

Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG

Demarcation of the protection zones around Hachef dam (Morocco) by remote sensing and GIS

A. El Garouani and A. Merzouk

Volume 19, Number 1, 2006

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/012170ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/012170ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Garouani, A. E. & Merzouk, A. (2006). Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 19(1), 1–10. <https://doi.org/10.7202/012170ar>

Article abstract

Due to the degradation of the quality of Moroccan water resources, it is necessary to set up mechanisms and actions to ensure their conservation and protection. The creation of protection zones is one of the more effective means for establishing this protection. The study region involved the Hachef dam, operating since 1995 and located in the Moroccan Occidental Rif, approximately 30 km south of Tangiers City and 15 km east of Asilah City. The watershed area is 220 km² with an annual average precipitation of 900 mm. The useful capacity of the dam is 270 million m³. By storing 90 million m³/year in normal years, this dam supplies a water supplement to the existing resources, covering drinking water requirements and irrigation for the region located between Tangiers and Asilah beyond the year 2015.

In order to classify the importance of protection from pollution, the watershed was divided into three zones (zones I, II and III), as defined by their distance from the resource to be protected. In the immediate protection zone (zone I), it is necessary to assure protection of the dam against water pollution. The dimension of this zone should allow for appropriate intervention in the event of an accident and also allow for planting of a forest or a zone of protective vegetation. In the next protection zone (zone II), one should assure protection against pollution and other anthropogenic stressors that could threaten the harnessed waters. In zone III, located furthest away from the resource to be protected, the protection of waters should focus on major pollutant problems, in particular those cases difficult to eliminate such as chemical or radioactive contamination. The demarcation of these zones requires several disciplines and different expertises.

In order to facilitate the management, storage and analysis of necessary data for the demarcation of protection zones, we used a Geographic Information System (GIS), in which remote sensing allowed the description of the natural environment (land use, crop types, infrastructure, hydrographic network, etc.). The following cartographic approach represents the analysis of the spectral signatures of the main types of land use by a supervised classification based on the minimum distance method. The study of data in the context of a dam allowed us to identify the information flows, as well as to analyse and collect data in the form of information layers including both cartographic and alphanumeric data (Table 1).

In the demarcation of the protection zones around the reservoir, we conducted adjustments and multi-criteria analyses while taking into account a number of parameters (Figure 3). The manipulation of the system was assured by structured tools that offer to the user all the possibilities of GIS management, from data entry to the output of results (Figure 2). The examination of the study region by remote sensing data (Spot HRV image of 17-08-96 and Landsat TM image of 28-03-96), allowed the discrimination of the distribution of the different land use classes (Figure 4). The interpretation of aerial photos and observations allowed us to establish the ground truth against which the image processing results were compared. The adopted GIS contained software to plan the various tasks required for the demarcation of the protection zones demarcation.

After analysis of all the potential factors to be considered for the demarcation of the protection zones (geologic, hydrogeologic, climatic, anthropogenic factors), we noted that geologic and hydrogeologic factors make a negligible contribution to the pollution of the reservoir. In contrast, morphology, degradation of vegetation, the hydrographic network and agriculture are important factors for determining the protection zones. Integrating the previously mentioned factors allowed the demarcation of three protection zones, as presented in Figure 5.

This work has taken advantage of GIS implementation to define protection zones for a potable water supply (dam). This research has also defined different necessary stages for the conception of a prototype that integrates the remote sensing data into a GIS for the delimitation of these zones. The implementation of these zones represents a possibility for effectively protecting water resources and extending their potential lifetime. This action also generated a better profitability for the investments and the infrastructure.

DÉLIMITATION DES ZONES DE PROTECTION AUTOUR DE LA RETENUE DU BARRAGE HACHEF (MAROC) PAR TÉLÉDÉTECTION ET SIG

Demarcation of the protection zones around Hachef dam (Morocco) by remote sensing and GIS

A. El Garouani^{1} et A. Merzouk²*

¹Laboratoire de Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques Fès-Saiss, B.P. 2202, Route d'Imouzzer, Fès-Saiss, Maroc

²Laboratoire des Sciences du Sol, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Avenue Allal Fassi, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc

Reçu le 24 octobre 2002, accepté le 16 mars 2004

ABSTRACT

Due to the degradation of the quality of Moroccan water resources, it is necessary to set up mechanisms and actions to ensure their conservation and protection. The creation of protection zones is one of the more effective means for establishing this protection. The study region involved the Hachef dam, operating since 1995 and located in the Moroccan Occidental Rif, approximately 30 km south of Tangiers City and 15 km east of Asilah City. The watershed area is 220 km² with an annual average precipitation of 900 mm. The useful capacity of the dam is 270 million m³. By storing 90 million m³/year in normal years, this dam supplies a water supplement to the existing resources, covering drinking water requirements and irrigation for the region located between Tangiers and Asilah beyond the year 2015.

In order to classify the importance of protection from pollution, the watershed was divided into three zones (zones I, II and III), as defined by their distance from the resource to be protected. In the immediate protection zone (zone I), it is necessary to assure protection of the dam against water pollution. The dimension of this zone should allow for appropriate intervention in the event of an accident and also

allow for planting of a forest or a zone of protective vegetation. In the next protection zone (zone II), one should assure protection against pollution and other anthropogenic stressors that could threaten the harnessed waters. In zone III, located furthest away from the resource to be protected, the protection of waters should focus on major pollutant problems, in particular those cases difficult to eliminate such as chemical or radioactive contamination. The demarcation of these zones requires several disciplines and different expertises.

In order to facilitate the management, storage and analysis of necessary data for the demarcation of protection zones, we used a Geographic Information System (GIS), in which remote sensing allowed the description of the natural environment (land use, crop types, infrastructure, hydrographic network, etc.). The following cartographic approach represents the analysis of the spectral signatures of the main types of land use by a supervised classification based on the minimum distance method. The study of data in the context of a dam allowed us to identify the information flows, as well as to analyse and collect data in the form of information layers including both cartographic and alphanumeric data (Table 1).

In the demarcation of the protection zones around the reservoir, we conducted adjustments and multi-criteria

*Auteur pour correspondance :

Tél. : (212) 55 60 29 53

Fax : (212) 55 60 82 14

Courriel : abdelkader.elgarouani@fst-usmba.ac.ma

analyses while taking into account a number of parameters (Figure 3). The manipulation of the system was assured by structured tools that offer to the user all the possibilities of GIS management, from data entry to the output of results (Figure 2). The examination of the study region by remote sensing data (Spot HRV image of 17-08-96 and Landsat TM image of 28-03-96), allowed the discrimination of the distribution of the different land use classes (Figure 4). The interpretation of aerial photos and observations allowed us to establish the ground truth against which the image processing results were compared. The adopted GIS contained software to plan the various tasks required for the demarcation of the protection zones demarcation.

After analysis of all the potential factors to be considered for the demarcation of the protection zones (geologic, hydrogeologic, climatic, anthropogenic factors), we noted that geologic and hydrogeologic factors make a negligible contribution to the pollution of the reservoir. In contrast, morphology, degradation of vegetation, the hydrographic network and agriculture are important factors for determining the protection zones. Integrating the previously mentioned factors allowed the demarcation of three protection zones, as presented in Figure 5.

This work has taken advantage of GIS implementation to define protection zones for a potable water supply (dam). This research has also defined different necessary stages for the conception of a prototype that integrates the remote sensing data into a GIS for the delimitation of these zones. The implementation of these zones represents a possibility for effectively protecting water resources and extending their potential lifetime. This action also generated a better profitability for the investments and the infrastructure.

Keywords: *Protection zone, pollution, Hachef Dam, Remote sensing, GIS, Morocco*

RÉSUMÉ

La présente étude concerne le barrage Hachef (Barrage nommé 9 Avril 1947), mis en service en 1995, situé dans le Rif Occidental Marocain à environ 30 km au sud de la ville de Tanger et 15 km à l'est de la ville d'Asilah. La retenue du barrage d'une capacité utile de 270 millions de m³ reçoit un apport solide de 609 000 tonnes/an à cause de l'érosion des versants favorisée par le déboisement. Des foyers de pollution sont également identifiés dans les régions limitrophes du barrage. Dans le but de préserver et protéger cette ressource destinée à l'alimentation en eau potable de la population des régions voisines, il s'est avéré nécessaire de mettre en place des périmètres de protection. Ceci entraîne également une plus grande rentabilité des investissements et infrastructures réalisés.

Dans ce travail, une solution informatisée pour la délimitation des périmètres de protection a été conçue et réalisée. Ainsi, un modèle d'analyse spatiale par le SIG basé sur l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination de la ressource a été élaboré. Toutes les données disponibles, aussi bien celles issues de la télédétection que celles du terrain, ont été modélisées et intégrées au sein d'une base de données géographique gérée par un SIG. Dans cette expertise, les différents aspects de la problématique concernant la sauvegarde de la ressource en eau ont été cernés et les besoins des gestionnaires ont été recensés. L'utilisation de cette méthode a permis de délimiter les trois zones de protection autour de la retenue du barrage (zones de protection immédiate, rapprochée et éloignée).

Mots-clés : *Zone de protection, pollution, barrage Hachef, télédétection, SIG, Maroc*

1. INTRODUCTION

Dans plusieurs régions du Maroc, les ressources en eau sont de plus en plus menacées par la pollution. Par conséquent, la qualité des eaux se dégrade en raison de l'augmentation des rejets polluants dans les milieux récepteurs sans traitement préalable. L'utilisation des sols liée aux activités urbaines, agricoles et industrielles a contribué, au cours des dernières décennies, à augmenter le potentiel de contamination des eaux de surface et, dans certains cas, à une détérioration réelle de la qualité de la ressource. Pour éviter de nouveaux problèmes de contamination des eaux et assurer un approvisionnement en eau de qualité, il est essentiel de mieux connaître la ressource dans l'objectif de la protéger. À cet effet, il est nécessaire de prendre toutes les mesures susceptibles de garantir la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable (ANONYME, 1992). La réalisation des périmètres de protection des ressources en eau constitue un outil important pour atteindre cet objectif. À cette fin, la loi a prévu autour de chaque captage trois périmètres en général emboîtés et soumis à des contraintes plus ou moins fortes en relation avec l'éloignement de la ressource.

La délimitation de ces périmètres de protection constitue un travail de grande envergure dans la mesure où, d'une part, elle nécessite beaucoup de temps pour la collecte des données et le suivi de certains paramètres à variation temporelle et, d'autre part, il s'agit d'un travail multidisciplinaire faisant appel à des expertises diverses (KRAUSE et LAMRHARY, 1995, MARTEL *et al.*, 1999).

La gestion et la protection de la ressource en eau seraient assurées alors par les schémas d'aménagement du territoire. La protection de ces ressources apparaît comme une des responsabilités primordiales des services de l'état (Office national de l'eau potable, Direction de l'hydraulique, collectivités locales, etc.) qui se doivent de délivrer une eau

conforme aux normes sanitaires. D'autre part, l'instauration des zones de protection interfère avec d'autres aménagements (routes, urbanisation, activités agricoles, etc.), et exige une concertation entre tous les acteurs et intervenants dès l'engagement de la procédure.

Pour protéger les ressources en eau, un grand nombre d'informations géoscientifiques multidisciplinaires, multisources et souvent multiformats sont nécessaires. Ces informations doivent être structurées selon les thèmes suivants : la définition du contexte de la retenue; les caractérisations physiques du bassin versant et l'aire d'alimentation; l'occupation du sol; l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination et la détermination de périmètres de protection. Cela implique : la compilation de l'information existante, l'acquisition de nouvelles données, l'intégration et l'analyse des données géoscientifiques dans une base de données relationnelle et l'interprétation des résultats en fonction de modèles hydrologiques pour faciliter la gestion et la protection de la ressource (PARADIS *et al.*, 2000). Pour cela, des solutions techniques et des outils de traitement et de manipulation des données doivent être mis en place.

La présente étude porte sur l'élaboration d'une méthodologie basée sur les outils de la géomatique pour la délimitation des périmètres de protection d'une ressource en eau de surface. Il s'agit de la retenue barrage Hachef au nord du Maroc. La sauvegarde de la ressource en eau disponible dans ce barrage nous incite à délimiter les zones pourvoyeuses de pollution qui nécessitent une intervention immédiate.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Région d'étude et problématique

La présente étude concerne essentiellement le barrage Hachef (Barrage nommé 9 Avril 1947) et son pourtour. Ce barrage, situé dans le Rif occidental marocain, à environ 30 km au sud de la ville de Tanger et 15 km à l'est de la ville d'Asilah, a été mis en service en 1995 (figure 1). Ayant une capacité de mobiliser 90 millions de m³/an en année normale, il permettra, en complément des ouvrages existants, de couvrir les besoins en eau potable et d'irrigation de la région comprise entre Tanger et Asilah au-delà de l'horizon 2015. Il collecte les eaux d'un bassin versant de 220 km² dont les précipitations moyennes annuelles sont d'environ 900 mm. La retenue du barrage, d'une capacité utile de 270 millions de m³, reçoit un apport solide de 609 000 tonnes/an à cause de l'érosion des versants favorisée par le déboisement (ANONYME, 1996 et IBRAHIMI *et al.*, 2001).

Dans le bassin versant du barrage Hachef sont situées les agglomérations principales suivantes : Dar Chaoui, El Hajeriyane, Khendar Essenane, Beni Hakim, Ain Snâd, El Mnazel et Bezouala. Le centre de Dar Chaoui représente la plus grande agglomération dans la région et il se trouve à moins d'un kilomètre de la retenue du barrage.

Le barrage est sujet à deux types de pollution : les pollutions urbaines (déchets liquides et solides) et les pollutions agricoles (fertilisants, lessivages des sol, etc.).

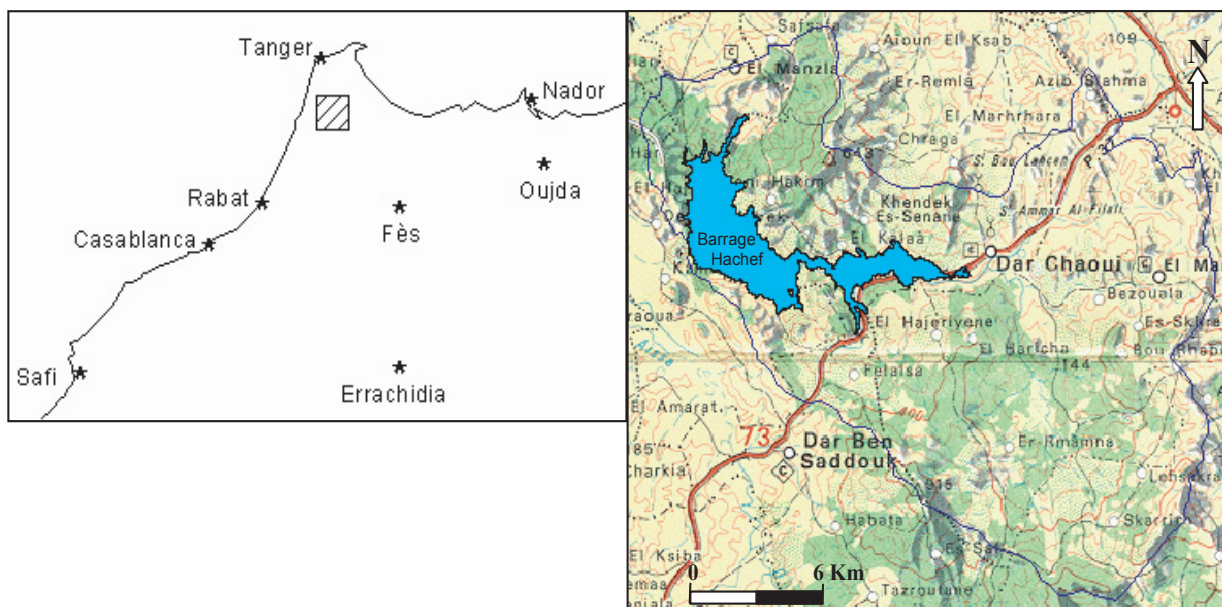


Figure 1 Situation géographique de la région d'étude
Geographic description of the study area

Le recensement des différentes sources de menace, situées dans le bassin versant limitrophe, a permis de constater des foyers de pollution potentiels actuels qui peuvent s'accroître avec le temps. Il s'agit notamment de :

- Trafic routier sur la route principale reliant Larache et Tétouan, passant très près de la retenue au Sud-Est.
- Evacuation inappropriée des ordures ménagères provenant du milieu urbain (eaux usées, déchets solides, etc.).
- Intensification de l'agriculture et de l'irrigation (exploitation agricole et forestière, épandage des fertilisants, utilisation des produits phytosanitaires, abreuvoirs au bord de la retenue, etc.), ce qui entraîne un apport en éléments nutritifs vers la retenue du barrage par ruissellement et lessivage des sols.

En effet, les réserves de phosphore résultant des déjections animales, dans les couches superficielles du sol et celles de produits nutritifs, provenant des terrains à usage de pâturage, ont tendance à augmenter. Il faudrait toutefois mentionner le fait que l'apport en phosphore des déjections animales, introduites dans l'eau lorsque le bétail s'abreuve dans la retenue, n'a pas pu être quantifié, comme pour le cas aussi, de temps à autre, des parcelles de la retenue asséchées qui sont mises en culture.

Les charges croissantes en produits nutritifs (composés azotés et phosphorés, matière organique, etc.) entraînent l'apparition des premiers indices d'eutrophisation. Il faudrait ainsi procéder à une surveillance de la qualité de l'eau et discuter le besoin d'installer des zones de protection de la ressource.

2.2 Concepts des zones de protection pour les eaux de surface

L'effet de la pollution diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la ressource à protéger de manière appropriée. La lutte contre cette pollution nécessite un partage de la région qui alimente la ressource en eau (le bassin versant) en plusieurs zones. Il s'agit de trois zones suivant la législation marocaine : la zone de protection immédiate (zone I), la zone de protection rapprochée (zone II) et la zone de protection éloignée (zone III) (ANONYME, 1995). La délimitation de ces zones fait appel à plusieurs disciplines et diverses expertises (KRAUSE et LAMRHARY, 1995, PARADIS *et al.*, 2000). Les périmètres de protection d'un barrage visent à protéger les abords immédiats de la retenue et son voisinage, ainsi qu'à interdire ou à réglementer les activités qui pourraient nuire à la qualité des eaux captées.

Dans la zone I, il faut assurer la protection contre la pollution de l'eau de la retenue et éviter que des déversements ou des infiltrations de substances polluantes se produisent à l'intérieur ou à proximité immédiate du captage. La dimension de cette zone doit permettre d'intervenir convenablement en

cas d'accident, de supprimer chaque influence humaine et d'implanter une forêt ou une zone de végétation à vocation protectrice.

Dans la zone II, il faut donner la priorité à la protection contre des pollutions et d'autres détériorations résultant des diverses activités et aménagements humains, dont la proximité pourrait mettre en danger les eaux de captage. Pour délimiter cette zone on doit tenir compte des paramètres suivants : la durée et la vitesse de transfert de l'eau entre les points d'émission de pollutions possibles et la retenue; le pouvoir de fixation et de dégradation du sol et du sous-sol vis-à-vis des polluants.

Enfin, la zone III, qui prolonge éventuellement la précédente, doit assurer la protection des eaux contre les détériorations étendues, en particulier les pollutions persistantes ou difficiles à éliminer ainsi que la pollution chimique ou radioactive (ONEP-GTZ, 1995). La création de cette zone est conditionnée par une insuffisance de l'application de la réglementation générale ou par l'existence d'un risque potentiel que la nature des terrains traversés ne permet pas de réduire en toute sécurité, malgré l'éloignement du point de prélèvement. Pour faciliter son repérage, les limites de cette zone (ainsi que celles de la zone de protection rapprochée) suivront autant que possible les limites cadastrales (communes ou parcelles) et géographiques (cours d'eau, voies de communication).

2.3 Présentation de la démarche adoptée

Il existe plusieurs méthodes de détermination des zones de protection allant des plus simples jusqu'au plus compliquées. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques topographiques, géologiques et hydrologiques du milieu, plus elle est précise. La principale problématique dans l'établissement des zones de protection consiste à faire le choix d'une méthode qui assure une détermination réaliste de ces zones à partir d'un minimum d'informations et pour un minimum de coûts (LALLEMAND-BARRES et ROUX 1989, MURAT *et al.*, 2000).

La cartographie de la vulnérabilité de la ressource en eau comprend toutes les activités et les techniques nécessaires pour recueillir, documenter, interpréter et représenter l'information sous forme graphique, dans le but d'arriver à une compréhension globale du fonctionnement des systèmes hydrologiques. Cette démarche implique la compilation de l'information existante, l'acquisition de nouvelles données, l'intégration et l'analyse des données pour faciliter la gestion et la protection de la ressource.

L'approche utilisée dans ce projet pilote, pour la délimitation des périmètres de protection, consiste à combiner les techniques de traitement d'images de télédétection et les possibilités offertes par le SIG (PRAKASH BASNYAT

et al., 2000 et SIVERTUN et PRANGE, 2003). Pour affiner l'analyse statistique et spatiale des données satellitaires ainsi que pour exploiter les données de terrain, le développement et la structuration d'une base de données s'avèrent nécessaires. Un modèle conceptuel de données (MCD) a été produit pour modéliser ces données et les flux d'information correspondants (EL GAROUANI, 1995).

Les étapes proposées dans le cadre de l'étude analytique et conceptuelle couvrent tous les points de décision aussi bien en matière d'outils de travail qu'au niveau de la modélisation conceptuelle des données et des flux correspondants (figure 2). Ainsi, les phases réalisées lors de cette étude ont permis la

conception d'un système de gestion de données géographiques multisources qui organise toutes les données disponibles de façon à assurer la validation des différents traitements modélisés dans le diagramme de flux de données. Le résultat de cette étude a produit le modèle d'analyse spatiale présenté par la figure 3. Il est basé sur la méthode de vulnérabilité qui utilise des paramètres géoscientifiques conventionnels tels que la topographie, la pédologie, l'occupation du sol, etc. Le tableau 1 résume les paramètres requis. L'élaboration de ce modèle, qui illustre les différentes étapes de la délimitation des zones de protection, est le résultat de l'examen des concepts utilisés pour l'élaboration des périmètres de protection d'une ressource en eau de surface ainsi que l'analyse des données techniques requises.

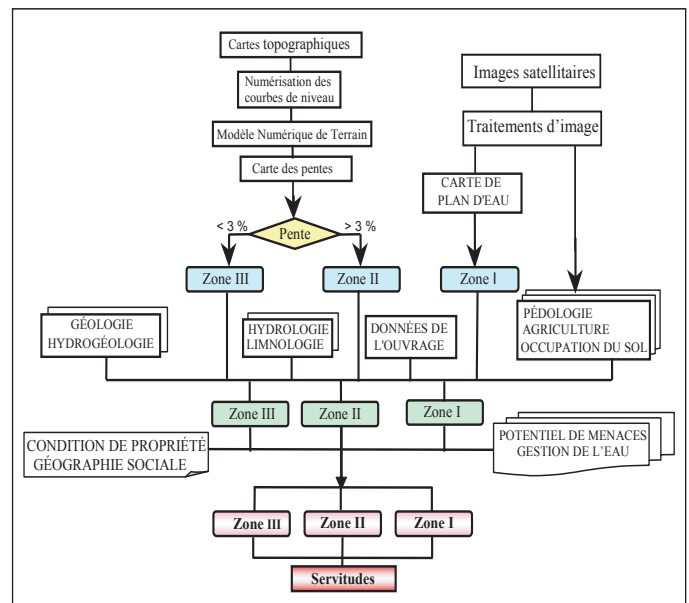
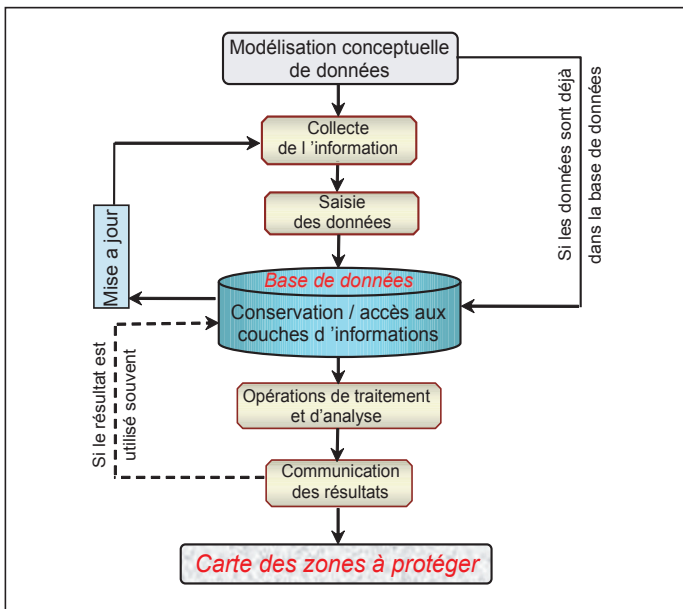


Figure 2 Enchaînement des opérations effectuées par le système d'information géographique
The chain of operations carried out by the geographic information system

Figure 3 Méthode d'analyse spatiale pour l'élaboration des zones de protection des ressources en eau de surface
The spatial analysis method for the elaboration of the protection zones for the surface water resources

Tableau 1 Couches d'information identifiées et utilisées pour la délimitation des zones de protection
Table 1 Layers of information identified and used for the demarcation of the protection zones.

Couches thématiques d'entrée	Couches thématiques de sortie	Données descriptives correspondantes
<ul style="list-style-type: none"> - Morphologie et géographie - Cadre administratif - Occupation des sols - Foyers de pollution - Hydrogéologie - Pédologie - Géologie - Données sur l'ouvrage - Climatologie - Hydrologie - Gestion de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle numérique d'altitude - Carte des pentes - Limites des bassins versants - Réseau hydrographique - Occupation des sols - Aménagements proposés - Carte du potentiel des menaces - Zone de protection immédiate - Zone de protection rapprochée - Zone de protection éloignée - Cartes thématiques diverses 	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques physiques du bassin versant - Données statistiques de la population - Espèces forestières, engrais et pesticides utilisés - Descriptions des foyers de pollution - Fluctuation piézométrique - Caractéristiques des unités pédologiques - Nature, caractéristiques et âge des roches - Caractéristiques générales de l'ouvrage - Pluviométrie et températures moyennes mensuelles - Bilans hydrologiques, paramètres hydrologiques - Besoins et productions en eau potable, qualité de l'eau.

2.3.1 Choix des facteurs et leur pondération

Tous les facteurs et toutes les combinaisons de facteurs pouvant contribuer à l'évaluation de vulnérabilité de la ressource en eau sont identifiés. Les facteurs les plus importants sont sélectionnés en tenant compte aussi de la disponibilité des données ainsi que des limites de capacité et de performance imposées par le SIG utilisé. L'étude étant effectuée à une échelle régionale, seuls les facteurs identifiables à cette échelle sont retenus, soit l'occupation du sol, la pente de la topographie de surface, l'hydrographie, la pédologie, les foyers de pollution, les infrastructures, etc.

Les paramètres et facteurs requis pour la délimitation des zones de protection ont fait l'objet par la suite d'une opération de pondération. La méthode proposée ici est basée sur la comparaison inter-critère. Nous avons évalué l'importance d'un critère en fonction d'un autre, basé sur une échelle pondérée en se basant sur les travaux de CLOUÂTRE *et al.* (1996). En effet, chacun des facteurs retenus est pondéré selon l'importance de son rôle dans le processus de la délimitation des périmètres de protection. La pondération est faite subjectivement de façon à bien démarquer d'abord les facteurs principaux et ensuite les facteurs complémentaires.

2.3.2 Extraction d'information thématique à partir des données de télédétection

L'accès aux nouvelles sources de données provenant des images satellitaires permet l'obtention d'informations plus précises, ce qui autorise une extrapolation spatiale des informations à partir de la connaissance de quelques données locales. Grâce à leur répétitivité temporelle, ces images offrent aussi la possibilité de suivre le changement de ces caractéristiques (PUECH, 1993, WILMET, 1996). Il est néanmoins important d'indiquer que la télédétection ne pourra être pleinement exploitée qu'en combinant ses informations aux données multisources, ce qui peut se faire dans le cadre d'une base de données géographiques.

Les données de la télédétection spatiale (une image Spot HRV de 17-08-96 et une image Landsat TM de 28-03-96) ont permis la cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol à jour. Ces images ont été géoréférencées selon la projection conique conforme de Lambert et calée selon le système de coordonnées de référence de la zone Merchich Nord (Système de coordonnées du nord du Maroc). Ces prétraitements géométriques ont permis l'intégration des images satellitaires dans le SIG de la zone et d'effectuer les analyses requises.

Pour élaborer la carte d'occupation du sol, nous avons

procédé par un traitement combiné qui comprend deux étapes : un traitement analogique suivi d'un traitement numérique. Le traitement analogique consiste à identifier sur l'image les différents types d'occupation du sol, en interprétant visuellement des restitutions en composition colorée. Les traitements numériques sont appliqués aux différentes bandes spectrales pour en isoler des classes thématiques (CALOZ et COLLET, 2001). Nous avons recherché d'abord, de manière non supervisée, réalisée antérieurement à la mission de reconnaissance, les différentes classes spectrales sur l'ensemble de la zone, en utilisant la plus petite distance euclidienne, et procédé à l'étude de leur représentativité (nombre de pixels et distribution spatiale) et de leurs caractéristiques spectrales. Ainsi, on a éliminé les classes peu représentées et/ou de variance élevée, regroupé les classes semblables et séparé celles qui confondaient des utilisations du sol différentes. Cette procédure fut poursuivie par une classification supervisée qui consiste à regrouper les valeurs spectrales des pixels en classes qui prennent un sens thématique bien précis grâce à une connaissance préalable du terrain. Les thèmes sont définis en fonction des caractéristiques du sol, de la végétation et de l'utilisation agricole des parcelles de référence observées sur le terrain (EL GAROUANI, 2000). Un traitement en soi n'a de signification que s'il est accompagné d'une estimation numérique de sa qualité. Deux approches sont envisagées :

- Confrontation des traitements d'images avec la « réalité terrain intermédiaire » issue de la photo-interprétation des photographies aériennes.
- Confrontation des traitements satellitaires et de la photo-interprétation des photographies aériennes avec la « réalité terrain » issue des enquêtes sur le terrain.

2.3.3 Utilisation du SIG pour la mise en relation et la cartographie des facteurs

La superposition des plans cartographiques est l'une des caractéristiques principales du SIG. Cela sous-entend que tous les documents cartographiques dont nous disposons soient dans un même référentiel connu pour pouvoir les superposer.

Le choix de la méthode pouvant mettre en relation les facteurs de risque a suscité nombre d'interrogations. Beaucoup de méthodes existent, mais sans toutefois s'adapter facilement aux types de données utilisées ici (BETLAAN *et al.*, 1996, BOUAZZAOUI *et al.*, 2001). La méthode choisie est celle de l'approche opérationnelle du critère unique de synthèse de ROY (1985), n'intégrant que des données comparables et avec laquelle on peut mettre en relation les facteurs reliés au risque tout en demeurant plus près de la réalité. La délimitation des zones de protection résultera donc de la superposition, par addition, de chacun des facteurs retenus jouant un rôle

important dans le processus d'évaluation de vulnérabilité à la contamination de la ressource en eau (EL GAROUANI *et al.*, 1999).

Dans l'opération de la délimitation des zones de protection autour de la retenue, nous avons procédé à des ajustements et à des analyses multicritères en tenant compte à chaque fois d'un certain nombre de paramètres (figure 3). La manipulation du système mis en place est assurée moyennant des utilitaires bien structurés qui offrent à l'utilisateur toutes les possibilités de gestion du SIG depuis l'entrée de données jusqu'aux sorties des résultats (figure 2).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La connaissance du milieu physique s'est traduite par la réalisation d'une base de données regroupant les paramètres qui caractérisent le milieu (modèle numérique du terrain, occupation du sol, hydrographie, pédologie, géologie, sources de pollution, paramètres météorologiques, etc.). Le résultat des différents traitements d'images de télédétection a mis en

évidence huit classes d'occupations du sol (Figure 4). La photo-interprétation des photographies aériennes et les observations sur le terrain ont permis d'établir la réalité terrain à laquelle sont confrontés les résultats de traitement d'images.

L'organisation du SIG adopté englobe un ensemble de logiciels et de programmes nécessaires pour la réalisation des différentes tâches requises pour la délimitation des zones de protection. Ces outils permettent la saisie de données provenant de différentes sources (cartes existantes, images satellitaires, photographies aériennes, tableaux, etc.), la gestion de la base de données, les opérations numériques et de simulation, et l'édition des résultats.

Le système a permis d'intégrer et de traiter des données à des échelles variables. La précision des résultats est donc reliée à l'échelle des cartes utilisées. Elle sera d'autant plus grande que l'on utilise des cartes à grande échelle lors des mises à jour. Après l'analyse des paramètres existants dans la base de données, nous avons constaté que les facteurs géologiques et hydrogéologiques ont un apport négligeable en éléments nutritifs vers la retenue. Par contre la morphologie, la

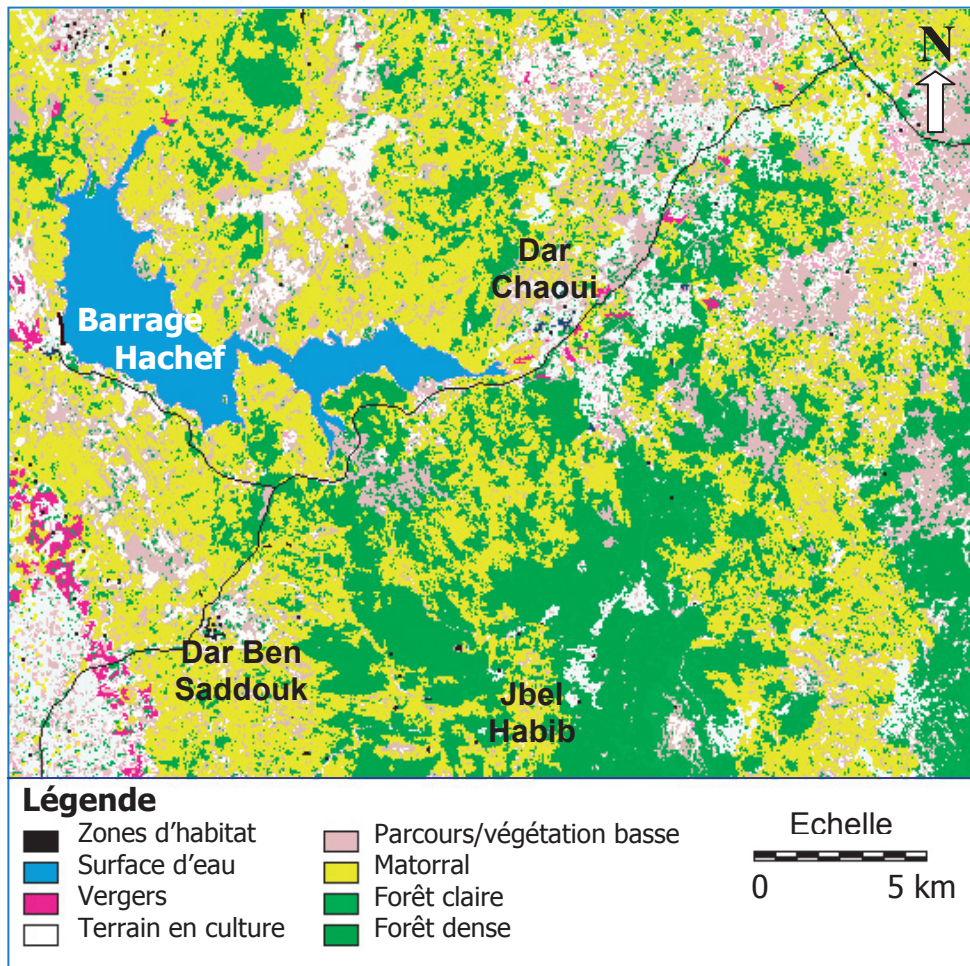


Figure 4 Carte de l'occupation du sol à partir de l'image Spot HRV du 17-08-96
Map of land use from the Spot HRV image of 17-08-96

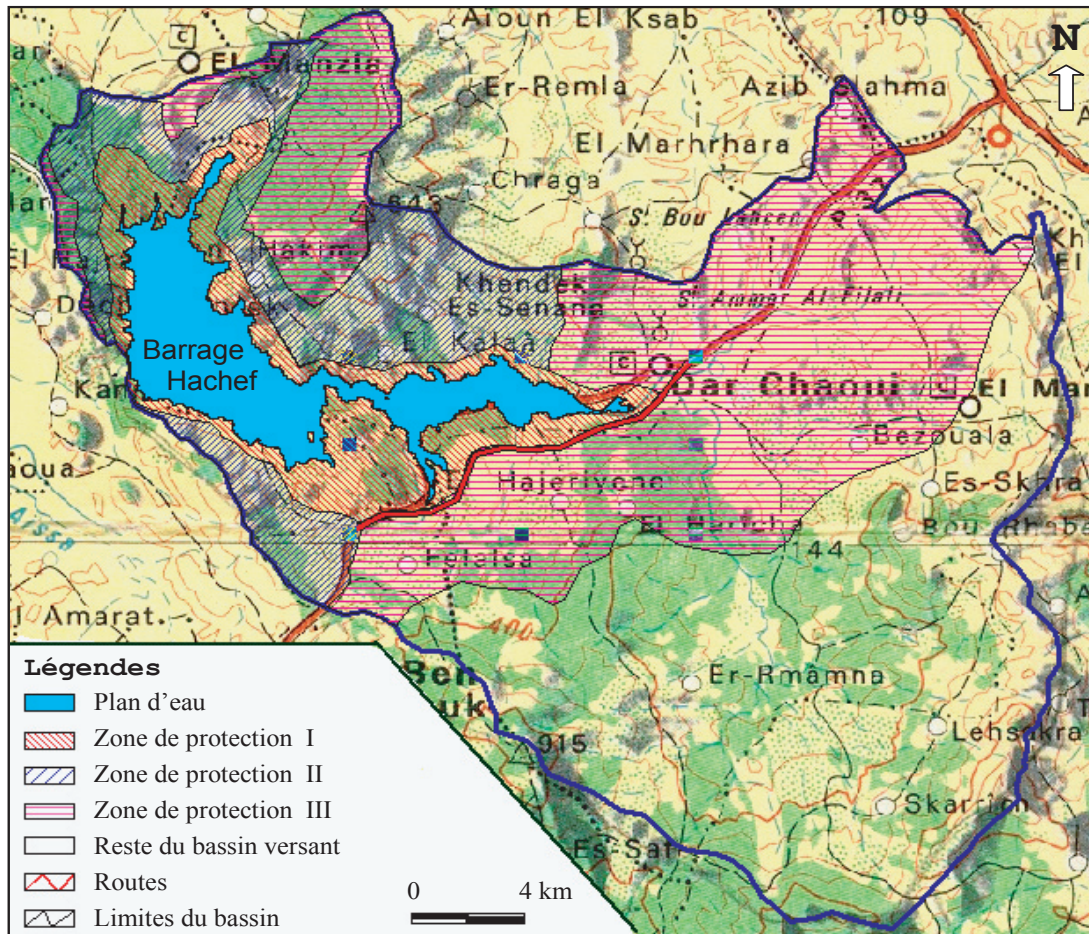


Figure 5 Carte de la délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage
Demarcation map of the protection zones around the reservoir

dégradation du couvert végétal, le ruissellement et l'agriculture sont des facteurs importants pour la délimitation des zones de protection. En effet, dans le cas présent, une grande partie de la région est formée par des synclinaux charriés des grès numidiens de l'Eocène supérieur. Le reste du bassin d'El Hachef est constitué essentiellement de larges vallées alluviales du Quaternaire avec quelques collines marneuses de Crétacé supérieur avec un potentiel hydrogéologique très limité. Cela fait que la structure géologique de la région ne permet pas des apports nutritifs transversaux significatifs. La mise en relation des facteurs précédemment évoqués a permis la délimitation de trois zones de protection telle qu'elles sont présentées sur la figure 5.

La zone I comprend la retenue et ses îles, ainsi qu'une bande côtière, justifiée surtout par les exigences de la protection contre les pollutions directes. Elle est limitée à une bande de 100 m dans la projection orthogonale par rapport à la retenue normale. La zone II est délimitée dans un premier temps à des terrains limitrophes ayant une pente supérieure à 3 degrés mais sans que l'étendue de cette bande ne dépasse un kilomètre de largeur. La zone de protection III est reliée à l'extérieur de la zone II et englobe les terrains ayant des pentes inférieures

à 3 degrés. Les étendues de ces zones peuvent augmenter ou diminuer en faisant intervenir les autres paramètres et/ou par des ajustements en fonction des limites cadastrales (communes ou parcelles) et géographiques (cours d'eau, voies de communication) (Figure 3).

Après la délimitation des différentes zones de protection, des servitudes doivent être formulées pour chaque zone. Selon la loi sur l'eau 10-95 adoptée par le Royaume du Maroc, promulguée en septembre 1995, les indications et réglementations pour les différentes zones de protection ont été précisées (ANONYME, 1995).

L'installation de ces dernières présente donc une possibilité de protéger efficacement les ressources en eau et de prolonger la durée de leur exploitation. Ceci entraîne également une plus grande rentabilité des investissements et infrastructures réalisés. Cependant, l'évolution du sol, certaines activités anthropiques et les variations du climat peuvent modifier certains facteurs (occupation du sol par exemple) considérés pour cette délimitation. L'utilisation du SIG permet ainsi de mettre à jour facilement le zonage établi.

4. CONCLUSION

Au terme de ce travail, une solution informatisée pour la délimitation des périmètres de protection a été conçue et réalisée. Ainsi, un modèle d'analyse spatiale par le SIG basé sur l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination de la ressource a été élaboré. Toutes les données disponibles, aussi bien celles issues de la télédétection que celles du terrain, ont été modélisées et intégrées au sein d'une base de données gérée par un SIG. Dans ce travail, les différents aspects de la problématique concernant la sauvegarde de la ressource en eau ont été cernés et les besoins des gestionnaires ont été recensés. L'utilisation de cette méthode a permis de délimiter les trois zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (zones de protection immédiate, rapprochée et éloignée).

Cette étude apparaît donc encourageante pour le développement futur de l'utilisation de la télédétection spatiale et du SIG pour l'étude et la gestion des ressources en eau destinée à l'alimentation en eau potable. Elle vise l'objectif fondamental d'amélioration des connaissances nationales sur les ressources en eau et de leur protection, et fournit une base pour toute étude expérimentale ultérieure en matière de protection des ressources en eau de surface.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME, 1992, Plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins de Bourgreg Oum Rbia. Conseil supérieur de l'eau du Maroc, 6^e session, janvier 1992.
- ANONYME, 1995. Loi N° 10-95 sur l'eau au Maroc. Bulletin officiel du Maroc, n° 4325, 20 septembre 1995.
- ANONYME, 1996. Barrage Hachef (9 Avril). Ministère des travaux publics du Maroc, Rabat, Rapport scientifique, 16 p.
- BETLAAN O., WANG Z.M., DE SMEDT F., 1996. An adaptive SIG toolbox for hydrological modelling. Dans : HydroSIG 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. Proceedings of the Vienna Conference, April 1996, IAHS Publication, 235, 3-9.
- BOUAZZAOUI N., CHAHIN N., AIT BELAID M. AHLAFI Z. BIJABER N., EL FAKER A., 2001. Mise en œuvre d'un système d'information géographique pour le suivi de la forêt de la Maàmora au Maroc. *Télédétection*, 2, 137-149
- CALOZ R., COLLET C., 2001. Précis de Télédétection. Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'université du Québec/AUPELF-UREF, Vol. 3, Québec, 386 p.
- CLOUÂTRE E., DUBOIS J.M.M., POULIN A. 1996. SIG et détermination régionale des zones à risque de glissement de terrain : secteur de Hull Gatineau, Québec. *Can. Geogr.*, 40, 367-86.
- EL GAROUANI A., 1995. Méthodologie pour l'élaboration du SIG pour la Région Économique du Centre dans le cadre de la monographie de l'environnement. Ministère de l'Environnement du Maroc, Rapport scientifique, 50 p.
- EL GAROUANI A., JABRANE R., MERZOUK A., 1999. Essai méthodologique exploitant les images spatiales dans un SIG pour la protection des ressources en eau de surface au Maroc. Journées Scientifiques de l'AUPELF-UREF, La Télédétection en Francophonie, Lausanne 22-25 novembre 1999, Suisse.
- EL GAROUANI A., 2000. Caractérisation hydrologique de bassins versants par télédétection et SIG : Application à la région d'Asilah (N.W. de Maroc) et la région de la basse vallée de la Medjerda (N.E. de Tunisie). Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc, 210 p.
- IBRAHIMI S., DAMNATI B., RADA KOVITCH O., 2001. Couplage du 137_{Cs} et du 210_{Pb} pour l'estimation des pertes et des dépôts dans le bassin versant du barrage El Hachef. 16^e colloque des Bassins Sédimentaires Marocains. Meknès, 28-30 septembre 2001, Maroc.
- KRAUSE H., LAMRHARY A., 1995. Manuel relatif à la délimitation des zones de protection des captages d'eaux de surface. Office national de l'eau potable, Rabat, Rapport scientifique, 40 p.
- LALLEMAND-BARRES A., ROUX J.C., 1989. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Collection : Manuels et Méthodes, N° 19, BRGM, 224 p.
- MARTEL R., PARADIS D., MURAT V., MICHAUD Y., THERRIEN R., LEFEBVRE R., FAGNAN N., BOISVERT E., 1999. Protection des aquifères : vulnérabilité et périmètres de protection autour des puits. 3^e conférence biennale, Americana 1999, 24-26 mars 1999, Montréal. 375-376.
- MURAT V., MARTEL R., MICHAUD Y., THERRIEN R., 2000. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien, Québec. 53^e conférence canadienne de géotechnique, 15-18 Octobre 2000, Montréal. 411-418.
- ONEP-GTZ, 1995. Étude en vue de la requête pour l'installation des périmètres de protection pour la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur l'oued Bou Regreg. Office national de l'eau potable et Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Office national de l'eau potable du Maroc, Rapport scientifique, 175 p.
- PARADIS D., MARTEL R., MICHAUD Y., LEFEBVRE R., 2000. Étude comparative des méthodes de détermination des périmètres de protection en milieu granulaire : exemple du piémont laurentien. 53^e Conférence canadienne de géotechnique, 15-18 Octobre 2000, Montréal, 403-410.

- PRAKASH BASNYAT L.D., TEETE, B.G., LOCKABY, K.M. FLYNN, 2000. The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems. *Forest Ecol. Manage.*, 128, 65-73
- 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 de Doctoral, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 234 p.
- ROY B., 1985. Méthodologie multicritères d'aide à la décision. Edition ECONOMICA, Paris.
- SIVERTUN A., PRANGE L., 2003. Non-point source critical area analysis in the Gisselo watershed using GIS. *Environ. Modell. Softw.*, 18, 887-898.
- WILMET J., 1996. Télédétection aérospatiale : Méthodes et applications. Editeur SIDES, Fontenay-sous-Bois.