont des réflectances identiques à celles des terrains nus. Nous avons procédé à leur masquage pour éviter les confusions.

Un sol nu est caractérisé principalement par sa rugosité et sa couleur (BILLINGSLEY, 1979). C'est ce qu'on essayera de mettre en évidence par l'indice de brillance :

$$\sqrt{XS2^2 + XS3^2}$$

Toutefois, cet indice ne présente guère d'intérêt pour de grandes étendues ayant une diversité de types de sol. Au contraire, notre zone d'étude contient de petites parcelles correspondant à un même type de sol. Le tableau 2 illustre la quantification des espaces nus sur l'image et sur la mosaïque.

Bassin versant	Image HRV de SPOT (surface en ha)	Photographie (surface en ha)	Décalage (%)
10	12,01	14,40	16,60
14	23,47	26,57	11,67
16	23,29	24,06	3,21
20	9,38	10,04	6,58
22	5,25	6,24	15,87

Tableau 2. Quantification des terrains nus sur cinq bassins versants pris comme échantillons

Nous remarquons que les valeurs calculées sur les photographies aériennes sont plus élevées que celles de l'image HRV de SPOT. Logiquement, elles seront moins élevées car la réponse spectrale du végétal est conditionnée par son état phénologique. Puisque le tapis végétal, constituant la majeure partie de la végétation, commence à se dessécher à partir de la fin du mois d'avril, sa réponse spectrale sera donc proche d'un terrain nu.

L'anomalie remarquée relève du fait, qu'en mars 1982, il y avait beaucoup de chantiers dans ces zones, ce qui a engendré une surévaluation des terrains nus.

5. Calcul automatique du coefficient de ruissellement

À partir des deux classifications obtenues (surfaces couvertes de végétation et terrains nus), nous procédons aux mesures des surfaces perméables sur un périmètre donné, dans notre cas, le bassin versant. Nous rappelons que le fichier «bassins versants» contient 22 périmètres qui sont les 22 bassins versants d'ordre 1 définis sur notre zone d'étude. L'image rastérisée «bassins versants» est superposée simultanément sur les deux images classées puis, pour chacune, nous avons quantifié les espaces recherchés (fig. 3-1, voir cahier couleur).

Pour le calcul du coefficient de ruissellement (CR), nous avons procédé à la quantification des pixels de «confusion» entre les classes «végétation» et «sol nu». Ces pixels sont en nombre très réduit ou sont parfois inexistants (tab. 3).

Y. Messar et N. Messar

Tableau 3. Coefficients de ruissellements calculés sur l'image HRV de SPOT pour chacun des bassins versants

Bassin versant	Surface en végétation (ha)	Surface terrains nus (ha)	Surface totale (ha)	Pixels mixtes	Coefficient de ruissellement
1	56,99	74,32	237,56	635	0,47
2	4,61	6,22	77,63	0	0,86
3	3,92	3,35	68,48	4	0,89
4_	2,71	3,41	50,31	0	0,88
5	3,16	3,79	55,31	0	0,87
6	6,53	4,59	48,02	0	0,77
7	3,78	2,53	23,90	4	0,74
8	7,93	28,36	109,79	13	0,67
9	4,16	30,01	86,24	8	0,60
10	5,31	12,01	84,25	4	0,79
11	0,77	1,80	25,93	0	0,90
12	22,82	37,43	257,73	20	0,77
13	10,74	8,84	136,42	4	0,86
14	27,12	23,47	153,92	345	0,69
15	1,26	4,46	26,46	0	0,78
16	4,44	23,29	72,79	59	0,63
17	17,69	107,95	115,58	348	0,38
18	26,50	92,28	298,79	195	0,61
19	42,03	66,18	236,35	72	0,55
20	21,72	9,38	92,63	4	0,66
21	22,43	15,81	80,46	12	0,53
22	8,40	5,25	41,16	0	0,67

5.1. Estimation de la marge d'erreur par rapport aux résultats obtenus par calcul sur mosaïque

La validation a été faite sur les 5 bassins versants pris comme échantillons (tab. 4). Nous remarquons que les résultats sont précis à 95 % en moyenne; ceci est dû essentiellement aux facteurs suivants :

- une superposition fiable du fichier rastérisé «bassins versants» sur l'image, ainsi que sur les photographies aériennes;
 - de bonnes description et localisation des surfaces perméables sur l'image satellitaire.

Tableau 4. Comparaison des résultats de l'image HRV de SPOT avec ceux calculés sur les photographies aériennes

Bassin versant	Surface (ha)		Photographies aériennes	HRV de SPOT	Décalage (%)
	surface totale		81,86	84,25	2,90
10	surface artificialisée		61,00	66,97	9,00
	coefficient de ruissell	lement	0,75	0,79	4,00
	surface totale		156,25	153,92	1,50
14	surface artificialisée		100,04	106,78	6,32
	coefficient de ruissell	lement	0,64	0,69	5,00
	surface totale		70,78	72,79	2,75
16	surface artificialisée		40,48	45,65	11,33
	coefficient de ruissell	lement	0,57	0,63	6,00
	surface totale		90,50	92,63	2,30
20	surface artificialisée	·	56,11	61,57	8,87
	coefficient de ruissell	lement	0,62	0,66	4,00
	surface totale		40,70	41,16	1,20
22	surface artificialisée		24,36	27,51	11,45
	coefficient de ruissellement		0,61	0,67	7,00
		Surface	totale	= 2,11	
Déc	Décalage moyen (%) Surfac		rface artificialisée = 9,39		
Coefficient de ruissellement = 5,20					

5.2. Estimation de la marge d'erreur par rapport aux résultats obtenus par le Service hydraulique

Du Service hydraulique d'Oran, nous avons obtenu les estimations du coefficient de ruissellement sur les 22 bassins versants (SOGREAH, 1983) et nous rappelons que la marge d'erreur tolérable est de 10 %.

Si nous examinons les coefficients (tab. 5), dont la marge d'erreur est supérieure à 10 %, nous remarquons que les bassins versants 10 et 12 sont situés à la périphérie de la ville. Entre 1983 (date de l'étude de SOGREAH) et 1986 (date de prise de vue de l'image), plusieurs constructions ont eu lieu, éliminant ainsi des surfaces couvertes de végétation et des terrains nus.

6. Conclusion

La marge d'erreur introduite est de l'ordre de 5,2 % par rapport à la mesure faite par planimétrie sur les photographies aériennes. Elle est de 6,4 % par rapport à l'estimation de SOGREAH (1983). Ces résultats restent largement acceptables dans la mesure où la marge d'erreur tolérée est de 10 %.

Y. Messar et N. Messar

Tableau 5. Comparaison des résultats obtenus sur l'image HRV de SPOT avec ceux de SOGREAH (1983)

Bassin versant	Coe	efficient de ru	issellement		calage (%)
	HRV de SPOT	SOGREAH	Photographies aérinnes	HRV de SPOT/ photographies	HRV de SPOT/ SOGREAH
1	0,47	0,50			3
2	0,86	0,80			6
3	0,89	0,80			9
4	0,88	0,80			8
5	0,87	0,80			7
6	0,77	0,80			3
7	0,74	0,80			6
8	0,67	0,60			7
9	0,60	0,60			0
10	0,79	0,60	0,75	4	19
11	0,90	0,80			10
12	0,77	0,60			17
13	0,86	0,80			6
14	0,69	0,79	0,64	5	10
15	0,78	0,80			2
16	0,63	0,60	0,57	6	3
17	0,38	0,40			2
18	0,61	0,60			1
19	0,55	0,60			5
20	0,66	0,60	2,62	4	6
21	0,53	0,60			7
22	0,67	0,70	0,61	6	3

Pour le réseau déjà existant, cet outil sera d'une aide extrêmement efficace à sa gestion. Aussi, pour une étude d'installation de nouveaux réseaux d'assainissement, cet outil permettra de réaliser une chaîne de traitements automatiques pour le calcul des débits maximaux et ce, en intégrant un modèle numérique de terrain (MNT).

Généralement, les débits sont directement liés à la nature du substrat; en effet, qu'il s'agisse d'un sol argileux ou rocheux, les débits changent. Ainsi, une utilisation plus rationnelle consiste à introduire d'autres documents tels que la carte lithologique. Pour cela, nous avons envisagé l'intégration d'une banque de données urbaines dans un système d'information géographique, ce qui va permettre une automatisation plus complète et un suivi plus efficace des phénomènes évolutifs.

Enfin, l'apport de cette technique pourrait être d'une aide efficace pour l'évaluation des risques d'inondation (carte de sensibilité aux inondations), parce qu'il faut garder en tête l'idée que les conditions de l'occupation du sol dans les bassins versants ne sont pas très stables : l'érosion des sols se développe, des constructions nouvelles apparaissent et le coefficient de ruissellement change considérablement.

7. Références

- BILLINGSLEY, F. C. 1979. Theory on data processing and instrumentation. Principes physiques et mathématiques de la télédétection. CNES, École d'été de physique spatiale, Strasbourg, p. 293-297.
- BOURRIER, P. 1981. Les réseaux d'assainissement. Édition technique & documentation, Paris, 329 p.
- CHENE, J. M. 1986. Modèles de bassins versants pour la prévision hydrologique. Rapport des huitième et neuvième cours de formation FAO/UNDRO/OMM/ASE, RSC série 41, Rome, 275 p.
- CUSSOL, J., LEPRIEUR, C., PEDRON, C. et TOURNET, J. 1987. Intégration des données SPOT dans un système d'informations géocodées. SPOT 1, utilisation des images, bilan et résultats. CNES, Toulouse, p. 515-530.
- DARTEYRE, J.-P. et DUBUCQ, M. 1988. L'indice de végétation, l'indice de brillance. Groupement du développement de la télédétection aérospatiale, Toulouse, 20 p.
- SOGREAH. 1983. Société grenobloise d'études et applications hydrauliques. Réseau d'assainissement de l'agglomération d'Oran, Service hydraulique, Oran (Algérie).

4

Influence des failles actives sur les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay (nord du Viêt Nam)

TRINH PHAN-TRONG

Institut de géologie, Centre national pour la recherche scientifique du Viêt Nam, Nghiado, Tuliem, Hanoi, Viêt Nam;

téléphone : +84 (4) 34-30-68; télécopieur : +84 (4) 35-24-83

Résumé

La tectonique récente de la partie nord du Viêt Nam est très importante. Deux zones de failles principales sont affectées par des mouvements rapides : les zones de failles du fleuve Rouge (song Hong) et de Dien Bien Phu. On a construit deux grands réservoirs à côté de la zone de faille du fleuve Rouge: le lac de la rivière Chay (song Chay) et le lac de Hoabinh. Nous avons utilisé des techniques de télédétection en les combinant avec différentes méthodes de géologie, de géophysique et d'observations sur le terrain pour déterminer la cinématique des failles actives et pour estimer les risques géologiques (glissement de terrain, fracturation de terrain et de barrage, tremblement de terre, érosion à l'aval de barrage, etc.). Dans la région du lac de Hoabinh, une zone de failles normales actives de direction N-S, est mise en évidence. Cette zone de failles est responsable des sismicités induites produites dans la région. On estime que la magnitude maximale de tremblement de terre est de l'ordre de 6,2-6,7 sur l'échelle de Richter pour la faille située à la bordure est de la vallée de Hoabinh, 2 km à l'est du barrage. Le lac de la rivière Chay, appelé lac de Thac Ba, est localisé à côté d'une grande faille active, qui est une trace principale de la zone de failles du fleuve Rouge. La vitesse du mouvement de cette faille est de l'ordre de quelques mm/an. Le lac est situé dans une zone sismique importante : la magnitude maximale de tremblement de terre est de l'ordre de 8.

1. Introduction

La déformation récente de l'Asie suscite depuis quelques années un regain d'intérêt. Plusieurs équipes dans le monde ont une approche pluridisciplinaire de ce problème. Le modèle d'extrusion en deux phases (TAPPONNIER et al., 1982, 1986) a ainsi vu une de ses prédictions majeures (extrusion de l'Indochine vers le SE au Tertiaire) vérifiée par l'étude de la zone de failles du fleuve Rouge (TAPPONNIER et al., 1990; SCHARER et al., 1990). Il ne fait aucun doute que la tectonique active du nord du Viêt Nam est aussi importante que celle observée dans le Yunnan de la Chine (ALLEN et al., 1984; PHANTRONG et al., 1991, 1993).

Deux zones de failles principales sont affectées par des mouvements rapides : la zone de failles du fleuve Rouge et la faille de Dien Bien Phu (fig. 1). Les réservoirs de la rivière Chay et de Hoabinh sont construits à côté de la zone de failles du fleuve Rouge.

Le lac de Hoabinh est localisé sur la rivière Noire (song Da), 75 km à l'ouest de Hanoi. Le volume d'eau du lac est de 9,45·10⁹ m³. Le barrage de Hoabinh, d'une hauteur de 165 m, est le plus grand barrage de l'Asie du Sud-Est. Ce lac joue deux rôles principaux : le contrôle des inondations et la production d'électricité. La puissance totale de l'usine hydroélectrique est de 1 920 MW. Le lac, qui a une longueur de 200 km, de Hoabinh à Sonla, et une surface de 230 km², change profondément l'environnement de la région. Le remplissage du réservoir a commencé en 1988. Lorsque le niveau d'eau a atteint la cote de 66 m, une série de séismes de magnitude inférieure à 2,0 se sont produits au voisinage du lac. En mai 1989, un tremblement de terre de magnitude 4,9, avec une intensité de 6-7, a provoqué des dégâts sur les habitations de la région près du barrage (NGUYEN NGOC et al., 1990; NGUYEN VAN et DUONG, 1990). Plusieurs fissures et glissements de terrain sont observés au voisinage du lac et le long des structures géologiques. L'érosion intense des bordures de la rivière Noire, à l'aval du barrage de Hoabinh, est liée aux changements brusques du niveau d'eau par le fonctionnement du système des tunnels. Elle pose un problème très important pour la région.

Le lac de Thac Ba résulte de la construction d'un barrage sur la rivière Chay. Le volume de ce lac est plus modeste que celui de Hoabinh. Ce barrage de 60 m de hauteur, avec une usine hydro-électrique d'une puissance de 180 kW, est malheureusement situé à côté d'une grande faille active passant sur la bordure SO du lac. La faille active de la rivière Chay est une trace principale de la zone de faille du fleuve Rouge. Le niveau d'eau du lac est de beaucoup inférieur à celui prévu.

À l'aide des images TM de Landsat, HRV de SPOT, SOYOUZ (russe) et des photographies aériennes et en y combinant les méthodes de géologie, de géophysique et des observations sur le terrain, on peut identifier en détail ce système de failles dans la région des réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay, mettre en évidence les failles actives et estimer ainsi les risques sismiques de même que l'influence de l'environnement géologique sur les réservoirs (fissurations, glissements de terrain, érosion à l'aval des barrages, etc.).

2. Matériel et méthode

Dans la région des réservoirs, on peut combiner les images TM de Landsat (résolution de 30 m), HRV de SPOT en mode multibande (résolution de 20 m), HRV de SPOT en mode panchromatique (résolution de 10 m), SOYOUZ (résolution de 6 à 8 m), les photographies aériennes stéréoscopiques (échelles 1: 33 000 et 1: 15 000), la carte géologique (1: 200 000)

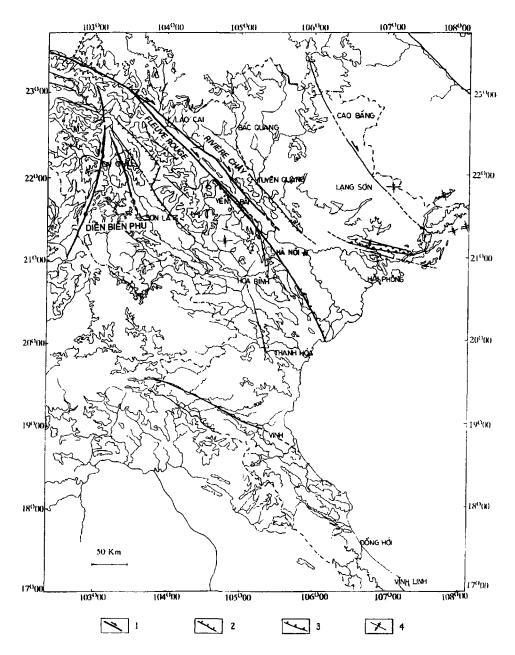


Figure 1. Le système de failles actives du nord du Viêt Nam; 1) faille décrochante, 2) faille normale, 3) faille inverse, 4) pli quaternaire

et la carte topographique (1: 50 000). La comparaison de différents types de données nous permet d'identifier les structures géologiques de la région (failles, plis, etc.). En particulier, à l'aide de la méthode mise au point par l'équipe de Tapponnier, à l'Institut de physique du globe de Paris, on peut distinguer non seulement les failles et les plis à partir de linéaments, mais aussi les failles anciennes et les failles actives. De plus, on peut identifier les types de failles actives (normales, décrochantes) et, dans certain cas, des failles inverses ou chevauchantes ainsi que le sens du mouvement. Cette technique se base principalement sur la comparaison des marqueurs géomorphologiques observés sur les images : réseaux hydrographiques, facettes triangulaires, terrasses, moraines, crêtes de montagne, cônes alluviaux, surfaces d'érosion ou sur la comparaison des marqueurs géologiques : structure «pull-apart» avec sédiments quaternaires, structure «push-up», etc. La mesure des déplacements des marqueurs coupés par des failles nous donne les rejets des failles actives. Si on connaît l'âge des marqueurs, on peut déterminer la vitesse de cette faille. Cette technique est utilisée par l'équipe de Tapponnier pour déterminer les rejets et les vitesses des principales failles actives d'Asie, d'Amérique du Sud et d'Afrique du Nord.

Les images TM de Landsat sont utilisées d'abord pour étudier une vaste région. Elles nous permettent de cartographier les structures géologiques générales. Les études sur les images TM et HRV sont concentrées ensuite sur les zones de failles pour préciser la largeur de faille, le type de faille et le sens du mouvement. Les images HRV à grande échelle sont utilisées pour observer les marqueurs géomorphologiques. Les photographies aériennes stéréoscopiques sont enfin utilisées le long de la trace de la faille active pour observer en détails les accidents et les terrasses.

Dans la région de Hoabinh, on peut observer les facettes triangulaires à partir de l'image HRV et des photographies aériennes. Ces observations sont confirmées sur le terrain. Le rejet vertical est précisé par des mesures géodésiques.

L'interprétation visuelle d'images joue un rôle très important. Elle est combinée avec le traitement numérique de l'image HRV. L'amélioration des contrastes est primordiale et simple. Elle permet d'augmenter le contraste des images afin de pouvoir discerner à l'oeil le maximum de détails. Deux approches sont utilisées : la première est l'étalement linéaire de l'histogramme (étirement), qui présente l'intérêt de conserver et d'améliorer les contrastes sur les zones de faible dimension, proches de la taille des pixels, ainsi que de conserver le contraste relatif entre les différentes zones. La deuxième est l'étalement dynamique (normalisation) qui permet d'augmenter le contraste dans des zones d'intensités fortement représentées et qui donne des images globalement plus contrastées. La combinaison de deux canaux, ainsi que des filtrages sont également utilisés. L'image est visualisée en détails à l'écran ou sortie sur un restituteur d'images VISIR.

3. Résultats

3.1. Géodynamique générale

Les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay sont construits dans la partie nord du Viêt Nam. Il est très important de connaître la tectonique active de cette région pour estimer les risques sismiques ainsi que l'influence de l'environnement géologique sur les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay. On ne peut pas limiter l'étude aux strictes régions voisines des lacs; on doit situer ces dernières dans le cadre géodynamique de l'Asie : la collision de l'Inde contre l'Asie avec le déplacement décrochant des systèmes de failles crustales.

Les images TM et HRV, les photographies aériennes et les cartes topographiques nous donnent un moyen très efficace pour étudier en détail les systèmes de failles actives.

Le déplacement du système de failles du fleuve Rouge a provoqué l'extrusion du sud de la Chine vers le SE au Miocène. Le sens du mouvement de cette faille a changé récemment au Pliocène-Quaternaire. La zone de failles du fleuve Rouge se prolonge, sur 700 km, du Tibet (Yunnan) à travers tout le nord du Viêt Nam jusqu'à la mer de Chine. Au nord du Viêt Nam, elle se divise en une zone plus complexe, avec deux traces principales : la trace de la vallée du fleuve Rouge et la faille de la rivière Chay. Elles se prolongent, respectivement, au SO et NE de la chaîne métamorphique Day Nui Con Voi. La trace de la vallée du fleuve Rouge se divise elle-même en deux failles principales : la faille NO et la faille SE de la vallée du fleuve Rouge.

À l'aide de l'image HRV (panchromatique et couleur composite) et des cartes topographiques détaillées, nous avons pu observer des décalages importants des réseaux hydrographiques le long de la zone de failles du fleuve Rouge. Les décalages des rivières sont systématiquement très nets. Plusieurs rivières et ruisseaux le long de la faille de la rivière Chay sont décalés en sens dextre avec un rejet de 250 m à 1000 m (valeur moyenne de 566 m). Le décalage dextre des ruisseaux varie de 200 à 600 m le long la faille NE de la vallée du fleuve Rouge et de 220 à 700 m (valeur moyenne de 313 m) le long de la faille SO de la vallée du fleuve Rouge. Le déplacement sénestre de la faille de Dien Bien Phu, une faille conjuguée avec la zone de faille du fleuve Rouge, est aussi mise en évidence avec le décalage des réseaux hydrographiques de 270 à 1500 m. Le réservoir de Thac Ba est localisé juste à côté de la faille de la rivière Chay, en passant la bordure SO du lac. Le barrage de Thac Ba est situé à seulement 1 km au NE de cette faille. Vers le delta du fleuve Rouge, la zone de faille se divise en plusieurs failles de composante normale-décrochante dextre. Une zone de failles normales de direction N-S apparaît dans la région du réservoir de Hoabinh.

3.2. Structure géologique

La structure géologique de la région de Hoabinh est très complexe. La région est déformée par plusieurs phases tectoniques importantes (NGUYEN TRONG et al., 1991; PHAN TRONG et al., 1991). Le réservoir de Hoabinh est situé à la frontière de deux grandes structures du NO du Viêt Nam. Dans la région s'étendant de Suoi Rut jusqu'à l'amont de la rivière Noire, on trouve un ensemble de failles parallèles, de direction NO-SE, qui sépare la zone de plissement de la rivière Noire au SO et le soulèvement de Fanxipan au NE.

À partir des images TM, HRV (fig. 2) et SOYOUZ, on peut identifier les systèmes de failles à différentes échelles. De Suoi Rut à Hoabinh, on peut observer la frontière de deux structures prenant la forme d'une faille courbe (fig. 3). Le soulèvement de Fanxipan est caractérisé par le système de failles et de plis courbes. La zone de Fanxipan est chevauchée vers le SE par de grands mouvements horizontaux. Ces mouvements provoquent la formation d'un ensemble de chevauchements courbes parallèles. Cet ensemble est entrecoupé par des failles plus jeunes de direction NO-SE. Dans la zone de plissement de la rivière Noire, on observe deux systèmes de failles : un réseau de failles de direction E-O, parallèle à la grande faille de Cho Bo-Suoi Rut et un autre réseau de failles de direction NO-SE. Le réseau de failles est à la fois de type normal et décrochant. Il faut remarquer que toutes les failles mentionnées ne sont plus actives. Elles existent comme des accidents géologiques ou des zones de faiblesse.



Figure 2. Image HRV de SPOT en mode panchromatique de la région de Hoabinh, 21 juin 1990; on peut observer un segment d'une faille normale active de direction N-S à l'est de la vallée de la rivière Noire (interprétation sur la figure 3)

À partir des images SOYOUZ, on peut distinguer l'âge relatif des systèmes de failles :

- a) le système de failles courbes dans la structure de Fanxipan est le plus ancien;
- b) la grande faille de Cho Bo Suoi Rut et le système de failles de direction E-O sont plus jeunes que le système de failles courbes;
- c) les failles de direction NO-SE et les failles normales de direction N-S de Phu Tho-Hoabinh sont les plus jeunes. Le système de failles N-S est actuellement actif.

Le lac de la rivière Chay est localisé sur des roches métamorphiques et des schistes. À partir des images HRV (fig. 4), on observe les zones de cisaillements et les zones de foliations à grande échelle. La direction générale des foliations et des zones de cisaillement NO-SE est courbée localement sous forme sigmoïde. La bordure SO du lac de la rivière Chay est marquée par une faille active spectaculaire, soit une trace de la zone de faille du fleuve Rouge.

3.3. Failles actives et risques sismigues

L'analyse géomorphologique des images (TM, HRV, SOYOUZ et photographies aériennes) ainsi que l'observation sur le terrain permettent de mettre en évidence une trace de la zone de failles du fleuve Rouge tournant de direction N-S, en passant par la région de Hoabinh. La cinématique de mouvement le long de la zone de failles change principalement d'une

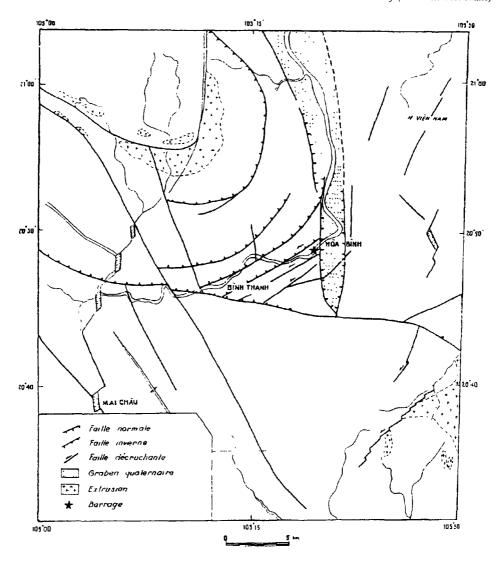


Figure 3. Structure géologique de la région de Hoabinh

faille décrochante dextre, entre Phu Tho et Ngoi Lat, à une zone de failles entre Ngoi Lat et Hoabinh. On distingue quatre failles dans la zone de failles de Phu Tho à Hoabinh :

a) une faille de direction NNO-SSE de Phu Tho à Ngoi Lat; le sens décrochant dextre de cette faille est mis en évidence par le décalage du réseau hydrographique;

b) une faille normale de direction N-S, à pendage vers l'est, entre Ngoi Lat et Xom My; la longueur de cette faille est de 15 km; elle montre des jeux normaux et est marquée par des facettes triangulaires bien visibles sur les images HRV et les photographies aériennes; on peut observer un escarpement de faille normale de 2 à 3 m de hauteur; on ne connaît pas



Figure 4. Image HRV de SPOT en mode multibande de la région de la rivière Chay, 16 septembre 1987 (interprétation sur la figure 5)

de sismicité historique sur cette faille alors qu'une activité holocène avec un escarpement frais est évidente;

c) une faille normale de direction N-S, à pendage vers l'ouest, de 12 km de longueur, est localisée vers l'est de la ville de Hoabinh; elle est marquée sur les photographies aériennes par des facettes triangulaires et des cônes alluviaux décalés; on observe sur le terrain un escarpement de 0,5 m et une couche de galets quaternaires décalée d'une hauteur de 20 m;

d) une autre faille normale, de direction N-S, à pendage vers l'est de 5 km de longueur est localisée vers l'ouest de la vallée de Hoabinh.

Ces deux dernières failles normales, de direction N-S, forment le graben de Hoabinh où s'accumulent des sédiments quaternaires. La faille normale, à l'ouest de Hoabinh, peut être interprétée comme une faille compatible avec la faille située à l'est de Hoabinh. Cette faille est le résultat de l'absorption de la déformation de surface provoquée par le déplacement de la faille de l'est de Hoabinh. Il faut noter que l'épaisseur de sédiments quaternaires dans le graben est très importante (le barrage de Hoabinh est installé sur une couche de galets de 70 m d'épaisseur). Jusqu'à présent, la faille Suoi Rut-Cho Bo est considérée comme une faille active. Cependant, nous ne trouvons aucun argument relativement à l'activité récente ou actuelle de cette faille.

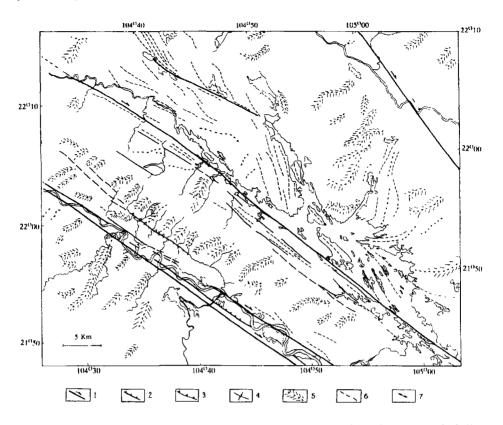


Figure 5. Structure géologique de la région de la rivière Chay, 1) faille décrochante, 2) faille normale, 3) faille inverse, 4) pli quaternaire, 5) crête de montagne, 6) foliation, 7) décalage de faille

Pour le réservoir de la rivière Chay, le plus grand accident de la structure géologique est aussi une grande faille active soit la faille de la rivière Chay (fig. 5). Nous avons mentionné cette faille dans le contexte géodynamique du Viêt Nam et de l'Asie du Sud-Est. Elle est le risque majeur pour ce réservoir. Il faut noter que les deux traces de failles du fleuve Rouge sont aussi un risque important pour le lac.

Si la géométrie d'une faille active est déterminée, on peut estimer la magnitude maximale de tremblement de terre produit par cette faille en calculant le moment sismique. Dans la région de Hoabinh, la faille normale entre Ngoi Lat et Xom My peut produire un tremblement de terre de magnitude entre 5,7 et 6,3. La faille normale à l'ouest de Hoabinh et donc près du barrage peut produire un tremblement de terre de l'ordre 5,2. Par sa longueur et sa vitesse de déplacement, la faille de la rivière Chay peut produire un grand tremblement de terre d'une magnitude de l'ordre 7,6-8,0.

3.4. Sismicité induite

Quelques 46 séismes de magnitude entre 2,0 et 4,0 ont été notés dans la région de Hoabinh depuis 1900. Lorsque le niveau d'eau du réservoir a atteint la cote de 86-87 m, une série

de séismes de magnitude inférieure à 2,0 se sont produits au voisinage du barrage. Le plus grand tremblement de terre, de magnitude 4,9, s'est produit en mai 1989. En général, la sismicité induite s'est produite dans une région activée par la déformation extensive et la hauteur du barrage de l'ordre 100 m avec le volume du lac supérieur à 10⁹ m³. Le lac de Hoabinh satisfait cette condition. Il est raisonnable de lier le tremblement de terre de mai 1989 avec le fonctionnement de la faille de l'est de Hoabinh. Il est probable que plusieurs séismes induits seront produits à l'intersection entre la faille de Cho Bo et les deux failles actives du graben de Hoabinh. On peut estimer que les magnitudes de séismes induits ne peuvent être supérieures à la valeur maximale de 6,7 prévue pour la faille normale localisée vers l'est de Hoabinh.

3.5. Fissuration et glissement de terrain

Après le remplissage plusieurs fissures d'extension se sont produites au voisinage du réservoir. La longueur des fissures varie entre 10 et 300 m avec une largeur entre 1 et 20 cm. La zone de fissures se prolonge dans certains cas jusqu'à 1 km. On distingue trois types de fissures : 1) le premier est lié aux glissements de terrain; il se produit à côté du lac, dans la saison des pluies; 2) le deuxième est lié à la sismicité induite; plusieurs fissures apparaissent sur les maisons pendant le tremblement de terre de magnitude 4,9; 3) le troisième apparaît le long des failles.

L'apparition des fissures le long des failles indique que la région n'est pas en état d'équilibre. Certaines fissures sont observées dans le barrage. Elles sont probablement liées à des causes géotechniques. Quelques chercheurs supposent que les fissures dans le barrage sont liées aux failles actives, mais à partir d'images à différentes échelles, on peut supprimer cette cause. Les glissements de terrain sont observés à la bordure du lac. Plusieurs glissements de terrain sont anciens. Ils se développent à des altitudes différentes. Le plus grand glissement de terrain a de 800 à 1 000 m de long. Il se trouve principalement dans les sédiments continentaux (T3k) et sur le contact entre ces sédiments et les calcaires Anizi (T2a). Heureusement, on n'observe aucun important glissement de terrain à côté du barrage, car on reconnaît que les glissements de terrain de grand volume, produits pendant un grand tremblement de terre, sont très dangereux pour le barrage parce qu'ils provoquent des vagues gigantesques.

3.6. Fuite d'eau des réservoirs

La fuite de l'eau du réservoir de Hoabinh peut prendre deux formes différentes : la fuite par le barrage et la fuite par des failles. La fuite par le barrage est beaucoup plus importante que prévu. Les mesures au piézomètre montrent que cette fuite est probablement liée à une couche de galets (épaisseur de 70 m) sous le barrage et à un réseau de failles de chaque côté du barrage. Il est difficile d'estimer la fuite par les failles. Cependant, à partir de la structure géologique, on suppose que la fuite a probablement lieu le long de la faille de Cho Bo et dans la vallée de Mai Chau. Dans le barrage de la rivière Chay, le niveau d'eau du lac est de beaucoup inférieur à celui prévu. Un volume important d'eau est perdu par la fuite d'eau. Il est probable qu'un grand volume est perdu par la faille de la rivière Chay. Pour préciser la fuite d'eau, nous proposons des mesures par piézomètre le long de ces failles (failles de Cho Bo et de la rivière Chay).

3.7. Érosion à l'aval des barrages

Il n'y a pas de grand problème d'érosion à l'aval du réservoir de la rivière Chay parce que ses bordures sont dans les roches métamorphiques et le volume du lac est modeste. Cependant, l'érosion intense des bordures de la rivière Noire à l'aval du barrage de Hoabinh, causée par le changement brusque du niveau d'eau par le fonctionnement du système de tunnels, pose un problème très important. À l'aide des images prises à différentes périodes, on peut estimer l'intensité de l'érosion. C'est un travail à venir.

4. Discussion

Certains sismologues considèrent que la sismicité induite dans la région de Hoabinh est liée à l'activité de la faille de Cho Bo, de direction E-O (NGUYEN NGOC et al., 1990; NGUYEN VAN et DUONG, 1990). Cependant, sur les images, on n'observe aucune évidence de déplacement actif de cette faille. Cette remarque est confirmée ensuite sur le terrain. La faille de Cho Bo est une grande faille ancienne mais elle n'est plus active aujourd'hui. Depuis 1900, certains séismes de magnitude 4,0 se sont produits dans la région de Hoabinh. Ils sont situés à l'intersection entre la faille de Cho Bo et la zone de failles de direction N-S. La grande incertitude de localisation sismique empêche de les lier à la zone de failles N-S du graben de Hoabinh. À partir de nos résultats, on peut confirmer que la sismicité induite est liée à la zone de failles actives, de direction N-S. La faille active ne coupe donc pas le barrage de Hoabinh: les fissures sur ce barrage sont donc liées localement aux causes géotechniques.

5. Conclusion

Les réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay sont construits dans une région à la tectonique active importante de l'Asie du Sud-Est, à côté des deux grandes failles actives du fleuve Rouge et de la rivière Chay. Les magnitudes maximales des séismes dans la région des réservoirs de Hoabinh et de la rivière Chay sont respectivement de l'ordre 6,7 et 8,0. La fuite de l'eau des deux réservoirs et l'érosion à l'aval du barrage de Hoabinh sont deux grands problèmes et doivent être étudiées en détail dans l'avenir.

6. Remerciements

Je tiens à remercier Messieurs P. Tapponnier, R. Lacassin, P.H. Leloup, Winter, Phung Van et Y. Nguyen Trong pour les discussions que nous avons eues, l'UREF pour une bourse d'excellence qui m'a permis de faire un stage à l'Institut de physique du globe de Paris et à l'Institut national des sciences de l'Univers, et le Centre national de la recherche scientifique de France pour le financement du projet «Tectoscope».

41

7. Références

- ALLEN, C. R., GILLESPIE, A. R., HAN, Y., SIEH, K. E., ZHANG, B. and ZHU, C. 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. Journal of the American Geological Society, vol. 95, p. 686-700.
- NGUYEN NGOC, T., NGUYEN DINH, X. et NGUYEN THANH, T. 1990. Sismicités induites du lac réservoir de Hoabinh. Sciences de la Terre, Hanoi, vol. 12, ser. 4, p. 97-105 (en vietamien).
- NGUYEN VAN, L. et DUONG, Q. H. 1990. Tremblement de terre de Hoabinh du 22 mai 1989. Sciences de la Terre, Hanoi, vol. 12, ser. 1, p. 13-16 (en vietamien).
- NGUYEN TRONG, Y., PHAN-TRONG, T. and PHUNG, V. P. 1991. Stress field of Hoabinh region and its surrounding area. Symposium of the second conference of Indochinese geology, Hano1, vol. 2, p. 338-395.
- PHAN-TRONG, T., NGUYEN TRONG, Y. and TAPPONNIER, P. 1991. Stress field and tectonics of North Vietnam. Symposium of the second conference of Indochinese geology, Hanoi, vol. 2, p. 403.
- PHAN-TRONG, T., LACASSIN, R., TAPPONNIER, P. and LELOUP, P. H. 1993. Evidence for active strike-slip movements in Northwestern Vietnam. 7th congress of the European Union of Geosciences, Strasbourg.
- SCHARER, U., TAPPONNIER, P., LACASSIN, R., LELOUP, P. H., ZHONG, D. and JI, S. 1990. Intraplate tectonics in Asia: a precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China. Earth and Planatery Sciences Letter, vol. 97, p. 65-67.
- TAPPONNIER, P., PELZER, G., LE DAIN, Y. and ARMIJO, R. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia, New insights from simple experiments with plasticine. Geology, vol. 10, p. 611-616.
- TAPPONNIER, P., PELZER, G. and ARMIJO, R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. From Coward, Collision tectonics, Geological Society, no 19, p. 115-157.
- TAPPONNIER, P., LACASSIN, R., LELOUP, P. H. and SCHARER, U. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary lef-lateral shear between Indochina and south China. Nature, vol. 343, p. 431-437.

5

Intégration de la pente lors du processus de segmentation des images satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol : résultats préliminaires

JACYNTHE POULIOT ¹, KEITH THOMSON ¹, JEAN-JACQUES CHEVALLIER ¹, MARTINA CHUMOVA ¹ et MOHAMED RACHED BOUSSEMA ²

- Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1K 7P4;
 téléphone: +1 (418) 656-7895; télécopieur: +1 (418) 656-7411
- École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie; téléphone: +216 (1) 514-700; télécopieur: +216 (1) 510-729

Résumé

Ce projet de recherche et de développement vise principalement la combinaison spatiale des images satellitaires HRV de SPOT et TM de Landsat avec les informations de pente pour la cartographie de l'occupation du sol. On parle ici d'intégration numérique réelle des données images aux données vectorielles se déroulant en deux étapes, soit la segmentation de l'image et la classification de segments. La segmentation hiérarchique est une technique d'analyse exploitant à la fois la dimension spatiale et spectrale des informations. Un fichier des zones de pente est introduit sous forme numérique dans un système d'information géographique (SIG) et est utilisé comme nième canal, pour aider l'algorithme de segmentation à délimiter les entités spatialement homogènes. Les segments homogènes sont par la suite classifiés par l'intermédiaire d'un outil statistique non-conventionnel en télédétection, soit l'analyse discriminante. Les premiers résultats indiquent que la classification de segments, au lieu de pixels originaux de l'image, permet d'améliorer légèrement la précision des

résultats. Cette amélioration est notamment perçue dans les champs de grandes superficies. L'introduction de la pente permet d'améliorer la précision des classifications jusqu'à 25 % dans les zones accidentées. Cependant, cette même information sur la pente amène beaucoup de confusion dans des zones à faible relief.

1. Introduction

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de coopération internationale qui s'intitule «SIRS basé sur des données de télédétection pour la protection des eaux et des sols (Tunisie)» et qui implique le Centre de recherche en géomatique (CRG) de l'Université Laval, l'École nationale d'ingénieurs de Tunis (ÉNIT) et la Direction de la conservation des eaux et des sols (DCES) du ministère de l'Agriculture de Tunisie. La description du projet, ainsi que les objectifs globaux, sont décrits dans BOUSSEMA et al. (1992). Ce projet vise, entre autres, à mettre sur pied une méthodologie pour acquérir, gérer et tenir à jour les informations descriptives du territoire et à obtenir une meilleure connaissance des contraintes et des possibilités de l'intégration multisource (images satellitaires, photographies aériennes, cartes thématiques).

Suite à l'inventaire des données, l'analyse des besoins a clairement démontré la nécessité d'obtenir une information sur l'occupation du sol qui soit en même temps à jour et la plus exacte possible. Dans des projets comme celui-ci, on a souvent tendance à prendre pour acquis l'existence de cartes d'occupation du sol qui soient précises et à jour. On réalise rapidement que, dans les pays en voie de développement, cette information est déficiente ou même inexistante. La cartographie de l'occupation du sol est traditionnellement réalisée à l'aide de l'interprétation des photographies aériennes disponibles sur le secteur d'étude. Cependant, l'incertitude de la photo-interprétation et la subjectivité du produit résultant (liée à l'expérience du photo-interprète) viennent limiter grandement leur utilisation dans des projets d'application. Cette information sur le territoire joue néanmoins un rôle important dans les projets de conservation des eaux et des sols, tels que réalisés par la DCES. Par leur répétitivité et leur grand champ d'observation, les images satellitaires sont perçues comme des outils de choix pour la cartographie de l'occupation du sol.

Les techniques de classification des niveaux de gris des pixels sont habituellement employées pour former les classes d'occupation. Les résultats des classifications, basées sur les pixels, sont cependant largement dépendants du type de région, du type d'occupation, des dates d'acquisition des images et de la confusion amenée par les pixels mixtes (HILL and MEGIER, 1988; IOKA and MASATO, 1986). De plus, la classification traditionnelle se limite à l'unité spectrale des pixels. Il existe des alternatives, comme l'introduction de connaissance a priori, l'ajout de données contextuelles et les approches structurales. Les approches structurales, telles que la segmentation sont considérées quelquefois supérieures aux classifications car, en plus d'exploiter l'espace spectral, elles utilisent la forme comme caractéristique supplémentaire pour distinguer les classes d'objet (HILL and MEGIER, 1987). BÉNIÉ et al. (1987) ont utilisé un algorithme de segmentation hiérarchique sur les bandes du capteur Thematic Mapper (TM) de Landsat qui a permis d'améliorer les résultats de classification d'environ 15 %. AIT BELAID et al. (1992) ont employé le même algorithme de segmentation sur les bandes du capteur HRV de SPOT et un fichier numérique décrivant le cadastre, ce qui astreint les segments à la structure spatiale de cette couche cartographique. Ces résultats montrent une amélioration de la classification de l'ordre de 20 %.

Plusieurs variables environnementales influencent la signature spectrale des objets captés par le satellite (KARASKA et al., 1986). Parmi ces variables, la pente est un facteur relativement important et déterminant dans des secteurs ayant un relief moyennement accidenté. L'intégration de l'information sur la pente, lors du processus de segmentation des images, peut aider l'algorithme à mieux discriminer les différentes classes d'occupation du sol.

2. Objectifs

L'objectif général de ce travail est donc de vérifier l'application de l'algorithme de segmentation hiérarchique sur un ensemble de données multisources pour la cartographie de l'occupation du sol dans un milieu semi-aride. L'intégration d'un fichier numérique, contenant le degré de pente, dans le processus de segmentation vise à améliorer les résultats de segmentation en imposant une structure spatiale reliée aux différentes classes de pente. L'utilisation de l'analyse discriminante pour la classification des segments homogènes aspire à produire un meilleur regroupement des classes que la classification traditionnelle des pixels. La sélection automatique des segments qui serviront pour la classification dirigée vise également à diminuer l'influence de l'interprète. La combinaison des données TM et HRV, l'introduction de données auxiliaires, comme la pente, et de connaissances a priori visent à maximiser l'utilisation des données satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol.

3. Méthodologie

3.1. Données

Le secteur d'étude correspond à la partie sud du bassin versant de l'oued Ettiour, situé dans le centre de la Tunisie. Le secteur couvre une superficie approximative de 20 km² et présente des altitudes variant entre 285 et 860 m. On retrouve cinq grandes classes d'occupation du sol soit : arboriculture, culture annuelle, parcours (pâturage), constructions isolées et lit de cours d'eau. Le site d'étude a fait l'objet d'une interprétation de photographies aériennes au 1: 20 000 datant de 1988. Cette photo-interprétation a été réalisée en stéréoscopie par K. Ziadi (ingénieur de la DCES) et selon leur système de classification des terres. Les photographies interprétées sont, par la suite, redressées et la photo-interprétation reproduite numériquement dans un SIG.

Le jeu des données est constitué de 3 bandes HRV datant du 26 février 1991, de 6 bandes TM datant du 6 juin 1987 et d'un fichier numérique dérivant les zones de pente extraites d'un modèle numérique de terrain (MNT). Quatre classes de pente ont été délimitées soit < 5 %, 5-10 %, 10-20 % et > 20 %. Ces classes ont été sélectionnées en conformité avec les standards utilisés par la DCES pour des travaux liés à l'érosion hydrique.

L'ensemble des traitements a été réalisé sur une station Intergraph avec le logiciel Tigris. Les logiciels de segmentation sont programmés en langage PPL (langage de développement de Tigris) et en langage C.

3.2. Correction géométrique

La correction géométrique des images HRV et TM a été réalisée au Centre canadien de télédétection avec le logiciel SRIT (Système de rectification des images de télédétection) (TOUTIN et LEMIEUX, 1991). Le SRIT est basé sur la modélisation précise des paramètres liés à la géométrie totale de prise de vue (orbite, capteur, terre). Le rééchantillonnage de l'image se fait à l'aide d'une altitude moyenne établie à partir de la carte topographique. Un levé de 23 points au GPS a été effectué en novembre 1992 dans le secteur d'étude. Ce levé a été effectué avec un récepteur PRONAV GPS 100 ayant une précision interne de l'ordre de 30 à 50 m. Huit points ont été sélectionnés pour l'ajustement du modèle mathématique. Les ortho-images résultantes ont été rééchantillonnées à 20 m et la précision des ortho-images, estimée par l'erreur moyenne quadratique, est de l'ordre de grandeur du pixel.

3.3. Correction radiométrique

Les images ont, par la suite, fait l'objet d'une normalisation radiométrique permettant de réduire les variations du signal recu au capteur. Faute de données terrains, les corrections radiométriques appliquées ici ne tiennent pas compte des variations induites par l'atmosphère. La méthode habituellement employée pour corriger les différences induites par l'angle du soleil est de procéder au calcul de la réflectance effective mesurée au satellite (PILESJÖ. 1991; HILL and STURM, 1988; MARHAM and BARKER, 1986). Les niveaux de gris sont tout d'abord convertis en valeur de luminance spectrale par la formule suivante:

$$L_{\lambda} = A_{0\lambda} + A_{1\lambda} * NG_{\lambda}$$

οù

 $L_{\lambda} = luminance spectrale (mw \cdot cm^{2} \cdot sr^{2} \cdot \mu m^{2}),$ $NG_{\lambda} = valeur$ de niveau de gris.

Les constantes $A_{0\lambda}$ et $A_{1\lambda}$ sont les paramètres de calibration obtenus dans les fichiers de calibration de calibration obtenus dans les fichiers de calibration de calibrat d'entête des images HRV et TM (MARHAM and BARKER, 1986). Les valeurs de luminance spectrale sont par la suite transformées en réflectance spectrale apparente mesurée au satellite par la formule suivante:

$$\rho_{\lambda} = (\pi * L_{\lambda} * d^{2}) / (Esun_{\lambda} * \cos \theta)$$

réflectance spectrale apparente mesurée au satellite; οù luminance spectrale (mW \cdot cm⁻² \cdot sr⁻¹ \cdot μ m⁻¹); distance terre-soleil en unité astronomique (= 1); flux solaire (mW \cdot cm⁻² \cdot mm⁻¹); angle zénithal du soleil en degré.

Esun, est obtenu des tables de calibration distribuées par les agences de distribution des images satellitaires (MARHAM and BARKER, 1986; PILESJÖ, 1991).

3.4. Segmentation

L'algorithme de segmentation hiérarchique basé sur l'optimisation séquentielle développé par BEAULIEU et GOLDBERG (1989), a été utilisé pour les tests. Celui-ci a déjà fait l'objet d'applications dans des milieux agricoles au Maroc (AIT BELAID et al., 1992) et au Canada (THOMSON et al., 1990; THOMSON et al., 1993). La segmentation permet de regrouper spatialement les pixels spectralement homogènes et de partager la scène en

segments. Le regroupement des segments est réalisé de façon itérative en regroupant les segments spatialement adjacents selon un critère de sélection. Ce critère correspond ici à la différence des moyennes des pixels adjacents au segment pondérée par le nombre de pixels contenus dans chaque segment (BEAULIEU and GOLDBERG, 1989; THOMSON et al., 1993). Le processus itératif cesse lorsque l'utilisateur juge que l'image segmentée résultante représente le mieux sa région d'étude. Les différents attributs reliés aux segments sont conservés dans une table d'attributs qui est par la suite utilisée lors de la classification des segments. Parmi ces attributs, on retrouve : la moyenne et l'écart-type des niveaux de gris des pixels formant le segment, le nombre de pixels contenu dans le segment et le périmètre du segment.

3.5. Classification des segments par analyse discriminante

L'étape suivante consiste à regrouper les segments ayant des caractéristiques similaires en classes d'occupation. L'analyse discriminante, qui est une méthode paramétrique assumant une distribution normale, utilise des fonctions discriminantes basées sur la covariance des segments (KLECKA, 1980; THOMSON et al. 1993). La première étape de l'analyse consiste à déterminer le pouvoir discriminant des attributs, ou variables statistiques, calculés lors de la segmentation. Cette opération est réalisée par la détermination des valeurs propres associées aux variables discriminantes. Ces valeurs sont calculées à partir de segments dits «purs». Pour qu'un segment soit pur, 90 % des pixels le composant doivent appartenir à une seule et même classe d'occupation délimitée par la vérité-terrain et répondre à un critère de superficie minimale. Cette étape se réalise par la superposition spatiale du fichier de segmentation et de la vérité-terrain. L'identification des segments purs permet donc de délimiter automatiquement les sites d'entraînement qui serviront lors de la classification des segments. La combinaison linéaire des variables détermine par la suite une fonction discriminante servant à la classification des segments où la règle d'appartenance est basée sur la distance de Mahalanobis.

3.6. Classification traditionnelle des pixels

La classification supervisée par maximum de vraisemblance a également été calculée sur le site d'étude. Les sites d'entraînement ont été sélectionnés de manière à respecter le plus possible l'interprétation des photographies au 1: 20 000.

4. Résultats et interprétation

Actuellement, en raison d'une capacité limitée de mémoire de l'ordinateur, nous avons dû procéder à une première sélection de bandes pour les premiers tests de segmentation. Les bandes les moins corrélées, soit: HRV 1, HRV 2, TM2 et TM7, ont été sélectionnées pour débuter les traitements. Nous tenions également à prendre, pour les premiers tests, un nombre égal de bandes HRV et TM pour mieux évaluer la performance des deux capteurs. Il est évident que, pour des travaux en milieu semi-aride, d'autres combinaisons pourront être utilisées pour des analyses subséquentes.

La segmentation a d'abord été calculée sur les 4 bandes sélectionnées. Par la suite, la couche cartographique contenant les pentes a été additionnée aux 4 images satellitaires. La

classification des segments par analyse discriminante a de plus été réalisée en prenant respectivement en compte 10 et 7 variables discriminantes (tab. 1). Ce changement permet d'évaluer l'importance des variables discriminantes lors de la classification des segments. La classification par maximum de vraisemblance a également été calculée sur le même ensemble de données, soit les 4 bandes sélectionnées et la couche cartographique des pentes transformée, pour les besoins, en niveaux de gris de 1 à 4. La classification par maximum de vraisemblance a de plus été réalisée pour des seuils de décision correspondant à 3 et à 4 fois la déviation standard. Pour permettre une bonne comparaison entre les différents résultats obtenus, nous avons utilisé la matrice de confusion calculée entre la photo-interprétation, qui sert ici de vérité-terrain, et chaque segmentation et classification. Le tableau 2 nous présente le nombre de pixels et de champs pour chaque type d'occupation du sol retrouvé sur la photo-interprétation.

Tableau 1. Variables discriminantes utilisées pour la classification des segments

Nombre de variables	Utilisation pente	Variables discriminantes
10	Avec ou sans pente	Moyenne de HRV1, HRV2, TM2 et TM7 Écart-type de HRV1, HRV2, TM2 et TM7 Nombre de pixels Périmètre des segments
7	Sans pente	Moyenne de HRV1, HRV2 et TM2; Écart-type de HRV1, HRV2 et TM7; Périmètre des segments
7	Avec pente	Moyenne de HRV1, HRV2, TM2 et TM7 Écart-type de HRV1, HRV2 et TM2

Tableau 2. Nombre de pixels et de champs pour chaque type d'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Nombre de pixels	Nombre de champs
Parcours	20 542	8
Culture annuelle	8 778	14
Lit de cours d'eau	1 145	2
Constructions isolées	3 196	12
Arboriculture	1 764	15

Le tableau 3 présente le pourcentage de pixels bien classés, pour chaque type d'occupation, pour les différentes images segmentées et classées par analyse discriminante. Les résultats du tableau 3 montrent que l'introduction de la pente dans le processus de segmentation, améliore la segmentation d'environ 25 %, lorsque 10 variables étaient utilisées, et de 8 %, lorsque 7 variables seulement ont été employées. Il semble que l'apport de la bande cartographique des pentes soit d'une grande importance lorsque l'ensemble de variables est utilisé, mais que son impact diminue lorsque les meilleures variables discriminantes sont choisies. Ces variables ont été sélectionnées suivant le critère de Wilks, lequel permet

Tableau 3.	Pourcentage de pixels bien classés par classification de segments pour chaque type
	d'occupation

		Pourcentage de	pixels bien classé	s
Type d'occupation du sol	Segmentation (10*)	Segmentation avec pente (10*)	Segmentation (7*)	Segmentation avec pente (7*)
Parcours	23	65	39	65
Culture annuelle	20	27	40	30
Lit de cours d'eau	3	9	37	20
Const. isolées	43	1	26	3
Arboriculture	11	23	30	15
Moyenne pondérée	21	46	35	43

^{*} Nombre de variables discriminantes sélectionnées

de déterminer les variables les moins corrélées et de proposer à l'usager les meilleures variables à employer. De plus, on remarque que l'apport de la pente est positif pour les parcours, l'arboriculture et les cultures annuelles, mais qu'il est négatif pour les lits de cours d'eau et les zones habitées. Ce résultat peut être expliqué par la faible dénivellation de terrain présente dans les lits de cours d'eau et dans les zones habitées. Les parcours sont, en fait, les régions les plus accidentées du secteur. La pente a également diminué la grande confusion notée entre les parcours et les zones habitées. La segmentation des lits de cours d'eau s'est révélée également peu intéressante en raison de la faible longueur des segments formant les lits.

Le tableau 4 montre le pourcentage de pixels bien classés, pour chaque type d'occupation, pour les différentes images classifiées par maximum de vraisemblance. L'analyse de ce tableau nous indique que l'introduction d'une image de pente n'influence pas de façon significative la précision des résultats de la classification par maximum de vraisemblance. La variation du seuil de décision (3 ou 4 fois la déviation standard) fait cependant varier la précision de la classification d'environ 7 %.

Tableau 4. Pourcentage de pixels bien classés par maximum de vraisemblance pour chaque type d'occupation du sol

	Pou	rcentage de pixels bien	classés
Type d'occupation du sol	Maximum de vraisemblance (3*)	Maximum de vraisemblance et pente (3*)	Maximum de vraisemblance et pente (4*)
Parcours	27	30	38
Culture annuelle	26	27	29
Lit de cours d'eau	48	35	46
Const. isolées	34	23	26
Arboriculture	44	41	43
Moy. pondérée	29	30	36

^{*} Seuil de classification par maximum de vraisemblance (ex: 3 x déviation standard)

La comparaison des tableaux 3 et 4 nous permet de voir que la classification des segments, au lieu de pixels, ne révèle pas d'amélioration marquante de la précision globale lorsque la segmentation implique seulement des images satellitaires. Cependant, lorsque la pente est introduite dans la segmentation, la précision globale est améliorée en moyenne de 13 %. Cette amélioration est cependant dépendante du type d'occupation. Par exemple, la segmentation raffine la précision de la classification d'environ 27 % pour les parcours, mais diminue la précision d'environ 26 % pour les lits de cours d'eau.

5. Conclusion

Les premiers résultats montrent que la classification de segments, à la place de la classification de pixels, amène une légère amélioration de la précision de la classification. L'étude a montré, qu'avant même de sélectionner une technique de classification pour l'occupation du sol, il est très important de bien connaître les structures spatiales des éléments étudiés. Pour des éléments ayant peu ou pas de forme spécifique, et pour les objets de petites tailles, la classification traditionnelle demeure un bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats. Par contre, la segmentation avec l'appui de la pente réagit très bien dans des secteurs accidentés et pour des champs de moyenne superficie. La segmentation a l'avantage principal d'être une procédure plus automatique que la classification et élimine de plus la classe nulle obtenue lors de la classification par maximum de vraisemblance. La précision globale des classifications présentées dans cet article est relativement faible. Cependant, les prochains traitements vont permettre de déterminer les meilleures combinaisons de bandes pour l'étude spécifique du bassin versant Ettiour. L'introduction de la pente servira seulement dans les zones moyennement accidentées et elle sera laissée de côté pour les zones de faible relief.

La sélection automatique de segments purs par rapport à la vérité-terrain permet de garder un meilleur contrôle spatial des classes. L'utilisation de la vérité-terrain lors de la sélection de segments purs peut cependant biaiser légèrement les résultats. La qualité de la vérité-terrain est donc d'une importance primordiale. Il serait intéressant de développer des techniques permettant de bien évaluer la qualité d'un tel produit.

Même si des corrections radiométriques ont été appliquées aux données images, des différences significatives ont été notées dans les régions d'ombre. Ces travaux ont démontré que, dans des projets d'application comme celui-ci, des corrections radiométriques relatives à l'angle d'ensoleillement sont nécessaires mais pas suffisantes et qu'il faille procéder à des corrections pour l'angle de prise de vue du satellite. Ces corrections peuvent être éventuellement réalisées par l'introduction des données d'orientation extraites d'un modèle numérique de terrain.

6. Remerciements

Le CRG et l'ÉNIT tiennent à remercier le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) pour son support financier. Le groupe de travail remercie tout spécialement Esther Bouliane pour son aide technique et scientifique pour toutes les questions touchant les algorithmes de segmentation et d'analyse discriminante.

7. Références

- AIT BELAID, M., BEAULIEU, J. M., EDWARDS, G., JATON, A. and THOMSON, K. P. B. 1992. Post-Segmentation Classification of Images Containing Small Agricultural Fields. Geocarto International, vol. 7, n° 3, p. 53-60.
- BEAULIEU, J. M. and GOLDBERG, M. 1989. Hierarchy in Picture Segmentation: A Stepwise Optimisation Approch. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, nº 2, p. 150-163.
- BÉNIÉ, G. B., THOMSON, K. P. B., GOLDBERG, M. et FILLION, M. 1987. Application de la segmentation d'images à l'agriculture: extraction de parcelles agricoles basée sur le contexte. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 13, nº 1, p. 26-30.
- BOUSSEMA, M. R., RAÏS, S., KALLALA, A., CHEVALLIER, J.-J., THOMSON, K. P. B. et POULIOT, J. 1992. Système d'information à référence spatiale basé sur des données de télédétection pour la conservation des eaux et des sols (cas du bassin versant de l'Oued Merguellil en Tunisie). Actes de la Conférence canadienne sur les SIG, Ottawa, 24-26 mars, p. 868-876.
- HILL, J. and MEGIER, J. 1987. Cluster Based Segmentation of Multi-Temporal Thematic Mapper Data as Preparation of Region-Based Agricultural Land-Cover Analysis. Proceedings of IGARSS'87, Ann Arbor, 18-21 May, p. 91-96.
- HILL, J. and MEGIER, J. 1988. Regional Land Cover and Agricultural Area Statistics and Mapping in the Department Ardeche, France, by Use of Thematic Maper Data. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, n° 10/11, p. 1573-1595.
- HILL J. and STURM, B. 1988. Radiometric Correction of Multi-temporal Thematic Mapper Data for the Use in Agricultural Land-Cover Classification and Vegetation Monitoring. EARSeL Symposium, Italy, May, p. 21-40.
- IOKA, M. and MASATO, K. 1986. Performance of Landsat-5 TM Data in Land Cover Classification. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, nº 12, p. 1715-1728.
- KARASKA, M. A., WALSH, S. J. and BUTLER, D.R. 1986. Impact of Environmental variables on Spectral Signatures Acquired by the Landsat Thematic Mapper. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, nº 12, p. 1653-1667.
- KLECKA, W. R. 1980. Discriminant Analysis. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, 07-019, Beverley Hills and London. Sage Publications.
- MARHAM, B. L. and BAKER J. L. 1986. Landsat MSS and TM Post-Classification Dynamic Ranges. Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures. EOSAT, Landsat Technical Notes, nº 1.
- PILESJÖ, P. 1991. Field Cover Estimation Using Landsat MSS, Landsat TM and SPOT Data A Comparison in Semi-Arid Environments. Proceedings of the Twenty Fourth International Symposium on Remote Sensing of Environment, vol. II, May, Rio de Janeiro, Brazil, p. 525-538.
- THOMSON, K. P. B., EDWARDS, G., LANDRY, R., CADIEUX S.-P., JATON, A. and GWYN, H. 1990. SAR Applications in Agriculture: Multiband Correlation and Segmentation. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 16, nº 3, p. 47-54.
- THOMSON, K.P.B., EDWARDS, G., BOULIANE, E., JATON, A. and CADIEUX, S.-P. 1993. Image Segmentation for the Production of Thematic Maps: An Application Using Discriminant Analysis Classification. Manuscrit, Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Québec, 11 p.
- TOUTIN, Th. et LEMIEUX, J. P. 1991. Le système de rectification des images en télédétection. Journal canadien de télédétection, vol. 17, nº 4, p. 349-350.

6

Hydrologie et télédétection : utilisation d'un découpage géographique selon la végétation pour expliquer les écoulements annuels de petits bassins versants méditerranéens

CHRISTIAN PUECH, PASCAL VINE et URUYA WEESAKUL

Laboratoire commun de télédétection du Centre national du machinisme agricole du génie rural des eaux et des forêts (CEMAGREF) et de l'École nationale du génie rural des eaux et des forêts (ENGREF), B.P. 5095, 34033 Montpellier cedex 1, France; téléphone : +33 67-04-63-00; télécopieur : +33 67-63-57-95

Résumé

Cette étude vise à utiliser la télédétection pour mieux connaître l'influence de la végétation sur les écoulements de petits bassins versants. Le site d'étude est le massif des Maures (Var, France), zone méditerranéenne, montagneuse et très boisée avec peu d'actions anthropiques. L'imagerie satellitaire haute résolution a été utilisée pour établir la carte des essences forestières. Le fort relief a imposé la création d'un modèle numérique de terrain (MNT) pour les étapes de corrections d'images, tant radiométriques (rectification des effets d'éclairement) que géométriques (rectification de la parallaxe). L'hypothèse hydrologique proposée est l'existence de zones hydrologiquement homogènes, définissant par additivité l'écoulement global de chaque bassin. Plusieurs découpages de l'espace ont été testés, le découpage en classes de végétation expliquant correctement les écoulements élémentaires annuels sur ce massif. L'intérêt de l'approche réside dans la possibilité d'utiliser ce type de découpage pour une meilleure prédiction des écoulements sur des bassins non jaugés, à travers les particularités que peut déterminer la télédétection.

1. Introduction et méthode proposée

Pour les hydrologues, la télédétection constitue une source d'information particulièrement importante. Elle leur permet en effet d'acquérir sur des bassins versants non jaugés, inaccessibles, possédant peu de données ou évoluant rapidement, des informations sur la variabilité spatiale de caractéristiques physiques. Dans le cadre de cette étude, nous nous proposons de contribuer au développement de méthodes permettant d'associer aux modèles hydrologiques des informations spatialisées issues en particulier des techniques de la télédétection (ABEDNEGO, 1989; FORTIN et al., 1990).

Pour ce faire, nous proposons de mettre en oeuvre la méthode générale qui consiste à identifier un modèle hydrologique compatible avec les objectifs de l'étude, à sélectionner les données spatialisées qui correspondent à ce modèle, puis à créer un lien physique ou statistique entre le modèle et les données.

D'un point de vue pratique, notre étude a porté sur des bassins situés dans le sud de la France, en climat méditerranéen. La démarche a conduit à choisir une modélisation statistique de la relation pluie/débit au niveau annuel, une partition du bassin versant en zones dites homogènes au travers de données spatialisées et à déterminer pour chaque zone homogène les paramètres du modèle.

2. Site d'étude

Le bassin versant de recherches et d'expérimentations (BVRE) du Réal Collobrier (fig. 1) est situé dans le massif métamorphique des Maures (Var, France). Il est équipé d'un réseau de mesures hydroclimatologiques suivi par le CEMAGREF (Aix-en-Provence) depuis 1966 (LAVABRE, 1980). Ce réseau comporte en particulier 17 pluviographes et une station climatologique répartis sur une centaine de kilomètres carrés. Onze stations de mesures de débits sont également installées sur des bassins dont les superficies varient de 70 ha à 70 km² (fig. 2). Les chroniques de mesures représentent, pour certains bassins, jusqu'à 25 années d'enregistrement (tab. 1).

Sa situation géographique (bordure de mer) et son orographie (altitudes variant de 70 à 770 m) lui permettent de bénéficier d'une pluviométrie favorable (pluie annuelle moyenne de 1000 mm) et donc d'un climat de type méditerranéen humide, avec sécheresse estivale marquée (LAVABRE et al., 1991). Ce massif est essentiellement composé d'essences forestières calcifuges (pins, chêne-liège, châtaignier, maquis) avec seulement 10 % de zones cultivées. Il a été peu soumis aux actions anthropiques.

3. Méthode

3.1. Le choix du modèle hydrologique

Une approche statistique ne concernant que le seul processus de production, au travers d'une transformation de la pluie en débit, a été choisie.

L'observation des séries hydrologiques (WEESAKUL, 1992) révèle que, pour les différents bassins versants, il existe une relation linéaire (fig. 3) entre le rapport écoulement

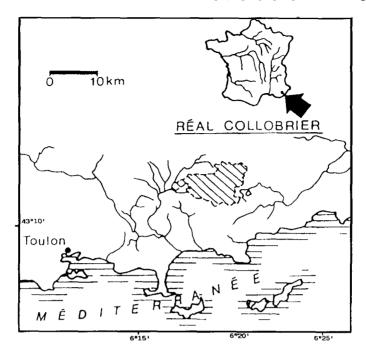


Figure 1. Le bassin du Réal Collobrier : situation

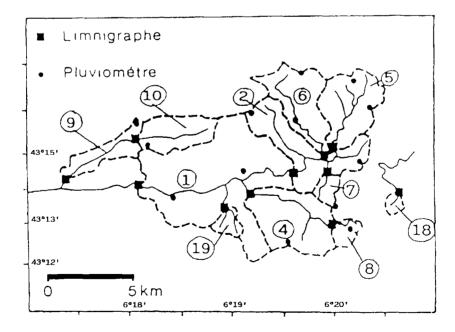


Figure 2. Implantation du réseau de limnigraphes; situation des sous-bassins de mesure

C. Puech, P. Vine et U. Weesakul

Tableau 1. Quelques caractéristiques des sous-bassins du Réal Collobrier

N°	Bassin versant	Superficie (km ²)	Début des données
1	Pont de Fer	70,6	1966
2	Collobrière	29,5	1972
4	La Malière	12,3	1965
5	Valescure	9,4	1967
6	Maurets	8,4	1968
7	Vaubarnier	1,5	1968
8	Rimbaud	1,4	1967
9	Davids	9,7	1966
10	Cogolin	5,5	1969
18	Boussicaut	0,7	1980
19	Meffrey	1,5	1985

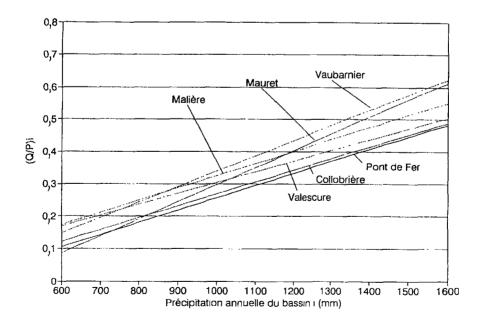


Figure 3. Liaison entre écoulement annuel et pluviométrie annuelle pour différents sousbassins

Hydrologie et télédétection : utilisation d'un découpage géographique selon la végétation

annuel/pluie annuelle et la précipitation annuelle (les coefficients de corrélation r, calculées sur 10 à 13 années de mesures, varient de 0,77 à 0,93).

Par conséquent, on peut écrire :

$$K_{1} = (Q/P)_{1} = a_{1} \cdot P_{1} + b_{1}$$
 (1)

οù

= numéro du bassin versant;

K = coefficient d'écoulement annuel du bassin i;

Q' = écoulement annuel du bassin i (mm);

P = précipitation annuelle du bassin i (mm);

a et b = coefficients pour le bassin i.

L'étude des variations des coefficients a et b, d'un bassin à l'autre, ne montre pas de liaison directe avec la superficie et la pluviométrie. Il semble par contre possible de lier l'origine de ces variations aux caractéristiques physiques des bassins. Nous avons testé l'utilisation d'informations spatialisées pour l'explication de ces variations. Pour ce faire, les hypothèses que nous formulons sont les suivantes :

- a) l'équation (1) est applicable aux surfaces partielles possédant des caractéristiques spatiales homogènes (zone homogène);
- b) les coefficients a et b sont identiques lorsqu'ils concernent une zone possédant les mêmes caractéristiques spatiales (même type de végétation, même pente, etc.);
- c) la pluie est suffisamment homogène sur le site d'étude pour considérer que les pluies annuelles de chaque bassin (P_i) peuvent être remplacées par la précipitation annuelle moyenne sur l'ensemble de la zone; l'équation (1) devient alors :

$$K_{i} = (Q/P)_{i} = a_{i} \cdot P + b_{i}$$
 (2)

où P est la précipitation annuelle moyenne sur tout le bassin du Réal Collobrier (mm);

d) l'écoulement annuel total d'un bassin est la somme des écoulements élémentaires produits par chaque zone homogène proportionnellement à la surface de chacune dans le bassin (hypothèse de linéarité). Par conséquent :

$$(Q/P)_{i} = \sum_{j} (K_{j} \cdot S_{ij})$$
(3)

où S_{ij} est le ratio entre la surface de la zone homogène j et la superficie totale du bassin i, et avec :

$$\mathbf{K}_{1} = \mathbf{a}_{1} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{b}_{1} \tag{4}$$

3.2. La constitution des données spatialisées explicatives

Une base de données géographiques numériques contenant les principales variables susceptibles d'influencer les écoulements a été constituée. Elle est composée d'un modèle numérique de terrain (MNT), d'une cartographie géologique et d'une cartographie forestière.

Le MNT a été constitué au pas de 20 m à partir de la digitalisation des courbes de niveau au 1: 25 000. Le module de génération du MNT est basé sur un schéma d'interpolation selon la ligne de plus grande pente (PROY, 1986).

La cartographie géologique est issue de la numérisation de la carte géologique au 1: 50 000 de 1933 (mise à jour partielle en 1960) et nous a conduit à un découpage en trois zones.

La cartographie forestière (fig. 6-4, voir cahier couleur) a été réalisée à partir de deux images SPOT (KJ: 52-263; été 1986 et hiver 1989) pour identifier les essences forestières (WEESAKUL, 1992; PUECH, 1993).

Par suite du fort relief, le MNT a été intégré dans des étapes de corrections des images. Pour les corrections géométriques on a utilisé un logiciel (PUECH, 1992) basé sur le principe de rectification de parallaxe à partir d'une image SPOT de niveau 1B et d'une série de points d'amers. La précision de recalage de l'image est de l'ordre du pixel. Les corrections radiométriques (rectification des effets d'éclairement) ont été effectuées, canal par canal, sur l'image d'hiver à partir des algorithmes de rectification développés par YANG (1990) et YANG et al. (1991). Les résultats de ces rectifications montrent une atténuation très sensible de l'impression du relief sur les images et une baisse notable du coefficient de variation entre l'image brute et l'image rectifiée, respectivement de 11, 38 et 52 % sur les canaux XS1, XS2 et XS3.

Une segmentation selon les grandes unités géologiques a amélioré considérablement les précisions de classification. Trois classifications, par la méthode du maximum de vraisemblance sous hypothèse gaussienne, ont en effet été étudiées : la première en monodate basée sur la seule image d'été, la deuxième en monodate et par segmentation selon la géologie, et la troisième en bidate et par segmentation (tab. 2).

Type de classification	Précision géogr	raphique (%)
	Apprentissage	Contrôle
Monodate	69,3	67,3
Monodate + géologie	79,8	77,5
Bidate + géologie	85,1	78,3

Tableau 2. Précision globale des trois classifications

Pour la classification retenue (bidate + géologie), le taux global de précision oscille entre 80 et 90 % pour les parcelles d'apprentissage, et entre 70 et 90 % pour les parcelles de contrôle, ce qui est très convenable (WEESAKUL, 1992).

Une comparaison complémentaire (WEESAKUL, 1992) a été faite par rapport à la cartographie existante de l'inventaire forestier national (IFN) au 1: 25 000 et obtenue par l'interprétation des photographies aériennes de 1983. Au niveau global, et après harmonisation des nomenclatures, on a obtenu des pourcentages de concordance (même classement pour les pixels de l'image et les pixels de la carte) qui atteignent 85 % en moyenne

3.3. Liaison entre le modèle et la cartographie des couverts forestiers

Chaque bassin versant est subdivisé en zones homogènes selon des critères de pente, de géologie et de végétation. Nous avons testé l'application de la méthode pour chacun de ces critères. Dans cet article, nous présentons la mise en oeuvre de cette méthode pour le seul critère «végétation».

En effet, les méthodes employées pour les deux autres critères sont similaires et fournissent des résultats moins satisfaisants que la végétation (fig. 5) (WEESAKUL,

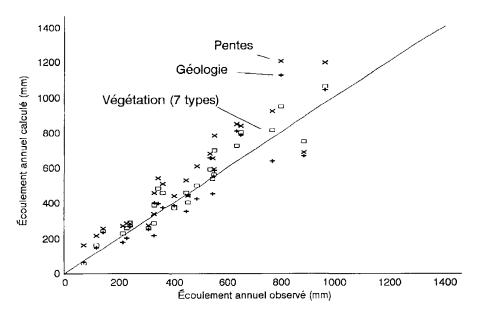


Figure 5. Comparaison de la méthode pour les trois critères : végétation, pente et géologie

1992).

Chaque bassin versant est découpé en zones homogènes à partir de la carte des couverts forestiers établis à l'aide de l'imagerie satellitaire. L'hypothèse testée est que ces zones possèdent également des caractéristiques hydrologiques homogènes.

L'équation (3) peut être écrite sous forme matricielle :

$$[(Q/P)_{i}]_{m,1} = [S_{i,j}]_{m,v} [K_{j}]_{v,1}$$
 (5)

où i = numéro du bassin versant;

i = numéro du type de végétation;

S = ratio surface végétation j/bassin versant i;

m = nombre de bassins versants;

v = nombre de types de végétation;

K = coefficient d'écoulement annuel du type de végétation j (à déterminer).

Pour une année hydrologique donnée, le coefficient annuel d'écoulement de chaque type de végétation peut être déterminé par résolution du système d'équations (5). La détermination mathématique d'un jeu de K_j pour chaque année hydrologique correspond à la résolution d'un système linéaire de «m» équations (dans notre cas : m=9 bassins versants) et «v» variables (dans notre cas : v=7 types de végétation) sous contraintes. Il faut en effet que la solution satisfasse aux contraintes physiques suivantes : $0 \le K_j \le 1$.

Nous avons obtenu 13 jeux de K, un pour chaque année d'étude. Puis, pour chaque type de végétation, nous avons étudié les variations interannuelles de son K [équation (4)] en fonction des précipitations régionales annuelles moyennes (fig. 6).

4. Résultats et discussion

Sur la figure 6 apparaît une organisation hiérarchique entre les valeurs estimées de K_j . Par exemple, le type de végétation j=2 (chênes+pins), qui est un mélange des types j=1 (chênes) et j=3 (pins), présente des résultats numériques pour K_2 proches de la moyenne de K_1 et K_3 .

Au vu de ce résultat, nous avons considéré que chaque zone de mélange de type A+B pouvait être remplacée par une zone A et une zone B, couvrant la moitié de la superficie. Cette transformation permet de réduire le nombre de types de végétation «v» et ainsi d'augmenter le nombre de degrés de liberté pour résoudre l'équation (5). Nous avons refait l'ensemble des calculs avec m = 9 et v = 5, et obtenu des résultats cohérents avec les précédents (WEESAKUL, 1992).

Plusieurs validations ont été effectuées (WEESAKUL, 1992), la première, spatiale (fig. 7), sur d'autres bassins versants voisins n'ayant pas servi à la résolution du système d'équations (5), la deuxième, temporelle, sur les bassins d'apprentissage avec des dates d'observation non utilisées lors de la résolution. Les résultats obtenus sont apparus satisfaisants.

Ces résultats ont également été comparés à une approche statistique globale par régression multiple (WEESAKUL, 1992). Ils procurent de meilleurs résultats, particulièrement pour les bassins possédant des valeurs d'écoulement éloignées des estimations statistiques moyennes (fig. 8).

Ces résultats ne permettent pas encore d'indiquer, du point de vue des processus, le ou les facteurs réels qui se cachent derrière cette notion de «végétation» révélée par la télédétection satellitaire et qui contribuent à l'écoulement annuel (type de peuplements, type d'arbustes ou d'herbacées, type de sols, etc.).

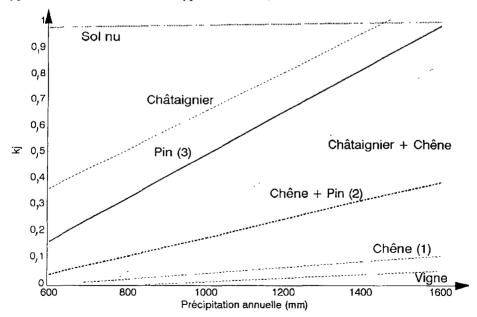


Figure 6. Variations interannuelles des K_j en fonction des précipitations régionales annuelles moyennes

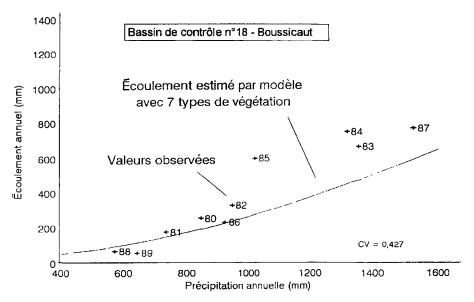


Figure 7. Validation spatiale des résultats obtenus

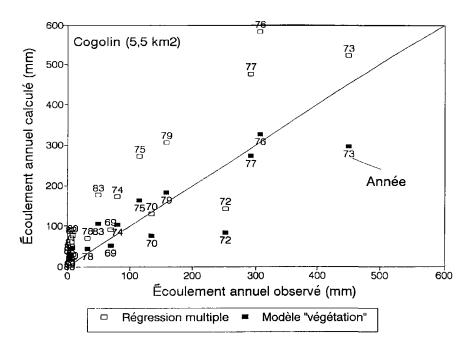


Figure 8. Comparaison des résultats obtenus par la méthode proposée et une approche statistique par régression multiple

Ces résultats ne doivent pas non plus cacher une limite importante à la méthode proposée. Il faut impérativement disposer d'un nombre de bassins versants jaugés plus important que le nombre de types de végétation (m>v) pour pouvoir résoudre l'équation (5). De plus, les bassins doivent se trouver dans une même région climatique et présenter une pluviométrie annuelle régionale moyenne homogène sur le site d'étude. Cette dernière contrainte pourrait être levée en choisissant P_i au lieu de P (voir introduction). Ceci réduirait le nombre de bassins versants nécessaires, mais imposerait alors de disposer d'une haute variabilité spatiale et temporelle de la pluie sur le site d'étude, ce qui, pour le niveau annuel, n'est pas le cas sur le bassin du Réal Collobrier.

Ce travail est une première étape d'un programme de recherche destiné à étudier les relations entre la végétation et les écoulements. Les premiers résultats sont prometteurs et ouvrent des perspectives intéressantes en termes de régionalisation. Des études complémentaires sont d'ores et déjà engagées pour tester la démarche sur d'autres sites, changer de pas de temps au sein des modèles hydrologiques utilisés, et cartographier de façon plus fine chacune des strates végétales de l'écosystème forestier afin de mieux comprendre leurs relations avec les écoulements.

5. Références

- ABEDNEGO, B. S. P. 1989. Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Thèse, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 259 p.
- FORTIN, J.-P., VILLENEUVE, J.-P., BOCQUILLON, C., LECONTE, R. and HARVEY, K. D. 1990. Hydrotel, a hydrological model designed to make use of remotely sensed and GIS data. Proceedings NHRI and CWRA Workshop, Saskatoon, 13-14 February 1990, p 177-185.
- LAVABRE, J. 1980. La pluviométrie du bassin expérimental du Réal Collobrier. «La météorologie», VIe série, nºs 20-21 mars-juin 1980, p. 615-627.
- LAVABRE, J., SEMPERE TORRES, D.ET CERNESSON, F. 1991. Étude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. Hydrologie continentale, vol. 6, n°2, p. 121-132.
- PROY, C. 1986. Intégration du relief au traitement d'images de télédétection. Thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, 173 p.
- PUECH, C. 1992. Logiciel de correction géométrique d'images en zone de relief. Rapport interne, Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, Montpellier, 20 p.
- PUECH, C. 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. Thèse, Université Joseph Fourier (Grenoble I), Grenoble, 217 p.
- WEESAKUL, U. 1992. Apports de la télédétection et de l'information géographique numérique à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens. Thèse, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 280 p.
- YANG, C. J. 1990. Corrections radiométriques des effets topographiques sur les images satellitaires. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 187 p.
- YANG, C. J., PUECH, C. et WEESAKUL, U. 1991. Correction radiométrique sur les données satellitaires en zone de relief: modélisation et application. *in* DUBOIS, J.-M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (réd.) Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Collection Universités francophones Actualité scientifique, Éditions AUPELF/Presses de l'Université du Québec, p. 65-80.