Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 35-52

© 2005 CONTEMPORARY ,PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

TÉLÉDECTION DE LA DYNAMIQUE DE LA DÉGRADATION DES SOLS ET DE LA SÉDIMENTATION DANS LE LAC DE PÉLIGRE, À HAÏTI

RÉGINE LOUIS[a], RÉMY SIETCHIPING[b] et JUDE PIERRE MARIE BASQUIAT[c]

[a] *Université Quisqueya, Angle rue Charéron et boulevard Harry Truman, Port-au-Prince, Haïti, West Indies*
Téléphone : (509) 221 4516 6618 ; télécopieur : (509) 221 4211

[b] *School of Anthropology. Geography and Environmental Studies, The University of Melbourne, 221 Bouverie Street, Parkville, Victoria 3010, Australia*
Téléphone : (613) 83449382 ; télécopieur : (613) 93494218

[c] *Université d'État d'Haïti, Route nationale # 1, Damien, Port-au-Prince, Haïti, West Indies*
Téléphone : (509) 219 5325

Courriel [(a,b,c)] : lregie@yahoo.com ; rsietchiping@yahoo.com ; pbasquiat@hotmail.com

(soumis : 9 mars 2004 ; révisé : 26 juin 2004 ; accepté 6 octobre 2004)

Le lac artificiel de Péligre, à Haïti, subit l'effet d'une sédimentation accélérée qui menace de le rendre incapable de remplir les fonctions pour lesquelles il avait été construit. La télédétection, associée à d'autres méthodes d'analyse de l'espace a permis, dans cette étude, d'identifier et de suivre tant les sources de sédiment sur le bassin versant que la progression de la sédimentation au sein du lac entre 1964 et 2002. L'analyse numérique de l'image HRV de SPOT a révélé, qu'en l'an 2000, 27 % du bassin versant était constitué de sol nu, 37 % était cultivé ou recouvert d'une végétation clairsemée et environ 30 % portait une couverture végétale arborée ou arbustive. Les observations faites sur les photographies aériennes de 1978 ont révélé que, sur une première période de 22 ans (1956-1978), le banc de sédiment principal avait progressé sur près de 5,9 % de la superficie totale du lac. L'observation de l'image HRV de 2000 révèle, de son côté, que les sédiments avaient progressé sur une superficie additionnelle de 7,6 % par rapport à la superficie du lac.

La méthode employée a révélé que les pratiques culturales utilisées en amont du lac, par une population croissante de planteurs, constituent l'une des causes majeures de l'érosion du bassin versant et, par conséquent, de l'augmentation de la vitesse de sédimentation dans le lac.

Mots-clefs : sédimentation ; érosion ; bassin versant ; télédétection ; photographies aériennes

REMOTE SENSING OF THE DYNAMIC AND SEDIMENTATION IN PÉLIGRE LAKE, HAITI

Accelerated sedimentation threatens to prevent Péligre artificial lake, in Haiti, from fulfilling the functions for which it has been built. In this study, remote sensing associated with other space analysis methods was used to identify and follow the sources of erosion in the watershed as well as sediment deposition in the lake between 1964 and 2002. Digital analysis of the 2000 HRV SPOT image reveals that 27 % of the watershed were made of bare soil, 37 % were cultivated or covered with scattered vegetation and 30 % bore woody or bushy vegetation. Visual and stereoscopic analysis of the 1978 aerial photographs reveals that in 22 years (1956-1978) the major sediment channel had progressed over 5,9 % of the total area of the lake. On the other hand, the analysis of the 2000 HRV image shows an additional 7,6 % from 1978 to 2000. The method used in this study emphasized that upstream agricultural practices, used by an increasing population of farmers, are among the prime contributing factors of rapid erosion processes in the watershed and increase sedimentation rate in the lake.

Keywords : sedimentation ; erosion ; watershed ; remote sensing ; aerial photograph.

1. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Le barrage de Péligre, construit en 1956, a permis la formation du lac artificiel du même nom à partir de l'accumulation des eaux du fleuve Artibonite et de ses affluents. Progressivement, il s'est vu attribué trois missions principales. La première était la réglementation du débit du fleuve en aval afin de prévenir les méfaits des crues et le manque d'eau d'irrigation en période d'étiage. Ensuite, ce barrage devait assurer l'irrigation de la vallée de l'Artibonite, principale zone rizicole du pays. Enfin, le barrage devait servir à couvrir les besoins en énergie de Port-au-Prince et de ses environs (ODVA, 1982).

Quatre décennies après la mise en service du barrage, sa capacité à assurer ses trois missions s'est progressivement affaiblie, au point qu'au début des années 1980, le rationnement du courant électrique, qui avait cessé à l'inauguration de la centrale en 1971, a été réinstauré.

Entre autres facteurs souvent évoqués pour expliquer l'amenuisement de la performance du barrage figurent les motivations politiques et économiques ainsi que la mauvaise gestion du territoire, aussi bien par les autorités locales que par les populations environnantes (Frenette *et al.,* 1982 ; Knowles *et al.,* 2003).

Ailleurs, des chercheurs utilisant des techniques de télédétection se sont penchés sur des bassins versants présentant des problèmes similaires à ceux rencontrés au niveau du lac Péligre. Les pratiques agricoles érosives des populations se sont avérées déterminantes dans l'accélération de la dégradation des sols des bassins versants (Wasson *et al.*, 1998 ; King, 2001 ; Maitra, 2002). D'après Dubucq (1986) « les manifestations de l'érosion hydrique (érosion en nappe, érosion en griffe, ravinement et dépôts) sont généralement bien décelées sur les photographies aériennes à partir du 1 : 50 000 ». Les discussions sur l'apport de la télédétection à l'étude de l'érosion des sols sont suffisamment rapportées dans la littérature (Cyr *et al.*, 1991 ; Bonn et Escadafal, 1996 ; Najmoddini, 2003) . Par contre, l'évaluation globale de l'état du couvert végétal du bassin versant du lac, à partir de l'interprétation d'images satellitaires associées à d'autres outils de recherche, n'a pas été rapportée. Ceci constitue une approche nouvelle permettant l'évaluation rapide de la dynamique de l'érosion du bassin versant et de la sédimentation dans le lac.

Cette recherche a pour objectif principal de démontrer comment l'intégration de la télédétection, en l'occurrence des photographies aériennes et une image HRV de SPOT, à d'autres méthodes de collecte de données (comme la bathymétrie et les observations de terrain), peut apporter une nouvelle perspective à l'analyse des dynamiques spatiale et temporelle de la dégradation des sols du bassin versant et de la sédimentation dans le lac de Péligre. Plus spécifiquement, dans cette recherche, on démontrera comment les sources de sédiments peuvent être clairement identifiées grâce à la méthodologie associant l'interprétation automatique de l'image satellitaire, l'interprétation visuelle de cette dernière et des photographies aériennes, les données bathymétriques et les observations de terrain. D'une manière pratique, on se propose de fournir aux organismes qui interviennent ou auront à intervenir dans la zone une meilleure idée des travaux à réaliser au niveau du bassin versant afin d'améliorer leurs pratiques de contrôle de l'érosion et, par conséquent, d'augmenter la longévité du lac. Cette recherche se base sur le postulat suivant : la télédétection, associée aux observations de terrain, permet d'identifier les zones affectées par l'érosion ; associée aux données bathymétriques, elle permet aussi de suivre la progression de la sédimentation dans le lac en fonction de l'évolution du couvert végétal.

2. SITE D'ÉTUDE

Le lac de Péligre, situé dans le département du Centre ou Plateau Central, à Haïti (figure 1), fait partie d'un bassin hydrographique d'environ 6 615 km^2 (figure 2) . Le lac de Péligre est alimenté par le fleuve Artibonite et ses affluents, dont le plus important est la rivière de Guayamouc. La tête du fleuve Artibonite, *el rio Artibonito*, est située en République Dominicaine, qui détient 41 % de la superficie du bassin (soit 2 685 km^2) et la partie haïtienne a une superficie de 3 634,3 km^2, soit 13,2 % du territoire national (Thomas, 1988).

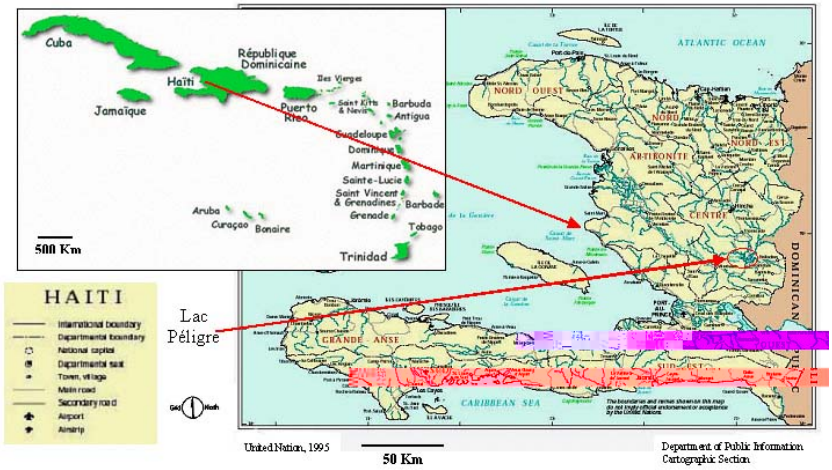


FIGURE 1 Localisation d'Haïti et du lac artificiel de Péligre. *Localization of Haiti and Péligre artificial lake.*

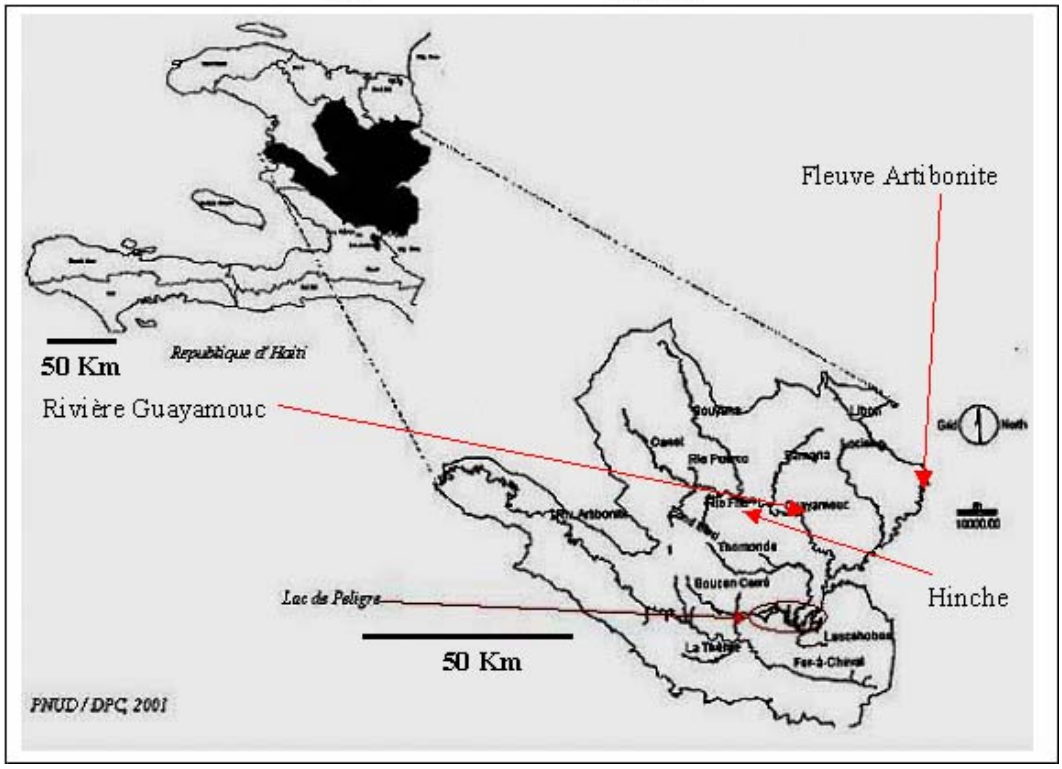


FIGURE 2 Localisation du bassin versant du fleuve Artibonite. *Localization of the Artibonite River watershed.*

King (2001) suggère que quatre facteurs principaux contrôlent l'érosion et la sédimentation dans un bassin versant : la topographie (pente), les types d'occupation du sol, les caractéristiques physico-chimiques des sols et les caractéristiques météorologiques des évènements pluvieux. La description du site d'étude portera donc sur ces quatre éléments.

L'analyse de la carte des pentes du bassin hydrographique (figure 3) révèle l'existence de six classes de pente sur le bassin hydrographique du fleuve Artibonite (tableau 1). Le bassin versant comprend quatre unités géomorphologiques : montagne, vallée, plateau et plaine. Un paysage incluant les deux premières unités est présenté sur la figure 4.

Les visites de terrain, réalisées en novembre 2002 et en avril 2003, ont révélé que le bassin versant est pourvu d'une végétation diversifiée constituée d'essences pérennes fruitières et forestières dispersées au niveau des vallées, des montagnes et des plateaux. L'agriculture constitue l'activité éco-

nomique principale de la région et fournit les moyens de subsistance à plus de 500 000 personnes, soient 91 % de la population du Plateau Central (Doura, 1995). Comme partout ailleurs dans les campagnes haïtiennes, les exploitations agricoles sont caractérisées par deux types de jardins : le verger qui entoure la résidence du fermier et où la couverture végétale pérenne est généralement dense et les parcelles de cultures saisonnières, pratiquées sous forme d'une association de céréales, de légumineuses, de tubercules, disséminées sur les pentes, les vallées et les plateaux (Thomas, 1988). Par ailleurs, Doura (1995) affirme que les sols de cette région sont surexploités puisque près de 35 % des 214 700 ha cultivés le sont suivant le système de production sans couvert arbustif, souvent sur de très fortes pentes, supérieures à 50 %.

Les sols de la zone centrale du plateau accusent, à plus de 75 % , des faciès meubles (argile, grès, limon, siltstone et calcaire crayeux) très exposés à l'érosion hydrique quand ils sont dépourvus de végétation (DATPE/BUDEPRA, 1987). Ces formations sont consolidées par les roches dures qui forment la périphérie du plateau et l'ossature des montagnes. En d'autres termes, les sols du bassin versant du lac sont constitués de calcaires durs, de marnes et d'argilites ainsi que de calcaires en plaquettes, crayeux ou marneux (DATPE/ BUDEPRA, 1987). D'après Louissaint et Edouin (1999), les sols du Plateau Central sont, dans 70 % des cas, semblables à ceux de Pandiassou, à Hinche (figure 2). Ils sont de texture argileuse en surface et en profondeur et renferment en moyenne 26 % de sable, 21 % de limon et 53 % d'argile. Ces sols ont généralement une certaine résistance à l'érosion grâce à leur forte teneur en argile. Cependant, quand ils sont dépourvus de couverture végétale, comme c'est souvent le cas dans les montagnes de ce département, on assiste à leur dégradation poussée qui suscite des affleurements rocheux.

TABLEAU 1 Classes de pente. *Slope classes.*

Classe (%)	Superficie (km²)	%
1-5	3 223	51
5-15	1 368	22
15-25	587	9
25-35	415	7
35-50	423	7
50 et plus	263	4
Total	6 279	100

Source : PNUD/DPC (2001)

Les sols possèdent les caractéristiques physico-chimiques suivantes : le pH varie du neutre à l'alcalin, en moyenne 8,45. Leur conductivité électrique se situe autour de 0,55 micromohs et leur capacité d'échange cationique aux environs de 26 milliéquivalents (meq)/100 g. Ces sols accusent une somme moyenne de bases échangeables égale à 26,4 meq/100g. De ces bases échangeables, 85 % sont constituées de calcium, 9 % de magnésium, 5 % de sodium et 1 % de potassium. Leur teneur en matière organique et en azote est généralement faible (Louissaint et Edouin, 1999). Ces sols, généralement peu perméables à cause de leur forte teneur en argile, favorisent le ruissellement. Ce phénomène agissant sur les sols dénudés conduit à toutes les formes d'érosion hydrique.

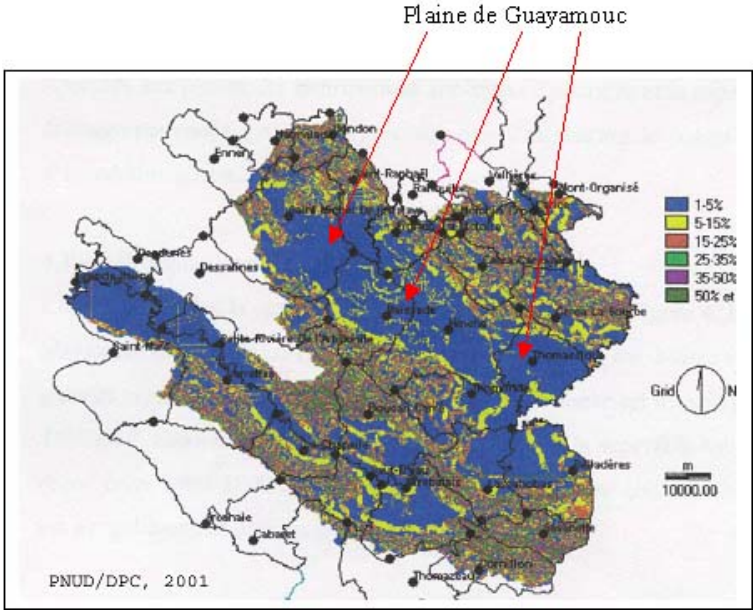


FIGURE 3 Carte des pentes du bassin hydrographique. *Slope map of the hydrographical basin.*

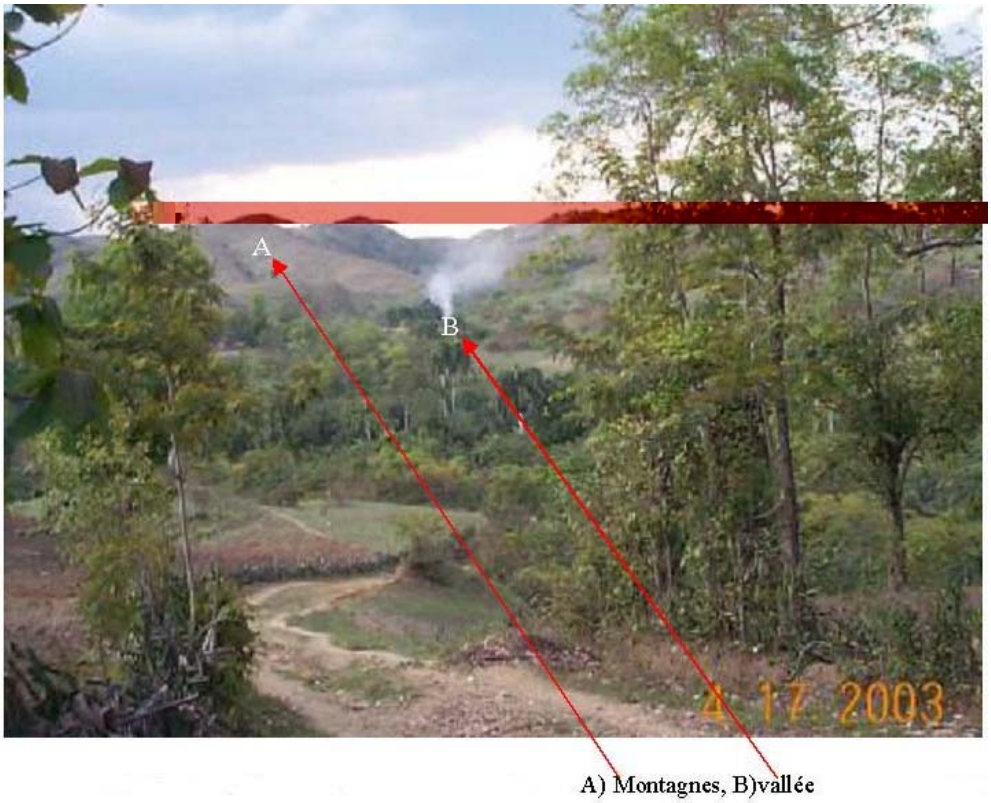


FIGURE 4 Unités géomorphologiques du Plateau Central. *Morphological unit in Plateau Central.*

Les pluies sont inégalement réparties dans le bassin versant du lac de Péligre. La pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 3 200 mm/an pour les zones de montagne et entre 1 000 et 2 000 mm/an pour les zones de plaine et de la basse vallée. La pluviométrie augmente avec l'altitude (figure 5), les parties les plus arrosées correspondant aux sommets des montagnes. La zone présente une longue saison pluvieuse qui va d'avril à octobre, avec des pics en mai et en septembre. Les données pluviométriques enregistrées sur plusieurs décennies à Hinche (figure 6) confirment cette tendance. Les pluies, de durée variable, causent des dégâts particulièrement importants quand leur intensité augmente après plusieurs heures de précipitations modérées. Cette situation est exacerbée par la faiblesse du couvert végétal qui facilite les phénomènes d'érosion hydrique.

La décision du gouvernement Duvalier, dans les années 1960, d'abattre les forêts pour éliminer les aires propices à l'installation d'une guérilla hostile à son régime, est souvent avancée comme une incitation majeure à une campagne soutenue de déforestation qui conduisit à la destruction du couvert arboré de nombreux massifs montagneux, dont le bassin versant du lac Péligre (Doura,1995 ; Nagle, 2001). À cette occasion, d'importants lots boisés de ce bassin versant, qui stabilisaient la couche arable en amont du lac, furent en grande partie rasés et les sols nus, exposés. D'après Doura (1995), la superficie totale des forêts de ce département est passée de 21 227 à 8 635 ha entre 1956 et 1977.

L'état actuel de la zone d'étude suggère que les actions en reboisement et en conservation de sol de l'Organisme de développement du bassin versant du fleuve Artibonite (ODBFA), qui durèrent de la mise en service de la centrale (1971) jusqu'à la chute du régime de Duvalier (1986), n'ont pu inverser ni même ralentir la tendance à la dégradation croissante du couvert végétal et des sols de cette région.

L'utilisation du barrage à des fins hydro-électriques a commencé, en 1971, avec l'installation et la mise en service d'une usine hydroélectrique munie de trois turbines de 15 MW chacune. Ceci permettait de couvrir 77 % des besoins en énergie électrique de Port-au-Prince. Haïti disposait alors

de sept centrales hydroélectriques d'une capacité totale de 55 MW. Celle de Péligre fournissait à elle seule 81,8 % de cette énergie (COB/LGL, 1998). Après la mise en fonctionnement de cette centrale, la gestion du barrage a alors été confiée à l'Électricité d'État d'Haïti (EDH), qui devait veiller à harmoniser la production d'électricité avec les besoins en irrigation de la vallée de l'Artibonite. De plus, avec tous les affluents en amont et en aval du barrage de Péligre, le fleuve Artibonite représente à lui seul plus de 50 % du potentiel hydroélectrique d'Haïti (Magny, 1991).

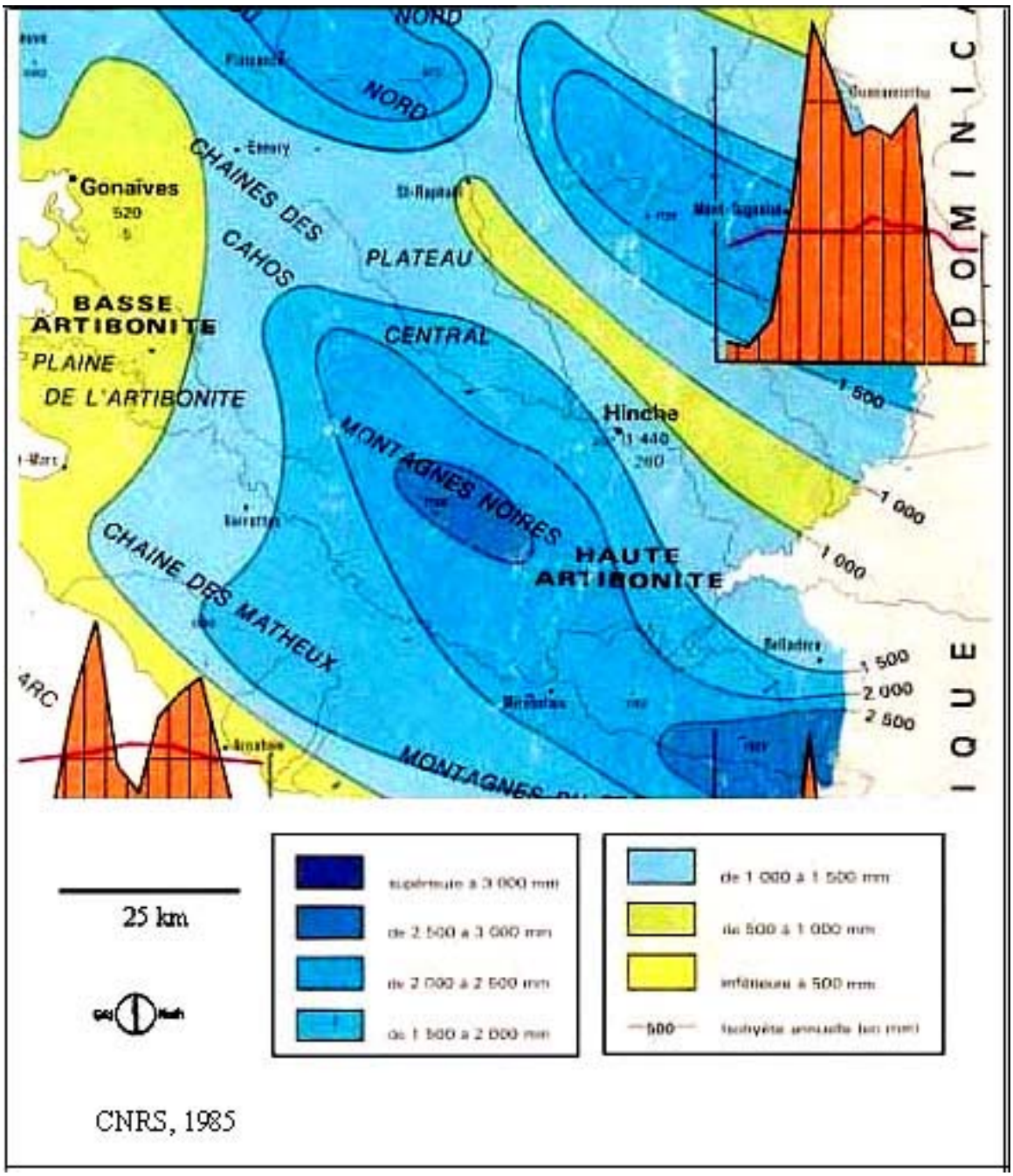


FIGURE 5 Carte présentant la répartition des pluies à Lascahobas. *Lascahobas rainfall map.*

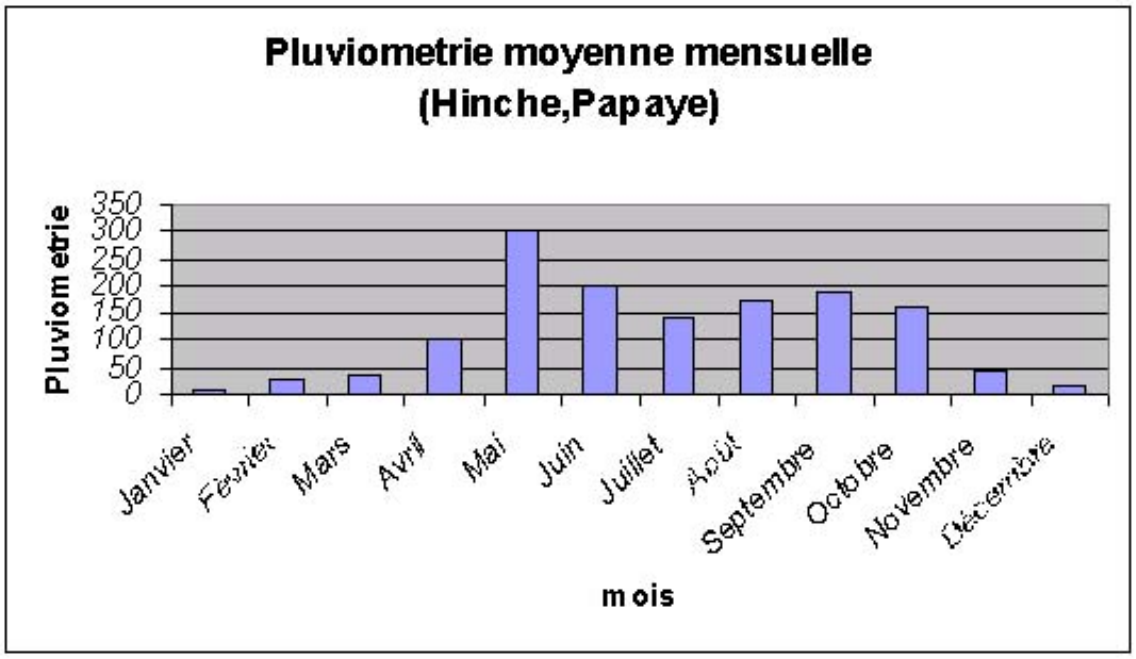


FIGURE 6 Régime pluviométrique de Hinche (Papaye). *Rainfall pattern of Hinche (Papaye).*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Trois principales sources de données ont été utilisées pour évaluer le recul de la végétation et la progression de la sédimentation dans le lac Péligre : les photographies aériennes, une image HRV de SPOT, des mesures bathymétriques et statistiques, toutes soutenues par des données de réalité de terrain. D'abord, trois jeux de photo-graphies aériennes ont étés utilisés : ceux de 1964 et de 1978 avaient été imprimés à l'échelle du 1:20 000 et celui de 2002 était en format numérique. Les photographies aériennes de 2002 ont été obtenues auprès de l'Unité de télédétection et de système d'information géographique (UTSIG) du Ministère de la planification et de la coopération externe (MPCE) d'Haïti. Celles de 1978 et de 1964 ont été consultées auprès du Service de géodésie et du Service des ressources en eau du Ministère de l'agriculture d'Haïti. Ensuite une image HRS(XS) de SPOT-4, du 8 janvier 2000 (ce qui correspond à la saison sèche), avecune résolution spatiale de 20 m a été obtenue de Lantmateriet (National Land Survey of Sweden). L'image a été prétraitée pour réduire les déformations. Les informations sur les différentes corrections effectuées lors du prétraitement n'ont pas été mises à notre disposition. La projection utilisée est le UTM (zone 18 N) et le sphéroïde est le WGS 84. L'image est comprise entre les longitudes 72º10'0"O-71º40'0"O et les latitudes 18º45'0"N-19º15'0"N. Enfin, les données bathymétriques ont été obtenues auprès de l'EDH. L'échosonde utilisé, le *Sonarlite Echo Sounder*, de marque *Ohmex Instrumentation,* est muni d'un transducteur actif de 2 000 khz ayant une vitesse de 1 400 à 1 600 m/s. La fréquence pulsative est de 2 Hz et le niveau de profondeur varie de 0,28 à 75 m. La précision (RMS) est de plus ou moins 0,025 m et la diffusion du faisceau de 5-10 degrés.

Une grille d'interprétation des données spatiales a d'abord été développée sur la base de leur pertinence à informer sur le processus d'érosion et de sédimentation dans le contexte du lac de Péligre. Ensuite, pour des raisons d'uniformité dans la comparaison, il faillait s'assurer que les mêmes éléments spatiaux pouvaient être identifiables aussi bien sur les photographies aériennes (1964, 1978 et 2002) que sur l'image HRV (2000). Ainsi, les paramètres retenus ont comporté, entre autres, l'eau, les zones agricoles, les zones de faible couverture végétale, les zones de couverture végétale moyenne et les zones dénudées. Les interprétations visuelles et numériques ont été validées par des vérifications sur le terrain (novembre 2002 et avril 2003), les études anté-rieures (bathymétrie et statistiques) et des entrevues avec des cadres en charge de la gestion du barrage pour l'EDH ou ayant travaillé sur le bassin versant par le passé.

Il est important de mentionner que les jeux de photographies aériennes des années 1964 et 1978 étaient incomplets et ne couvraient pas la totalité de la zone d'étude. Pour contourner cette couverture limitée de photographies aériennes, des

analyses ont d'abord été menées sur les portions de la zone d'étude présentes sur toutes les photographies aériennes et l'image satellitaire. Les photographies aériennes de 1964 de ces portions ont été comparées à celles de 1978 et 2002, puis à l'image HRV de 2000. Les couplets de photographies aériennes ont été interprétés en stéréoscopie dans l'optique d'identifier les catégories d'occupation du sol suivantes : sols nus et dégradés, zones de faible couverture végétale, zones de couverture végétale moyenne et plans d'eau. Les estimations sur l'évolution des classes d'occupation de sol ont été réalisées à l'aide d'un quadrillage (0,5 cm de côté) transparent superposé à l'image. Les échelles présentées sur les photo-graphies aériennes ont été calculées par comparaison de la distance entre des paires de points visibles aussi bien sur ces photographies que sur la carte topographique de la zone (US Army Map Service, 1968).

L'analyse de l'image HRV a été réalisée à deux niveaux. La version imprimée (80 cm × 80 cm) a permis d'identifier visuellement et à l'aide de la stéréoscopie le lac et les cours d'eau, les zones cultivées, les zones de faible couverture végétale, les zones de couverture végétale moyenne, les zones dénudées ainsi que les cicatrices d'érosion au niveau du bassin versant. La version numérique a permis de mener une classification automatique et dirigée dans l'optique d'isoler les classes identifiées précédemment. Pour mener cette classification, nous avons utilisé l'algorithme de classification du maximum de vraisemblance avec le logiciel ERDAS

L'image satellitaire et la comparaison des photographies aériennes (tableau 2), ont servi à mesurer la progression des bancs de sédiments, mais n'ont pas pu fournir des données quantifiables précises sur la progression de l'envasement du réservoir et la diminution de sa capacité d'emmagasinage. Nous avons donc jugé utile d'y associer les résultats des mesures tirées d'études sédimentologies (LGL, 1981) et bathymétriques (LGL, 1989 et 1999).

TABLEAU 2 Caractéristiques des données de télédétection utilisées. *Characteristics of the remote sensing data used.*

Données	Année	Spécificité	Échelle	Institution
Image HRV	2000 (01 / 08)	Multibande (analogique et numérique)	1 : 100 000	METRIA (Kiruna, Suède)
Photographies aériennes 1	1964	Noir et blanc (analogique)	1 : 20 000	MARNDR, Ressource en eau
Photographies aériennes 2	1978	Noir et blanc (analogique)	1 : 20 000	Service de géodésie
Photographies aériennes 3	2002	Couleur naturelle (numérique)	n/a	UTSIG

4. RÉSULTATS

Utilisant la méthode décrite ci-dessus, il a été possible d'identifier et d'évaluer les changements sur trois importants points : *1)* l'évolution de la dégradation de la couverture végétale, *2)* l'identification de la source de sédiments au niveau du bassin versant du lac , et *3)* l'évolution de la sédimentation du lac de Péligre.

4.1. Couverture végétale

Cette étude s'articule autour de la relation entre le couvert végétal, l'érosion et la sédimentation. Ainsi, il a fallu identifier les classes d'occupation de sol susceptibles de transparaître aussi bien durant les interprétations visuelles que numériques, d'une part, et d'influencer les phénomènes d'érosion, d'autre part. Trois classes principales ont donc été retenues : sols nus et dégradés, zones de faible couverture végétale (agriculture sarclée et prairie) et zones de couverture végétale moyenne (agriculture sous couvert boisé). Ces dernières ont pu être validées par les observations sur le terrain ou comparées aux cartes existantes.

L'analyse visuelle de l'image HRV de 2000 a permis de mettre en exergue les trois classes d'occupation du sol précédemment citées. Cette classification visuelle, à l'aide de la stéréoscopie, ne permettait pas de quantifier de manière précise la superficie des différents types de couvert végétal. C'est ainsi que l'analyse numérique (classification dirigée) faite à partir de ces trois classes a permis de relever, qu'en 2000, 27 % du bassin versant était constitué de sols nus, 37 % était cultivé ou recouvert d'une végétation clairsemée et environ 30 % était recouvert d'une couverture végétale arborée ou arbustive (figure 7).

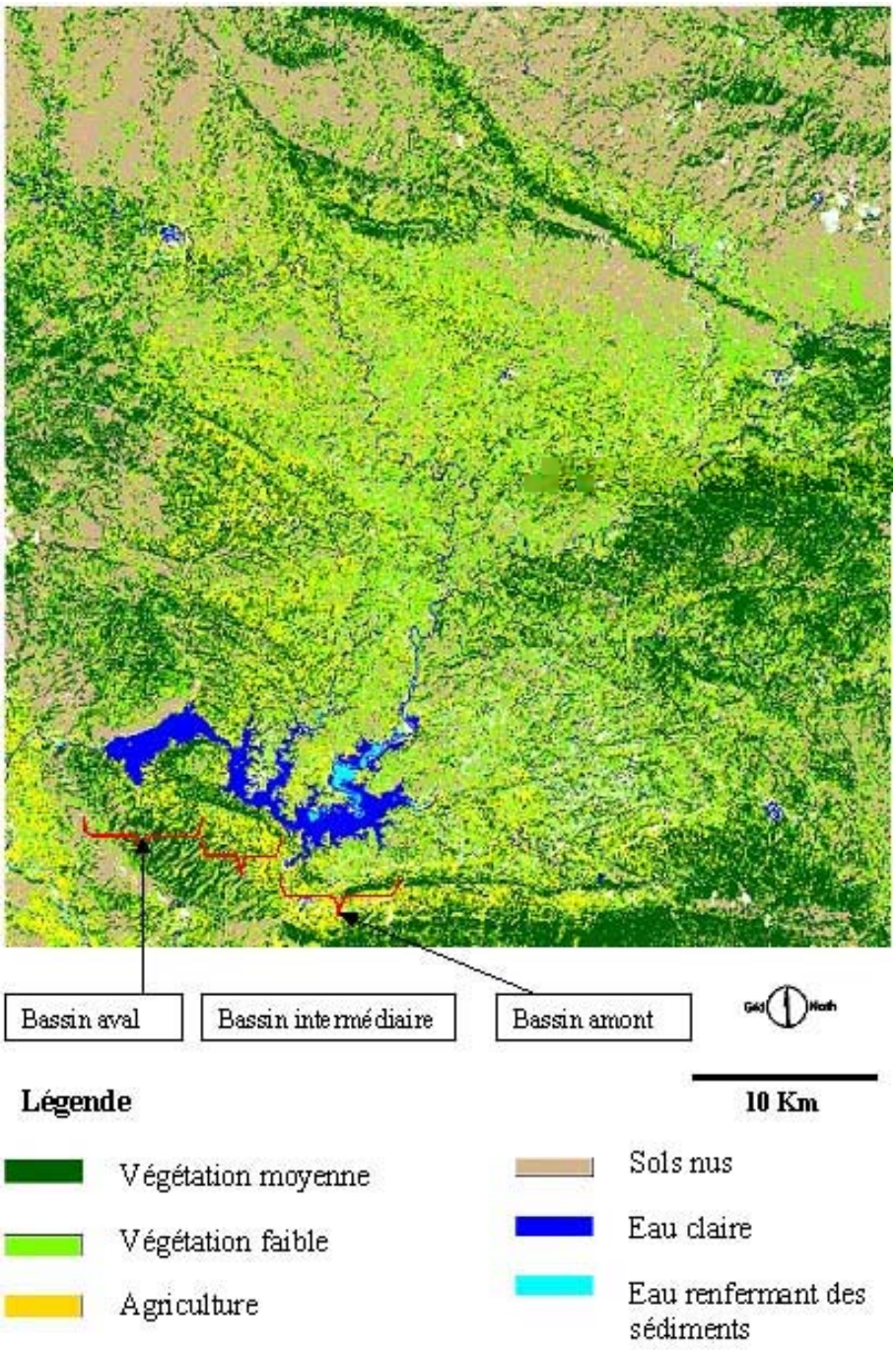


FIGURE 7 Carte de l'occupation des sols du bassin versant du lac de Péligre, basée sur la classification dirigée d'une image HRV de SPOT de 2000. *Watershed Land cover map based on the supervised classification of a SPOT HRV 2000 image.*

La technique d'interprétation visuelle a permis d'identifier les trois classes de couvert végétal sur les photographies aériennes de 1964, de 1978 et de 2002. Pour faciliter les comparaisons, les portions du bassin versant observées au moyen des photographies aériennes ont été identifiées sur une carte topographique de la région de Péligre (figure 8). La comparaison d'une portion, comprise

entre les latitudes 2090 000 et 2091 000 Nord et les longitudes 821 000 et 822 500 Est, observée sur les photographies aériennes de ces trois années accuse une régression du couvert végétal. La classe « couverture moyenne », estimée à 6 % en 1964, est passée à 2,5 % et à 2,4 % respectivement en 1978 et 2002. Le même constat est fait pour la classe « faible couverture végétale » qui occupait environ 25 % de cette portion en 1964 et a atteint 21 % en 1978 et 16 % en 2002 (figure 9). Par contre, la superficie des sols nus et érodés n'a que progressé, de 69 % en 1964 elle a atteint 76,5 % en 1978 et 81,6 % en 2002. Cette même tendance a été observée sur d'autres portions du bassin versant. Ainsi sur le versant ouest du bassin intermédiaire, dans la portion comprise entre les latitude 2090 500 et 2093 000 N et les longitudes 816 500 et 819 000 E (figure 10), l'observation des photographies aérienne de 1964 et de 1978 révèle une diminution drastique de la couverture végétale pérenne, qui passe de 25 % environ à moins de 10 %. L'observation des photographies aériennes (figure 11) de la région de Lascahobas (située entre les latitudes 2082 000, 2087 000 N et les longitudes 820 000 et 823 000 E) a révélé très peu de changement dans l'évolution de la couverture végétale, en particulier dans la région située au nord-ouest de cette ville. Des observations similaires sont faites pour la ville de Thomonde.

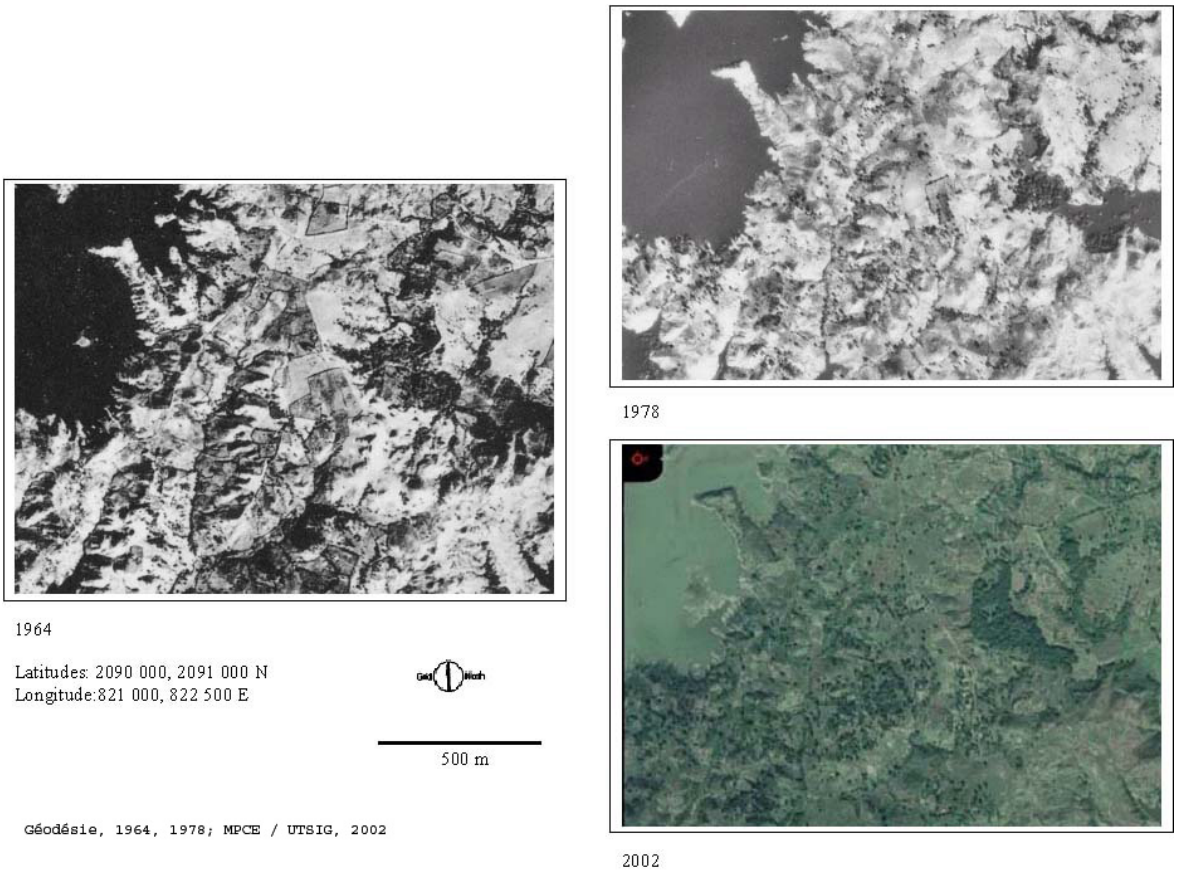


FIGURE 8 Localisation des zones couvertes par les photographies aériennes utilisées. *Localization of the area covered by the aerial photographs used.*