



LE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE AU SERVICE DE L'AMENAGEMENT RURAL : CAS DE L'ÉVALUATION DU RISQUE D'ÉROSION DANS LES HAUTES TERRES DE LUBERO EN REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO

Par

KAKULE VYAKUNO Joseph Emmanuel

RESUME

Le système d'Information Géographique (SIG) est une structure assistée par ordinateur pour l'acquisition, l'archivage, la réorganisation, l'analyse et l'affichage de données spatiales géoréférencées. Il est composé de données et d'un ordinateur pour traiter ces informations.

Il s'applique actuellement dans plusieurs domaines. Cet article en illustre l'application en aménagement rural, spécialement dans la cartographie du risque d'érosion dans les hautes terres de Lubero en RDC. Sur le terrain d'étude, les facteurs de l'érosion sont cinq : la pente, la susceptibilité du sol, le potentiel érosif du climat, la densité démographique et le recouvrement végétal. Ces variables sont transformées en cartes numériques par digitalisation des cartes préexistantes en papier au moyen du logiciel Géoconcept 5.5 et par intégration de données issues des images satellitaires et du recensement de la population. Les cinq cartes obtenues sont multipliées pour générer celle du risque d'érosion. Cette dernière montre la gradation du risque et sert d'outil de prise de décision aux aménageurs. Grâce à la carte du risque d'érosion, en effet, les décideurs doivent définir les zones d'intervention prioritaires pour la lutte antiérosive.

Ainsi, notre article illustre bien l'importance du SIG en aménagement rural. Cette méthode permet, à partir des éléments connus, de générer des données nouvelles et d'orienter l'action des décideurs. Par ce fait la Géographie s'avère une Science appliquée.

ABSTRACT

The Geographical Information System (GIS) is a computer assisted structure for the acquisition, the saving, the reorganisation, the analysis and the showing of georeferenced spatial data. It is composed by data and computer for the analysis of those informations.

It is actually applied in many fields. This article shows his application in rural planning, especially in erosion risk cartography in the Lubero highlands in DRC. On the study land, the erosion factors are five : the slope, the soil susceptibility, the erosive potential of the climate, the human density and the

low vegetal cover. Those variants are transformed in numeric maps by digitalizing paper preexistent maps via the Geoconcept 5.5 software and by integrating data from satellite images and population recensement. The five obtained maps are multiplied to generate that one of erosion risk. This one shows the risk gradation and serves to the responsables as a tool for taking decision. In fact, thanks to the erosion risk map, the responsables must precise the priority areas intervention for the antierosiv fight.

So, our article illustrates well GIS importance in rural planning. This method permits, from known elements, to generate news data and to rule the responsables' action. By this fact Geography shows itself as an applied Science.

INTRODUCTION

Longtemps méconnu en RDC, le Système d'Information Géographique (SIG) est actuellement valorisé dans plusieurs études. Il a été récemment utilisé par la Commission Electorale Nationale Indépendante (CENI) dans la cartographie opérationnelle destinée à faciliter les élections dans notre pays. Dans ce contexte, nous voulons porter à la connaissance du monde scientifique congolais la définition du SIG et son importance dans les Sciences. Nous illustrons notre propos par la cartographie du risque d'érosion dans les hautes terres de Lubero.

Cet article comprend ainsi quatre points : l'actualité du SIG, l'usage du SIG dans la cartographie du risque d'érosion dans les hautes terres de Lubero, les résultats obtenus, et l'interprétation et l'application des résultats en aménagement rural.

1. L'ACTUALITE DU SIG

Ce point démontre l'actualité du SIG. Il en donne une information succincte en présentant le SIG dans sa définition, ses composantes et ses applications.

1.1. LA DEFINITION DU SIG

Il y a plusieurs définitions du SIG. Nous en donnons les plus représentatives. Le SIG est un système assisté par ordinateur pour l'acquisition, l'archivage, la réorganisation, l'analyse et l'affichage de données spatiales. Le SIG se définit aussi comme un équipement instrumental puissant pour l'acquisition, le traitement, la transformation et la représentation de données localisées relatives au monde réel. Enfin, le SIG est un système composé de hardware, de software et de procédures pour acquérir, manipuler, traiter, analyser, modéliser et représenter les données géoréférencées dans le but de résoudre des problèmes de gestion et d'aménagement (Paegelow, 1995).

De ces définitions on déduit les composantes du SIG.

1.2. LES COMPOSANTES DU SIG

La définition même du SIG donne une idée sur ses composantes. En effet, le SIG a quatre composantes : l'équipement matériel ou hardware, le logiciel ou software, les données et le personnel qualifié (Paegelow, 1995).

Le hardware désigne l'ordinateur et ses périphériques. Cet ordinateur doit être suffisamment puissant pour traiter les données, généralement gourmandes en mémoire. Les périphériques exigés pour le SIG sont ceux qui accompagnent généralement un ordinateur, mais ils doivent être appropriés pour le traitement des cartes et des images satellitaires. Parmi eux nous citons particulièrement la table à digitaliser, dont nous décrirons l'usage plus bas.

Le software désigne le logiciel. Un logiciel SIG doit assumer ces fonctions : l'acquisition, la gestion, le traitement, l'analyse spatiale et la représentation de données géoréférencées et attributaires (Rouet, 1991, Paegelow, 1995). Parmi ces fonctions, nous insistons sur la possibilité de combiner les informations par le croisement de plusieurs cartes, dont nous parlerons plus bas. Nous citons en exemple quelques logiciels : Géoconcept, Idrisi et Quantum GIS (Eastman, 1999).

Les données traitées par le SIG sont de plusieurs types. Elles sont alphabétiques, numériques, alphanumériques, vectorielles et rasters. Une donnée alphabétique est un mot contenant des lettres de l'alphabet, le nom d'un lieu par exemple. Une donnée numérique est un chiffre, un nombre entier ou réel, avec lequel on peut faire ou ne pas faire un calcul mathématique. Ce sont les cas, par exemple, du prix d'un article de vente ou du numéro matricule d'un fonctionnaire de l'Etat. Une donnée alphanumérique est une donnée qui contient en même temps des lettres de l'alphabet et des chiffres. Dans ce cas, les chiffres ne peuvent pas servir à des opérations mathématiques. Nous citons en exemple le format d'une feuille de papier, qui est A4 ou A3. Une donnée vectorielle est un dessin qui compose une carte géographique. Elle a de trois aspects. Elle est un point pour représenter par exemple un lieu sur une carte à très petite échelle. Elle est une ligne pour représenter les objets linéaires tels que les voies de communication et les cours d'eau. Elle est une surface, appelée généralement polygone, quand elle représente une entité géographique comme un territoire par exemple. Une donnée est raster quand elle est un pixel de télédétection. C'est le cas d'une image satellite,

où tous les objets, ponctuels, linéaires et surfaciques, sont représentés par une juxtaposition de pixels (Paegelow, 1995).

Nous faisons remarquer que les données du SIG ont à leur tour quatre composantes : la localisation, l'attribut, l'interrelation et l'ancrage temporel. La localisation positionne les données dans un référentiel spatial établi, appelé géoréférencement. Ce sont les coordonnées géographiques x, y et z, qui sont respectivement la longitude, la latitude et l'altitude. L'attribut est l'information que l'on donne sur un objet. Les données attributaires, à l'exception des noms des objets, n'apparaissent pas sur la carte. Elles constituent une base gardée dans le logiciel SIG sous forme de tableau et que l'on peut consulter pour enrichir sa connaissance du milieu représenté. Elles sont de type alphabétique, numérique et alphanumérique (Rouet, 1991). L'interrelation ou ensemble des propriétés topologiques est l'agencement des objets dans l'espace. L'interrelation est une connexité si les points sont reliés par des axes, une orientation s'il y a un sens précis pour les flux, une contiguïté si des polygones se touchent, une inclusion si un polygone est homogénéisé avec un autre dans lequel il se situe et une exclusion si un polygone reste autonome au milieu d'un autre. L'ancrage temporel des données est leur datation pour prouver la dynamique progressive ou régressive de l'occupation du sol au cours du temps (Béguin et Pumain, 1994, Paegelow, 1995, Pumain et Saint-Julien, 1997 et Muhindo Sahani, 2012).

Enfin, la dernière composante du SIG, c'est le personnel qualifié. Pour obtenir de bons résultats dans l'usage du SIG, il faut avoir un personnel bien formé en Informatique et en Géographie. En effet, ce personnel doit être capable de bien manipuler l'ordinateur et de bien interpréter les résultats obtenus. Sans cela, le SIG serait improductif comme un avion cloué au sol (Paegelow, 1995).

1.3. LES APPLICATIONS DU SIG

Le SIG a des applications dans ces domaines : la cartographie, l'environnement et les ressources naturelles, l'aménagement et la gestion du territoire, les questions socio-économiques, les phénomènes planétaires (Rouet, 1991, Dubois et al., 1993, Paegelow, 1995 et Bonn, 1996).

Dans le domaine de la cartographie, le SIG est utilisé pour établir les cartes topographiques de l'Institut Géographique National (IGN) et les cartes géologiques du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Ces deux organismes sont présents dans chaque pays (Scanvic, 1983 et Rouet, 1991).

Dans le domaine de l'environnement et des ressources naturelles, le SIG fait l'inventaire forestier du point de vue écologique et économique, surveille la dynamique agricole et l'occupation des sols, aide dans la prospection et la gestion des ressources énergétiques et minières et évalue l'impact environnemental des activités humaines (Rouet, 1991, Paegelow, 1995, Guigo et al., 1995, Lebeau, 2000 et Robin, 2002).

Dans le domaine de l'aménagement et de la gestion du territoire, le SIG aide dans la confection du cadastre, dans l'établissement des réseaux d'infrastructures tels que les réseaux d'eau potable, des eaux usées, de gaz, d'électricité et des routes, dans l'aménagement et la gestion urbains quant à ce qui concerne l'élaboration du Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (SDAU) et du Plan d'Occupation des Sols (POS) et, enfin, dans la protection civile et la défense militaire en localisant les zones à risques d'inondation, d'incendie et d'érosion et en déterminant les cibles à détruire et les installations à protéger en cas de guerre (Rouet, 1991, Paegelow, 1995, Robin, 2002 et Merlin, 2002).

Dans le domaine socio-économique, le SIG aide à calculer le tracé idéal des voies de communication, la navigation aérienne et terrestre par l'usage du Global Positionning System (GPS), l'implantation d'un marché par rapport à la localisation des consommateurs, le recensement de la population et les élections (Paegelow, 1995, Souiah et Toutain, 2005).

Enfin, au niveau planétaire, le SIG, en utilisant les données de la télédétection, étudie l'écosystème planétaire et ses dysfonctionnements ou ses variations : déforestation, réchauffement atmosphérique, désertification, stérilisation du sol, etc. (Paegelow, 1995).

En définitive, le SIG est un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées. Il désigne la base de données et le logiciel qui en permet le traitement. Il sert d'outil d'aide à la décision en matière d'aménagement (Pornon, 1992 et 1998 ; Laurini et Milleret-Raffort, 1993 et Pantazis et Donnay, 1996). Le SIG sert d'outil de base pour fédérer plusieurs données disparates autour d'un thème commun. En ce sens, il s'avère un catalyseur de la pluridisciplinarité, comme le reconnaît Sandron (2001).

Le SIG aboutit à la prise de décision en aménagement du territoire. C'est en cela que consiste son but : fournir aux décideurs les éléments

[illegible]

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99

D. ENTREGA DE LAS ACTIVIDADES DE LOS ALUMNOS

EVERY EXPLORED APOCALYPSE

SUBJECTS



Ainsi localisées, les hautes terres de Lubero constituent une frange étroite entre le lac Id Amin, appelé encore Edward, à l'Est, et, à l'Ouest, le plateau entourant la cuvette centrale de la RDC. Elles font partie de la chaîne des Monts Mitumba, qui longent tout l'Est de la RDC, de la Province de Tanganyika jusqu'à celle de l'Ituri.

Un zoom sur les hautes terres donne le plan topographique suivant, qui servira de fond pour les cartes thématiques élaborées par notre SIG :

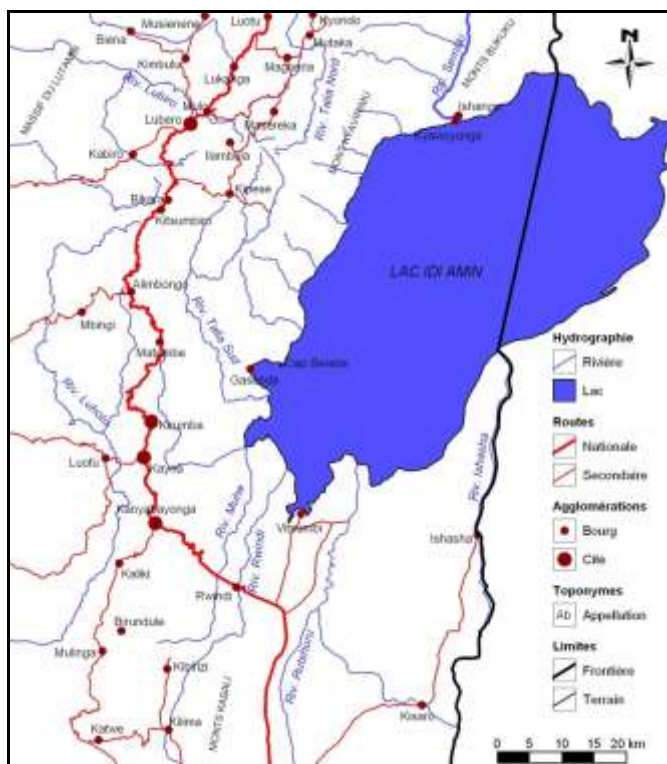


Figure 2 : Terrain de notre étude (Département des Mines, 1981a et Kakule Vyakuno 2006).

2.2. Les matériels utilisés

Pour réaliser notre travail, nous avons utilisé un ordinateur de bureau. Parmi les logiciels SIG connus, nous avons choisi GeoConcept 5.5. Celui-ci en effet permet d'exécuter tous les traitements numériques et a surtout la particularité de recevoir les données introduites par le moyen d'une table à digitaliser. Effectivement, le troisième matériel utilisé, c'est la table à digitaliser. Celle-ci est une plaque magnétisée d'environ 1 m² de

surface rattachée à l'ordinateur par un câble. Elle est accompagnée d'une souris munie d'une loupe avec un viseur en croix, également rattachée à l'ordinateur par un câble. En plus du logiciel Geoconcept 5.5, nous avons utilisé le logiciel Idrisi 32 pour le traitement des images satellitaires.

Avec ces matériels relevant du hardware et du software, nous avons digitalisé les cartes que voici : la carte géologique de Lubero (Département des Mines, 1981a), qui nous a servi de fond topographique pour le géoréférencement des autres cartes et des images satellitaires, la carte pédologique du Kivu (Pecrot, 1957-1958a), l'image satellitaire multibande SPOT de Butembo du 2 Mars 1992, l'image satellitaire panchromatique SPOT de Lubero du 8 Août 1996 et enfin l'image satellitaire multibande Landsat TM du 7 Août 1987 du territoire de Lubero.

Nous avons enfin utilisé les données chiffrées de la population et des stations météorologiques du terrain d'étude puisées dans les archives de l'administration locale et des centres agronomiques pour générer les autres cartes.

La mobilisation de tous ces matériels pour créer notre base de données et générer nos cartes est décrite dans le point suivant.

2.3. LA METHODE SUIVIE

Les données textuelles, numériques et cartographiques que nous avons recueillies ont été regroupées dans cinq variables de l'érosion que nous avons jugées les plus représentatives de tous les facteurs de ce phénomène : la pente, la susceptibilité du sol, l'agressivité de la pluie, le recouvrement végétal et la densité démographique. Ces variables ont été traduites en cartes numériques et ont été croisées selon la méthode d'un SIG.

Représentant les variables d'érosion, toutes nos cartes numérisées ont été générées par le logiciel Geoconcept 5.5 en procédant à la digitalisation par l'usage de la table à digitaliser. La digitalisation permet de récupérer la géométrie des objets disposés sur un plan ou une carte préexistante. Elle consiste à faire évoluer un curseur sur un plan posé sur la table à digitaliser et préalablement calé en coordonnées. Dans le logiciel Geoconcept 5.5, ce géoréférencement s'appelle « calage Helmert ». La table est réceptive aux signaux électriques émis par le curseur. Elle peut localiser ces signaux sur le plan géoréférencé avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre (Rouet, 1991). En suivant

cette procédure, nous avons digitalisé les cartes plus haut citées en procédant par couche vectorielle : les points, les lignes et les surfaces.

Le fond topographique des cartes est commun et correspond aux limites longitudinales et latitudinales que nous avons précisées plus haut en délimitant notre terrain d'étude. Celui-ci étant situé juste au Sud de l'Equateur, notre fond topographique, qui est la carte géologique de Lubero (Département des Mines, 1981a), est géoréférencé dans le système de référence UTM 35 Sud. Le minimum des coordonnées x est 720 000, leur maximum est 834 000. Pour les y, le minimum est 9 889 000, tandis que le maximum est 10 000 000. Notre but n'étant pas de calculer la quantité des terres érodées, mais d'évaluer le risque d'érosion, dans notre SIG, les valeurs numériques que nous avons données aux variables de l'érosion expriment simplement les différents niveaux de danger d'érosion que représente chaque facteur pris à part. Ce sont donc des valeurs relatives et non absolues. Il en est de même des qualificatifs que nous leur avons assignés : très fort, fort, moyen, faible et très faible.

De toutes les cartes dessinées, la procédure de génération est exposée dans les lignes qui suivent.

3. LES RESULTATS OBTENUS

Par digitalisation et traitement des images satellitaires, nous avons obtenu cinq cartes représentant les facteurs de l'érosion et une carte du risque d'érosion déduite des cinq premières.

3.1. L'ÉLABORATION DES CARTES NUMÉRIQUES

3.1.1. La carte des pentes.

La première carte que nous avons dessinée, c'est celle des pentes. Elle est une copie de la carte des sols de Pecrot (1957-1958a), qui est de type morpho-pédologique. Cette dernière représente en effet chaque type de sol associé à la topographie. La topographie coïncide avec la valeur de la pente. Etant donné que l'érosion croît avec la déclivité de la pente (Salomon, 2001), aux pentes faibles nous avons attribué des valeurs numériques basses et aux fortes des valeurs hautes suivant ce tableau :

Tableau 1 : Classe des pentes (Pecrot, 1957-1958a et Pecrot et Léonard, 1960).

Topographie	Valeur de la pente en %	Valeur numérique	Qualificatif
Plane	[0 – 3[	1	Très faible
Ondulée	[3 – 10[	2	Faible
Vallonnée	[10 – 20[	3	Moyenne
Accidentée	[20 – 50[	4	Forte
Escarpée	[50 et plus]	5	Très forte

3.1.2. La carte de la susceptibilité des sols à l'érosion.

La deuxième carte que nous avons établie concerne une propriété du sol ayant un rapport avec l'érosion, la texture.

La texture du sol, combinée à la matière organique, assure la stabilité structurale du sol et sa résistance à l'érosion. En effet, le potentiel érosif d'un sol dépend largement de sa granulométrie, du pourcentage et de la nature de ses argiles, et de sa teneur en matière organique (Veyret et Wicherek, 1992). Ces deux propriétés jouent un rôle dans la cohésion et la stabilité structurale des sols. La stabilité structurale se définit comme la plus ou moins grande capacité de résistance aux actions extérieures, naturelles ou anthropiques, par la permanence ou la non-permanence de la forme de l'agrégation et de la porosité qui lui est associée (Riou, 1990).

Concernant la texture du sol, on constate que les sols argileux sont stables alors que les sols limoneux ou sableux sont instables.

Ces diverses facettes de la stabilité due à la texture sont modifiées par la teneur en matière organique présente dans le sol. En effet, la matière organique, comme l'argile colloïdale, joue le rôle de ciment pour les agrégats. Lorsque le taux de matière organique est suffisant par rapport au taux d'argile, l'humus peut enrober l'ensemble des particules d'argile, les stabiliser à l'état floculé et augmenter la cohésion (Chamayou et Legros, 1989).

Ainsi, les sols riches en humus et en argile offrent la meilleure résistance à l'érosion en raison de leur forte stabilité structurale (Neboit, 1991 ; Campy et Macaire, 2003 et Valadas, 2004). Les sols pauvres en argile, donc ayant une stabilité d'origine texturale médiocre, peuvent acquérir une meilleure stabilité avec l'augmentation de la teneur en matière organique (Angélieume, 1996). Cette teneur est évaluée à partir du carbone par la formule $C \times 1,72$ (Chamayou et Legros, 1989).

Les autres éléments flocculants intervenant dans la stabilité de la structure du sol, ce sont les oxydes et les hydroxydes de fer, l'aluminium et le calcium.

Ne possédant pas la teneur en matière organique de toutes les catégories des sols des hautes terres de Lubero, nous avons évalué leur susceptibilité à l'érosion uniquement à partir de leur granulométrie. Pour ce faire, nous nous sommes basé sur les analyses physiques contenues dans la notice explicative de la carte morpho-pédologique de Pecrot et Léonard (1960).

Ces auteurs regroupent les argiles (0 – 2 μm) et les limons fins (2 – 20 μm) en une seule classe dite d'« éléments fins » (0 – 20 μm), les limons grossiers (20 – 50 μm) et les sables fins (50 – 250 μm) en une autre appelée d'« éléments intermédiaires » (20 – 250 μm) et enfin les sables grossiers (250 – 2 000 μm) dans la classe des « éléments grossiers » (250 – 2 000 μm). Leur regroupement est donc différent du classique (Duchaufour, 1997), auquel nous sommes habitués. Ils obtiennent quatre classes texturales ou types de sols sur notre terrain d'étude : les sols argileux, argilo-sableux fins, argilo-sableux et limono-sableux. A ces classes, nous ajoutons la catégorie des lithosols, dont la granulométrie n'est malheureusement pas définie, et celle des sols argilo-sableux sur produits volcaniques, dont la granulométrie est donnée par Jongen (1970).

En tenant compte du rôle que joue la texture dans la stabilité structurale, nous avons hiérarchisé nos classes texturales selon leur degré de résistance à l'érosion. L'ordre de cette hiérarchie est inversé en considérant la susceptibilité à l'érosion car les sols les plus stables sont les moins susceptibles et, inversement, les sols les plus instables sont les plus susceptibles. Nous obtenons ainsi le tableau suivant :

Tableau 2 : Classification des sols selon leur stabilité d'origine texturale.

Classe texturale ou type de sol	Teneur en éléments fins et grossiers en %		Stabilité d'origine texturale	Susceptibilité à l'érosion	Valeur numérique
	0 – 20 μm	250 – 2000 μm			
Argileux	50 – 70	<10	Très forte	Très faible	1
Argilo-sableux fins	50 ou 60 – 80	>10	Forte	Faible	2
Argilo-sableux	40 – 60	> 20			
Lithosols			Moyenne	Moyenne	3
Argilo-sableux sur produits volcaniques	30 – 50	< 30	Faible	Forte	4
Limono-sableux	20 – 35	10 – 40	Très faible	Très forte	5

Dans ce tableau manquent les chiffres des éléments intermédiaires (20 – 250 μm) et ceux des catégories granulométriques des lithosols à cause des lacunes dans les données. Aux lithosols nous donnons la valeur 3 parce que leur charge graveleuse, bien que favorable à l'imperméabilisation du sol et au ravinement, empêche la battance, limite le ruissellement grâce à la rugosité qu'elle offre, facilite l'infiltration dans une certaine mesure et donne plus de résistance au sol par rapport aux sols argilo-sableux sur produits volcaniques et aux sols limono-sableux (Neboit, 1991 et Mietton, 1998). Les sols sur produits volcaniques sont réputés pour leur forte vulnérabilité (Wils, Caraël et Tondeur, 1986 ; Rishirumuhirwa, 1994 et Salomon, 2001).

Ainsi hiérarchisés, les sols sont représentés sur la carte de la susceptibilité à l'érosion. Cette carte, comme celle des pentes, est superposable à la carte morpho-pédologique de Pecrot et Léonard (1957-1958a) pour les contours de chaque catégorie de sol.

3.1.3. La carte du potentiel érosif du climat.

Le potentiel érosif du climat est exprimé par l'indice de Fournier. Cet indice se déduit des hauteurs des précipitations. Il s'énonce comme suit :

$$K = \frac{p^2}{P}$$

Dans cette formule, K est la nocivité du climat, que l'on peut qualifier de « capacité érosive du climat » ou de « potentiel d'érosion », p est la moyenne pluviométrique du mois le plus arrosé et P le total annuel des précipitations (Péguy, 1970 et Petit, 1990).

L'indice de Fournier est généralement corrélé à la dégradation spécifique d'un bassin versant. Calculé avec les données pluviométriques de notre terrain d'étude, il permet d'y distinguer cinq niveaux de nocivité climatique différents regroupant des valeurs s'étalant de 10 à 30. Le tableau suivant reprend les valeurs numériques assignées à ces cinq niveaux pour constituer notre carte du potentiel érosif du climat :

Tableau 3 : Valeurs du potentiel érosif du climat selon l'indice de Fournier.

Valeurs de l'indice de Fournier	Compte numérique	Qualificatif
[10 – 14[	1	Très faible
[14 – 18[	2	Faible
[18 – 22[	3	Moyen
[22 – 26]	4	Fort
[26 – 30]	5	Très fort

3.1.4. La carte des densités humaines.

Pour intégrer le facteur humain dans notre SIG, nous avons choisi de le représenter sous la forme de la densité humaine parce que celle-ci est facilement quantifiable. Les termes « densité humaine » expriment toutes les activités anthropiques qui ont un rapport avec le milieu physique. Parmi elles, nous intégrons la différence temporelle dans l'anthropisation de l'espace, les pratiques culturelles et les modes de mise en valeur des milieux. Ainsi, la densité humaine traduit l'influence que l'homme a sur la dégradation du milieu physique. En effet, plus la densité humaine est forte, plus le risque de destruction du milieu est important. Aux faibles densités correspondent un risque moindre.

Pour réaliser notre carte des densités, nous avons pris comme fond un découpage administratif à échelle suffisamment grande pour marquer la disparité du territoire, la division en Groupements. Nous avons calculé ces densités avec les chiffres de 2003, qui reflètent la situation actuelle (*Registres de l'état civil des Territoires de Beni et Lubero*). Mais, étant donné que notre terrain d'étude embrasse le Nord-Est du Territoire de Walikale, précisément celui de la Chefferie de Wanianga, c'est la population de cette dernière qui est représentée dans le Sud-Ouest de la carte. De la population de Wanianga, nous avons utilisé les chiffres de 1984 et 1998 (Vulambo, 1996 et 2000) pour faire une projection sur 2003 en utilisant la formule prévue à cet effet en Démographie (Rollet, 2003 et Souiah et Toutain, 2005). Cette formule s'énonce comme suit :

$$P_t = P_0(1 + r)^n$$

P_t est la population à l'instant t , P_0 est la population initiale, r est le taux d'accroissement annuel moyen et n le nombre d'années entre les instants 0 et t . Pour calculer r , on utilise cette formule :

$$r = \sqrt[n]{\frac{P_t}{P_0}} - 1$$

Ainsi, pour déterminer le taux d'accroissement annuel moyen de la population de Wanianga, nous avons considéré les 14 ans d'intervalle séparant 1984 de 1998 en utilisant cette formule :

$$tx = \sqrt[14]{\frac{Pop.1998}{Pop.1984}} - 1$$

Une fois ce taux connu, nous avons projeté la population de 1998 sur 2003, c'est-à-dire sur un intervalle de 5 ans, en suivant cette formule :

$$Pop.2003 = Pop.1998(1 + tx)^5$$

Une fois cette projection faite, nous avons calculé les densités de tous les Groupements, puis les avons regroupées en classes et numérisées suivant le tableau ci-après :

Tableau 4 : Numérisation des densités démographiques.		
Densité en hab/ km ²	Qualificatif	Valeur numérique
[0 – 2[	Très faible	1
[2 – 50[	Faible	2
[50 – 100[	Moyenne	3
[100 – 150[	Forte	4
[150 et plus]	Très forte	5

Dans le souci de respecter les disparités locales, nous avons tenu compte du Parc National des Virunga, quasi vide d'hommes, situé à l'Est. Pour cette raison, nous avons tronqué l'étendue des groupements orientaux par une ligne matérialisant la limite du Parc.

3.1.5. La carte de la dégradation de la végétation.

Un des facteurs classiques de l'érosion des sols, c'est la couverture végétale. Celle-ci influe sur l'érosion selon son niveau de dégradation. Pour cette raison, nous avons réalisé une carte de la dégradation du couvert végétal. Cette carte, qui reflète en même temps l'occupation des sols, permet d'associer indifféremment cultures et végétation spontanée.

Pour l'établir, nous avons recouru à l'imagerie satellitaire, par manque de photographies aériennes récentes. Ce recours à la télédétection dans le SIG est justifié par le fait que des images satellitaires on extrait des informations utiles au SIG (Robin, 2002). En plus, comme le reconnaissent certains chercheurs, « l'utilisation des données de télédétection pour évaluer des informations sur de grands territoires est plus objective et efficace que la compilation des données de plusieurs efforts individuels » (Anys, Bonn et Merzouk (1991).

De nos images satellitaires, nous avons fait des traitements avec le logiciel Idrisi 32. Nous les avons d'abord géoréférencées à partir des points d'amer choisies sur les scènes et sur les cartes géologiques de Beni et Lubero (Département des Mines, 1981a et b). Le système de référence variait d'une image à l'autre : UTM 35 Nord pour la multibande SPOT, qui est à cheval sur la ligne de l'Equateur, et UTM 35 Sud pour la multibande LANDSAT TM et la panchromatique SPOT, situées juste au Sud de l'Equateur. Ces géoréférencements ont rendu nos images

superposables sur notre fond topographique, géoréférencé également avec le même système de référence et les mêmes coordonnées x et y.

Pour améliorer la visibilité de l'image panchromatique SPOT, très floue, nous avons procédé à l'étalement de sa dynamique. Ses valeurs radiométriques, en dehors de celles qui sont très basses, étant concentrées entre 50 et 110, nous les avons étalées sur 256 niveaux de gris, en réduisant à 0 les valeurs inférieures ou égales à 50 et en rehaussant jusqu'à 255 les valeurs supérieures ou égales à 110. Ainsi étalée, l'image permet de visualiser, comme une photographie aérienne classique, les différents types d'utilisation du sol sur le terrain d'étude : bois et forêts en gris sombre, savanes, brousses ou cultures en gris moyen, sols nus, roches dénudées et agglomérations en gris clair. Ainsi, l'image panchromatique nous permet de voir les différents niveaux de recouvrement végétal du sol, objectif de notre carte.

Pour les deux images restantes, toutes des multibandes, nous avons fait des classifications pour obtenir l'occupation des sols. Ce thème nous renseigne déjà sur l'état de la couverture végétal. Mais le traitement le plus important pour notre SIG a été le calcul du *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

De cet indice, le principe repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande rouge R et réfléchit beaucoup dans la bande proche infra-rouge PIR. De là est née sa formule, bien connue :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Avec les canaux de SPOT, cela revient à $\frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$

Avec ceux de LANDSAT TM, cela équivaut à $\frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$

La division par la somme des deux bandes tend à réduire les effets d'éclairement ou de pente. Elle permet ainsi une comparaison de la couverture végétale en relative indépendance du relief. Cela est important pour notre terrain d'étude, qui est montagneux.

Le NDVI n'est pas corrélé linéairement à la densité de la biomasse. Il présente une relation de type exponentiel avec la densité de la végétation verte et sature en présence d'une épaisse couverture végétale, de telle sorte que sa sensibilité est intéressante surtout pour les

couverts peu denses (Caloz et Collet, 2001). Le NDVI reste l'indice de référence pour connaître l'état de la végétation.

Calculé, le NDVI de nos scènes présente des valeurs numériques qui s'étalent respectivement de $-0,07$ à $0,56$ pour l'image SPOT et de $-0,35$ à 1 pour l'image LANDSAT TM. Ces résultats rentrent dans la fourchette théorique du NDVI, qui va de -1 à $+1$.

Des deux nouvelles images ainsi obtenues, seule l'image LANDSAT TM sert à notre SIG, la première étant utilisée comme terme de comparaison. Pour intégrer cette image LANDSAT TM dans le SIG, nous en avons discrétisé les valeurs afin de produire une image classifiée. Cette dernière a servi à connaître les différents niveaux du taux de recouvrement du sol par la végétation. La détermination de ce taux est l'un des indicateurs fondamentaux qui servent à évaluer le degré de protection des sols contre l'érosion (Bonn, 1996). Notre souci étant justement la mise en relation entre le taux de recouvrement du sol par la végétation et le risque d'érosion, nous avons transformé l'image discrétisée du NDVI en une image exprimant plutôt le taux de dégradation du couvert végétal. Pour ce faire, il nous a suffi d'inverser les valeurs du NDVI. Ainsi, les valeurs fortes du NDVI, qui expriment une bonne couverture végétale, représentent un faible degré de dégradation et donc un faible risque d'érosion. De même, les valeurs faibles du NDVI, qui expriment un mauvais recouvrement végétal, trahissent un fort niveau de dégradation et donc un grand risque d'érosion.

L'image de dégradation du couvert végétal ainsi produite par le logiciel Idrisi a été digitalisée et introduite en mode vectoriel dans la base de données gérée par Geoconcept. Ainsi, elle a été transformée en une carte numérique superposable sur les précédentes. Comme notre image satellitaire ne s'étend pas plus à l'Est du Kyavirimu et plus au Sud du cap Bereze, nous avons évalué nous-même le taux de dégradation de la couverture végétale du Nord-Est et de tout le Sud de notre terrain d'étude. Pour ce faire, nous avons recouru à nos observations directes faites d'avion et à la carte de la végétation. Par analogie avec les valeurs du NDVI, nous avons pu évaluer approximativement le niveau de dégradation des types de végétation présents dans ces zones.

Ainsi, à partir du NDVI de l'image LANDSAT TM, de la carte de la végétation et de nos observations, nous avons produit la carte de la dégradation du couvert végétal avec 5 niveaux numérisés, hormis le lac. Le tableau ci-après résume ces opérations :

Tableau 5 : Correspondance entre degré de recouvrement végétal et niveau de dégradation de la végétation

Valeur du NDVI	Discrétisation de l' image NDVI	Qualificatif	Discrétisation de l' image de la dégradation et valeur numérique de la carte de la dégradation	Qualificatif
[-0,35 - -0,18[	1	Très faible	5	Très forte
[-0,18 - -0,01[	2	Faible	4	Forte
[-0,01 – 0,24[	3	Moyen	3	Moyenne
[0,24 – 0,32[	4	Fort	2	Faible
[0,32 – 1]	5	Très fort	1	Très faible
-	-	Lac	-	Lac

Une fois établies, les cinq cartes numériques représentant les facteurs de l'érosion ont été multipliées pour produire une carte de synthèse montrant les degrés du risque d'érosion.

3.2. LE CROISEMENT DES CARTES NUMERIQUES

Pour unifier nos différentes variables de l'érosion, nous avons multiplié les cartes correspondantes afin d'obtenir la carte du risque d'érosion. Notre méthode, en discrétisant les variables et en croisant les différentes couches d'informations qu'elles représentent, correspond à l'esprit d'un SIG (Rouet, 1991, Pornon, 1992 et 1998 ; Laurini et Milleret-Raffort, 1993 ; Pantazis et Donnay, 1996 et Robin, 2002). Comme nous l'avons vu, les variables gardent le même poids dans la numérisation et puis au moment de la multiplication. Toutes ces opérations sont représentées sur le schéma ci-après :

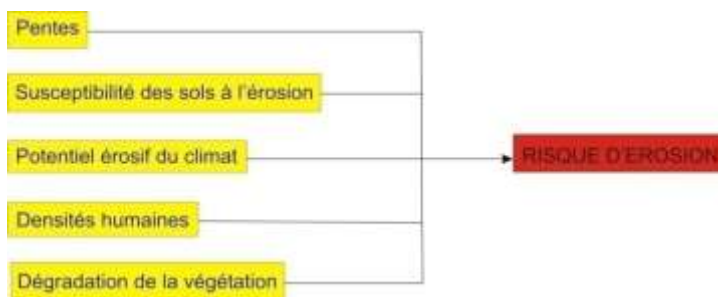


Figure 3 : Organigramme du SIG.

Pour des raisons de clarté, à l'instar des cinq cartes de base, la carte du risque a été aussi hiérarchisée selon le tableau suivant :

Tableau 6 : Les différents niveaux du risque d'érosion.

Valeur du produit des facteurs de l'érosion	Valeur de la classification	Qualificatif
[1 – 48[	1	Très faible
[48 – 144[	2	Faible
[144 – 336[	3	Moyen
[336 – 720[	4	Fort
[720 – 1500]	5	Très fort

Les cartes des facteurs et du risque d'érosion ainsi élaborés sont présentées et commentées dans le point suivant.

3.3. Les cartes générées

À chaque facteur d'érosion correspond une carte. Le risque d'érosion comme synthèse de tous les facteurs est représenté lui-même par une carte. Toutes ces représentations cartographiques sont commentées dans les lignes qui suivent.

3.3.1. La carte des pentes.

Voici la carte des pentes des hautes terres de Lubero :



Figure 4 : Carte des pentes (Kakule Vyakuno, 2006).

Sur cette carte, les pentes très faibles, comprises entre 0 et 3 %, et portant la valeur numérique 1, caractérisent les lieux déprimés, le fossé tectonique et les dépressions situées à l'intérieur des hautes terres. Elles

ont un potentiel érosif très faible. Les pentes faibles, allant de 3 à 10 % et ayant la valeur numérique 2, sont situées dans la plaine de Luofu, au Nord et autour de Birundule. Elles favorisent faiblement l'érosion. Les pentes moyennes, de valeur numérique 3, sont comprises entre 10 et 20 %. Elles sont de préférence situées dans les hautes terres tièdes à l'Ouest de la route Lubero-Kanyabayonga et à l'Est de Kayna, mais avec une incursion notable dans les hautes terres fraîches autour de Kipese. Elles sont en îlots au Sud-Est du fossé tectonique. Leur potentiel érosif est moyen. Par contre, les pentes fortes, ayant une déclivité allant de 20 à 50 %, ont un potentiel érosif fort et donc la valeur numérique 4. Elles sont très représentées dans les hautes terres fraîches entre Kyondo et Ilambula, puis à l'Est de Matembe, et dans les hautes terres tièdes sur le massif du Lutambi, à l'Ouest de Lubero, autour de la plaine de Luofu, au Sud de Kanyabayonga et à l'Ouest de Katwe. Enfin, les pentes très raides, de 50 % et plus, à valeur numérique 5 et au potentiel érosif très fort, sont l'apanage des escarpements et des monts Bukuku et Kasali.

3.3.2. *La carte de la susceptibilité des sols à l'érosion.*

La carte de la susceptibilité des sols à l'érosion se présente comme suit :

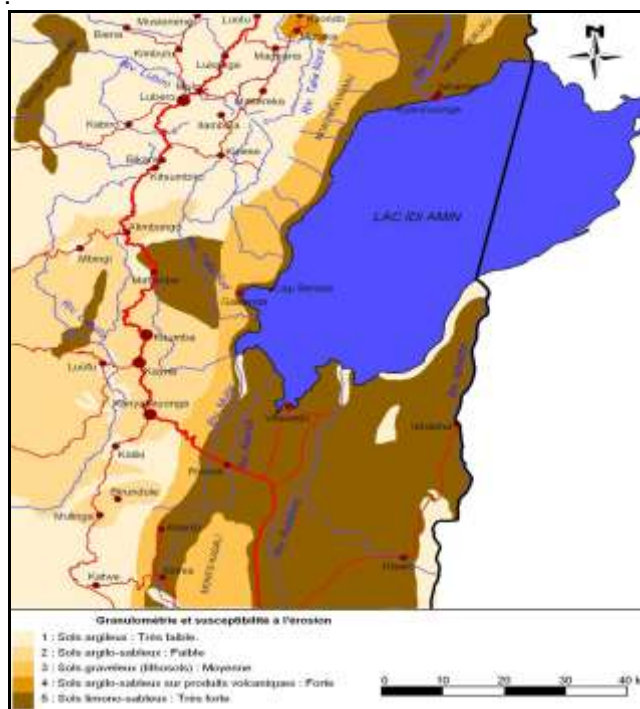


Figure 5 : Carte de la susceptibilité des sols à l'érosion (Kakule Vyakuno, 2006).

Sont très peu susceptibles à l'érosion les sols alluviaux argileux hydromorphes, les kaolisols argileux à horizon A₁ prononcé, les kaolisols argileux à horizon A₁ sombre et les kaolisols argileux sur matériaux ferrisoliques et à horizon A₁ autrefois brûlé. Ces sols, riches en argile et en matière organique, ont une bonne stabilité structurale et offrent une excellente résistance à l'érosion. Ils sont plastiques, collent au pied et sont de bonnes terres à briques. Toutefois, en cas d'une forte humectation, ils fluent. Ils ont la valeur numérique 1 dans notre SIG. Ils sont présents dans tous les étages altitudinaux. Les sols alluviaux argileux hydromorphes sont, en îlots, dans le fossé tectonique et dans toutes les dépressions des hautes terres. Les kaolisols argileux occupent, quant à eux, toutes les hautes terres fraîches et toutes les parties septentrionale et méridionale des hautes terres tièdes. Seuls deux îlots de terre situés au massif du Lutambi et au Sud de Kyondo n'en font pas partie.

Les sols peu susceptibles à l'érosion, et donc de valeur numérique 2, ce sont les kaolisols argilo-sableux fins à horizon A₁ sombre, qui s'étendent d'Alimbongo à Kanyabayonga, puis à l'Ouest de Luofu, les kaolisols argilo-sableux sur matériaux ferrisoliques et à horizon A₁ prononcé, que l'on signale au Sud-Ouest de Mbingi, le long de la Luholu, et tous les kaolisols argilo-sableux sur matériaux ferrisoliques et à horizon A₁ autrefois brûlé, situés dans la plaine de Luofu et sur les montagnes qui l'entourent.

Les sols moyennement susceptibles à l'érosion, portant la valeur numérique 3, ce sont tous les lithosols, situés sur les escarpements et sur les monts Bukuku et Kasali.

Les sols fortement susceptibles à l'érosion ont la valeur numérique 4. Ils héritent leur vulnérabilité de leur instabilité d'origine texturale. Ce sont les sols bruns à allophanes sur produits volcaniques, situés uniquement au Sud de Kyondo en hautes terres fraîches.

Enfin, nous avons les sols très susceptibles à l'érosion, ayant la valeur numérique 5. Leur très forte vulnérabilité est imputable à leur texture grossière. Ils sont très ramifiés. Parmi eux se rangent d'abord les sols alluviaux limono-sableux du fossé tectonique. Viennent ensuite les kaolisols limono-sableux à horizon A₁ sombre situés à l'Est de Matembe dans les hautes terres fraîches. Finalement, leur dernière ramification se manifeste dans les kaolisols limono-sableux sur matériaux ferrisoliques et à horizon A₁ prononcé, rencontrés dans les hautes terres tièdes sur le Lutambi et au Nord de Luofu.

3.3.3. La carte du potentiel érosif du climat.

La carte du potentiel érosif du climat a l'aspect que voici :

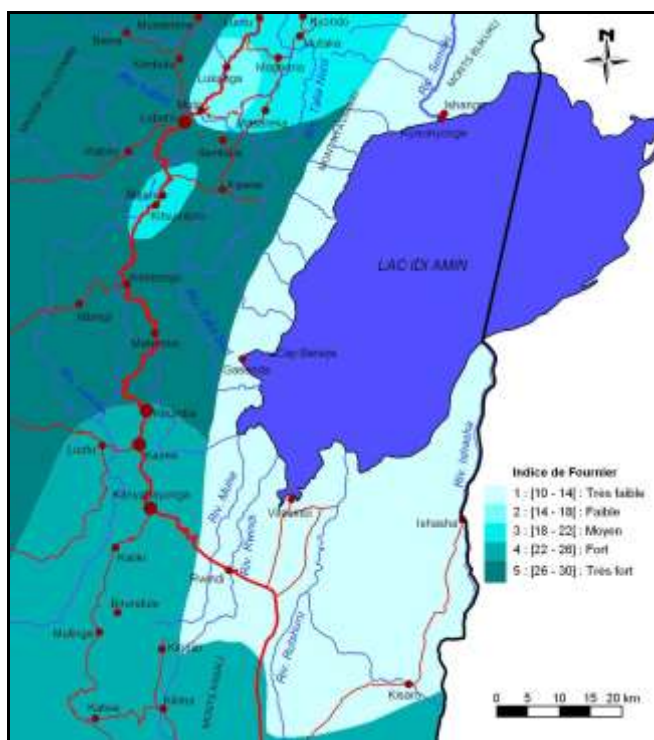


Figure 6 : La carte du potentiel érosif du climat (Kakule Vyakuno, 2006).

Les hautes terres de Lubero se diversifient non seulement selon les pentes et la granulométrie des sols, mais aussi suivant les valeurs de l'agressivité climatique calculée en utilisant la formule de Fournier. Ainsi, sur notre carte du potentiel érosif du climat (figure 52), trouvons-nous cinq niveaux. Le premier, de valeur numérique 1, correspond à une très faible agressivité, comprise entre 10 et 14. Nous le retrouvons dans le fossé tectonique et sur les escarpements. Le niveau faible, de valeur 2, allant de 14 à 18, se situe entre Mulo et Lukanga. Le niveau moyen, ayant la valeur 3 et les chiffres compris entre 18 et 22, se retrouve dans le secteur Nord, entre Kyondo et Masereka, et, en îlot, autour de Bikara et Kitsumbiro. La forte agressivité, de valeur 4, dont l'indice varie de 22 à 26, se retrouve dans tout le Sud des hautes terres tièdes, de Kirumba à Katwe, et dans tout le Sud du fossé tectonique. En dehors de ces périmètres délimités, le reste des hautes terres fraîches et tièdes a une très forte agressivité, codée 5, dont l'indice va de 26 à 30.

3.3.4. La carte des densités humaines.

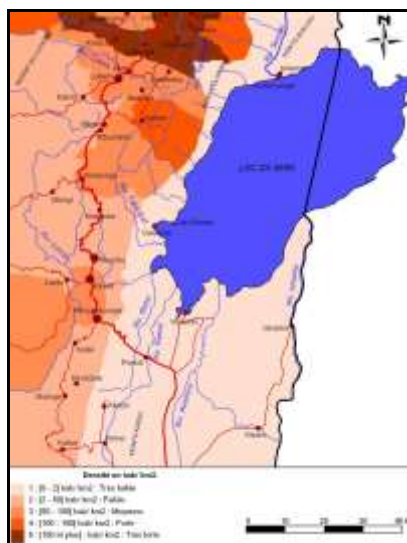


Figure 7 : La carte des densités humaines(Kakule Vyakuno, 2006).

Sur cette carte, les très faibles densités, comprises entre 0 et 2 hab/ km² et de valeur numérique 1, correspondent aux zones peu habitées du fossé tectonique, du mont Kyavirimu et des escarpements.

Au-dessus de cette valeur, les faibles densités, allant de 2 à 50 hab/ km² et ayant la valeur numérique 2, s'enregistrent dans la Chefferie de Wanianga au Sud de Kanyabayonga. Depuis des décennies, cette contrée connaît une occupation humaine lâche à cause d'une pluviosité peu élevée et d'une saison sèche bien marquée (Pécrot et Léonard, 1960). La même valeur numérique se retrouve plus au Nord dans les Groupements de Tama, Musindi et Mbulie. Cette dernière entité renferme de vastes étendues inoccupées à l'Ouest de Lubero, dans la direction de Kasuo. Des lieux similaires quasi vides d'hommes sont également perceptibles dans le Luongo entre Lubero et Kimbulu.

Plus peuplés que ces zones, les Groupements à densité moyenne, allant de 50 à 100 hab/ km² et portant la valeur numérique 3, sont ceux d'Itala, de Hutwe et Buhimba, de Luongo et de Ngulo et Manzia. Pour le cas précis d'Itala, ce sont les agglomérations de Kayna et Kanyabayonga qui assurent ce fort coefficient d'occupation humaine de l'espace (Jones et Egli, 1984).

C'est en s'élevant dans les Groupements des hautes terres fraîches que l'on commence à trouver des densités encore plus importantes. Ainsi, les Groupements de Bulengya et Masiki-Vahiana ont-ils une densité ayant 100 à 150 hab/ km² et correspondant à la valeur numérique 4. Au-dessus d'eux se situent les très fortes densités, supérieures à 150 hab/ km². Celles-ci, de valeur numérique 5, se retrouvent dans les Groupements de Bukenye, de Buyora et de Masiki-Kalonge.

Comme on peut le noter, un tel contraste de peuplement au sein des zones ayant presque la même altitude témoigne de la complexité des facteurs explicatifs du mode d'occupation humaine de l'espace montagnard.

3.3.5. La carte de la dégradation de la végétation.



Figure 8 : La carte de la dégradation de la végétation (Kakule Vyakuno, 2006).

D'après cette carte, les très fortes dégradations, de valeur numérique 5 sont situées à Kipese et en îlots sur les escarpements. Les fortes dégradations, de valeur 4, occupent de vastes plages dans la région maraîchère entre Kyondo et Magheria, autour de Masereka et de Kipese, sur les escarpements à l'Est de Kyondo et en îlots sur les pentes qui descendent vers le lac Idi Amin. Ces zones sont enserrées par de vastes étendues d'une dégradation de niveau 3, occupant toutes les hautes terres fraîches à l'Est de Lukanga, Mulo, Lubero et Bikara, autour de Mbingi et Alimbongo, vers Matembe et sur les escarpements. La même valeur occupe les hautes terres tièdes sur la ligne de crête de la dorsale, de Kirumba au Sud de Kanyabayonga, autour de Luofu et sur les monts Kasali. Le reste de la carte est globalement caractérisé par une faible dégradation, celle de niveau 2.

Cette valeur s'étend à tout le fossé tectonique, au rebord oriental des hautes terres fraîches et à toutes les hautes terres tièdes dans la partie Ouest de la carte. Toutefois, au milieu de ces zones émergent des îlots de très faible dégradation, de valeur 1, que l'on rencontre dans les hautes terres tièdes, sur les flancs du Kyavirimu, au sommet et au Sud des monts Kasali et au Sud-Est du lac Idi-Amin.

3.3.6. *La carte du risque d'érosion.*

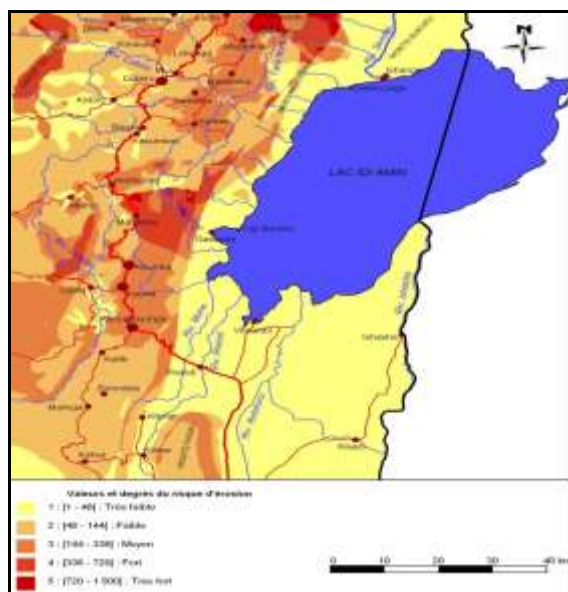


Figure 9: La carte du risque d'érosion (Kakule Vyakuno, 2006).

A l'observation de cette carte, nous constatons que le très fort risque, ayant le niveau 5 et des valeurs allant de 720 à 1 500, se manifeste dans des îlots autour et à l'Est de Kyondo et au Nord de Matembe. Visiblement, ces valeurs très élevées sont dues aux fortes ou très fortes pentes, aux moyennes, fortes ou très fortes susceptibilités des sols à l'érosion, aux fortes ou très fortes densités humaines, à la moyenne ou forte dégradation du couvert végétal et au moyen ou très fort potentiel érosif du climat.

Le fort risque d'érosion, de niveau 4 et correspondant aux valeurs 336–720, se trouve au Nord du Kyavirimu, sur le massif du Lutambi, au Nord de Luofu, sur les collines gréseuses à l'Est de Matembe et dans quelques îlots sur les escarpements au Sud-Est de Kipese. Dans ce cas, ce sont surtout les fortes ou très fortes pentes, les moyennes ou très fortes susceptibilités des sols à l'érosion et le moyen ou très fort potentiel

érosif du climat qui déterminent les valeurs élevées du risque, alors que les densités humaines et la dégradation de la végétation ont des poids variés selon les lieux.

Le risque d'érosion de niveau moyen, de valeur numérique 3 et affichant les valeurs allant de 144 à 336, est visible sur les escarpements, comme une traînée, sur les pentes des monts Kasali, entre Kipese et Luotu, de Kimbulu à Biena, dans le Sud du Lutambi, autour d'Alimbongo et de Mbingi, au Nord et au Sud-Ouest de Luofu et de Kirumba à Kanyabayonga. Visiblement, cette valeur, assez élevée dans notre échelle, est imputable aux moyennes ou fortes pentes, aux moyennes, fortes ou très fortes densités humaines et au fort ou très fort degré de destruction de la couverture végétale pour la région maraîchère, comprise entre Kipese et Luotu. Ailleurs, ce sont les moyennes ou fortes pentes et le fort ou très fort potentiel érosif du climat qui en sont à la base, alors que la densité humaine et la dégradation du couvert végétal ont des valeurs et des influences variables selon les lieux.

Le risque d'érosion faible, de niveau 2 et ayant les valeurs comprises entre 48 et 144, se retrouve au sommet des Kasali, dans la frange orientale et la partie méridionale des hautes terres fraîches, dans les hautes terres tièdes autour de Musienene, à l'Ouest du Lutambi, autour de Lukanga, de Kimbulu à Mbingi, dans la plaine de Luofu et de Kaliki à Katwe. Visiblement, le sommet des Kasali porte cette valeur basse à cause de sa très faible densité humaine et de son recouvrement végétal très élevé. Pour les zones des hautes terres fraîches, ce faible niveau de risque est redevable à la très faible susceptibilité à l'érosion des sols, généralement argileux, alors que les facteurs topographiques, climatiques, biogéographiques et démographiques, défavorables et assez élevés, feraient attendre un niveau plus élevé. Pour les zones concernées des hautes terres tièdes, cette explication vaut pour le Sud de Musienene et les zones situées à l'Ouest du Lutambi, autour de Lukanga, et de Kimbulu à Mbingi. Par contre, les zones situées entre Kaliki et Katwe doivent cette valeur faible à la faible susceptibilité des sols à l'érosion, aux basses densités humaines et à la faible dégradation de la couverture végétale. Sans ces atouts, les autres facteurs d'érosion, qui y sont assez importants, élèveraient le niveau de risque.

Enfin, le très faible niveau de risque d'érosion, numéroté 1 et englobant les valeurs allant de 1 à 48, est largement représenté sur notre carte. Il occupe tout le fossé tectonique, à l'exception des Kasali, le Kyavirimu, des îlots importants au Sud-Ouest et au Nord de Kabiro, les plaines marécageuses des hautes terres tièdes et le Sud-Ouest de Katwe. Apparemment, ce très faible niveau s'explique par les faibles ou très

faibles densités humaines et les faibles ou très faibles taux de dégradation de la couverture végétale. Ainsi, dans le fossé tectonique, la très forte susceptibilité intrinsèque des sols à l'érosion ne représente pas de risque majeur grâce aux très faibles valeurs des autres paramètres, que sont la pente, le climat, la densité humaine et la végétation. Dans les zones situées en altitude, la résistance intrinsèque des sols et le bon recouvrement végétal atténuent l'effet de la pente et du climat.

Les diverses cartes numériques ainsi générées par le SIG sont susceptibles d'être critiquées pour en comprendre les faiblesses et les forces en vue de leur usage en aménagement rural.

4. INTERPRETATION ET APPLICATION DES RESULTATS EN AMENAGEMENT RURAL.

Les cartes numériques correspondant aux facteurs de l'érosion sont découpées chacune en cinq classes. On peut aussi pondérer la même variable en accordant des poids discontinus selon le degré de risque. Dans ce cas, la variable devient quantitative discrète et non plus continue et découpée en classes. Telle est la façon que rapporte Robin (2002) pour l'évaluation de l'érosion en Tunisie. Notre découpage standard peut aussi sembler niveler l'information parce qu'aucune variable ne reçoit une pondération particulière. On peut se demander quel facteur d'érosion peut être plus important que l'autre. Le facteur pente, par exemple, peut être plus influent que celui de l'agressivité climatique. En accordant la même pondération aux divers facteurs de l'érosion, nous ne négligeons pas la différence dans leurs degrés de nocivité. Cette absence de pondération est compensée par la gradation du risque que nous établissons au sein de chaque facteur en l'échelonnant sur cinq degrés, correspondant aux cinq classes de la carte. Plus la valeur d'un facteur est importante, plus le risque d'érosion est important.

En plus, les méthodes de découpage en classes utilisées peuvent faire l'objet d'un débat. Celle des seuils observés permet de regrouper dans une même classe les zones dont les valeurs numériques sont proches et que l'on peut facilement distinguer des autres. Tel est le cas des cartes des pentes, de la susceptibilité des sols à l'érosion, des densités humaines, de la dégradation du couvert végétal et du risque d'érosion. La méthode de l'amplitude égale, appliquée pour la carte de l'agressivité du climat, simplifie la manipulation des données en regroupant les zones dans des classes respectant des intervalles réguliers pour leur bornage. L'important pour toutes ces diverses méthodes de discrétisation, c'est de montrer que la valeur numérique de

chaque facteur s'accroît proportionnellement au risque d'érosion qu'elle représente, quel que soit le découpage fait. C'est la combinaison des facteurs, selon la méthode systémique, qui compte. Cette combinaison, qui aboutit à la carte du risque de l'érosion, est la synthèse des cinq cartes des facteurs.

Par cette combinaison, notre méthode crée du nouveau. En effet, il est impossible de multiplier cinq cartes pour en obtenir une sixième sans usage d'un logiciel du SIG. Ce résultat ne peut pas non plus s'obtenir par l'usage de cartes imprimées sur un support papier. C'est à ce niveau que le SIG se révèle comme un outil de recherche et de découverte scientifique. Il crée de l'information inconnue jusqu'alors et que l'on ne peut obtenir sans l'usage de l'ordinateur.

La carte du risque ainsi obtenue permet de prévenir l'érosion qui peut se déclencher à un endroit donné suivant le mode de culture qu'on y applique (Veyret et Wicherek, 1992) et d'établir des priorités pour l'intervention contre ce fléau suivant les degrés de dégradation constatée (Robin, 2002). L'élaboration d'une carte similaire en Tunisie a permis à ses concepteurs de faire ce jugement sur les données qu'elle recèle : *« De telles données peuvent aider les scientifiques et les décideurs à déterminer la portée d'un problème et concentrer les activités là où elles seront plus efficaces »* (Anys, Bonn et Merzouk, 1991). Bonn (1996) est clair à ce propos : *« L'intégration des différentes composantes des équations de pertes de sols dans les systèmes d'information géographique permet de produire des cartes qui guident les interventions prioritaires pour les mesures de conservation, comme le reboisement ou la construction de banquettes dans les zones agricoles accidentées »*.

Pour le cas des hautes terres de Lubero, les zones prioritaires pour la lutte antiérosive sont les plus dégradées, celles qui affichent le risque d'érosion de niveaux très fort, fort et moyen. Pour le niveau très fort, il s'agit des îlots autour et à l'Est de Kyondo et au Nord de Matembe. Pour le niveau fort, ce sont les zones qui se trouvent au Nord du Kyavirimu, sur le massif du Lutambi, au Nord de Luofu, sur les collines gréseuses à l'Est de Matembe et dans quelques îlots sur les escarpements au Sud-Est de Kipese. Enfin, pour le niveau moyen, très répandu, l'aire concernée se trouve sur les escarpements, sur les pentes des monts Kasali, entre Kipese et Luotu, de Kimbulu à Biena, dans le Sud du Lutambi, autour d'Alimbongo et de Mbingi, au Nord et au Sud-Ouest de Luofu et de Kirumba à Kanyabayonga. Ce sont toutes ces zones citées qu'il faut équiper prioritairement de dispositifs anti-érosifs.

Ainsi, notre méthode atteint des résultats qui seraient inaccessibles en dehors de son utilisation. Il est en effet impossible, sans l'outil SIG, de fédérer dans une même base de données des informations disparates et de les croiser par multiplication pour obtenir une carte de synthèse. La méthode du SIG illustre aussi le rôle d'une Géographie appliquée : servir de guide à l'aménagement du territoire. Elle donne en effet des résultats qui permettent aux responsables des services publics de prendre une décision pour intervenir concrètement sur le territoire.

CONCLUSION

Cet article s'était fixé pour objectif d'informer le lecteur sur l'importance du Système d'Information Géographique (SIG) dans l'aménagement de l'espace. Le SIG est composé de données et du logiciel pour leur traitement. Nous en avons illustré l'application en aménagement rural, spécialement dans la cartographie du risque d'érosion dans les hautes terres de Lubero en RDC.

Sur le terrain d'étude, les facteurs de l'érosion sont cinq : la pente, la susceptibilité du sol, le potentiel érosif du climat, la densité démographique et le recouvrement végétal. Ces variables ont été transformées en cartes numériques par digitalisation des cartes préexistantes en papier au moyen du logiciel Geoconcept 5.5 et par intégration de données issues des images satellitaires et du recensement de la population. Les cinq cartes obtenues ont été multipliées pour générer celle du risque d'érosion. Cette dernière montre la gradation du risque et sert d'outil de prise de décision aux aménageurs. Grâce à la carte du risque d'érosion, en effet, les décideurs doivent définir les zones d'intervention prioritaires pour la lutte antiérosive.

Ainsi, notre article illustre bien l'importance du SIG en aménagement rural. Cette méthode permet, à partir des éléments connus, de générer des données nouvelles et d'orienter l'action des décideurs. Par ce fait la Géographie s'avère une Science appliquée.

BIBLIOGRAPHIE

- ANGELIAUME, A. 1996. *Ruissellement, érosion et qualité des eaux en terre de grande culture. Etude comparée de deux bassins versants du Laonnois et du Soissonnais (02)*. Thèse Doctorat : Géo : Université de Lille, 488 p. et 221 p. d'annexes.
- ANYS, H., BONN, F. et MERZOUK, A. 1993. Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un SIG, cas du bassin versant d'Oued Aricha (Settat, Maroc). In DUBOIS, J.M.M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (dir.). *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Actes des Journées scientifiques de Montréal 1991*. Sainte-Foy (Québec) : Presses de l'Université du Québec, p. 141-150. Universités francophones.
- BEGUIN, M. et PUMAIN, D. 1994. *La représentation des données géographiques. Statistique et cartographie*. Paris : Armand Colin, 192 p. Cours Géographie.
- BONN, F. 1996. *Précis de télédétection. Volume 2. Applications thématiques*. Sainte-Foy : Presses Universitaires du Québec, 633 p. Universités francophones.
- CALOZ, R. et COLLET, C. 2001. *Précis de télédétection. Volume 3. Traitements numériques d'images de télédétection*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec et Agence Universitaire de la Francophonie, 386 p. Universités francophones.
- CAMPY, M. et MACAIRE, J.-J. 2003. *Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. 2^{ème} éd. Paris : Dunod, 440 p.
- CHAMAYOU, H. et LEGROS, J.-P. 1989. *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*. Paris : Agence de coopération culturelle et technique, Conseil international de la langue française et Presses Universitaires de France, 593 p.
- DEPARTEMENT DES MINES. 1981a. *Carte géologique de reconnaissance. Lubero S1/ 29*. Echelle : 1/ 200 000. Kinshasa : Bureau des Arts graphiques du Service géologique.
- DEPARTEMENT DES MINES. 1981b. *Carte géologique de reconnaissance. Beni NO/ 29*. Echelle : 1/ 20 000. Kinshasa : Bureau des Arts graphiques du Service géologique.
- DOUMAMBILA, C.E. 2000. *Infrastructure urbaine en République Démocratique du Congo*. Libreville : Banque Africaine de Développement et Programme Régional de Gestion de l'Information Environnementale, 54 p.
- DUBOIS, J.M.M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (dir.). 1993. *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et*

- topographique. Actes des Journées scientifiques de Montréal 1991. Sainte-Foy (Québec) : Presses de l'Université du Québec, 366 p. Universités francophones.*
- DUCHAUFOR, P. 1997. *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement.* 5^{ème} éd. Paris : Masson, 1997. 291 p.
- EASTMAN, J.R. 1999. *Idrisi 32. Guide to GIS and Image Processing. Volume 1.* Worcester : Clark Labs, Clark University, 193 p.
- GUIGO, M. et al. 1995. *Gestion de l'environnement et systèmes experts.* Paris, Milan et Barcelone : Masson, 181 p. Collection Géographie.
- Image satellitaire multibande LANDSAT TM du Territoire de Lubero du 7 août 1987.*
- Image satellitaire multibande SPOT HRV de la région autour de Butembo du 2 mars 1992.*
- Image satellitaire panchromatique SPOT HRV du Territoire de Lubero du 8 août 1996.*
- JONGEN, P. 1970. *Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. 26. Nord-Kivu et région du lac Edouard. A. Notice explicative de la carte des sols.* Bruxelles : INEAC, 78 p.
- KAKULE VYAKUNO. 2006. *Pression anthropique et aménagement rationnel des hautes terres de Lubero en RDC. Rapports entre société et milieu physique dans une montagne équatoriale.* Thèse de Doctorat en Géographie et Aménagement. Toulouse : Université de Toulouse II – Le Mirail, 558 p.
- LAURINI, R. et MILLERET-RAFFORT, F. 1993. *Les bases de données en géomatique.* Paris : Hermès, 1993. 340 p. Collection Traité des Nouvelles Technologies, série Géomatique.
- LEBEAU, R. 2000. *Les grands types de structures agraires dans le monde.* Paris : Armand Colin, 182 p. Collection Initiation aux études de Géographie.
- MERLIN, P. 2002. *L'aménagement du territoire.* Paris : Presses Universitaires de France, 445 p. Collection Premier Cycle.
- MIETTON, M. 1998. Rythmes et bilans (de l'érosion) en domaine tropical. In VEYRET, Y. (coord.). *L'érosion entre nature et société.* Paris : Sedes, p. 263-294. Dossiers des images économiques du monde n° 22.
- MUHINDO SAHANI, 2012. *Le contexte urbain et climatique des risques hydrologiques de la ville de Butembo (Nord-Kivu/RDC).* Thèse de doctorat en Sciences. Option Géographie. Liège : Université de Liège, 275 p.
- NEBOIT, R. 1991. *L'homme et l'érosion : l'érosion des sols dans le monde.* 2^{ème} éd. Clermont-Ferrand : Association des Publications de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Clermont-

- Ferrand, 269 p. Collection Faculté des Lettres et Sciences humaines de l'Université Blaise Pascal, nouvelle série.
- PAEGELOW, M. 1995. *Nouvelles technologies en Géographie. Initiation aux systèmes d'information géographique*. Cours inédit. Toulouse : Université de Toulouse II – Le Mirail, 182 p.
- PANTAZIS, D.N. et DONNAY, J.-P. 1996. *La conception de SIG. Méthode et formalisme*. Paris : Hermès, 343 p. Collection Géomatique.
- PECROT, A. 1957-1958a. *Carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Ruanda-Urundi. 16. Dorsale du Kivu. A. Sols. Carte de reconnaissance*. Echelle : 1/ 500 000. Bruxelles : Institut Géographique Militaire, Publications de l'INEAC.
- PECROT, A. et LEONARD, A. 1960. *Carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Ruanda-Urundi. 16. Dorsale du Kivu. Notice explicative de la carte des sols et de la végétation*. Bruxelles : INEAC, 124 p.
- PEGUY, C.P. 1970. *Précis de climatologie*. 2^{ème} éd. Paris : Masson et C^{ie}, 468 p.
- PETIT, M. 1990. *Géographie physique tropicale. Approche aux études du milieu. Morphogenèse-paysages*. Paris : Karthala et ACCT, 351 p.
- PORNON, H. 1992. *Les SIG. Mise en œuvre et applications*. Paris : Hermès, 158 p. Collection Traité des Nouvelles Technologies, série Géographie assistée par ordinateur.
- PORNON, H. 1998. *Systèmes d'information géographique, pouvoir et organisations. Géomatique et stratégies d'acteurs*. Paris : L'Harmattan, 255 p.
- POURTIER, R. 1997. Du Zaïre au Congo : un territoire en quête d'Etat. *Afrique contemporaine*, n° 183, p. 7-30.
- PUMAIN, D. et SAINT-JULIEN, T. 1997. *L'analyse spatiale. 1. Localisations dans l'espace*. Paris : Armand Colin, 1997. 167 p. Cursus Géographie.
- Registres de l'état civil des Territoires de Beni et Lubero de 1930 à 2003.*
- RIOU, G. 1990. *L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux. Systèmes d'érosion hydrique*. Paris : Masson, 221 p. Collection « Géographie ».
- RISHIRUMUHIRWA, T. 1994. Facteurs anthropiques de l'érosion dans les montagnes et hauts plateaux aux Burundi, Rwanda et Zaïre. *Cahiers d'Outre-Mer*. 1994, n° 185, p. 23-34.
- ROBIN, M. 2002. *Télédétection. Des satellites aux SIG. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique*. 2^{ème} éd. Paris : Nathan, 318 p. Fac Géographie.
- ROLLET, C. 2003. *Introduction à la démographie*. Paris : Nathan, 128 p. Sociologie n° 128.

- ROUET, P. 1991. *Les données dans les systèmes d'information géographique*. Paris : Hermès, 278 p.
- SALOMON, J.-N. 2001. Les pertes en sols dans les montagnes tropicales. In BART, F., MORIN, S. et SALOMON, J.-N. (dir.). *Les montagnes tropicales. Identités, mutations, développement. Table-ronde, Bordeaux-Pessac, 27 et 28 novembre 1998*. Pessac : Dynamiques des Milieux et des Sociétés dans les Espaces Tropicaux, p. 15-26. Espaces Tropicaux n° 16.
- SANDRON, F. 2001. Système, système d'information, système d'information géographique : une méthode en écologie humaine. In AUCLAIR, L., GUBRY, P., PICOUËT, M. et SANDRON, F. (dir.). *Régulations démographiques et environnement. Actes des VI^{es} Journées démographiques de l'ORSTOM. 22-24 Septembre 1997*. Paris. Paris : IRD, CEPED et LPE, p. 45-56. Collection Les Etudes du CEPED.
- SCANVIC, J.-Y. 1983. *Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre*. Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 158 p. Manuels et méthodes n° 7.
- SOUIAH, S.-A. et TOUTAIN, S. 2005. *L'analyse démographique et spatiale*. Nantes : Editions du temps, 286 p. Collection Outils et méthodes en géographie.
- VALADAS, B. 2004. *Géomorphologie dynamique*. Paris : Armand Colin, 192 p. Collection Campus.
- VEYRET, Y. et WICHEREK, S. 1992. Réflexion sur une cartographie des risques d'érosion des terres agricoles en région de plaines et de plateaux. *Bulletin de l'Association de Géographes français*. 69^{ème} année, n° 2, p. 169-176.
- VULAMBO KALISSA. 1996. *Profil socio-économique de la région du Nord-Kivu. La fiche technique régionale*. Goma : Division régionale du Nord-Kivu, 1996. 188 p.
- VULAMBO KALISSA. 2000. *Profil socio-économique de la Province du Nord-Kivu*. Goma : Division provinciale du Nord-Kivu, 255 p.
- WILLS, W., CARAËL, M. et TONDEUR, G. 1986. *Le Kivu montagneux. Surpopulation - Sous-nutrition – Erosion du sol (Etude prospective par simulations mathématiques)*. Bruxelles : ARSOM, 201 p. Classe des Sciences naturelles et médicales. Mémoires in-8°, Nouvelle Série, Tome 21, fasc. 3.