

Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Équation Universelle de Perte de Sol assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti

par

Kénel Délusca

**Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures et de la Recherche
pour l'obtention de la Maîtrise en Études de l'Environnement**

**Faculté des Études Supérieures et de la Recherche
Université de Moncton
Juin, 1998**

© Kénel Délusca, 1998



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33866-5

REMERCIEMENTS

Nombreuses sont les personnes et institutions qui m'ont aidé dans la réalisation de cette étude. Parmi celles-ci, j'aimerais présenter toute ma gratitude au(x):

- Prof. R.Roy qui a accepté d'assurer la direction de cette thèse et qui n'a pas marchandé son expertise,
- membres du comité aviseur, notamment R. Barry et G. Fairchild dont les multiples suggestions et recommandations m'ont permis d'améliorer considérablement la forme et le contenu du document,
- personnel enseignant de l'École de sciences forestières de l'Université de Moncton, particulièrement K. Goïta, E. Robichaud, B. Badibanga et J. Barbalata dont les nombreux conseils m'ont été d'une grande utilité,
- Centre de Conservation des Sols et de l'Eau de l'Est du Canada, particulièrement, L. Ouellette, J-L. Daigle, L. Carroll qui m'ont beaucoup aidé dans la recherche bibliographique,
- Centre de Limbé, particulièrement H. Fabien qui m'a facilité l'obtention des données climatiques utilisées pour la présente étude,
- Directeur du programme de Maîtrise en Études de l'Environnement de l'Université de Moncton, L. Lapierre qui, malgré ses multiples occupations, a accepté d'être l'évaluateur externe de cette thèse,
- L'AUPELF- UREF, le Partenariat Acadie-Haïti, l'Université Quisqueya pour leur soutien financier.

Pour finir, j'aimerais remercier, de façon toute spéciale, mes parents et amis qui, même loin de moi, ont pu m'apporter l'énergie et le moral nécessaires à la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

L'érosion hydrique des sols, processus naturel accéléré par l'Homme, est l'un des graves problèmes environnementaux auxquels font face les agriculteurs du bassin versant de la ravine Balan (Nord d'Haïti). La présente étude se propose non seulement de quantifier ce phénomène, mais également d'envisager des scénarios d'aménagement pouvant réduire son envergure. Pour ce faire, l'Équation Universelle de Perte de Sol a été couplée à un Système d'Information Géographique, IDRISI.

Les résultats obtenus ont révélé que le bassin versant de la ravine Balan possède non seulement un potentiel érosif élevé, mais accuse également un haut niveau d'érosion estimé, en moyenne, à 304.07 t / ha · an. En effet, 92% de la superficie totale du bassin versant possède un potentiel érosif supérieur à 60 t / ha · an. De même, sous les systèmes de production en vigueur dans la zone, 79% du bassin versant accuse une érosion des sols qui dépasse le seuil tolérable de 11.5 t / ha · an généralement admis en Haïti.

Avec la capacité de modélisation d'IDRISI, plusieurs scénarios d'aménagement ont été envisagés afin de réduire l'érosion hydrique des sols au niveau du bassin versant de la ravine Balan. Parmi les scénarios envisagés, on peut citer: les cultures en contour, les cultures en banquette et un système agroforestier. De ces trois scénarios d'aménagement, le système agroforestier apparaîtrait comme le plus prometteur, car sous un tel système la superficie située dans les limites du seuil tolérable passerait de 21% (sous les conditions actuelles) à 74%.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
I. INTRODUCTION	1
1.1 Généralités	1
1.2 Problématique	3
1.3 Hypothèses	6
1.4 Objectifs	6
1.4.1 Objectif général	6
1.4.2 Objectifs spécifiques	6
II. REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Historique de l'Équation Universelle de Perte de Sol	7
2.2 Processus et mécanique de l'érosion hydrique des sols	11
2.3 Types d'érosion hydrique des sols	11
2.3.1 Érosion entre rigoles	12
2.3.2 Érosion en rigoles	13
2.3.3 Érosion par ravinement	13
2.4 Mesure de l'érosion hydrique des sols	13
2.5 Prédiction de l'érosion hydrique des sols	15

2.5.1 Érosivité de la pluie (R)	15
2.5.1.1 Énergie cinétique de la pluie (KE)	17
2.5.1.2 Intensité maximale en trente minutes (I_{30})	17
2.5.1.3 Modification dans le calcul de KE	18
2.5.2 Érodabilité des sols (K)	20
2.5.2.1 Calcul de l'érodabilité des sols (K)	21
2.5.3 Facteurs topographiques (LS)	22
2.5.3.1 Facteur de longueur de pente (L)	23
2.5.3.2 Facteur de degré de pente (S)	24
2.5.3.3 Pentés irrégulières	24
2.5.3.4 Évaluation de (LS) à l'aide d'un Système d'Information Géographique .	25
2.5.4 Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C)	27
2.5.5 Facteur des pratiques de conservation des sols (P)	28
2.6 Modélisation de l'érosion des sols	29
III. SITE D'ÉTUDE	31
3.1 Choix du site	31
3.1.1 Localisation de la zone d'étude	31
3.1.2 Environnement physique de la zone d'étude	33
3.1.2.1 Climat	33
3.1.2.2 Topographie	35
3.1.2.3 Hydrographie	36
3.1.2.4 Sols	36

3.1.3	Végétation	38
3.1.4	Environnement socio-économique de la zone d'étude	39
IV.	MÉTHODOLOGIE	40
4.1	Collecte de données et détermination de la valeur des paramètres de l'Équation Universelle de Perte de Sol	40
4.1.1	Facteur d'érosivité des pluies (R)	40
4.1.2	Facteur d'érodabilité des sols (K)	42
4.1.3	Facteurs topographiques (LS)	43
4.1.4	Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C)	44
4.1.5	Facteur des pratiques de conservation des sols (P)	45
4.2	Intégration des paramètres du USLE dans le SIG	46
4.3	Production de cartes et propositions d'aménagement	46
V.	RÉSULTATS ET DISCUSSION	48
5.1	Valeur de l'érosivité de la pluie (R)	48
5.2	Valeur de l'érodabilité des sols (K)	50
5.2.1	Détermination de la teneur en matière organique (M.O.)	50
5.2.2	Détermination de la texture des sols	53
5.2.3	Détermination de la structure des sols	54
5.2.4	Détermination des classes de perméabilité des sols	54
5.2.5	Intégration des valeurs de l'érodabilité des sols dans IDRISI	56
5.3	Valeur des facteurs topographiques (LS)	59
5.3.1	Création du Modèle Numérique d'Altitude (MNA)	59

5.3.2 Valeurs de LS pour le bassin versant de la ravine Balan	68
5.4 Potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan	73
5.5 Valeur du facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C) .	75
5.6 Valeur du facteur des pratiques de conservation des sols (P)	79
5.7 Estimation de l'érosion hydrique des sols	81
5.8 Propositions d'aménagement	83
VI. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	99
BIBLIOGRAPHIE	101
ANNEXES	105
ANNEXE 1: CALENDRIER AGRICOLE DU BASSIN VERSANT DE LA RAVINE BALAN	106
ANNEXE 2: NOMOGRAMME DE WISCHMEIER	107
ANNEXE 3: FICHE D'ENQUÊTE DE PARCELLE	108
ANNEXE 4: CALCUL DU DIAMÈTRE DES PARTICULES DE SOL	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1	Calcul de l'érosivité d'un épisode pluvieux (tiré de Renard <i>et al.</i> 1991) 19
2	Valeur de C pour différents types d'agriculture à Ste-Lucie (extrait de Madramootoo et Cox 1997) 28
3	Distribution de la température moyenne mensuelle (Source: Station Marie-Louise de Limbé) 35
4	Classes texturales et contenu en matière organique des sols 55
5	Valeur de l'érodabilité des sols du bassin versant de la ravine Balan 57
6	Caractéristiques hypsométriques de la zone d'étude 66
7	Classification des pentes du bassin versant de la ravine Balan 68
8	Orientation des cellules constituant le bassin versant de la ravine Balan 70
9	Valeur du facteur combiné LS pour le bassin versant de la ravine Balan 71
10	Potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan 75
11	Modes d'occupation des sols à Balan 79
12	Érosion hydrique des sols du bassin versant de la ravine Balan 83
13	Valeurs de P pour les cultures en contour (adapté de Wischmeier et Smith 1978) 84
14	Érosion sous les conditions actuelles comparée à celle pour le scénario 1 90
15	Valeurs de P pour les cultures en banquette (adapté de Wischmeier et Smith 1978) 91
16	Érosion sous les conditions actuelles comparée à celle pour le scénario 2 94
17	Érosion sous les conditions actuelles comparée à celle pour le scénario 3 97

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Localisation de la zone d'étude	32
2	Distribution de la pluviométrie annuelle	34
3	Vue en trois dimensions du bassin versant de la ravine Balan	37
4	Schéma d'intégration des paramètres du USLE dans un SIG (adapté de Bonn <i>et al.</i> 1994, 1996)	41
5	Distribution de l'érosivité moyenne mensuelle	49
6	Sites d'échantillonnage des sols	51
7	Carte d'érodabilité des sols du bassin versant de la ravine Balan	58
8	Processus de création du MNA à partir d'une carte topographique	60
9	Carte hypsométrique du bassin versant de la ravine Balan	65
10	Carte de pente du bassin versant de la ravine Balan	67
11	Carte d'orientation des cellules constituant le bassin versant de la ravine Balan	69
12	Carte des valeurs de LS pour le bassin versant de la ravine Balan	72
13	Carte de potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan	74
14	Processus d'intégration des valeurs de C dans IDRISI	77
15	Carte des valeurs de la couverture végétale et des pratiques culturales	80
16	Carte d'érosion des sols du bassin versant de la ravine Balan	82
17	Processus d'intégration des valeurs du facteur P dans la base de données spatiales	86
18	Carte des valeurs du facteur P pour les cultures en contour	87
19	Carte d'érosion pour le scénario des cultures en contour	89
20	Carte des valeurs de P pour les cultures en banquette	92

21	Carte d'érosion pour le scénario des cultures en banquette	93
22	Carte d'érosion pour le système d'agroforesterie	96

I. INTRODUCTION

1.1 Généralités

Depuis plus de dix ans, on constate au niveau mondial une certaine baisse du taux de croissance de la production agricole, principalement celle des céréales. En effet, après une robuste progression de 2,3% par an en moyenne entre 1950 et 1984, les rendements en céréales n'ont augmenté que de 1,8% par an entre 1980-1984, et de 0,5% dans les années 1990, soit moins du tiers du taux d'accroissement de la population mondiale. Cette baisse est surtout attribuée à la dégradation accélérée des sols (Brown *et al.* 1996). Cette dégradation des sols va de la pollution à la salinisation causées par l'utilisation abusive de produits chimiques (fertilisants, pesticides, etc), en passant par l'érosion issue des mauvaises pratiques culturales.

L'érosion est la forme la plus courante du processus de dégradation des sols. Selon des estimations empiriques faites sur une base annuelle, elle entraîne en moyenne de 5 à 10 tonnes de sol par hectare en Afrique, en Europe et en Australie, de 10 à 20 tonnes par hectare sur tout le continent américain, et près de 30 tonnes par hectare en Asie (Brown *et al.* 1996). Ce processus de dégradation accélérée des sols constaté dans plusieurs régions dans le monde est également très présent en Haïti.

Haïti est un pays montagneux à 75%. La majeure partie de cette superficie montagneuse accuse des pentes supérieures à 20%. Cette situation topographique, combinée à l'agressivité des pluies et aux mauvaises pratiques culturales (cultures vivrières sur de fortes pentes) rend d'une acuité exceptionnelle le phénomène de l'érosion hydrique des sols en Haïti (United Nations Development Program 1990?). Cet état de fait a des conséquences néfastes sur l'environnement pris dans son sens le plus large. Parmi

celles-ci, on peut citer:

- la baisse de fertilité des sols,
- la sédimentation des cours d'eau, des barrages et des digues,
- la dégradation des zones de frayère (principalement les mangroves) de la faune aquatique,
- l'accentuation de la précarité socio-économique de la population à forte majorité rurale, et
- l'exode rural.

Depuis quelques années, plusieurs pays veulent arriver à l'autosuffisance alimentaire. Pour y arriver, le maintien des sols agricoles de bonne qualité s'avère indispensable. Dans cet ordre d'idée, la conservation des sols et de l'eau est devenue, depuis un certain temps, une préoccupation environnementale majeure pour plusieurs pays, notamment Haïti où des projets de conservation des sols sont en place depuis les années 1970 (White et Jickling 1995). Malgré le nombre relativement important de ces projets en Haïti, la tendance à l'érosion accélérée des sols se maintient, voire s'accroît (Bureau 1986).

Plusieurs facteurs sont déterminants dans la réussite des activités de conservation des sols. Ces facteurs peuvent être divisés en deux principaux groupes :

- facteurs socio-économiques, et
- facteurs techniques.

Ces deux principaux groupes de facteurs doivent être harmonieusement liés afin d'assurer la réussite de tout projet de conservation des sols. S'ils doivent être adéquatement liés, on

peut toutefois les considérer de façon séparée. Dans le cas des facteurs purement techniques, le contrôle effectif de l'érosion à l'échelle régionale requiert certaines étapes préliminaires (Bonn *et al.* 1994). Ces étapes préliminaires peuvent être résumées comme suit :

- une compréhension du processus de l'érosion hydrique des sols,
- une habilité de prédire quantitativement la perte de sol sous différents systèmes de production, et
- une bonne connaissance des problèmes d'échelle associés à l'extrapolation spatiale des modèles développés sur des parcelles expérimentales et sur des simulateurs de pluie.

1.2 Problématique

Depuis plusieurs années, de nombreuses études ont tenté d'estimer la perte totale annuelle de sol pour Haïti (Ministère de la Planification, de la Coopération Externe et de la Fonction Publique 1993, United Nations Development Program 1990?, par exemple). Les chiffres sur les pertes de sol pour le pays varient, pour une même époque, d'une étude à l'autre. Malgré la variation des résultats de perte de sol émanant de diverses études, le seuil tolérable de 11.5 t / ha · an est généralement admis (Anonyme 1988).

Ces estimations de perte de sol pour Haïti ont généralement été obtenues à l'aide de l'Équation Universelle de Perte de Sol (USLE, en anglais). Celle-ci est une équation empirique établie à partir de mesures d'érosion hydrique réalisées pendant plusieurs décennies sur 48 stations expérimentales dispersées dans 24 états des États-Unis

(Wischmeier et Smith 1978). Regroupant à travers six paramètres les éléments pouvant affecter l'érosion des sols, l'équation s'écrit comme suit:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

où A est la perte annuelle de sol exprimée en t / ha · an,

R est le facteur d'érosivité des pluies exprimé en MJ · mm / ha · h,

K est le facteur d'érodabilité des sols exprimé en t · ha · h / ha · MJ · mm,

L est la longueur de pente (m),

S est l'inclinaison de pente (%),

C est le facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales, et

P est le facteur adimensionnel relié aux pratiques de conservation des sols.

Dans la majorité des cas, ces études sur l'estimation de l'érosion des sols en Haïti sont basées exclusivement sur des investigations de terrain. Cette approche est généralement très consommatrice de temps et d'argent et requiert également des techniciens qualifiés. L'extrait de ces études est souvent l'extrapolation à l'échelle du bassin versant de la perte moyenne de sol estimée pour plusieurs parcelles situées au niveau du même bassin versant. On procède ensuite à la production manuelle de cartes décrivant la situation de l'érosion au niveau de l'unité considérée.

Avec l'extrapolation des résultats de perte de sol de la parcelle au bassin versant et avec la production manuelle de cartes, il est souvent difficile de tenir compte des spécificités des paramètres conditionnant l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Ceci est surtout vrai pour l'érodabilité des sols, les classes et les longueurs de pente, les

pratiques culturelles ainsi que les structures de conservation des sols pour tout le bassin versant. Par conséquent, le contrôle du phénomène de l'érosion devient de plus en plus difficile.

Depuis plus de dix ans, des progrès significatifs dans l'application des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour l'évaluation et la résolution des problèmes de conservation des sols ont été réalisés (Mellerowicz *et al.* 1994). Ces systèmes permettent non seulement de réduire le temps et l'argent nécessaires à de telles études, mais ils permettent également la manipulation d'informations spatialement hétérogènes et surtout une meilleure cartographie de la situation de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Avec une meilleure cartographie de tous les paramètres conditionnant l'érosion, il est donc possible d'effectuer une meilleure planification des activités de conservation des sols.

L'intégration des paramètres du USLE dans un SIG n'est certainement pas nouvelle. Elle a déjà été effectuée ailleurs dans le monde (e.g. Madramootoo et Cox 1997, Anys et Merzouk 1994, Mellerowicz *et al.* 1994). Toutefois, pour une meilleure planification des travaux de conservation des sols et pour réduire le temps et les dépenses nécessaires pour de telles études, il serait approprié d'essayer de l'appliquer dans les conditions spécifiques à Haïti, principalement celles du bassin versant de la ravine Balan. Ce bassin versant est l'une des zones ciblées par le projet Acadie-Haïti pour entreprendre des activités de conservation des sols (Lise Ouellette, Partenariat Acadie-Haïti, communication personnelle).

1.3 Hypothèses

Dans le cadre du présent travail, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- 1) En admettant un potentiel érosif excessif de 60 t / ha · an, le bassin versant de la ravine Balan peut être considéré comme une zone à haut risque d'érosion.
- 2) Sous les systèmes de production actuels, plusieurs parties du bassin versant de la ravine Balan accusent une perte de sol qui dépasse le seuil tolérable de 11.5 t / ha · an généralement admis en Haïti.

1.4 Objectifs

1.4.1 Objectif général

Le principal objectif poursuivi à travers cette étude est d'adapter et d'appliquer, dans les conditions spécifiques au bassin versant de la ravine Balan, la méthodologie d'évaluation de l'érosion hydrique des sols à partir du couplage USLE/SIG.

1.4.2 Objectifs spécifiques

De façon spécifique, cette étude vise à

- 1) Établir des subdivisions dans le bassin versant selon la quantité de sol érodé, et
- 2) Identifier les modifications à apporter dans les systèmes de production afin de réduire le niveau d'érosion hydrique des sols au niveau des zones les plus dégradées du bassin versant de la ravine Balan.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

Deux des caractéristiques essentielles d'une science sont non seulement l'habilité de définir et de mesurer les causes et les effets d'un phénomène naturel mais aussi et surtout l'habilité de prédire des résultats pour des conditions déterminées. Ces caractéristiques importantes de toutes sciences constitueront l'essence même de cette revue de littérature sur l'érosion hydrique des sols, et plus précisément sur sa prédiction à partir du USLE.

2.1 Historique de l'Équation Universelle de Perte de Sol

Largement utilisée à travers le monde dans la prédiction et le contrôle de l'érosion hydrique des sols, l'Équation Universelle de Perte de Sol est, sans nul doute, le résultat de plusieurs années de recherche. Ces recherches ont été menées par des équipes de chercheurs dans plusieurs régions des États-Unis d'Amérique.

Vers le début des années 1900, certaines zones aux États-Unis se trouvaient confrontées à de sérieux problèmes d'érosion des sols. Conscients de ce phénomène et de ses éventuelles conséquences, des agriculteurs et des agronomes entamaient des recherches en vue de remédier à la situation.

Ainsi en 1936, Cook a effectué des analyses afin d'examiner les principaux éléments qui affectent le phénomène de l'érosion des sols par l'eau. Suite à ces analyses, Cook a identifié trois principaux éléments (Renard *et al.* 1991) :

- la susceptibilité du sol à l'érosion,
- le potentiel érosif des gouttes de pluie et des eaux de ruissellement, et
- la protection du sol, tributaire du type de couverture végétale.

Quelques années après, soit en 1940, la première équation permettant de calculer la perte de sol a été formulée et publiée par Zingg. Cette équation décrivait mathématiquement les effets de l'inclinaison et de la longueur des pentes sur l'érosion des sols (Wischmeier et Smith 1978). Loin d'être l'aboutissement des recherches dans le domaine de la prédiction de l'érosion, l'équation de Zingg représentait néanmoins une piste, hautement valable, mise à profit par d'autres chercheurs.

En 1941, Smith, ajoutait deux facteurs à l'équation de Zingg (Renard *et al.* 1991). Il s'agissait des facteurs du type de couvert végétal (C) et des pratiques de conservation des sols (P). Parallèlement à l'ajout de ces deux facteurs, Smith a apporté deux importantes contributions qui méritent d'être signalées :

- le concept de la limite tolérable de perte de sol (T) (Par ce concept, Smith entendait la valeur maximale de perte de sol au-dessus de laquelle le sol commençait à perdre sa productivité), et
- la sélection de pratiques de conservation de sol (Utilisant l'équation de Zingg à laquelle il a ajouté les deux facteurs mentionnés ci-dessus, Smith a développé une méthode graphique pouvant aider dans le choix des pratiques de conservation des sols pour certaines régions de la moitié Ouest des États-Unis).

Malgré la Deuxième Guerre Mondiale, les recherches ont été poursuivies.

Toutefois, il a fallu attendre la fin de cette guerre pour que les résultats de ces recherches soient publiés. En 1947, Browning *et al.* ont ajouté à l'équation de Smith les facteurs d'érodabilité et de gestion des sols. Ils ont également préparé des tableaux où figuraient, selon les types de sol, les rotations culturales et la longueur des pentes, des valeurs pour

les facteurs entrant, jusqu'à l'époque, dans la prédiction de l'érosion hydrique des sols.

A la lumière des travaux de Browning et de ses collaborateurs, Smith et Whitt ont présenté en 1948 une équation dite "rationnelle" d'estimation de l'érosion (Renard *et al.* 1991) . Celle-ci s'écrivait ainsi :

$$A = C S L K P \quad (2)$$

où A est la perte de sol estimée en t / ha · an, et

C S L K P sont déjà définis.

L'équation (2) était applicable aux principaux types de sols du Missouri (États-Unis). Vu que d'autres régions étaient confrontées au même problème et compte tenu du fait que cette équation était d'une grande utilité pour les fermiers dans la planification des travaux anti-érosifs, les bureaux régionaux du Service de Conservation des Sols (SCS) du Wisconsin organisèrent un atelier de travail afin d'appliquer cette équation dans d'autres régions. À l'issue de cet atelier en 1947, le facteur de l'érosivité de la précipitation a été ajouté à l'équation (2) présentée par Smith et Whitt. Cette nouvelle équation fut appelée l'Équation de Musgrave. Pour résoudre cette équation, des graphes ont été préparés par Lloyd et Eley en 1952 (Renard *et al.* 1991).

Ces équations à base régionales et/ou étatiques s'avèrent fort utiles aux fermiers. Elles l'étaient à un point tel que les responsables en matière de conservation des sols avaient recommandé qu'un effort soit fait afin d'arriver à développer une équation nationale de perte de sol. Suite à ceci, le Service de Recherche Agricole (ARS) a établi en 1954 un centre national de données sur le ruissellement et la perte de sol. Ce centre est situé à l'Université de Purdue (Lafayette ouest, Indiana).

Après la mise sur pied du centre, plus de 10,000 parcelles/année dans 49 endroits aux États-Unis ont été suivies. Ces parcelles expérimentales (de 22.1 m de long et 9% de pente) ont permis de collecter des données sur le ruissellement et la perte de sol. Toujours dans l'objectif d'arriver à une équation nationale, une série de conférences portant sur les données collectées et réunissant des chercheurs et des fermiers a été tenue à l'Université de Purdue en 1956. À l'issue des analyses effectuées lors de ces conférences, Wischmeier, Smith et d'autres chercheurs ont développé l'Équation Universelle de Perte de Sol (USLE).

Entre 1959 et 1962, l'Équation Universelle de Perte de Sol fut l'objet de plusieurs ateliers régionaux. Ceux-ci ont conduit à la publication de cette équation dans le "Agriculture Handbook No 282" en 1965 (Wischmeier et Smith 1978). Une fois publiée, cette équation fut largement acceptée et utilisée à travers le monde. Toutefois, pour rendre encore plus facile son utilisation, on continuait à y apporter d'autres modifications. Parmi les plus importantes, l'on peut citer :

- le nomogramme construit par Wischmeier pour la détermination de l'érodabilité des sols, et
- le diagramme pour déterminer les facteurs topographiques dans des situations de pentes irrégulières.

Ces améliorations ont été incorporées dans la version du USLE publiée en 1978 dans le Agriculture Handbook No 537 (Renard *et al.* 1991).

2.2 Processus et mécanique de l'érosion hydrique des sols

L'érosion hydrique du sol peut se définir comme étant le phénomène par lequel le sol perd, sous l'action de l'eau, certaines ou toutes ses particules. Morgan (1986) mentionne que l'érosion du sol est un processus à deux phases :

- le détachement ou l'enlèvement des particules individuelles du sol, et
- le transport de ces particules par les agents érosifs (eau, vent).

Toutefois, si l'énergie suffisante pour le transport des particules du sol n'est pas disponible, il peut se produire une troisième phase, soit le dépôt des particules.

2.3 Types d'érosion hydrique des sols

Généralement, on distingue trois principaux types d'érosion par l'eau (Barry 1997):

- érosion en nappe (sheet erosion),
- érosion par ruissellement en rigoles (rill erosion), et
- érosion par ravinement (gully erosion).

Hudson (1981) mentionne que cette classification des formes d'érosion hydrique du sol n'est pas appropriée. Il avance que cette classification ne tient pas compte de la première et de la plus importante étape du processus de l'érosion des sols, soit le détachement des particules du sol, suite à l'impact des gouttes de pluies (érosion par éclaboussures). Par conséquent, le même auteur suggère de remplacer l'érosion en nappe par l'érosion entre rigoles (interrill erosion). Ce changement, une fois effectué, la nouvelle classification des types d'érosion hydrique des sols la plus courante devient donc :

- érosion entre rigoles (interrill erosion ou splash erosion),
- érosion en rigoles, et
- érosion par ravinement.

2.3.1 Érosion entre rigoles

L'érosion entre rigoles se caractérise par l'effet des gouttes de pluie sur le sol.

Lorsque les gouttes de pluie entrent en contact avec le sol, leur énergie compacte, détruit et disperse ses agrégats qui peuvent par la suite être transportés par l'eau de ruissellement.

L'énergie des gouttes de pluie peut prendre deux formes : potentielle et cinétique.

L'énergie potentielle (EP) résulte de la différence d'élévation entre deux corps.

Elle est donc le produit de la masse, de la différence d'élévation et de l'accélération due à la gravité. Elle s'écrit de la forme suivante :

$$EP = mhg \quad (3)$$

où EP est l'énergie potentielle exprimée en Joules,

m est la masse du corps exprimée en kg,

h est la différence d'élévation exprimée en m, et

g est l'accélération exprimée en m/s^2 .

S'il y a mouvement des gouttes de pluie, leur énergie potentielle sera convertie en énergie cinétique (KE). Celle-ci est liée à la masse et à la vitesse de chute des gouttes de pluie.

Cette relation s'exprime au moyen de la formule suivante :

$$KE = \frac{1}{2} mv^2 \quad (4)$$

où KE est l'énergie cinétique des gouttes de pluie en Joules,

m est la masse des gouttes de pluie en kg, et

v est la vitesse de chute des gouttes de pluie en (m / s).

2.3.2 Érosion en rigoles

Lorsque la capacité d'infiltration du sol a été dépassée, l'eau s'accumule à la surface du sol et pourra ruisseler sur l'effet de la pente. Cette eau de ruissellement peut provoquer des entailles à la surface du sol. Si le sol n'est pas protégé, certaines de ces entailles, surtout celles produites dans de petites dépressions, deviendront des rigoles.

2.3.3 Érosion par ravinement

L'érosion par ravinement est le résultat de l'érosion en rigole. Elle est la forme la plus dramatique d'érosion hydrique du sol. Les ravines se forment une fois que l'eau de ruissellement s'accumule dans les rigoles non traitées. Sous l'effet du volume et de la vitesse de l'eau de ruissellement, ces rigoles deviendront plus larges et plus profondes, formant ainsi des ravines.

2.4 Mesures de l'érosion hydrique des sols

Plusieurs méthodes sont utilisées dans la mesure de l'érosion hydrique des sols (Barry 1997). Selon l'endroit où la mesure est effectuée, ces méthodes peuvent être classées en :

- Mesures au site de détachement - Le détachement de particules de sol à un endroit peut se faire de trois façons:

1) Au moyen des fiches repères : ces fiches sont généralement utilisées comme repères pour des mesures périodiques de la dénudation relative d'une surface déterminée. Pour effectuer ces mesures, des photographies sont prises périodiquement à partir de points fixes.

2) Au moyen des tiges d'acier : installées en profondeur dans un sol pentu, ces tiges sont utilisées pour mesurer le déplacement du sol sur une base annuelle ou sur une plus longue période. La courbure ou le mouvement vers le bas sont mesurés de façon régulière.

3) Au moyen de traceurs : ceux-ci peuvent être de l'encre, du matériel radio-actif (e.g. Cesium 137) ou du sable. Ils sont utilisés pour déterminer le processus de détachement et de transport de particules de surface et du lit des cours d'eau.

- Mesures du matériel transporté - Les sédiments en suspension et les mouvements de matériel au fond du cours d'eau peuvent être estimés au moyen d'échantillons d'eau ou encore en mesurant les sédiments accumulés dans un étang de sédimentation.

- Mesures au site de déposition - Cette méthode consiste à effectuer des inventaires périodiques du matériel déposé dans les étangs, les lacs et les réservoirs. Pour ceci, dans le cas des étangs et des lacs, la topographie du fond du plan d'eau est déterminée et les apports supplémentaires en sédiments sont mesurés par des tiges fixes ou au moyen d'un sonar.

2.5 Prédiction de l'érosion hydrique des sols

Depuis le début des années 1900, plusieurs équations ont été développées afin de prédire l'érosion hydrique des sols. Parmi celles-ci, l'Équation Universelle de Perte de Sol de Wischmeier et Smith est la plus utilisée (Foster *et al.* 1981). D'après ce modèle empirique, l'érosion hydrique des sols est fonction de l'érosivité de la pluie et de l'érodabilité du sol. L'érosivité de la pluie réfère à ses propriétés tandis que l'érodabilité des sols est conditionnée par trois principaux facteurs :

- le premier est inhérent aux caractéristiques du sol (sa composition physique, chimique et mécanique),
- le deuxième est représenté par les facteurs topographiques, principalement l'inclinaison et la longueur de la pente, et
- le troisième est représenté par le système de production ainsi que les structures de conservation des sols.

Pour faciliter la compréhension de ce modèle de prédiction de l'érosion hydrique des sols, les deux principaux paramètres (érosivité et érodabilité) sont étudiés séparément.

2.5.1 Érosivité de la pluie (R)

Hudson (1981) définit l'érosivité comme étant la capacité potentielle de la pluie pour produire l'érosion. Cette capacité potentielle de la pluie est souvent attribuée à ses caractéristiques physiques. Parmi celles-ci l'on peut citer: la quantité, l'intensité, la dimension des gouttes de pluie, la distribution de la grosseur de ces gouttes, et la vitesse de chute. Ces caractéristiques sont reliées entre elles. La dimension des gouttes définit la

distribution de la grosseur des gouttes et influence la quantité de pluie tombée. Par ailleurs, la grosseur de la goutte affecte sa vitesse de chute et est reliée à l'intensité de la pluie (Hudson 1981).

Pour trouver la caractéristique physique de la pluie qui conditionnait le plus son érosivité, Wischmeier et Smith (1978) ont analysé les données collectées au niveau de 35 stations expérimentales totalisant 8250 parcelles/année. Les résultats ont révélé que, parmi les différentes caractéristiques physiques de la pluie, l'intensité était celle qui accusait la plus forte corrélation à la quantité de sol érodé. Suite à ce constat, des études supplémentaires ont été menées afin de déterminer de façon plus précise la relation qui existait entre l'intensité de la pluie et la quantité de sol érodé. À l'issue de ces études, il a été déterminé que l'érosivité de la pluie (R ou EI_{30} de Wischmeier) était le produit de l'énergie cinétique de la pluie (KE) par son intensité maximale en 30 minutes consécutives (I_{30}) :

$$EI_{30} = KE \cdot I_{30} \quad (5)$$

où EI_{30} est l'érosivité de la pluie pour un épisode pluvieux exprimée en $MJ \cdot mm / ha \cdot h$,

KE est déjà défini, et

I_{30} est l'intensité maximale de la pluie pendant 30 minutes consécutives exprimée en mm / h .

Techniquement, ce concept d'érosivité de la pluie indique la façon dont le détachement des particules est combiné à la capacité de transport de la pluie (Renard *et al.* 1991).

2.5.1.1 Énergie cinétique de la pluie (KE)

A partir de la relation de force, on déduit qu'une goutte de pluie, ayant une masse (m) et tombant à une vitesse (v) sous l'effet de la gravité, possède une énergie cinétique (KE) qui s'exprime selon l'équation (4) (Morgan 1986).

Il n'est toutefois pas facile de déterminer la masse et la vitesse de chute des gouttes de pluie. Ceci compliqua donc le calcul de l'énergie cinétique de la pluie. Il a fallu attendre les travaux de plusieurs chercheurs, particulièrement ceux de Wischmeier et Smith pour que ce calcul puisse être facilement effectué. En effet, à l'issue de ces travaux de recherche, une équation empirique permettant de calculer l'énergie cinétique de la pluie a été formulée :

$$KE = 0.11897 + 0.0873 \log I \text{ (Système international)} \quad (6)$$

où KE est déjà défini, et

I est l'intensité de la pluie exprimée en mm / hr.

Cette formule a également permis à Wischmeier et Smith de construire un tableau où l'énergie cinétique est donnée en fonction de l'intensité de la pluie (Wischmeier et Smith 1978).

2.5.1.2 Intensité maximale en trente minutes (I_{30})

L'intensité maximale en trente minutes peut être obtenue à partir des données de précipitation issues d'un pluviographe enregistreur. Parmi ces données, on ne considère que les épisodes pluvieux supérieurs à 12.7mm (une période de six heures avec moins de 12.7 mm de pluie marque la séparation entre deux épisodes pluvieux), à moins que cette

quantité soit enregistrée pendant 15 minutes ou moins (Wischmeier et Smith 1978).

2.5.1.3 Modification dans le calcul de KE

En 1987, Brown et Foster ont effectué des recherches sur l'érosivité de la pluie dans l'ouest des États-Unis. Ils ont constaté que l'énergie cinétique de la pluie était une fonction exponentielle plutôt que logarithmique de l'intensité de la pluie (Renard *et al.* 1991). Ceci a donné lieu à l'élaboration d'une nouvelle équation:

$$KE = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05I)] \quad (\text{Système International}) \quad (7)$$

où KE et I sont déjà définis.

Un exemple de calcul de l'érosivité de la pluie pour un épisode pluvieux est présenté au Tableau 1. L'énergie cinétique de la pluie est dans ce cas 8.21 MJ / ha, tandis que la valeur de I_{30} est de 54.88 mm. La valeur de I_{30} s'obtient en additionnant les valeurs de la colonne 4 pour l'intervalle de temps 4:27-4:57. On soustrait de cette somme la quantité de pluie enregistrée entre 4:20 et 4:27, soit 1.77. On obtient alors 27.44 comme somme totale de pluie tombée pendant 30 minutes consécutives. Pour ramener cette somme sur une base horaire, on la multiplie par 2 ($27.44 \times 2 = 54.88$). Les valeurs de KE et de I_{30} étant connues, l'érosivité de cet épisode pluvieux est donc : R ou $EI = 8.21 \times 54.88 = 450.56 \text{ MJ} \cdot \text{mm} / \text{ha} \cdot \text{h}$.

Tableau 1. Calcul de l'érosivité d'un épisode pluvieux (tiré de Renard *et al.* 1991)

Lecture du Pluviographe		Pour chaque intervalle de temps			Énergie	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Heure	Précipitation (mm)	Durée (min)	Quantité (mm)	Intensité (mm/h)	Par mm	total
4:00	0.00	-	-	-		
4:20	1.27	20	1.27	3.81	0.11	0.13
4:27	3.04	7	1.77	15.17	0.19	0.33
4:36	8.89	9	5.85	39	0.26	1.52
4:50	26.67	14	17.78	76.20	0.28	4.97
4:57	30.48	7	3.81	32.65	0.24	0.91
5:05	31.75	8	1.27	9.52	0.16	0.20
5:15	31.75	10	0	0	0.08	0
5:30	33.02	15	1.27	5.08	0.12	0.15
Total		90	33.02			8.21

Pour calculer sur une base annuelle l'érosivité de la pluie pour une région donnée, on applique la formule suivante :

$$R = 1/n \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E) (I_{30}) \right] \quad (8)$$

où R est l'érosivité moyenne annuelle en MJ · mm / ha · h,

n est le nombre d'années utilisées pour obtenir l'érosivité moyenne,

j est l'indice du nombre d'années utilisées pour produire la moyenne,

m est le nombre d'épisodes pluvieux par année,

k est l'indice du nombre d'épisodes pluvieux par année,

E est l'énergie cinétique totale des épisodes pluvieux, et

I_{30} est déjà défini.

Bien avant la modification apportée à la méthode de calcul de KE, le I_{30} de Wischmeier était l'objet de vives discussions. Cette situation était à l'origine du développement d'autres indices d'érosivité de la pluie. Parmi ceux-ci, l'on peut citer:

- le $KE > 25$ de Morgan (1986), et
- le UI (Universal Index) de Neicho (1985).

Il existe, certes, plusieurs indices d'érosivité de la pluie. Le choix de l'un de ces indices dépend de l'utilisateur. Toutefois, beaucoup d'efforts ont été menés afin de comparer l'indice d'érosivité de Wischmeier à d'autres. Ceci représente une erreur commune, celle de comparer un indice empirique contre d'autres qui n'ont pas été validés sur le terrain (Hudson 1981).

Il est certain que la force érosive de la pluie favorise l'érosion des sols. Toutefois, elle ne peut pas déterminer à elle seule ce phénomène. En effet, en plus de l'érosivité de la pluie, l'érosion des sols est également conditionnée par cinq autres paramètres (K LS C P).

2.5.2 Érodabilité des sols (K)

L'érodabilité d'un sol peut se définir comme étant sa vulnérabilité ou sa susceptibilité à l'érosion. En d'autres termes, elle est le contraire de sa résistance à l'érosion (Hudson 1981). Contrairement à l'érosivité de la pluie qui est une mesure

directe de ses propriétés physiques, l'érodabilité d'un sol est plutôt la résultante de plusieurs variables.

2.5.2.1 Calcul de l'érodabilité des sols (K)

Les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des sols ainsi que leurs interactions qui affectent les valeurs de K sont caractérisées par leur grande variabilité spatiale. Ajoutées à celles-ci, chacun des mécanismes d'érosion agit sur une propriété spécifique du sol (Renard *et al.* 1991). Cet état de fait rend complexe le calcul des valeurs de K pour les différents types de sol.

Malgré tout, plusieurs études ont été conduites afin de mesurer les valeurs de K relatives aux propriétés du sol. Parmi ces études, l'on peut mentionner celles de Wischmeier (1971), de Young et Mutchler (1977), de EL-Swaify et Dangler (1976), de Romkens *et al.* (1975), citées par Renard *et al.* (1991). De toutes ces études, la méthode synthétisée par le nomogramme de sol construit par Wischmeier est la plus utilisée et la plus citée (Renard *et al.* 1991).

Ce nomogramme a été construit à partir de données collectées dans 55 types de sol à texture moyenne dans la moitié ouest des États-Unis. Il est basé sur les paramètres suivants:

- pourcentage de sable (1 - 2 mm),
- pourcentage de sable très fin (0.05 - 1 mm),
- pourcentage de limon (0.002 - 0.05 mm),
- pourcentage de matière organique,

- classes de structure, et
- classes de perméabilité.

Le nomogramme est généralement approprié pour les types de sol des pays tempérés. Son application pour d'autres types de sol, principalement les sols tropicaux d'origine volcanique a eu des succès limités. Dans cet ordre d'idée El-Swaify et Dangler (1976) cités par Renard *et al.* (1991) ont développé une équation permettant de calculer l'érodabilité des sols d'origine volcanique en Hawaï. L'applicabilité de cette équation n'a pas été démontrée pour tous les sols tropicaux où le nomogramme continue à être utilisé, faute de mieux. On doit garder à l'esprit que les valeurs obtenues à partir du nomogramme de Wischmeier demeurent des substituts relativement imparfaits aux valeurs issues de mesures directes.

2.5.3 Facteurs topographiques (LS)

Dans l'Équation Universelle de Perte de Sol, les facteurs topographiques réfèrent à la longueur de pente (L) et à l'inclinaison de la pente (S). Ces deux facteurs sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel (LS). Le facteur LS est généralement défini comme étant le rapport de perte de sol entre deux parcelles ayant des conditions identiques à l'exception du degré et de la longueur de pente : l'une d'une longueur et d'un degré de pente donnés, l'autre ayant 22.1 m de long et 9% de pente (Wischmeier et Smith 1978). Au moyen des données collectées au niveau des parcelles expérimentales, Wischmeier et Smith (1978) ont développé une relation, présentée sous forme de diagramme, qui permet de calculer la valeur de (LS).

Ce diagramme est basé sur l'hypothèse que les pentes ont essentiellement des gradients uniformes. Pour la construction du diagramme, l'équation suivante a été utilisée:

$$LS = (\lambda/22.1)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (9)$$

où LS est le facteur combiné adimensionnel de longueur et de degré de pente,

λ est la longueur de la pente exprimée en m,

θ est l'angle de la pente en (%),

m est un exposant qui dépend du degré de la pente. Ainsi, la valeur de m sera de:

$$m = 0.5 \text{ si } \theta \geq 5\%,$$

$$m = 0.4 \text{ si } 3.5\% \leq \theta < 5\%,$$

$$m = 0.3 \text{ si } 1\% \leq \theta < 3.5\%, \text{ et}$$

$$m = 0.2 \text{ si } \theta < 1\%.$$

Pour mettre en évidence l'interaction des deux facteurs L et S dans le processus de l'érosion hydrique des sols, on considère généralement le facteur combiné (LS).

Toutefois, chacun de ces facteurs peut être calculé séparément.

2.5.3.1 Facteur de longueur de pente (L)

La longueur d'une pente est généralement définie comme étant la distance comprise entre le point où commence le ruissellement et celui où commence le dépôt. À l'égard de l'Équation Universelle de Perte de Sol, elle réfère au rapport de perte de sol entre un champ d'une longueur donnée et celle d'un champ d'une longueur de 22.1 m

(Wischmeier et Smith 1978). Sa valeur peut être calculée par la formule suivante :

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad (10)$$

où L est la longueur de la pente en mètres, et

λ et m sont déjà définis au niveau de l'équation (9).

2.5.3.2 Facteur de degré de pente (S)

De façon générale, la perte de sol augmente avec le degré de la pente. Dans l'Équation Universelle de Perte de Sol, il est évalué au moyen de la formule suivante :

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (11)$$

où S est le facteur adimensionnel du degré de pente, et

θ est l'angle de la pente en degré.

Pour la formulation de l'équation 11, des parcelles expérimentales ayant des gradients de pente uniformes ont été considérées. Dans la réalité, on rencontre le plus souvent des champs ou des parcelles à pentes irrégulières. Compte tenu de ce fait, d'autres stratégies ont été utilisées afin de déterminer la valeur de LS pour des pentes irrégulières.

2.5.3.3 Pentes irrégulières

La valeur de LS pour une unité de paysage à pentes irrégulières peut être également obtenue à partir du diagramme "effet - pente" de Wischmeier. Pour ceci, deux hypothèses doivent être acceptées :

- 1) les changements dans le gradient des pentes ne suffisent pas pour provoquer un

dépôt au niveau de la pente aval, et

2) les pentes irrégulières peuvent être divisées en une série de segments ayant la même longueur de pente de telle sorte que le gradient de pente soit uniforme pour chacun des segments.

Après avoir divisé les pentes irrégulières d'une unité de paysage en des segments à longueur de pente égale, la procédure pour le calcul de LS est la suivante ;

- déterminer le gradient de pente pour chacun des segments,
- introduire la valeur de L et de S pour chaque segment dans le diagramme (à cette fin, il est conseillé d'entrer ces valeurs dans l'ordre, en commençant par le segment situé en aval),
- faire la somme des valeurs de LS obtenues pour chaque segment, et
- diviser la valeur de la somme obtenue pour chaque segment par le nombre de segments considérés.

Cette méthode manuelle de détermination de la valeur de LS a été largement et longtemps utilisée. Toutefois, il a fallu les progrès dans le domaine de l'informatique, principalement dans le domaine des Systèmes d'Information Géographique pour constater que la méthode manuelle, en plus du fait qu'elle demandait beaucoup de temps, n'était pas la meilleure et qu'elle conduisait à une sous-estimation de la valeur de LS (Desmet et Govers 1996a).

2.5.3.4 Évaluation de (LS) à l'aide d'un Système d'Information Géographique

La détermination des facteurs topographiques LS de l'Équation Universelle de

Perte de Sol peut être effectuée en utilisant un Système d'Information Géographique. Pour réaliser une telle tâche, la procédure généralement utilisée est la création d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et le calcul du facteur combiné (LS) à l'aide de programmes informatiques développés pour cette tâche. Le MNA peut être obtenu à partir de la saisie des données topographiques pour une superficie déterminée. Il existe généralement deux façons de réaliser la saisie de ces données (Felicísimo 1997) :

1) Méthodes directes : Au moyen d'altimètres, de Système de Positionnement Global (Global Positioning System, GPS) et de stations topographiques.

2) Méthodes indirectes : Au niveau de ces méthodes, on peut procéder par :

- la restitution photogrammétrique,
- la radargrammétrie,
- la numérisation automatique, ou
- la numérisation manuelle.

L'utilisation d'un SIG dans la détermination de la valeur de LS permet également de déterminer la quantité de sol déposé dans les cours d'eau drainant un bassin versant. Cette quantité de sol déposé, généralement symbolisée par DR (Delivery Ratio) peut être évaluée à partir de la formule suivante:

$$DR = 10 (r / \lambda^*) \quad (12)$$

où r est la différence d'altitude entre le pixel (picture element) agricole et le pixel du talweg (ligne de plus grande pente selon laquelle se dirigent les eaux) considéré, et λ^* est la distance horizontale entre ces deux pixels.

La valeur de la dénivelée r est obtenue au moyen des fichiers d'orientation et d'altitude,

tandis que celle de la distance λ^* s'obtient en utilisant le même programme que celui qui a servi à la détermination de la longueur de la pente, mais en inversant le fichier d'orientation (Anys et Merzouk 1994).

2.5.4 Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C)

Ce facteur est le rapport de perte de sol entre une parcelle cultivée sous des conditions spécifiques et celle d'une autre maintenue en jachère continue. Les données collectées au niveau de 10 000 parcelles/année d'érosion ont révélé que la réduction de perte de sol constatée au niveau des parcelles cultivées est la résultante de plusieurs caractéristiques du type de couvert végétal et du mode de gestion de ce couvert

(Wischmeier et Smith 1978). Ces caractéristiques sont:

- le pourcentage de couvert végétal,
- le pourcentage de résidus laissés en surface après récolte,
- l'utilisation de ces résidus,
- le stade de développement de la plante, et
- l'érosivité de la pluie.

Suite à ce constat, des diagrammes ont été développés afin d'évaluer les valeurs de C pour différents types de couverture végétale et de pratiques culturales. Ces diagrammes peuvent être consultés dans Wischmeier et Smith (1978). Si ces diagrammes répondent bien aux conditions de cultures des pays tempérés, leur utilisation dans les pays tropicaux méritent toutefois certaines adaptations.

Le système de production végétale des pays tropicaux, notamment Haïti, est

surtout caractérisé par plusieurs saisons de culture par année ainsi que des associations de cultures vivrières. Cette spécificité des pays tropicaux n'a pas été prise en compte dans l'élaboration des diagrammes. Pour contourner ce problème, la valeur de C pour les associations culturales est généralement obtenue à partir de la moyenne des valeurs de C pour chaque culture, en tenant compte de l'érosivité de la pluie. Ainsi des valeurs de C pour plusieurs associations culturales ont été calculées. En Haïti, Durosier (1990) a évalué entre 0.05 et 0.22 la valeur de C pour une association de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), maïs (*Zea mays* L.) et pois congo (*Vinia sinensis* L.). À Ste-Lucie, des valeurs de C pour différents types d'agriculture ont été évaluées. Ces valeurs sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2. Valeur de C pour différents types d'agriculture à Ste-Lucie (extrait de Madramootoo et Cox 1997)

Types d'agriculture	Valeurs de C
arbres associés aux cultures	0.01
culture mixte	0.08
culture intensive	0.12
culture à végétation dense	0.003
culture intensive en plaine	0.12
culture sur terre érodée	0.5

2.5.5 Facteur des pratiques de conservation des sols (P)

Ce facteur est généralement considéré comme étant le rapport de perte de sol entre

une parcelle traitée par des structures de conservation des sols à celle d'une autre plantée en rangées orientées dans le sens de la pente. Les structures de conservation sont généralement représentées par la culture en contour, la culture en bandes alternées et les terrasses. En fonction de la longueur et du degré de pente, la valeur de P pour chacune de ces structures est donnée dans Wischmeier et Smith (1978).

2.6 Modélisation de l'érosion des sols

L'Équation Universelle de Perte de Sol est un modèle d'érosion de sol essentiellement empirique. Fondamentalement, elle représente les descriptions statistiques des données collectées au niveau de 10 000 parcelles/année d'érosion ayant des pentes uniformes et gérées sous des pratiques culturales communes. Bien qu'elle soit largement utilisée à travers le monde, elle possède certaines limitations. Parmi celles-ci, on peut citer:

- impossibilité de calculer les sédiments déposés, et
- impossibilité de calculer l'érosion pour un épisode pluvieux.

Récemment, à la lumière de la compréhension du processus d'érosion des sols, d'autres modèles ont été développés. Parmi les plus importants, l'on peut citer d'après Renard *et al.* (1991):

- le Water Erosion Prediction Project (WEPP),
- le Soil and Water Assessment Tool (SWAT), et
- le Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS).

Au début des années 1980 avec le développement des sciences de l'informatique, on a commencé à intégrer dans des Systèmes d'Information Géographique les paramètres du USLE. Cette nouvelle approche a permis d'étendre l'application du USLE à de plus larges superficies comme un bassin versant par exemple. En effet, l'approche SIG permet non seulement de spatialiser les informations provenant de diverses sources, mais de les combiner dans une approche de modélisation environnementale (Bonn *et al.* 1996).

III. SITE D'ÉTUDE

3.1 Choix du site

Certains critères ont guidé le choix de la zone d'étude . Parmi ceux-ci, on peut citer :

- l'existence de certaines informations préliminaires, mais essentielles comme:
 - carte topographique d'échelle 1/25 000,
 - photographies aériennes de 1978, en noir et blanc, d'échelle 1/50 000,
 - données climatiques en provenance de la Station Marie-Louise de Limbé.
- la facilité d'accès, et
- la zone de réalisation future de certains travaux de conservation des sols.

3.1.1 Localisation de la zone d'étude

D'une superficie d'environ 347 hectares, le bassin hydrographique de la ravine Balan se trouve entre 72°15'30" et 72°19'00" longitude ouest et entre 19° 43'30" et 19°45'00" latitude nord. Comme on peut l'observer à la Figure 1, le bassin versant de la ravine Balan est situé au nord d'Haïti, à environ 10 kilomètres à l'ouest de Cap-Haïtien, capitale régionale du Département du Nord. Ce bassin versant est borné au nord et à l'est par le morne du Haut-du-Cap, au sud par la plaine du nord et à l'ouest par la baie d'Acul.



Figure 1. Localisation de la zone d'étude

3.1.2 Environnement physique de la zone d'étude

L'environnement physique du bassin versant de la ravine Balan est décrit par les principaux facteurs abiotiques généralement considérés au niveau d'une entité hydrologique. Il s'agit du climat, du relief, du réseau hydrographique et des sols.

3.1.2.1 Climat

Parmi les différentes composantes du climat, deux d'entre elles sont considérées au niveau de cette étude : la pluviométrie et la température.

1) Pluviométrie : L'analyse de 6 années de précipitations collectées au niveau de la Station Marie-Louise située à moins de 10 kilomètres de la zone d'étude a permis d'observer une tendance de la distribution de la pluviométrie annuelle pour la zone d'étude. Comme on peut le constater en observant la Figure 2, la pluviométrie de la zone d'étude est généralement caractérisée par 6 à 7 mois pluvieux (mois recevant plus de 160 mm de pluie). Ces 6 ou 7 mois de pluie sont généralement séparés en deux saisons par 3 ou 4 mois de sécheresse (mois recevant moins de 160 mm de pluie).

2) Température : Contrairement à la pluviométrie, la température de la zone d'étude varie très peu. L'analyse de 6 années de température collectées au niveau de la station Marie-Louise a permis de construire le Tableau 3. Celui-ci nous permet de constater que la température moyenne mensuelle pour la zone est comprise entre 25°C et 29°C. Les mois moins chauds débutent vers le mois de décembre et s'arrêtent au mois de mars. Malgré la faible variabilité de la

température moyenne mensuelle pour le bassin hydrographique de la ravine Balan, des températures minimales de 21 °C peuvent être enregistrées pendant l'hiver de même que des températures maximales peuvent atteindre 32 °C pendant l'été, soit un écart de 11 °C entre les deux.

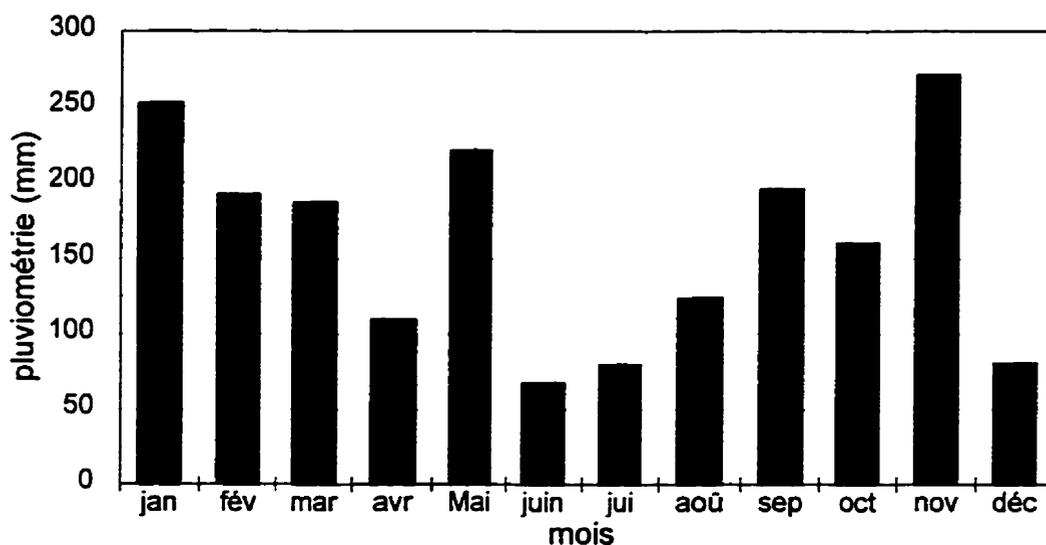


Figure 2. Distribution de la pluviométrie annuelle

Tableau 3. Distribution de la température moyenne mensuelle (Source: Station Marie-Louise de Limbé)

Mois	Température (°C)		
	Moyenne	Minimale	Maximale
Janvier	25	22	28
Février	25	21	28
Mars	25	22	29
Avril	26	23	28
Mai	27	24	30
Juin	29	26	30
Juillet	29	26	31
Août	29	27	32
Septembre	28	26	30
Octobre	28	25	30
Novembre	27	24	29
Décembre	25	21	28

3.1.2.2 Topographie

Le relief du bassin versant de la ravine Balan peut être divisé en trois grandes zones :

- une zone de plaine dont l'altitude est comprise entre 0 et 30 mètres,
- une zone de piedmont située entre 30 et 100 mètres d'altitude, et
- une zone de montagne d'une altitude supérieure ou égale à 100 mètres.

Le relief du bassin hydrographique sous étude, ci-dessus décrit, peut être observé à partir

de la Figure 3. Celle-ci est une représentation en trois dimensions du bassin versant de la ravine Balan.

3.1.2.3 Hydrographie

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est relativement simple. Il est représenté par un cours d'eau principal intermittent long d'environ 250 mètres. Ce cours d'eau principal, divisé en deux branches, se jette directement dans la Baie d'Acul.

3.1.2.4 Sols

Selon l'approche génétique (roche-mère) de classification des sols, ceux du bassin versant de la ravine Balan peuvent être considérés comme étant des sols jeunes sur du basalte (Wood 1963). Cette roche-mère est généralement constituée de deux principaux minéraux: l'augite et le labradorite. Ces derniers lui confèrent une vitesse de décomposition pouvant varier de modérée à rapide et un rythme d'érosion relativement élevé. Ceci peut s'expliquer par la circulation latérale des eaux pluviales à l'intérieur des minéraux formant ces sols (Wood 1963). Ces sols sont relativement peu profonds et leur profondeur varie selon la topographie. Elle peut être estimée entre 50 et 80 cm pour les zones ayant des pentes comprises entre 0% et 20%, tandis que pour les autres classes de pente, elle est souvent inférieure à 50 cm.

Si la roche-mère est la même pour tout le bassin versant, on y retrouve, toutefois, une bonne gamme de couleurs de sol. Parmi celles-ci, l'on peut distinguer selon le

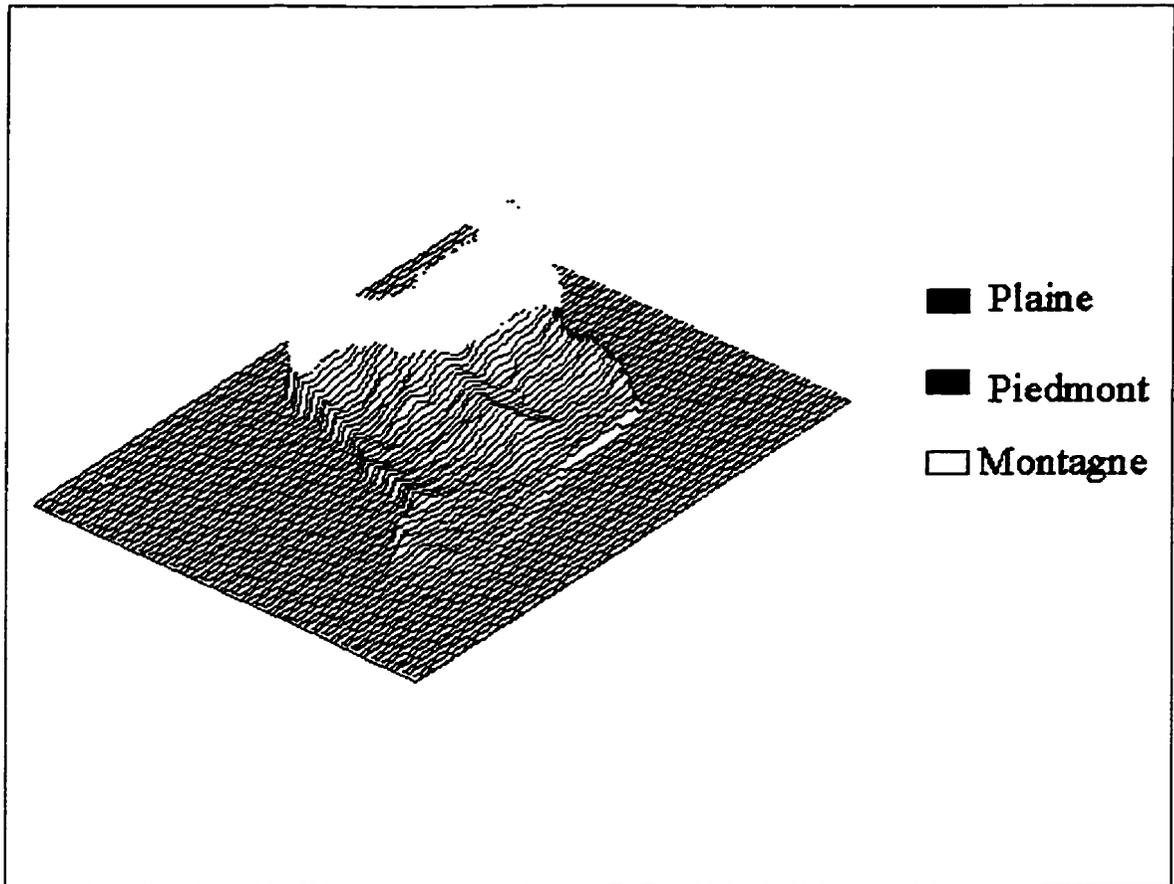


Figure 3. Vue en trois dimensions du bassin versant de la ravine Balan

système du "Munsell Charts" les sols ayant les notations suivantes: noir (7.5YR 2/0), rouge (10R 4/6), marron (10R 2.5/2) et gris (7.5YR 7/0). La couleur de ces sols est généralement due à la présence de certains éléments chimiques (fer à l'état oxydé, manganèse, aluminium, etc.) ou à leur teneur en matière organique.

3.1.3 Végétation

La végétation naturelle est très rare dans la zone. On y retrouve généralement des espèces pérennes et des cultures saisonnières ou annuelles. Les espèces pérennes sont généralement denses au niveau de la plaine, tandis qu'elles sont surtout éparpillées ou faiblement présentes au niveau des zones de montagne.

Les principales espèces pérennes retrouvées au niveau du bassin versant de la ravine Balan sont : manguiers (*Mangifera indica* L.), citronniers (*Citrus aurantifolia* (Christm.) Swingle), avocatiers (*Persea americana* Miller), cocotiers (*Cocos nucifera* L.), arbre véritable (*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg) et arbre à pain (*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg). En ce qui a trait aux cultures saisonnières, elles sont présentes dans la majorité du bassin versant. Elles sont surtout représentées par des tubercules, igname (*Dioscorea cayenensis* Lam), patate (*Ipomea batatas* L.), manioc (*Manihot esculenta* L.), des graminées, riz (*Oryza sativa* L.), maïs et des légumineuses, haricot, pois connu (*Vigna unguiculata* L.).

Étant donné qu'il n'existe pas jusqu'à présent un système d'irrigation dans la zone, la date de plantation de ces cultures est généralement dictée par les saisons pluvieuses (voir calendrier agricole de la zone en Annexe 1). De ce fait, il n'y a pas une grande différence

entre les dates de plantation pour les trois unités morphologiques du bassin versant sous étude. La canne-à-sucre (*Saccharum officinarum* L.), qui était très présente dans la zone, est actuellement en pleine régression. Ceci peut s'expliquer en grande partie par la faible valeur ajoutée découlant de cette culture, suite à la fermeture de l'Usine Sucrière du Nord (USN) . Parallèlement à ceci, l'introduction de nouvelles cultures comme le chou (*Brassica oleracea* L.) peut être constatée. Cette dernière, bien qu'exigeante en terme de main-d'oeuvre, a toutefois une importante valeur marchande.

3.1.4 Environnement socio-économique de la zone d'étude

Les infrastructures sont très rares dans la zone. Dans les secteurs de l'électricité et de la santé, elles sont complètement inexistantes. Dans d'autres secteurs comme le transport, l'éducation et l'eau potable, des structures élémentaires existent. Les activités économiques sont généralement représentées par la commercialisation des produits agricoles, du bétail et des fruits de mer. Bien qu'il y ait un marché local qui fonctionne deux fois par semaine, la majorité des produits agricoles de la zone sont vendus au Cap-Haïtien.

IV. MÉTHODOLOGIE

Comme illustrée à la Figure 4, la méthodologie utilisée pour cette étude comprend trois étapes principales :

- 1) collecte de données et détermination de la valeur des paramètres de l'Équation Universelle de Perte de Sol,
- 2) intégration des paramètres du USLE dans un Système d'Information Géographique, et
- 3) production de cartes et propositions de scénarios d'aménagement.

4.1 Collecte de données et détermination de la valeur des paramètres de l'Équation Universelle de Perte de Sol

Suite à la collecte de certaines données sur le terrain et à l'interprétation des photographies aériennes et aux travaux de SIG, on a procédé à la détermination proprement dite de la valeur des paramètres du USLE. Ces paramètres sont généralement représentés par les six facteurs qui constituent l'équation.

4.1.1 Facteur d'érosivité des pluies (R)

Pour évaluer l'érosivité de la pluie dans la zone d'étude, les données pluviographiques réparties sur sept années (1990-1996) ont été analysées. À travers ces analyses, on a estimé l'énergie cinétique ainsi que l'intensité maximale pendant 30 minutes consécutives pour chaque épisode pluvieux supérieur à 12.7 mm. La valeur de R dans la zone est le produit de l'énergie cinétique et de l'intensité maximale pendant trente minutes consécutives. Il est à signaler que le calcul de l'énergie cinétique de la pluie

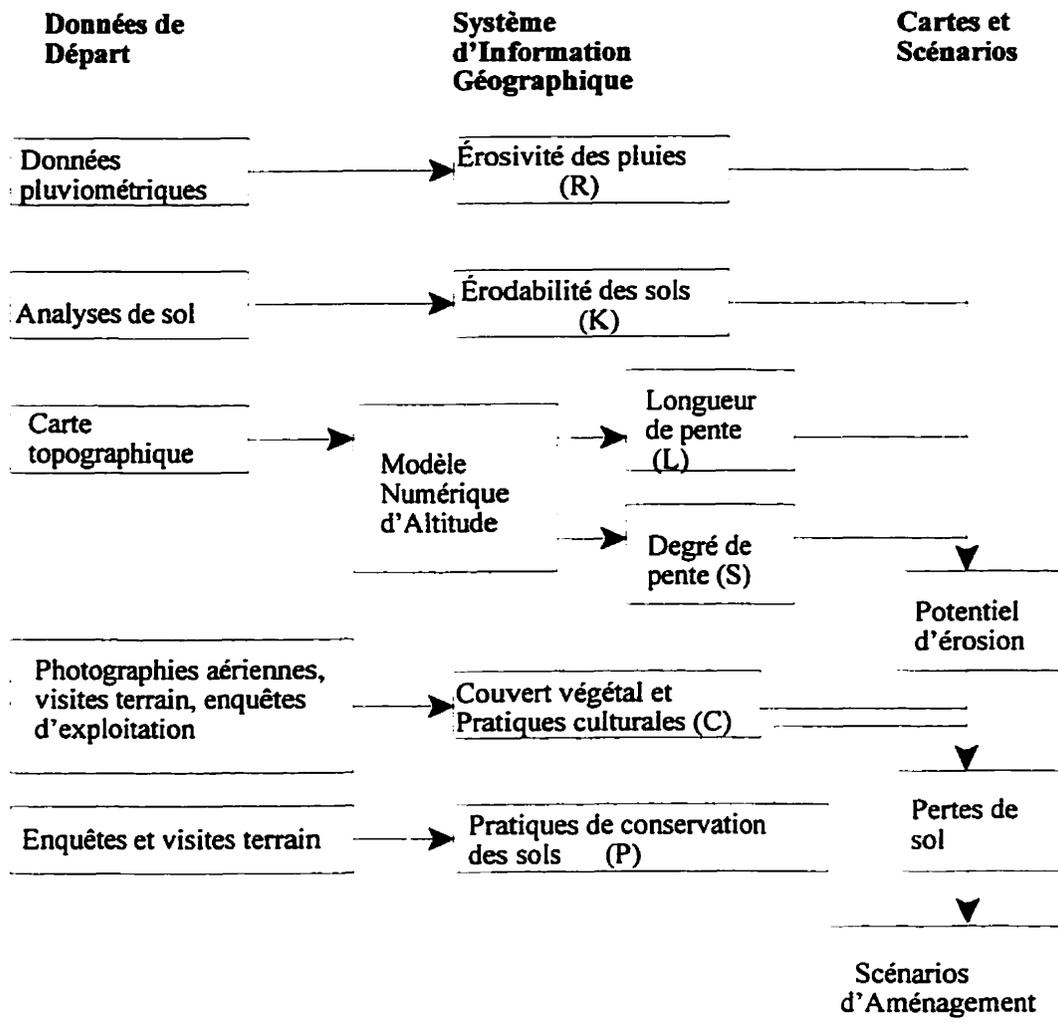


Figure 4. Schéma d'intégration des paramètres du USLE dans un SIG (adapté de Bonn *et al.* 1994, 1996)

est effectuée à l'aide de l'équation (8). Étant donné que l'aire du bassin versant considéré est relativement petite, on suppose que l'érosivité de la pluie est la même pour tout le bassin versant.

4.1.2 Facteur d'érodabilité des sols (K)

Vu l'inexistence d'une carte d'érodabilité des sols pour le bassin versant étudié, des visites terrain ont été réalisées afin de déterminer les critères de classification des sols. Suite à ces visites, la couleur des sols a été retenue comme étant le critère de différenciation le plus simple et le plus pertinent compte tenu des contraintes. Ce critère a été utilisé lors du prélèvement des échantillons de sol. Selon la superficie couverte par chaque couleur de sol, un ou plusieurs échantillons ont donc été prélevés dans chaque couleur de sol. Ces échantillons furent rapportés au laboratoire afin d'être analysés.

Les analyses de sol ont essentiellement porté sur les sous-facteurs conditionnant l'érodabilité des sols : sa texture, sa structure, sa perméabilité ainsi que son contenu en matière organique.

1) Texture du sol : Pour évaluer la texture du sol, des échantillons de sol ont été prélevés dans les 30 premiers centimètres du sol. La méthode de l'hydromètre développée par Bouyoucos et citée par McKeague (1978) a été utilisée. Cette méthode requiert la destruction de la matière organique, des sesquioxides de fer et d'aluminium, des carbonates ainsi que l'utilisation d'un agent de dispersion, comme l'hexamétaphosphate de sodium $((\text{NaPO}_3)_n)$. Connaissant la vitesse de sédimentation des particules (loi de Stoke), il est alors possible de déterminer la

texture du sol en mesurant, après un temps déterminé, la masse volumique de la suspension à l'aide d'un densimètre.

2) Structure du sol : Une approximation de la structure des sols a été réalisée au laboratoire. Celle-ci fut basée sur le système de classification des sols développé par le United States Department of Agriculture (Wischmeier et Smith 1978).

3) Teneur en matière organique : Pour évaluer ce sous-facteur, la méthode de combustion a été utilisée. Cette combustion a été effectuée à une température de 430°C pendant une période de 24 heures (Nelson et Sommers 1982). La teneur en matière organique obtenue avec cette méthode est donc basée sur la perte de masse au feu.

4) Perméabilité du sol : Vu la difficulté de réaliser des analyses de conductivité hydraulique du sol *in situ*, une estimation de ce sous-facteur a été effectuée sur le terrain. Cette estimation était basée sur la clé des classes de drainage proposée par le Système d'Information des sols canadiens telle qu'adaptée par Zelazny *et al.* (1991).

À l'issue de ces analyses, on était en mesure d'estimer la valeur de chacun des sous-facteurs qui affectent l'érodabilité des sols. Ces sous-facteurs furent ensuite introduits dans le nomogramme construit à cet effet par Wischmeier et Smith (1978) afin de déterminer la valeur de (K) pour chacun des échantillons analysés (voir Annexe 2).

4.1.3 Facteurs topographiques (LS)

Pour évaluer les facteurs de la longueur de pente (L) et du degré de pente (S), la

procédure suivante a été adoptée:

- délimitation du bassin versant de la ravine Balan à l'aide d'une carte topographique et de photographies aériennes,
- numérisation de la carte topographique de la zone à l'aide du logiciel de numérisation CAPTURE (R-WEL Inc. 1992),
- interpolation des données numériques dans le SIG matriciel IDRISI (Eastman 1997) pour créer le MNA de la zone d'étude, et
- détermination des valeurs de LS à l'aide du programme LS-MODULE (Van Oost *et al.* 1997).

4.1.4 Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C)

À défaut de photographies aériennes récentes, celles en noir et blanc de 1978 en provenance du Centre de Géodésie d'Haïti ont été interprétées. Lors de cette interprétation la végétation a été divisée en deux grandes classes : le territoire occupé par des plantes pérennes et celui occupé par des cultures saisonnières ou laissées en jachère.

Sur le terrain, les deux grandes classes d'occupation du sol ont été identifiées. Étant donnée la superficie relativement petite du bassin versant, chaque classe d'occupation du sol a été visitée de façon systématique. Au cours de ces visites, les changements dans l'occupation du sol ont été notés et on a également procédé à la reconnaissance de certaines cultures difficilement identifiables lors de l'interprétation des photographies aériennes. Ces changements ainsi que l'identification des cultures ont servi à la mise à jour de la carte d'occupation du sol préalablement réalisée pour le bassin

versant sous étude.

Pour déterminer la valeur de C pour chaque unité, la procédure suivante a été appliquée:

- pour les cultures pérennes et les terres en jachère, on a utilisé les données obtenues dans des zones ayant les mêmes conditions climatiques et topographiques que la zone d'étude, et
- pour la culture du riz, on a utilisé la méthode développée par Wischmeier et Smith (1978). Cette méthode est basée sur le type de couvert végétal ainsi que sur les systèmes de production, à savoir : les dates de labour, le type de labour, les dates de plantation, le pourcentage de couvert végétal à chaque stade de développement de la culture, les dates de récolte et le pourcentage de résidus laissés en surface avant la plantation et après la récolte. La valeur de C pour l'agriculture intensive à Ste-Lucie a été assignée aux zones du bassin versant de la ravine Balan occupées par des associations de cultures vivrières.

Pour connaître le système de production pratiqué au niveau du bassin versant de la ravine Balan, des enquêtes de parcelles ont été effectuées (voir fiche d'enquête, Annexe 3). En admettant que le calendrier agricole de la zone est conditionné prioritairement par les périodes de pluie, un nombre restreint d'exploitants agricoles (25) a été enquêté.

4.1.5 Facteur des pratiques de conservation des sols (P)

Les informations dérivées des enquêtes et des visites de terrain ont permis d'identifier les structures anti-érosives établies . Les structures anti-érosives étant

identifiées, la valeur de P dans la base de données spatiales a été déterminée selon le tableau construit à cet effet par Wischmeier et Smith (1978).

4.2 Intégration des paramètres du USLE dans le SIG

Suite à la détermination de la valeur des six paramètres constituant l'Équation Universelle de Perte de Sol, on a procédé à leur intégration dans IDRISI. Cette intégration a été effectuée paramètre par paramètre à l'aide des modules appropriés disponibles dans ce SIG.

4.3 Production de cartes et propositions d'aménagement

Comme on peut l'observer à la Figure 4, cette étape représente la toute dernière dans la méthodologie visant à intégrer les paramètres du USLE dans un SIG. À cette étape, une cartographie des différents paramètres du USLE a été effectuée. Parmi les cartes produites, mentionnons:

- carte d'érodabilité des sols,
- carte des facteurs LS,
- carte de couvert végétal, et
- carte des pratiques de conservation des sols.

Il faut toutefois signaler qu'il n'y pas eu production d'une carte d'érosivité de la pluie. Ceci s'explique par le fait qu'on a supposé que ce facteur est constant pour le bassin versant compte tenu de sa superficie relativement faible.

Une fois produites, ces cartes ont été superposées dans IDRISI au moyen du

module IMAGE CALCULATOR. Cette opération a permis d'évaluer non seulement le potentiel érosif, mais également l'érosion des sols au niveau du bassin versant de la ravine Balan. Ainsi, des cartes de potentiel érosif et d'érosion des sols pour la zone ont été produites. À la lumière de la carte de perte de sol, des propositions de systèmes d'aménagement pour les zones critiques du bassin versant ont été effectuées. L'érosion des sols a été ensuite calculée pour chacun des systèmes d'aménagement considérés.

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, on procède à la présentation ainsi qu'à l'analyse des résultats obtenus pour la présente étude. Ces résultats concernent surtout les six paramètres reliés à l'application de l'Équation Universelle de Perte de Sol.

En premier lieu, les paramètres R, K et LS seront présentés et analysés. Suite à la détermination de chacun de ces facteurs pour chaque cellule du bassin versant, une carte de potentiel érosif pour la zone d'étude sera produite. En deuxième lieu, la valeur de C et P seront aussi présentés et analysés. Les valeurs des six paramètres étant connues, la carte estimant l'érosion des sols dans la zone sera également produite. En dernier lieu, des scénarios d'aménagement seront envisagés afin de réduire l'érosion des sols au niveau des zones les plus touchées.

5.1 Valeur de l'érosivité de la pluie (R)

Pour le calcul de l'érosivité de la pluie pour le bassin versant de la ravine Balan, 191 épisodes pluvieux, répartis sur 7 années (1990 - 1996) ont été analysés. Ces épisodes pluvieux supérieurs à 12.7 mm ont été collectés par un pluviographe enregistreur. Les analyses portaient essentiellement sur les deux composantes de l'érosivité de la pluie, soit son intensité et son énergie cinétique.

L'intensité maximale en trente minutes et l'énergie cinétique ont été calculées pour chacun des 191 épisodes pluvieux. Suite à cette étape, on a procédé au calcul de l'érosivité de la pluie en utilisant l'équation (8) publiée dans la Version Révisée de l'Équation Universelle de Perte de Sol (RUSLE) (Renard *et al.* 1991). Selon les données traitées, l'érosivité de la pluie pour le bassin versant de la ravine Balan est estimée à

8097.96 MJ · mm / ha · h · an. Cette érosivité de la pluie pour le bassin versant est supérieure à celle de la Floride (7659 MJ · mm / ha · h · an) mais inférieure à celle obtenue pour le centre de Ste-Lucie (10000 MJ · mm / ha · h · an) (Farnum 1979). Ce constat confirme la tendance selon laquelle l'érosivité augmente lorsqu'on se dirige vers l'hémisphère Sud (Wischmeier et Smith 1978).

Étant donné que les dates de plantation dans la zone coïncident généralement avec l'arrivée des pluies, il est important de savoir, entre autres, la distribution de l'érosivité de la pluie à travers l'année. Cette situation est présentée à la Figure 5. L'observation de celle-ci permet de constater que les pluies les plus érosives arrivent au mois de février, mai, août, novembre et décembre, soit 1150.68, 1544.09, 1076.94, 1498.65 et 2432.24 MJ · mm / ha · h, respectivement.

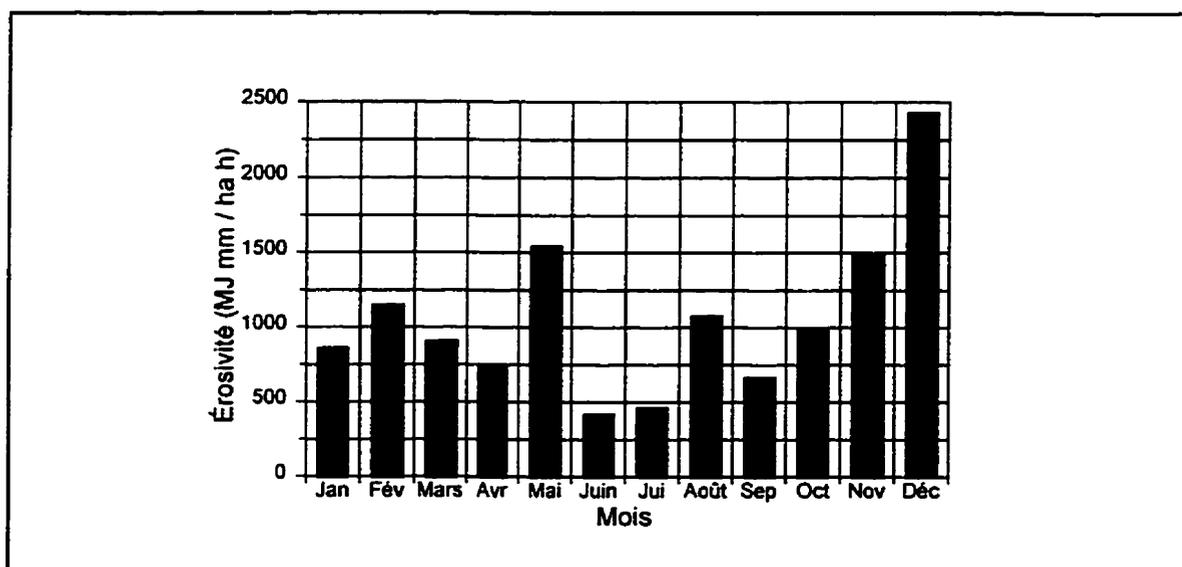


Figure 5. Distribution de l'érosivité moyenne mensuelle

5.2 Valeur de l'érodabilité des sols (K)

Ne disposant pas de carte de sol à l'échelle de la zone d'étude, il a fallu, avant tout, procéder à une certaine classification des sols de la zone. Suite à plusieurs visites sur le terrain, la couleur des sols a été retenue comme le critère de classification des grands types de sol retrouvés dans la zone . Le croquis présenté à la Figure 6 présente les sites de prélèvement des 17 échantillons ainsi que les différentes couleurs de sol rencontrées dans le bassin versant. Il faut signaler que le nombre d'échantillons prélevés par classe de couleur dépendait de la superficie occupée par la classe en question.

L'analyse en laboratoire des échantillons de sol a essentiellement porté sur les sous-facteurs conditionnant l'érodabilité des sols:

- la teneur en matière organique,
- la texture (pourcentage d'argile, de limon et de sable très fin),
- la structure, et
- la perméabilité.

5.2.1 Détermination de la teneur en matière organique (M.O.)

Comme les échantillons de sol ont été prélevés pendant un mois pluvieux (janvier), ils ont du être séchés à l'étuve afin d'enlever l'humidité qu'ils contenaient. Suite à ceci, les 17 échantillons ont été ensuite tamisés à 2 mm afin d'enlever les particules grossières.

Pour déterminer le pourcentage de matière organique (M.O.) pour chaque échantillon, deux étapes ont été suivies:

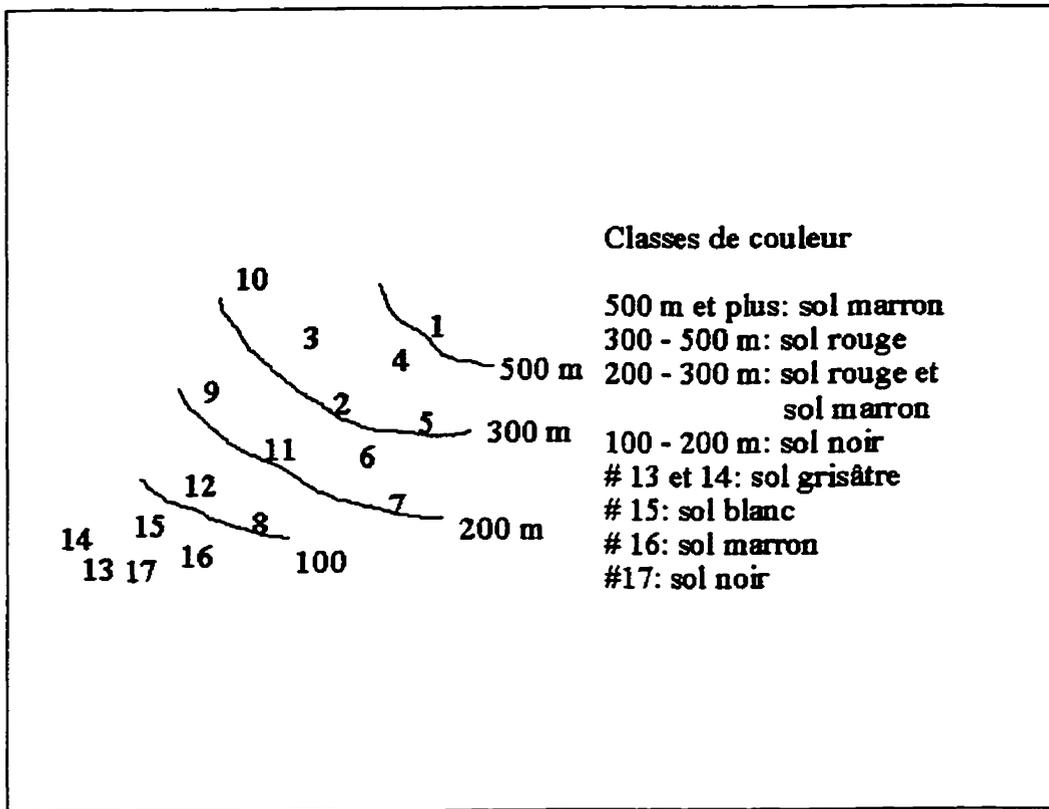


Figure 6. Sites d'échantillonnage des sols

1) Détermination de la teneur en eau des échantillons

- un sous-échantillon des 17 échantillons a été prélevé et pesé,
- ces sous-échantillons ont été placés à l'étuve à 105°C pendant une période de 48 heures,
- les sous-échantillons, une fois sortis de l'étuve, ont été placés dans des dessiccateurs et ensuite pesés afin de déterminer la masse sèche du sous-échantillon,
- connaissant les masses humides des sous-échantillons (M_{we}) ainsi que leur masse sèche (M_{se}), il était possible de calculer leur teneur en eau pondérale (θ_p) par la formule suivante :

$$\theta_p = [(M_{we} - M_{se}) / M_{se}] \times 100 \quad (13)$$

2) Combustion

- pour effectuer la combustion, environ 10 g de chacun des échantillons ont été tamisés à 32 mailles,
- avant de réaliser la combustion, la masse (C_o) sèche des échantillons a été calculée par la formule suivante :

$$C_o = [M_w / (\theta_p + 1)] \quad (14)$$

- la masse sèche des échantillons étant connus, ils ont été placés au four à 430°C pendant 24 heures,
- une fois sortis du four, ces échantillons ont été pesés afin de déterminer la masse des cendres (C_e),
- connaissant C_o et C_e , la teneur en matière organique pour les 17 échantillons a

été calculée comme suit :

$$\% \text{ M.O.} = (\text{Co}-\text{Ce}/\text{Co}) \times 100 \quad (15)$$

La teneur en M.O. pour les 17 échantillons variait entre 2.5% et 21%. Ce haut niveau de M.O. constaté pour la majorité des échantillons peut résulter d'une volatilisation de certaines particules minérales après la combustion. Pour considérer la teneur en M.O. des échantillons dans le nomogramme de Wischmeier, une limite de 4% a été envisagée pour tous les échantillons dont la teneur de M.O. était supérieure à 4%.

5.2.2 Détermination de la texture des sols

Pour évaluer la texture des 17 échantillons, les étapes suivantes ont été réalisées :

- une masse de 40 g ou 100 g de sol sableux ou limono-sableux a été considéré,
- ces masses de sol ont été placées dans des béchers de 500 ml,
- 100 ml d'une solution d'Héxamétaphosphate de sodium et 300 ml d'eau distillée ont été ajoutés aux échantillons de sol préalablement placés dans les béchers,
- ces suspensions ont été placées pendant 15 heures sur un agitateur oscillant, et
- ces suspensions ont été ensuite transvasées dans des cylindres et portées à 1 litre avec de l'eau distillée.

Avant de réaliser les lectures avec l'hydromètre, il a été étalonné:

- 100 ml d'une solution d'Héxamétaphosphate de sodium ont été versés dans un cylindre porté à 1 litre de l'eau distillée,
- la température de la salle a été notée et les lectures avec l'hydromètre ont été effectuées en introduisant l'hydromètre dans la solution.

L'hydromètre étant étalonné, on a procédé aux lectures à l'hydromètre des suspensions placés dans les cylindres. Ces lectures ont été effectuées après 30 secondes, 1 minute, 3, 10, 30, 90, 270 et 1080 minutes. La procédure de calcul du diamètre des particules est présenté en Annexe 4. Les résultats de l'analyse texturale pour les 17 échantillons de sol sont présentés au Tableau 4.

5.2.3 Détermination de la structure des sols

En se référant au système de classification des sols développé par le United States Department of Agriculture (Wischmeier et Smith 1978), une estimation de la structure des sols a été effectuée au laboratoire. Selon cette estimation, il a été déterminé que tous les sols de la zone d'étude avaient une structure granulaire moyenne, à l'exception des sols représentés par l'échantillon 15. La structure de ce dernier était qualifiée de granulaire fine.

5.2.4 Détermination des classes de perméabilité des sols

Compte tenu des difficultés pour effectuer la mesure directe de la perméabilité des sols au champ, une estimation *in situ* de ce paramètre a été effectué. Lors de ces estimations, la clé des classes de drainage du SISCan adapté par Zelazny *et al.* (1991) a été utilisée. Avec ces estimations, il a été constaté que tous les échantillons de sol analysés avaient une classe de drainage qualifiée de modérée à rapide, à l'exception des

Tableau 4. Classes texturales et contenu en matière organique des sols

No. Échant	% Sable	% sable très fin	% limon	% sable très fin + % limon	Classes texturales (USDA)	% M.O.
1	19	71	8	79	S	18
2	8	32	13	45	A-S	11
3	19	65	15	80	S-L	21.2
4	14	50	17	67	L-S	4.9
5	16	60	15	75	L-S	10
6	17	66	9	75	S-L	6.2
7	16	58	18	76	S-L	5.8
8	18	62	17	79	S-L	10.4
9	12	47	14	61	L-S-A	9.4
10	17	63	13	76	S-L	6.9
11	16	55	15	70	L-S	6.7
12	17	65	15	80	S-L	6.4
13	17	65	9	74	S-L	4.5
14	18	65	10	75	S-L	5.2
15	19	71	6	77	S-L	2.5
16	18	70	10	80	S	7
17	16	59	13	72	L-S	8

échantillons 13, 14, 15 et 16, dont les classes de drainage étaient qualifiées de mauvais, mauvais, rapide et rapide, respectivement.

La valeur des différents sous-facteurs étant connue, l'érodabilité proprement dite des sols a pu être calculée. Pour effectuer un tel calcul, la valeur de chacun de ces sous-

facteurs a été introduite dans le nomogramme de Wischmeier dans l'ordre suivant:

- pourcentage de limon et de sable très fin,
- pourcentage de sable,
- pourcentage de matière organique,
- classe structurale, et
- classe de perméabilité.

La valeur de l'érodabilité (K variant de 0 à 1) pour les 17 échantillons de sol est présentée au Tableau 5. En moyenne, l'érodabilité des sols du bassin versant est estimée à $0.046 \text{ t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$. Cette valeur moyenne se situe à l'intérieur de l'intervalle de celles obtenues par Durosier (1990) pour le bassin versant de la rivière Bouyaha, Haïti (K varie entre 0.004 et 0.150). L'examen de ce tableau permet de constater que les échantillons 13 et 14 accusent la plus forte valeur d'érodabilité des sols soit 0.0566. Ceci peut s'expliquer par le fait que le drainage de ces sols est très mauvais.

5.2.5 Intégration des valeurs de l'érodabilité des sols dans IDRISI

Pour intégrer les valeurs de l'érodabilité des sols dans la base de données spatiales, le processus suivant a été utilisé :

- numérisation à l'écran des superficies représentées par chaque échantillon (pour ce faire, on s'est inspiré d'un croquis réalisé sur le terrain et de celui présenté à la Figure 6),
- conversion du fichier vectoriel issu de la numérisation à l'écran en format matriciel (fichier image) en utilisant le module POLYRAS,

Tableau 5. Valeur de l'érodabilité des sols du bassin versant de la ravine Balan

No. Échantillon	Érodabilité (t · ha · h / ha · MJ · mm)
1 (sols isohumiques)	0.052
2 (sols fersiallitiques)	0.026
3 (sols fersiallitiques)	0.052
4 (sols fersiallitiques)	0.034
5 (sols fersiallitiques)	0.050
6 (sols isohumiques)	0.051
7 (sols isohumiques)	0.051
8 (vertisols)	0.052
9 (sols isohumiques)	0.032
10 (sols fersiallitiques)	0.051
11 (sols isohumiques)	0.039
12 (vertisols)	0.052
13 (Greyzems)	0.056
14 (Greyzems)	0.056
15 (sols salsodiques)	0.038
16 (sols isohumiques)	0.043
17 (vertisols)	0.048

- création d'un fichier de valeur à l'aide du module DATABASE WORKSHOP, et
- utilisation du module ASSIGN afin de faire la liaison entre l'image contenant les attributs géographiques et celle contenant la valeur de l'érodabilité de sols.

L'image représentant la valeur de l'érodabilité des sols du bassin versant de la ravine Balan est présentée à la Figure 7. Cette carte donne une idée des valeurs de

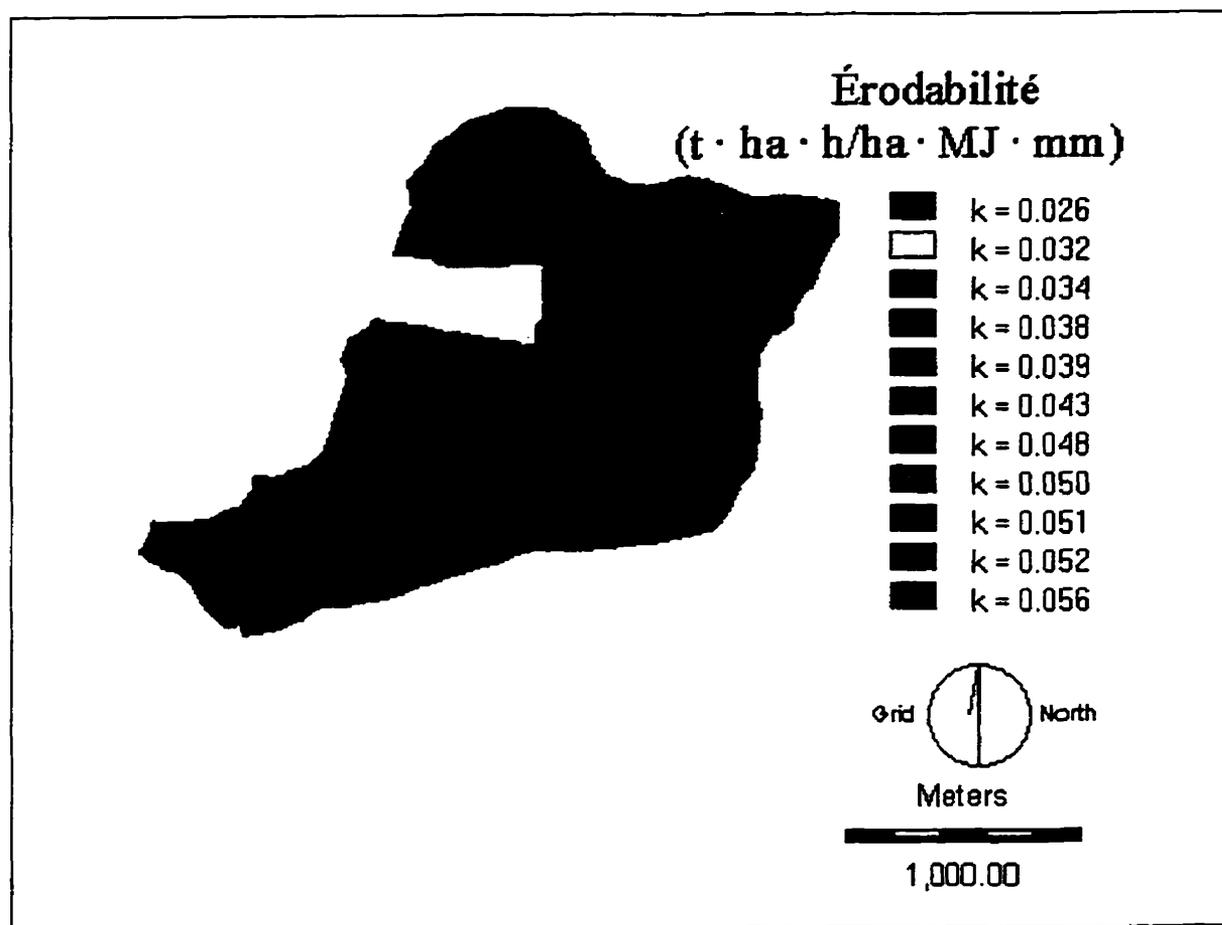


Figure 7. Carte d'érodabilité des sols du bassin versant de la ravine Balan

l'érodabilité des sols du bassin versant. Si on disposait d'une carte de sol avec les limites bien définies pour chaque type de sol, cela nous permettrait de contourner les problèmes rencontrés lors de la numérisation à l'écran. Ces problèmes étaient surtout caractérisés par la difficulté de numériser exactement, pendant deux fois, les lignes séparant deux zones avec des valeurs d'érodabilité différentes.

5.3 Valeur des facteurs topographiques (LS)

Tel qu'indiqué antérieurement, la longueur des pentes ainsi que leur inclinaison jouent un rôle important dans le processus d'érosion hydrique des sols. Leur action peut se résumer par le fait qu'elles facilitent le transport des particules de sol par l'eau. Compte tenu de leur importance dans le processus d'érosion des sols, il est impératif de les évaluer pour chaque cellule du bassin versant.

Pour arriver à déterminer la valeur des facteurs topographiques (LS), deux principales étapes ont été suivies :

- création du Modèle Numérique d'Altitude (MNA), et
- évaluation des valeurs de LS.

5.3.1 Création du Modèle Numérique d'Altitude (MNA)

Le MNA, défini comme étant une "représentation en forme numérique de la variation continue du relief à travers l'espace" (Burrough 1986), peut être obtenu de diverses façons. La procédure utilisée pour la présente étude est présentée à la Figure 8.

Pour l'obtention du MNA, une carte topographique de la zone d'étude d'échelle

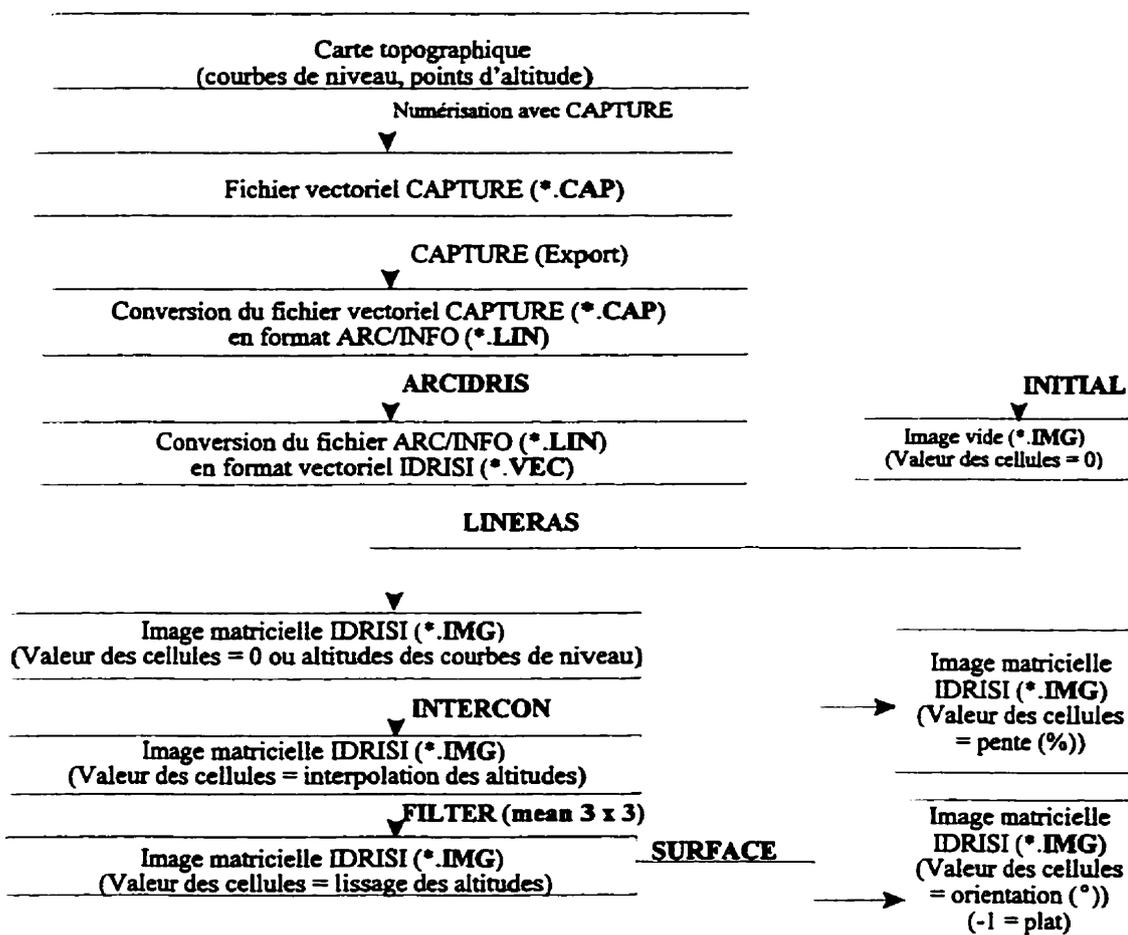


Figure 8. Processus de création du MNA à partir d'une carte topographique

1/25 000 a été utilisée. Cette carte, identifiée par la Feuille 5775 III SE du service de Géodésie d'Haïti, a été réalisée dans la Projection Transversale de Mercator suite à l'interprétation des photographies aériennes de 1956. Il y avait une distance de 20 m entre les courbes de niveau de la carte. Toutefois, pour certaines courbes supplémentaires il n'y avait qu'une distance de 10 m.

La saisie de l'information hypsométrique constitue l'étape initiale dans le processus de la création du MNA (Figure 8). À cette fin, la zone d'étude a été délimitée sur la carte topographique, en considérant toutefois une superficie plus grande pour les besoins de l'interpolation. Six points de contrôle ont été choisis afin que les entités numérisées puissent être dans un système de coordonnées réel, soit le système UTM dans le cas de la présente étude.

Étant donné que la zone d'étude est très accidentée, toutes les courbes de niveau de la superficie préalablement délimitée ont été numérisées afin d'obtenir une représentation fidèle de la topographie. Lors du processus de numérisation, l'étiquette donnée à chaque courbe de niveau était la valeur de l'altitude de la courbe considérée.

À l'issue de la numérisation, le fichier vectoriel des courbes de niveau a été créé. Le fichier vectoriel de format CAPTURE (*.CAP) a été converti en format ARC/INFO (*.LIN) à l'aide du module EXPORT de CAPTURE. À l'aide du module ARCIDRIS d'IDRISI, le fichier de format ARC/INFO a ensuite été importé et converti en format vectoriel IDRISI (*.VEC).

Suite à ces opérations, une image vide (toutes les cellules ont une valeur de 0) a été créée avec IDRISI. Cette image possède une résolution spatiale de 10 × 10 mètres. La

matrice utilisée est définie par les coordonnées suivantes:

- minimum X: 781000 m
- maximum X: 785000 m
- ΔX : 4000 m
- minimum Y : 2183000
- maximum Y : 2186000
- ΔY : 3000 m

Pour avoir la résolution spatiale antérieurement citée, la matrice pour l'image vide a été divisée en 400 colonnes et 300 rangées. Ce qui représente un total de 120000 cellules ou pixels ayant 0 comme valeur. Il faut, toutefois, signaler que la zone d'étude (bassin versant de la ravine Balan) englobe seulement 34700 de ces cellules, soit une superficie de 347 hectares.

Pour convertir les fichiers vectoriels d'IDRISI en format matriciel, le module LINERAS a été utilisé. Ce module convertit les lignes vectorielles en leur équivalent matriciel. Dans ce processus de conversion, un fichier image, en l'occurrence l'image vide, est mise à jour avec les valeurs associées à chaque ligne vectorielle. Cette opération se réalise en superposant les deux fichiers, soit les fichiers vectoriel et image. Avec LINERAS, chaque cellule qui est traversée par une courbe de niveau se voit attribuée la valeur (altitude) associée à la courbe. Cependant une valeur de 0 était attribuée aux cellules qui étaient traversées par aucune courbe de niveau.

En réalité, l'altitude de ces cellules est différente de 0. Comme aucune courbe de niveau ne les a traversées, il est difficile de connaître exactement leur altitude. Toutefois,

une valeur approximative de ces cellules peut être obtenue par interpolation.

Ainsi, le module INTERCON a été utilisé afin d'effectuer l'interpolation. Ce module, qui est une modification de l'algorithme CONSURF développé par D. Douglas à l'Université d'Ottawa fonctionne de la manière suivante (Eastman 1997):

- 1) Des profils sont construits le long des 4 bordures de la carte afin de produire un espace complètement fermé. Lors de cette étape, les altitudes des 4 coins de la carte ainsi que celles des courbes de niveau qui touchent les bordures sont utilisées pour produire les profils limites.
- 2) Un ensemble de profils horizontaux est créé à travers chaque cellule en utilisant les altitudes des profils limites et celles des courbes de niveau traversées par le balayage horizontal. À chaque cellule de valeur inconnue, l'altitude du profil horizontal qui la traverse est enregistrée.
- 3) Des profils verticaux sont créés à travers chaque cellule en utilisant le même procédé et les mêmes types de données que l'étape 2.
- 4) Des profils en diagonale de gauche à droite à travers l'image sont créés en utilisant le même procédé et les mêmes types de données que l'étape 2.
- 5) Des profils en diagonale de droite à gauche à travers l'image sont créés en utilisant le même procédé et les mêmes types de données que l'étape 2.
- 6) Un passage final à travers la matrice attribue à chaque cellule l'altitude du profil accusant la plus forte pente.

Après l'utilisation du module INTERCON, toutes les cellules ont maintenant une valeur représentant l'altitude. Certaines angularités ont été constatées dans l'image

produite après le processus précédent. Pour enlever ces angularités, il a fallu faire un lissage. Ceci a été fait en utilisant le module FILTER (mean 3 x 3). Ce module crée une nouvelle image où l'altitude d'une cellule est la moyenne de sa propre valeur et celle des 8 cellules voisines. Après avoir réalisé le lissage, le MNA est complété.

La qualité du MNA est généralement d'une grande importance, car elle est le principal facteur limitant pour les opérations futures, comme la détermination des pentes, de l'orientation et de la valeur de LS pour chaque pixel. Pour estimer la précision du MNA, certaines altitudes du modèle ont été comparées à d'autres altitudes facilement identifiables au niveau de la carte topographique. Parmi les trois points choisis sur la carte (altitude de 6 m, 369 m, 586 m), il n'y avait qu'une différence de 2.3 m en moyenne sur le modèle (altitude de 7 m, 367 m, 582 m). D'après le U.S. National Map Accuracy Standards cité par Eastman (1997), l'erreur standard admissible basée sur l'échelle est de 7.74 m pour une carte d'échelle 1/25 000. Considérant les erreurs possibles lors du processus de numérisation et pendant l'interpolation, la marge d'erreur de 2.3 m pour le MNA est toutefois acceptable. Une évaluation visuelle a également permis de déterminer que le MNA ne fait pas apparaître plus de vallons ou de thalwegs que la carte topographique.

Les caractéristiques hypsométriques de la zone étudiée (Figure 9), sont résumées au Tableau 6. L'examen de ce dernier permet de constater que 52% du bassin versant, soit 178.97 ha est dans la classe d'altitude comprise entre 0 et 100 m. Toutefois, seulement 1% de la superficie du bassin versant soit 3.17 ha est dans la classe d'altitude supérieure à 500 m.

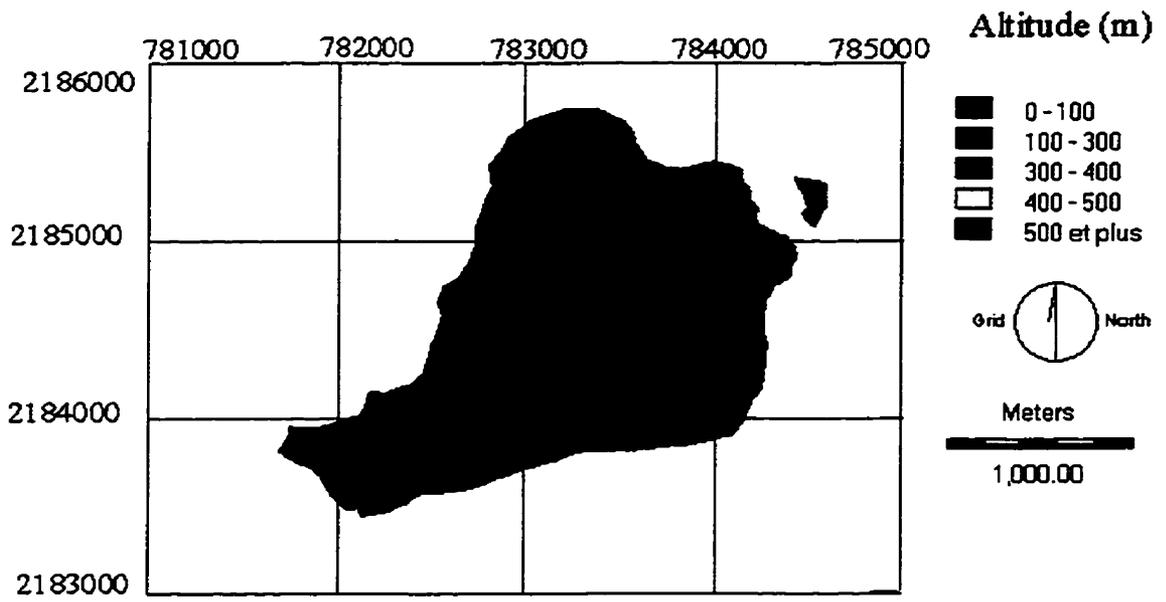


Figure 9. Carte hypsométrique du bassin versant de la ravine Balan

Tableau 6. Caractéristiques hypsométriques de la zone d'étude

Altitude (m)	Superficie (ha)	%
0 - 100	178.97	52
100 - 300	122.63	35
300 - 400	32.37	9
400 - 500	9.81	3
500 et plus	3.17	1
Total	346.97	100

Le fichier MNA étant disponible, le module SURFACE d'IDRISI a été utilisé pour produire les images de pente et d'orientation des cellules constituant le bassin versant de la ravine Balan. Dans l'image de pente présentée à la Figure 10, la valeur de chaque cellule indique la pente en pourcent, avec une valeur de 0 pour les cellules représentant les zones plates du bassin versant. Les informations de l'image de pente sont présentées au Tableau 7. L'analyse du Tableau 7 permet de remarquer que sur 346.93 ha représentant la superficie totale du bassin versant, seulement 82.63 ha (24%) accuse des pentes inférieures à 10%, tandis que les pentes supérieures à 30% occupent 50% du bassin versant, soit une superficie de 176.97 ha.

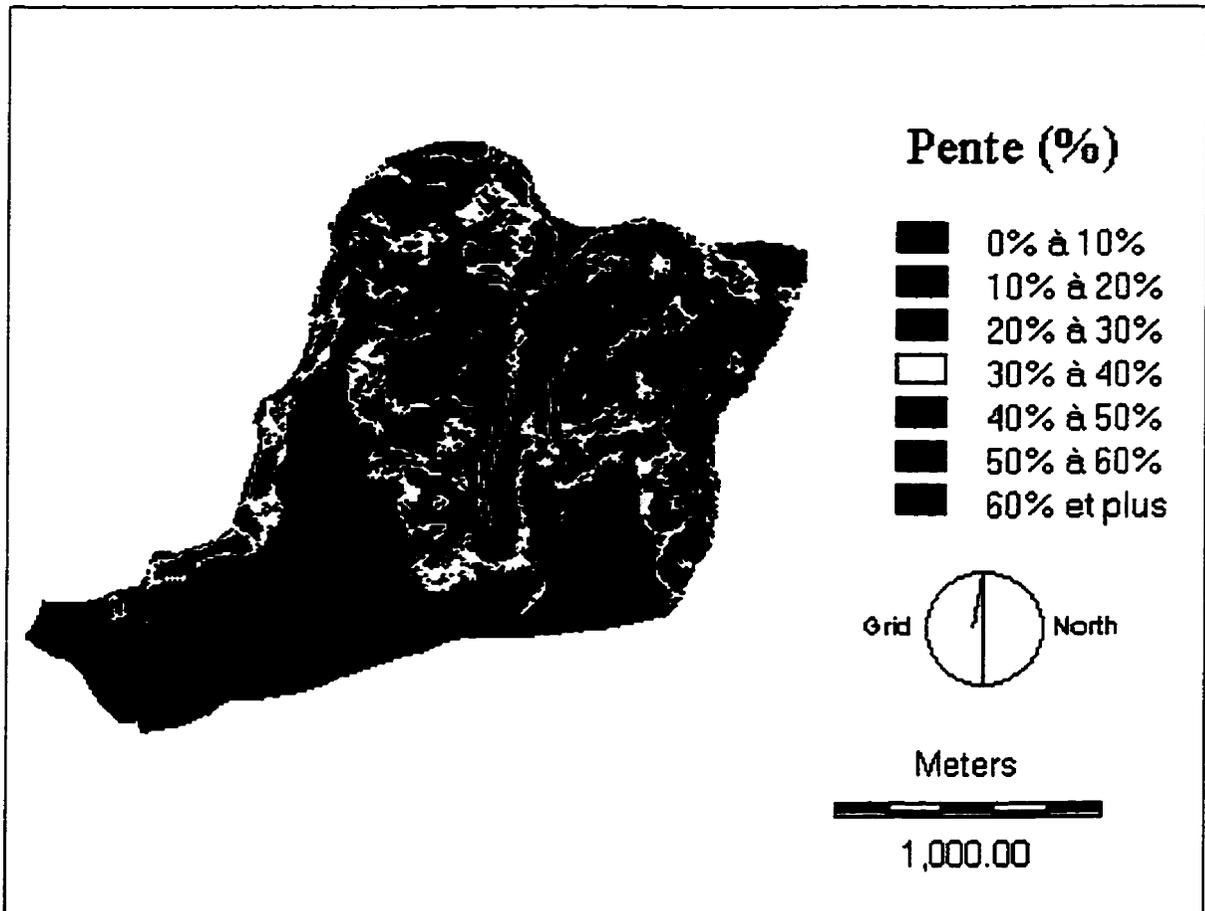


Figure 10. Carte de pente du bassin versant de la ravine Balan

Tableau 7. Classification des pentes du bassin versant de la ravine Balan

Pente (%)	Superficie (ha)	%
0 - 10	82.63	24
10 - 20	44.02	13
20 - 30	43.31	13
30 - 40	46.23	13
40 - 50	52.22	15
50 - 60	36.25	10
60 et plus	42.27	12
Total	346.93	100

Dans l'image d'orientation présentée à la Figure 11, la valeur de chaque cellule indique l'orientation en ($^{\circ}$), avec une valeur de -1 pour les cellules n'ayant aucune orientation (terrain plat). Comme on peut le constater au Tableau 8 qui résume les informations de l'image présentée à la Figure 11, la majeure partie du bassin versant, soit 230.97 ha est orientée vers le sud (90° - 270°).

5.3.2 Valeurs de LS pour le bassin versant de la ravine Balan

Pour déterminer LS pour chaque cellule du bassin versant, la version 3.1 du programme LS-Module écrit par Van Oost *et al.*(1997) a été utilisée. Pour l'exécution de ce programme, deux images IDRISI sont requises:

- l'image MNA avec les altitudes en nombre réel et en format ASCII, et
- un fichier (en format nombre entier et ASCII) où les cellules situées à l'intérieur

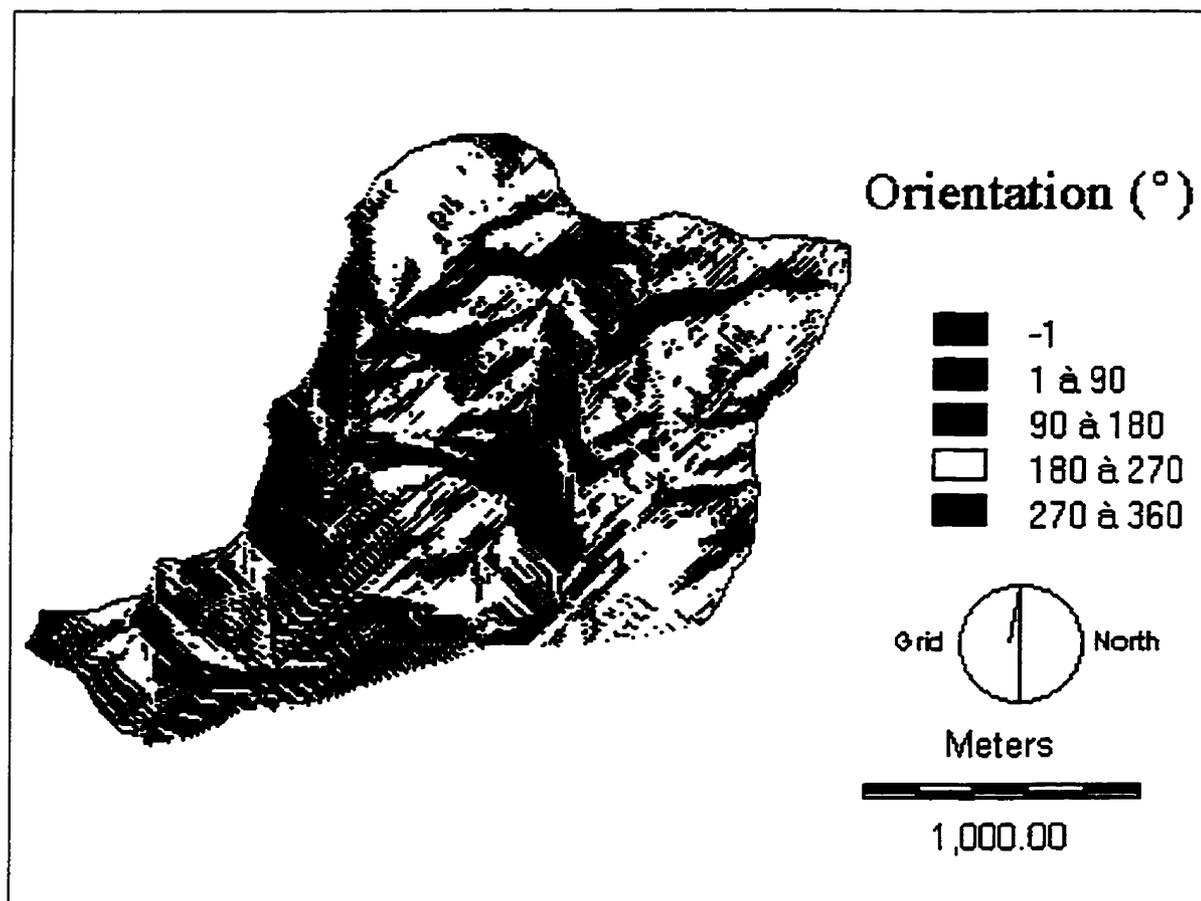


Figure 11. Carte d'orientation des cellules constituant le bassin versant de la ravine Balan

Tableau 8. Orientation des cellules constituant le bassin versant de la ravine Balan

Catégories (°)	Superficie (ha)	(%)
-1 (plat)	30.36	9
1 à 90	4.84	1
90 à 180	76.13	22
180 à 270	154.84	45
270 à 360	80.78	23
Total	346.95	100

du bassin versant ont 1 comme valeur, tandis que celles qui n'y sont pas ont 0 comme valeur.

Ce programme a été construit selon plusieurs formules et au moyen de plusieurs algorithmes. Pour la présente étude, l'algorithme "Steepest descent" basé sur la formule LS de Wischmeier a été retenue. Cet algorithme fonctionne de la manière suivante:

1) calcul du gradient de pente entre la cellule centrale et les cellules voisines situées en aval, et

2) conduite du flux dans la cellule voisine qui accuse la plus forte pente.

L'algorithme "Steepest descent" a été choisi pour sa simplicité (flux convergent).

Toutefois, il ne prend pas en compte les flux divergents et est très sensible aux petites erreurs. Par conséquent, s'il reste l'algorithme le plus utilisé, il n'est peut-être pas le meilleur choix dans le calcul de LS surtout pour les reliefs très accidentés (Desmet et Govers 1996b).

L'image représentant les différentes valeurs de LS a été reclassée et présentée à la Figure 12. En moyenne, LS a une valeur de 7.49 pour le bassin versant de la ravine Balan. Cette valeur de LS est supérieure à celle trouvée dans des pays comme le Canada, (LS généralement inférieure à 5) où la topographie est généralement peu accidentée (Wilson 1986). Comparée à la méthode manuelle de détermination des valeurs de LS pour un bassin versant, la méthode informatisée (à partir d'un SIG) offre certains avantages. Parmi ceux-ci, on peut citer:

- réduction considérable du temps mis pour la détermination des valeurs de LS,
- intégration des valeurs de LS dans une base de données spatiales, et
- représentation graphique des valeurs de LS pour tout le bassin versant.

Le Tableau 9 résume les informations contenues dans la Figure 12. L'analyse de ce tableau permet de remarquer que 73% du bassin versant ont une valeur de LS comprise entre 0 et 30, tandis que seulement 13% du bassin versant ont une valeur de LS supérieure à 60.

Tableau 9. Valeur du facteur combiné LS pour le bassin versant de la ravine Balan

Catégories	Superficie (ha)	%
0 - 30	252.17	73
30 - 60	48.24	14
60 - 90	19.73	6
90 - 120	8.75	2
120 et plus	18.06	5
Total	346.95	100

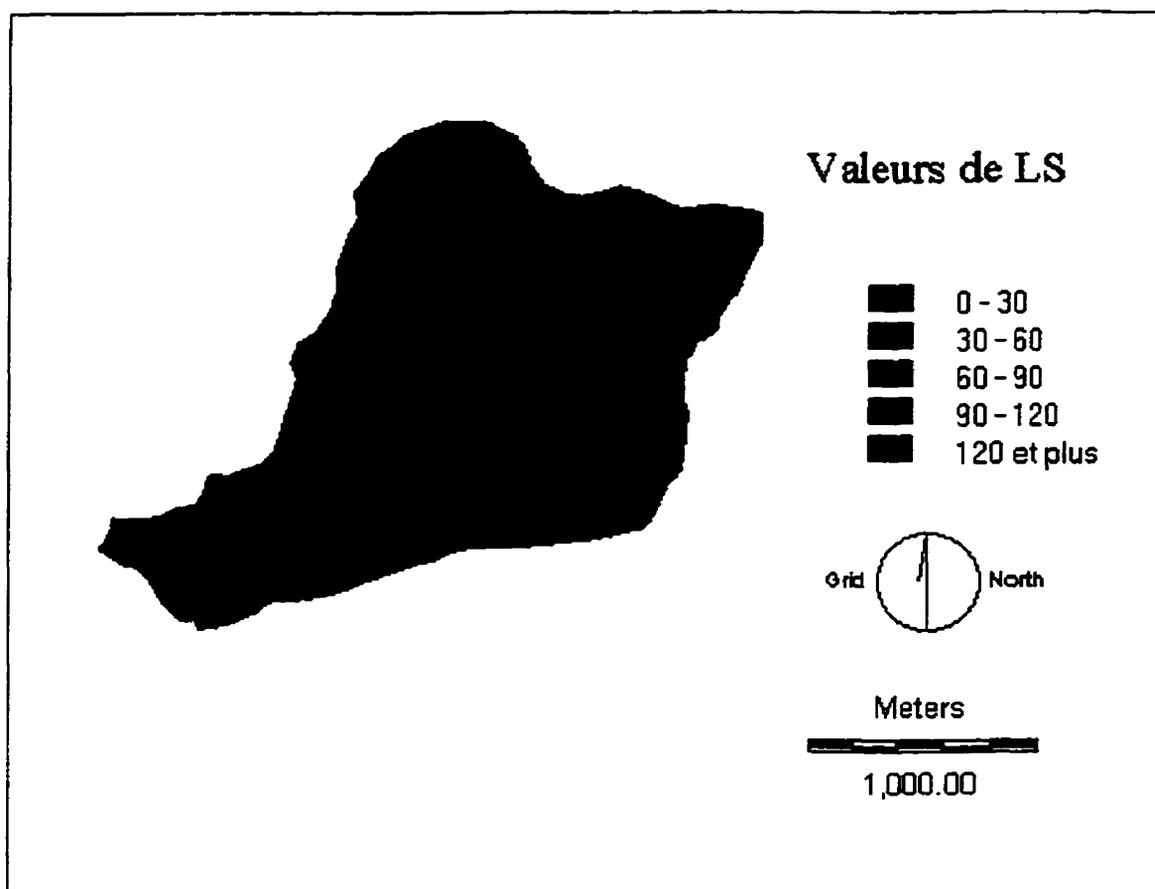


Figure 12. Carte des valeurs de LS pour le bassin versant de la ravine Balan

5.4 Potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan

Parfois, les aménagistes ont de la difficulté à obtenir des informations fiables et précises sur les facteurs de couverture végétale (C) et des pratiques de conservation des sols (P). Par conséquent, pour effectuer les travaux d'aménagement de bassin versant, ils se basent sur les secteurs les plus fragiles. La Figure 13 présente le potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan. Ce terme "potentiel érosif" fait référence à l'érosion qui se produirait si le bassin versant était complètement dénudé (pas de végétation, ni structures de conservation des sols). Autrement dit, le potentiel érosif est le produit des trois premiers facteurs du USLE, soit ceux de l'érosivité de la pluie (R), de l'érodabilité des sols (K) et des facteurs topographiques (LS).

Pour obtenir l'image présentée à la Figure 13, deux images non reclassées (valeur de LS et érodabilité des sols) et une constante (érosivité de la pluie) ont été multipliées. Cette multiplication d'images a été effectuée à l'aide du module IMAGE CALCULATOR.

En utilisant le module AREA, les superficies pour chaque classe de potentiel érosif présentée à la Figure 13 ont été calculées. Ces informations sont présentées au Tableau 10. Ce tableau permet de constater que les classes de potentiel érosif supérieures à 60 t / ha · an occupent 319.12 ha, soit 92% de la superficie totale du bassin versant de la ravine Balan.

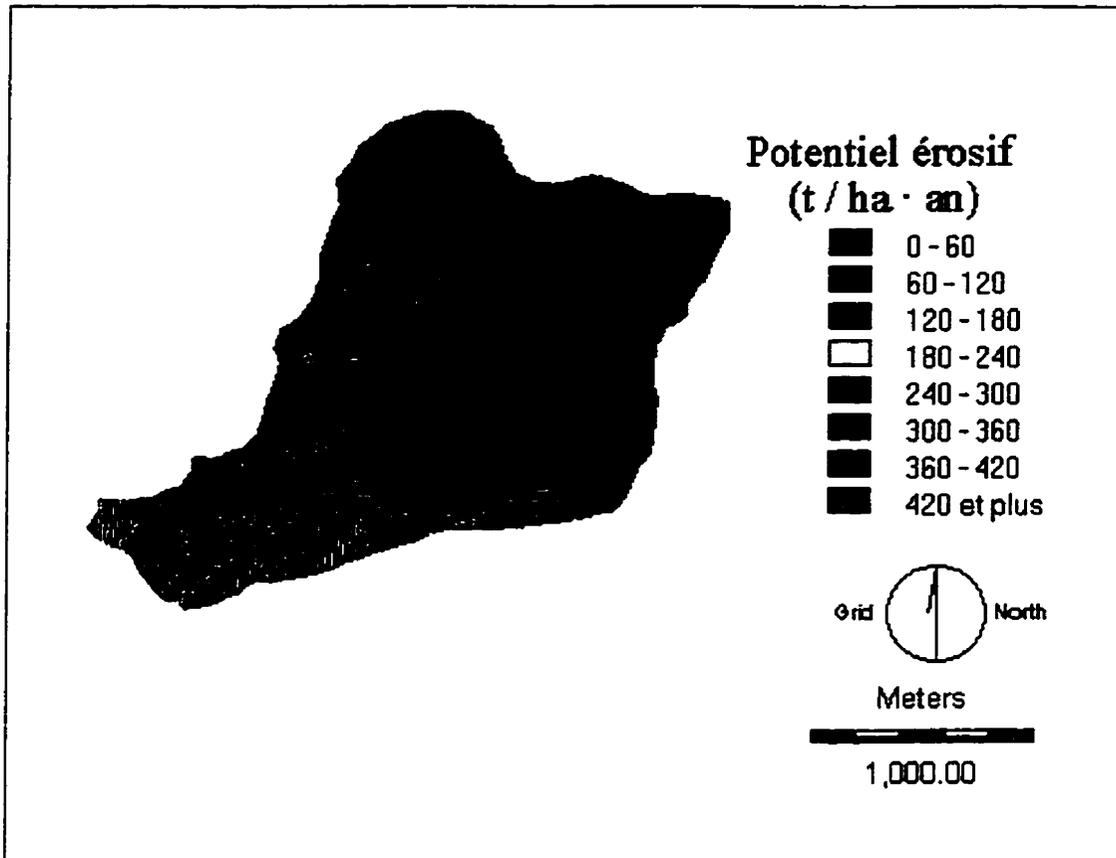


Figure 13. Carte de potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan

Tableau 10. Potentiel érosif du bassin versant de la ravine Balan

Classes	Potentiel érosif (t / ha · an)	Superficie (ha)	%
P1	0 - 60	27.66	8
P2	60 - 120	5.42	2
P3	120 - 180	19	5
P4	180 - 240	7.37	2
P5	240 - 300	5.97	2
P6	300 - 360	6.52	2
P7	360 - 420	3.20	1
P8	420 et plus	271.64	78
Total		346.78	100

5.5 Valeur du facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C)

Le système cultural de la zone d'étude est généralement caractérisé par des associations culturales. Les associations les plus courantes sont :

- patate, maïs, pois connu,
- patate, manioc, pois connu, et
- igname, taro (*Colocasia antiquorum* L.), banane (*Musa sapientum* L.).

La monoculture est très rare dans la zone. Dans la partie marécageuse du bassin versant de la ravine Balan (extrémité ouest), on y retrouve néanmoins la monoculture du riz.

La méthode de détermination de la valeur du facteur C décrite par Wischmeier et

Smith (1978) n'a pas été d'une grande utilité dans l'évaluation de C pour les associations culturales ci-haut mentionnées. Cette situation s'explique par le fait que les systèmes de production pratiqués dans la zone ne correspondent pas à ceux considérés dans les 10 000 parcelles / année qui ont servi à la formulation du USLE. Face à cet handicap, les valeurs de C pour des systèmes de production semblables à Ste-Lucie ont été considérées. Ainsi, une valeur de 0.12 a été assignée aux zones du bassin versant occupées par des associations culturales et une valeur de 0.01 aux zones boisées. Toutefois, pour la culture du riz, on s'est servi de la méthode de Wischmeier et Smith (1978). La valeur de C pour la monoculture est donc égale à 0.33.

Bien qu'il était difficile d'évaluer la valeur de C pour les associations culturales, on pouvait constater que leur phase de germination correspondait avec les périodes de pluie les plus érosives, soit février, septembre et octobre. La valeur de C pour chaque type d'agriculture étant définie, on a procédé à leur intégration dans la base de données spatiales.

Le processus d'intégration du facteur C dans IDRISI est présenté à la Figure 14. La photographie aérienne d'échelle 1/50 000 couvrant la superficie du bassin versant a été balayée optiquement à 350 DPI (Dot Per Inch), d'où une résolution terrain de 3.6 m. L'image balayée optiquement a été sauvegardée sous le format TIFF non compressé. Le fichier de format TIFF a été importé dans IDRISI à l'aide du module TIFIDRIS. Suite à cette opération le fichier image X.IMG a été créé.

Pour que la photographie aérienne balayée optiquement ait le même système de référence que les autres cartes déjà produites, le module RESAMPLE a été utilisé. Cette

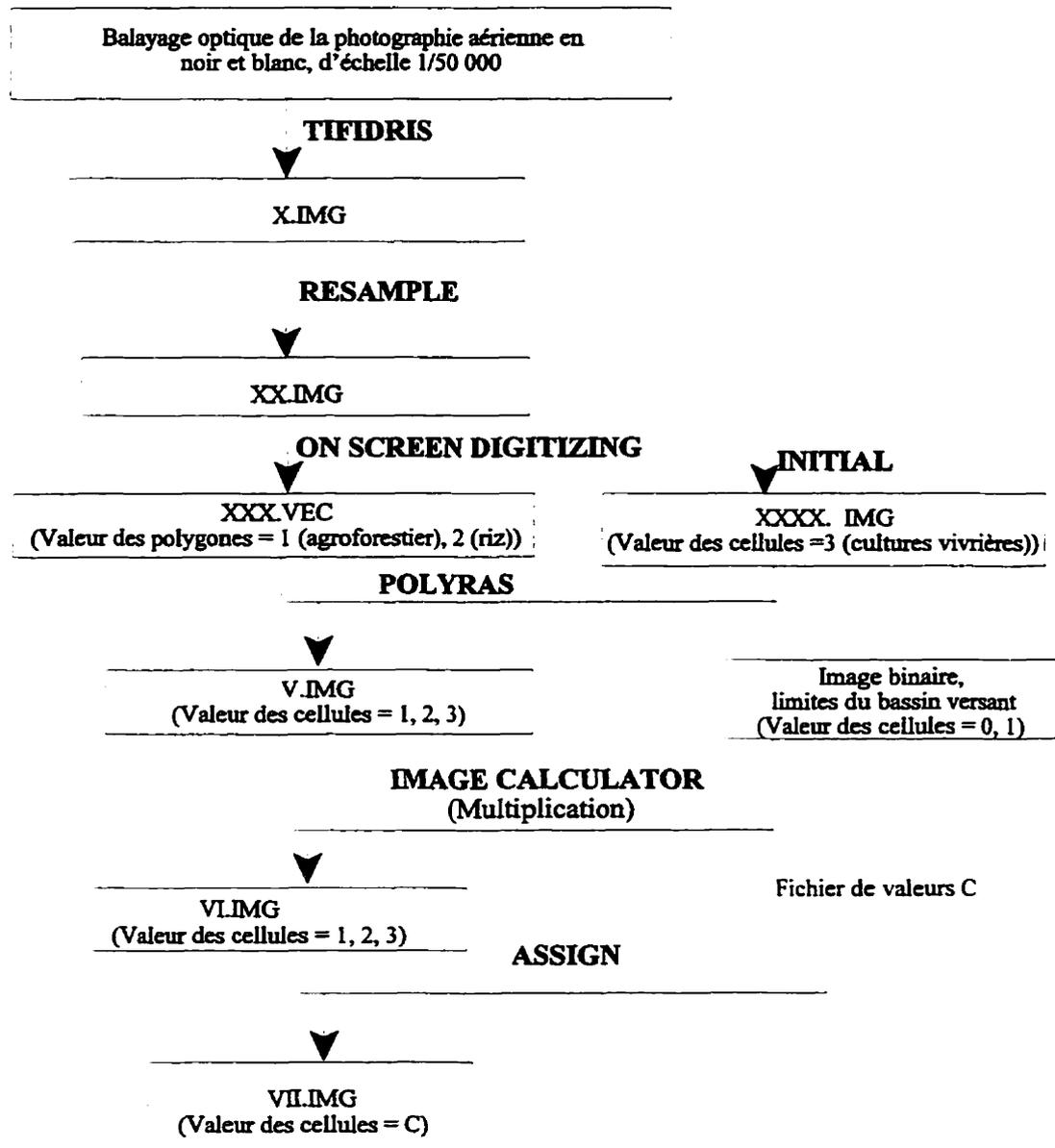


Figure 14. Processus d'intégration des valeurs de C dans IDRISI

opération a permis d'avoir l'image de la photo géoréférencée appelée XX.IMG. Cette image fut affichée et numérisée à l'écran à l'aide du module ON SCREEN DIGITIZING.

Pour effectuer cette numérisation, trois classes de système de culture ont été déterminées:

- les arbres associés aux cultures (agroforesterie),
- zones sous culture du riz, et
- zones occupées par les associations de cultures vivrières.

Comme la dernière classe était la plus représentée au niveau du bassin versant, seules les deux premières ont fait l'objet de cette numérisation. Ainsi une étiquette de 1 a été donnée aux polygones d'arbres associés aux cultures, tandis qu'une étiquette de 2 a été donnée à la zone sous culture du riz. Suite à cette numérisation, le fichier vectoriel XXX.VEC a été créé.

Rendu à ce stade, une image appelée XXXX.IMG où toutes les cellules ont une valeur de 3 a été créée à l'aide du module INITIAL. Le fichier vectoriel ci-haut mentionné fut converti en format matriciel à l'aide du module POLYRAS. À ce moment, les cellules de valeur 3 dans l'image V.IMG correspondent aux zones occupées par les associations culturelles. Cette image a été superposée à celle constituée par les limites du bassin versant afin d'avoir l'image VI.IMG.

Un fichier de valeurs a été créé avec DATABASE WORKSHOP. Dans ce fichier, on avait les valeurs associées aux cellules dans VI.IMG (1,2,3) et les valeurs de C, soit 0.01 pour les polygones d'arbres associés aux cultures, 0.33 pour la zone sous culture du riz et 0.12 pour les zones occupées par les associations culturelles. Le fichier de valeur une fois créé, le module ASSIGN a été utilisé afin de lier le fichier image VI.IMG au fichier

de valeurs. L'image présentée à la Figure 15 représente la carte d'utilisation des sols du bassin versant de la ravine Balan avec la valeur de C pour chaque mode d'occupation de l'espace. Les informations contenues dans cette carte sont résumées au Tableau 11.

L'examen de ce dernier met en évidence la représentativité considérable des associations de cultures vivrières dans la zone. Sur une superficie totale de 346.95 ha, les associations culturales occupent environ 74%, soit 256.15 ha. Il faut signaler que ce mode d'occupation de l'espace se rencontre aussi bien dans les zones à faible pente que dans celles où les pentes sont très prononcées. Par ailleurs, les zones occupées par les arbres associés aux cultures ne représentent que le quart du bassin versant, soit 88.16 ha.

Tableau 11. Modes d'occupation des sols à Balan

Catégorie	Superficie (ha)	%
arbres associés aux cultures	88.16	25
riz	2.28	1
association de cultures vivrières	256.51	74
Total	346.95	100

5.6 Valeur du facteur des pratiques de conservation des sols (P)

La valeur de P (variant de 0 à 1) est considérée constante et égale à 1 pour tout le bassin versant. Cette situation s'explique par le fait que les enquêtes de parcelles et les visites de terrain ont révélé que les agriculteurs labourent le sol dans le sens de la pente (du haut vers

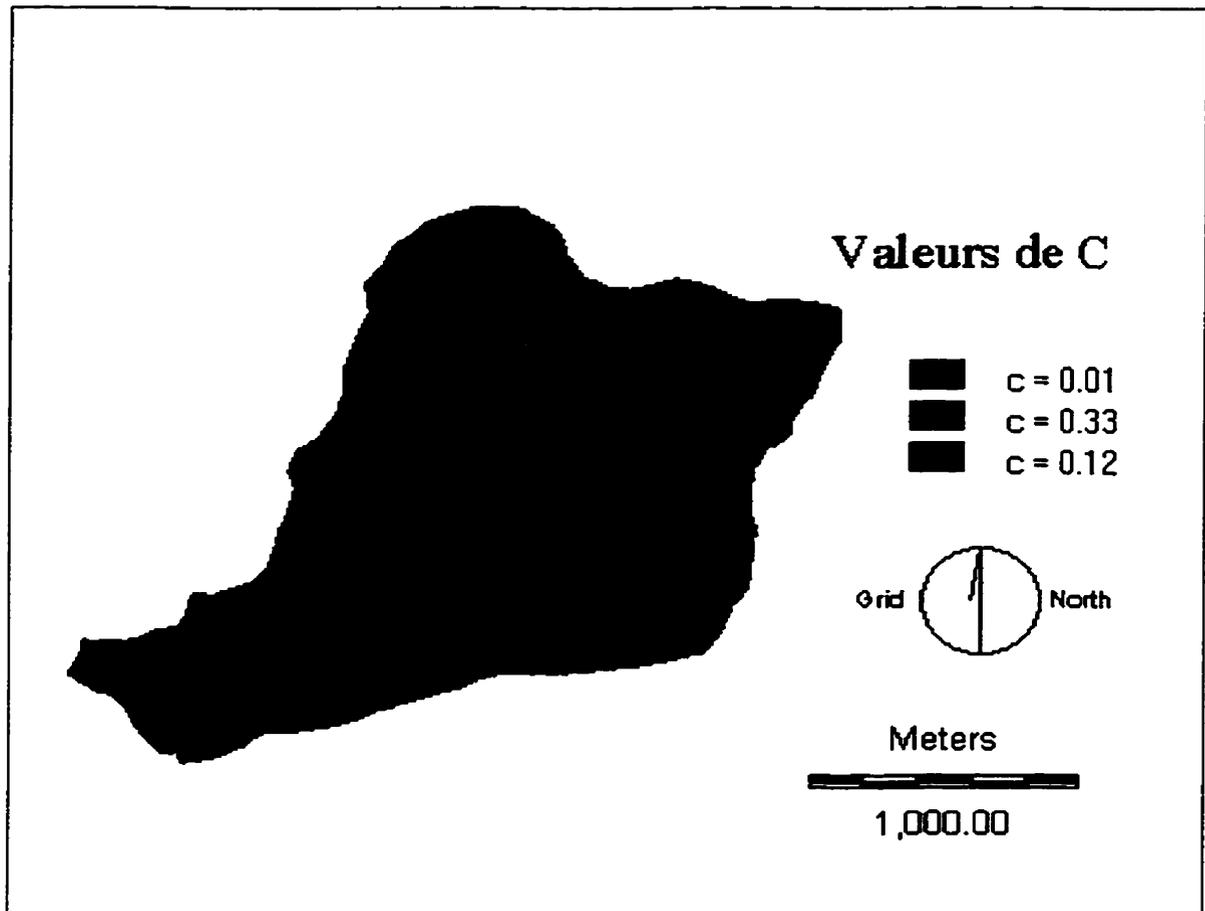


Figure 15. Carte des valeurs de la couverture végétale et des pratiques culturales

le bas) et n'établissent généralement pas de structures anti-érosives.

5.7 Estimation de l'érosion hydrique des sols

Suite à la détermination et à l'intégration des paramètres du USLE dans la base de données spatiales, on a pu estimer l'érosion hydrique des sols du bassin versant de la ravine Balan. Pour effectuer une telle estimation, le module IMAGE CALCULATOR a été utilisé afin de multiplier les trois images (K, LS et C) et les deux constantes (R et P). Cette opération de superposition d'images et de constantes a permis de produire l'image d'érosion hydrique des sols présentée à la Figure 16. Une analyse de l'image d'érosion non reclassée a révélé que l'érosion hydrique des sols pour le bassin versant est estimée à 304.07 t / ha · an en moyenne. Cette valeur moyenne est approximativement égale à celle déterminée par Madramootoo et Cox (1997) à l'aide de la même méthode (couplage USLE/SIG) pour le bassin versant Soufrière, Ste-Lucie (où l'érosion des sols a été estimée à 309 t / ha · an en moyenne).

Les informations contenues dans la Figure 16 sont résumées au Tableau 12. Ce tableau permet de constater que les classes E1 et E2, dont l'érosion est à l'intérieur du seuil tolérable admis en Haïti, n'occupent que 70.47 ha, soit 21% de la superficie du bassin versant. Les classes E3 à E8 dont l'érosion estimée dépasse 12 t / ha · an couvrent une superficie de 276.31 ha, soit 79% de la superficie totale du bassin versant de la ravine Balan. Avec une superficie de 243.20 ha, soit 70% de la superficie totale du bassin versant, la classe E8 est la plus représentée. Cette classe, localisée dans les zones à forte pente sous cultures vivrières confirme, une fois de plus, l'influence de telles

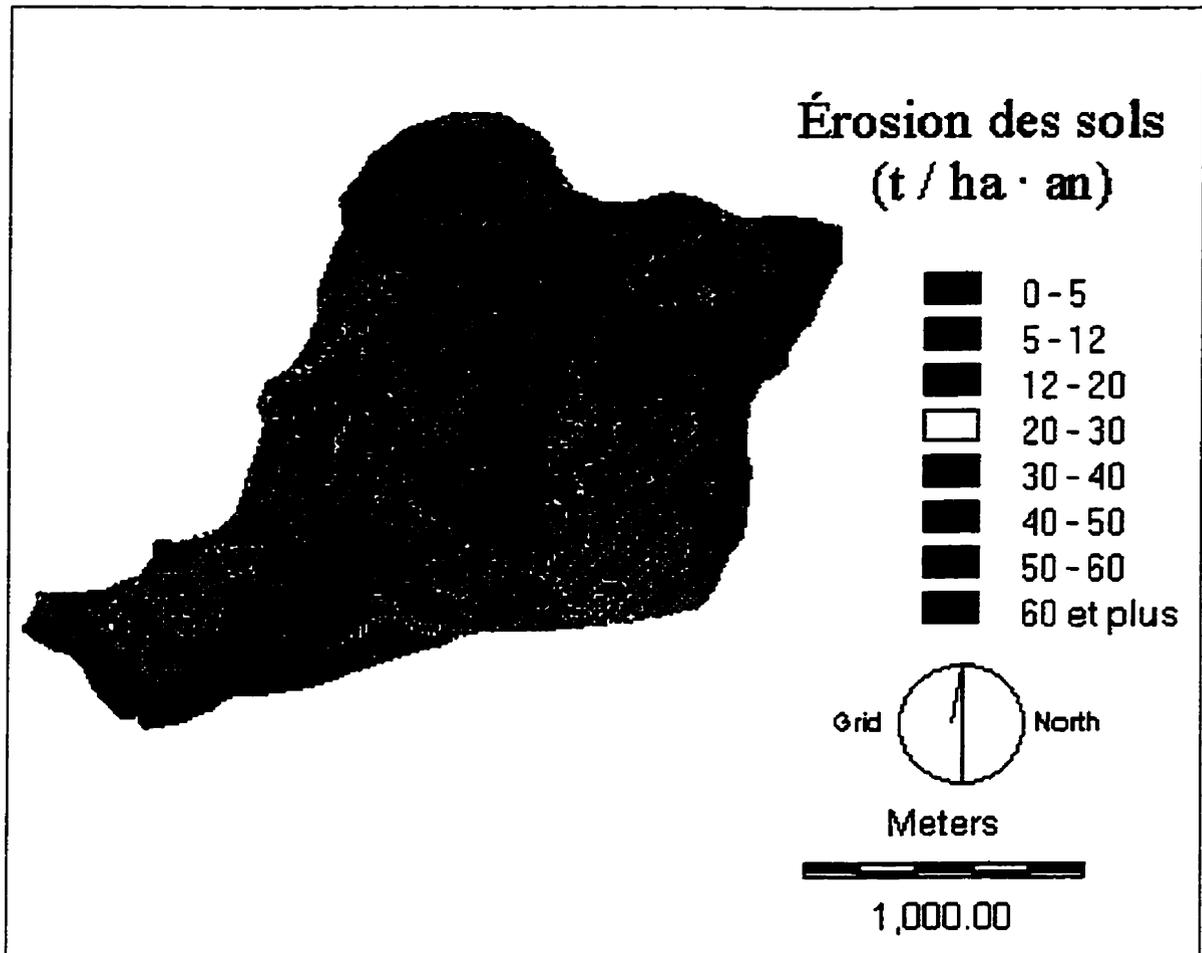


Figure 16. Carte d'érosion des sols du bassin versant de la ravine Balan

pratiques sur l'érosion hydrique des sols.

Tableau 12. Érosion hydrique des sols du bassin versant de la ravine Balan

Classes	Érosion (t / ha · an)	Superficie (ha)	%
E1	0 - 5	59.68	17
E2	5 - 12	10.79	4
E3	12 - 20	10.14	3
E4	20 - 30	7.69	2
E5	30 - 40	5.46	1
E6	40 - 50	5.85	2
E7	50 - 60	3.97	1
E8	60 et plus	243.20	70
Total		346.78	100

5.8 Propositions d'aménagement

Les zones les plus dégradées du bassin versant de la ravine Balan correspondent à celles où l'érosion est estimée à environ 60 t / ha · an et plus. Cette classe occupe environ 70 % du bassin versant. Ainsi, vue la superficie couverte par cette classe, les propositions d'aménagement y ont été exclusivement consacrées.

Bien qu'on ne peut agir que sur les facteurs C et P du USLE, il existe toutefois plusieurs scénarios d'aménagement pouvant réduire la superficie couverte par les zones dont l'érosion hydrique est supérieure à 60 t / ha · an. Pour la présente étude, trois scénarios d'aménagement ont été envisagés : cultures en contour, cultures en banquettes

et un système agroforestier.

- **Scénario 1:** La culture en contour (contouring) sera pratiquée partout où l'érosion hydrique est supérieure à 60 t / ha · an. Cette structure de conservation des sols réfère à l'établissement de petits canaux perpendiculaires à la pente du champ considéré.

La valeur du facteur P, qui était 1 sans les structures de conservation des sols, sera donc inférieure à 1. Sa valeur avec l'établissement de la culture en courbe de niveau est présentée au Tableau 13. Ce tableau donne les valeurs du facteur P en fonction de la pente. En analysant ce tableau, il est constaté que plus la pente est élevée, plus grande est la valeur du facteur P. Une valeur de 0.90 était assignée aux pentes supérieures à 25%.

Tableau 13. Valeurs de P pour les cultures en contour (adapté de Wischmeier et Smith 1978)

Pente (%)	Valeur de P
1 à 2	0.60
3 à 5	0.50
6 à 8	0.50
9 à 12	0.60
13 à 16	0.70
17 à 20	0.80
21 et plus	0.90

Les valeurs de P étant définies pour les différentes classes de pente, on a procédé à leur intégration dans la base de données spatiales. Le processus d'intégration des valeurs de P dans la base de données spatiales est présenté à la Figure 17. Lors de ce processus, deux fichiers images ont été utilisés : le fichier image d'érosion des sols et celui des pentes. L'image d'érosion des sols, X.IMG, a été reclassée pour créer l'image XX.IMG. Lors de cette reclassification, une valeur de 100 a été attribuée à toutes les cellules où l'érosion était inférieure à 60 t / ha · an, tandis qu'une valeur de 0 était attribuée à celles où l'érosion était supérieure ou égale à 60 t / ha · an.

L'image de pente Y.IMG a été également reclassée pour créer l'image YY.IMG. Pour cette reclassification, on s'est inspiré du Tableau 13. Toutefois des nombres entiers ont été attribués aux pentes, soit 60 pour les pentes de 1 à 2%, 50 pour les pentes de 3 à 5% et 6 à 8%, 60 pour les pentes de 9 à 12%, 70 pour les pentes de 13 à 16%, 80 pour les pentes de 17 à 20% et 90 pour les pentes supérieures ou égales à 21%.

À l'aide du module IMAGE CALCULATOR, les images XX.IMG et YY.IMG furent additionnés pour donner l'image XY.IMG. Cette image a été reclassée (valeur de 100 aux cellules avec valeur supérieure à 90) pour donner l'image XY1.IMG. Afin d'avoir les valeurs de P indiquées au Tableau 13, l'image XY1.IMG a été divisée par 100 à l'aide du module IMAGE CALCULATOR pour créer l'image XY2.IMG. L'image XY2.IMG issue de cette division a été multipliée par le fichier image des limites du bassin versant. Ainsi, l'image XY3.IMG avec les vraies valeurs de P pour les zones d'érosion hydrique supérieure à 60 t / ha · an a été créée. Cette image est présentée à la Figure 18.

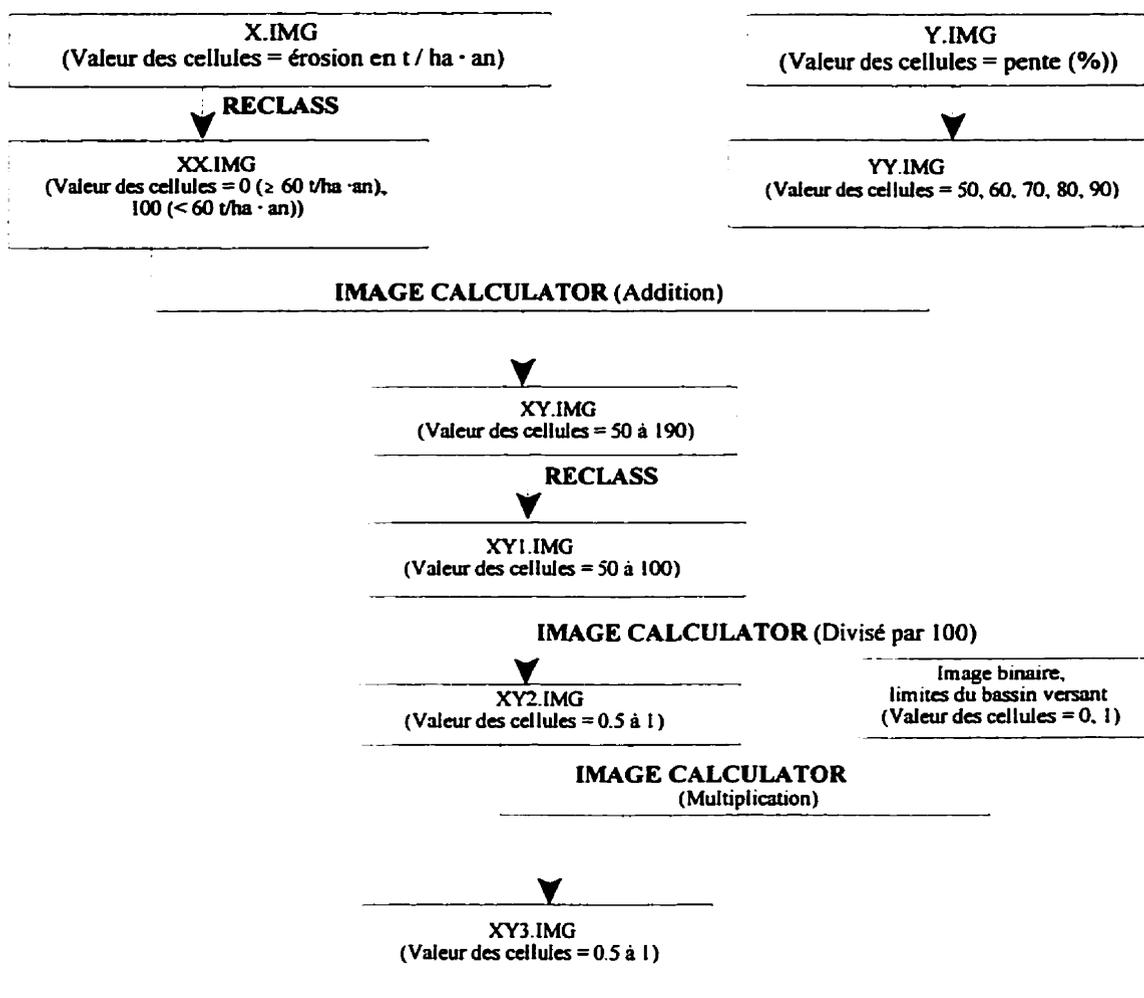


Figure 17. Processus d'intégration des valeurs du facteur P dans la base de données spatiales

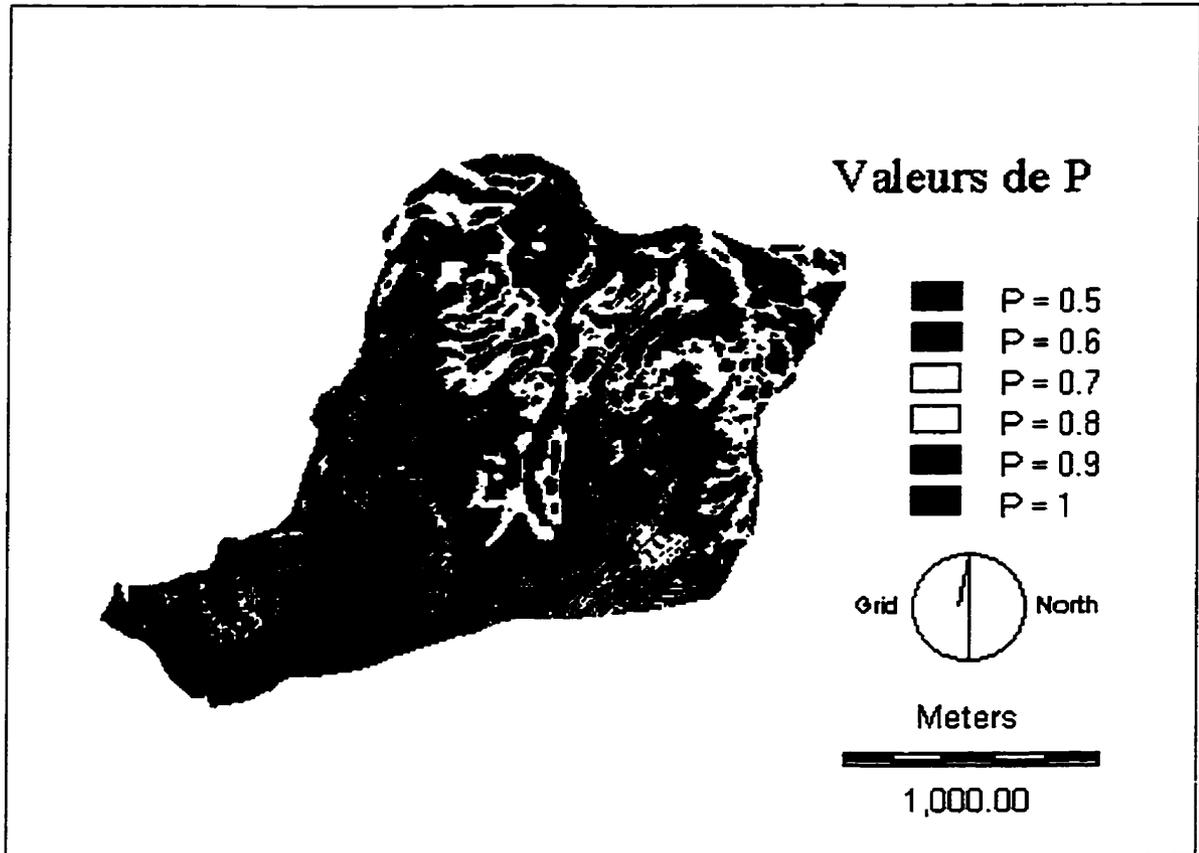


Figure 18. Carte des valeurs du facteur P pour les cultures en contour

Les valeurs de P étant intégrées dans la base de données spatiales, il est possible d'estimer la superficie couverte par la classe d'érosion supérieure à 60 t / ha · an pour le scénario des cultures en contour. Pour une telle estimation, il a fallu multiplier à l'aide du module IMAGE CALCULATOR les images contenant les valeurs des 6 paramètres qui constituent le USLE. Cette opération a donné l'image d'érosion des sols pour le scénario des cultures en courbe de niveau présentée à la Figure 19.

L'histogramme de cette image a été produit et comparé à celle de l'érosion des sols sous les systèmes de production actuels du bassin versant de la ravine Balan. La comparaison des deux histogrammes est présentée au Tableau 14. Ce tableau permet de constater que la culture en contour peut effectivement réduire la superficie occupée par la classe d'érosion supérieure à 60 t / ha · an. En effet, cette classe, qui occupait 70% du bassin versant sous les conditions actuelles d'aménagement, occuperait 63% si la culture en contour était pratiquée dans les zones très érodées, soit les zones d'érosion supérieure à 60 t / ha · an.

Il est important de signaler que la réduction apportée par la culture en courbe de niveau est toutefois faible, soit 7%. Cette situation s'explique par la présence de fortes pentes (supérieures à 20%) au niveau du bassin versant. En effet, il a été déterminé que de telles structures ne sont efficaces que dans les zones où les pentes sont généralement inférieures à 10% (Wischmeier et Smith 1978). Ces structures, pour jouer leur rôle de protection, doivent être régulièrement maintenues, ce qui implique une certaine disposition de main-d'oeuvre et certains équipements élémentaires appropriés.

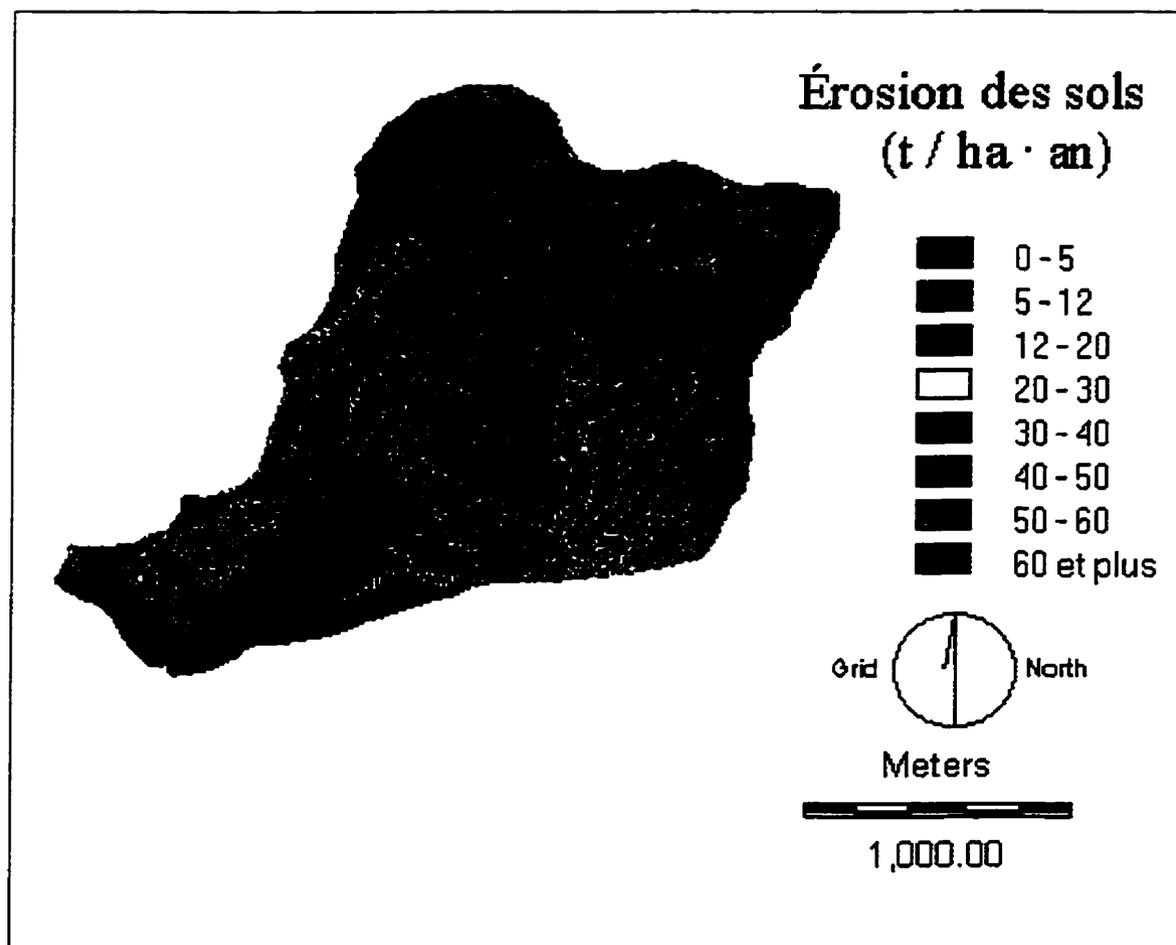


Figure 19. Carte d'érosion pour le scénario des cultures en contour

Tableau 14. Érosion sous les conditions actuelles comparée à celle pour le scénario 1

Érosion (t / ha · an)	Superficie (ha) - (%)	
	Conditions actuelles	Cultures en contour
0 - 5	59.68 - (17%)	59.68 - (17%)
5 - 12	10.79 - (4%)	10.79 - (4%)
12 - 20	10.14 - (3%)	11.86 - (3%)
20 - 30	7.69 - (2%)	11.79 - (3%)
30 - 40	5.46 - (1%)	12.13 - (3%)
40 - 50	5.85 - (2%)	12.93 - (4%)
50 - 60	3.97 - (1%)	10.99 - (3%)
60 et plus	243.20 - (70%)	216.61 - (63%)
Total	346.78 - (100%)	346.78 - (100%)

- **Scénario 2** : La culture en banquette (terracing) est pratiquée dans les zones où l'érosion dépasse 60 t / ha · an. Cette structure consiste essentiellement en une série de bandes horizontales ou quasi-horizontales s'étendant à travers du champ et soutenues par des talus abrupts. À l'instar des cultures en contour, les valeurs de P pour ce type d'aménagement varie selon la pente. Ces valeurs déterminées par Wischmeier et Smith (1978) ont été adaptées et présentées au Tableau 15.

Tableau 15. Valeurs de P pour les cultures en banquette (adapté de Wischmeier et Smith 1978)

Pente (%)	Valeurs de P
1 à 2	0.45
3 à 5	0.38
6 à 8	0.38
9 à 12	0.45
13 à 16	0.52
17 à 20	0.60
21 et plus	0.68

Les valeurs de P pour les cultures en banquette étant connues, on a procédé à leur intégration dans la base de données spatiales. La procédure présentée à la Figure 17 a été également utilisée pour les valeurs de P pour les cultures en banquette. L'image des valeurs de P pour les cultures en banquette est présentée à la Figure 20.

Après avoir intégré les valeurs de P pour les cultures en banquette dans la base de données spatiales, on a procédé à l'estimation de l'érosion hydrique des sols pour ce scénario d'aménagement. Pour effectuer cette estimation, les images contenant les valeurs des 6 paramètres du USLE ont été superposées (multipliées) à l'aide du module IMAGE CALCULATOR. Le produit de cette opération est l'image d'érosion des sols présentée à la Figure 21.

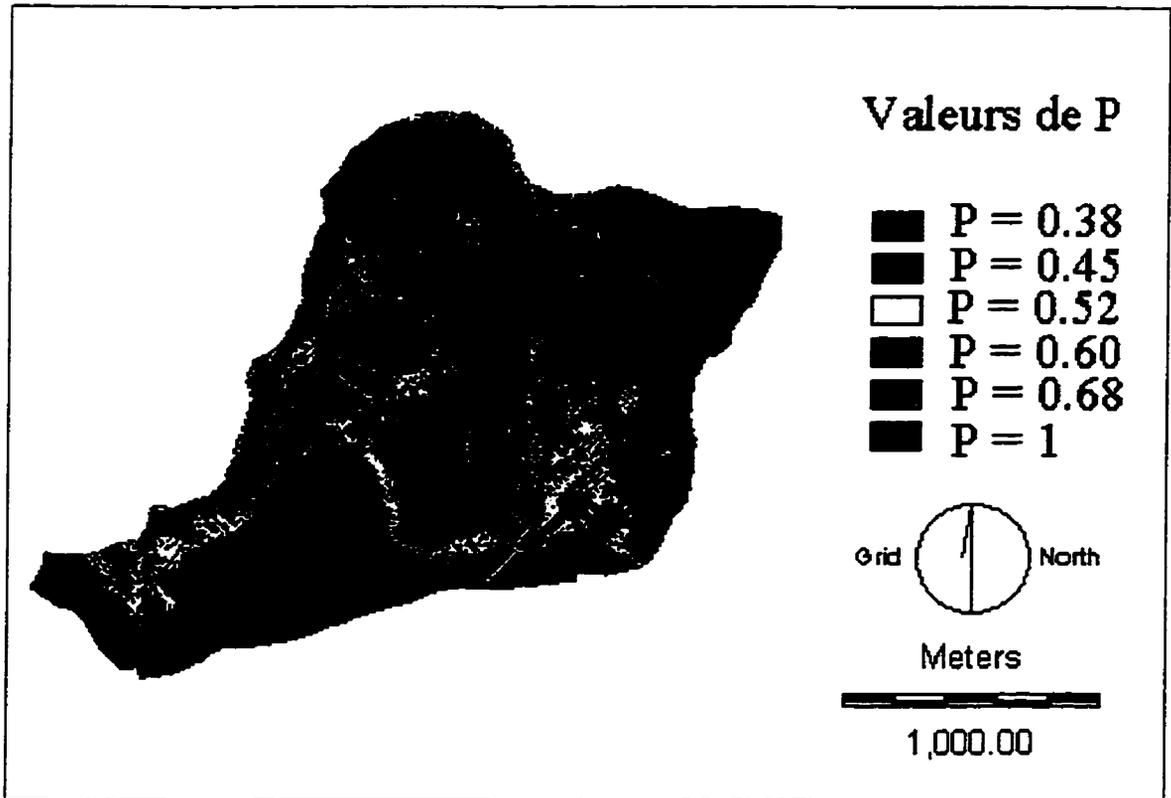


Figure 20. Carte des valeurs de P pour les cultures en banquette

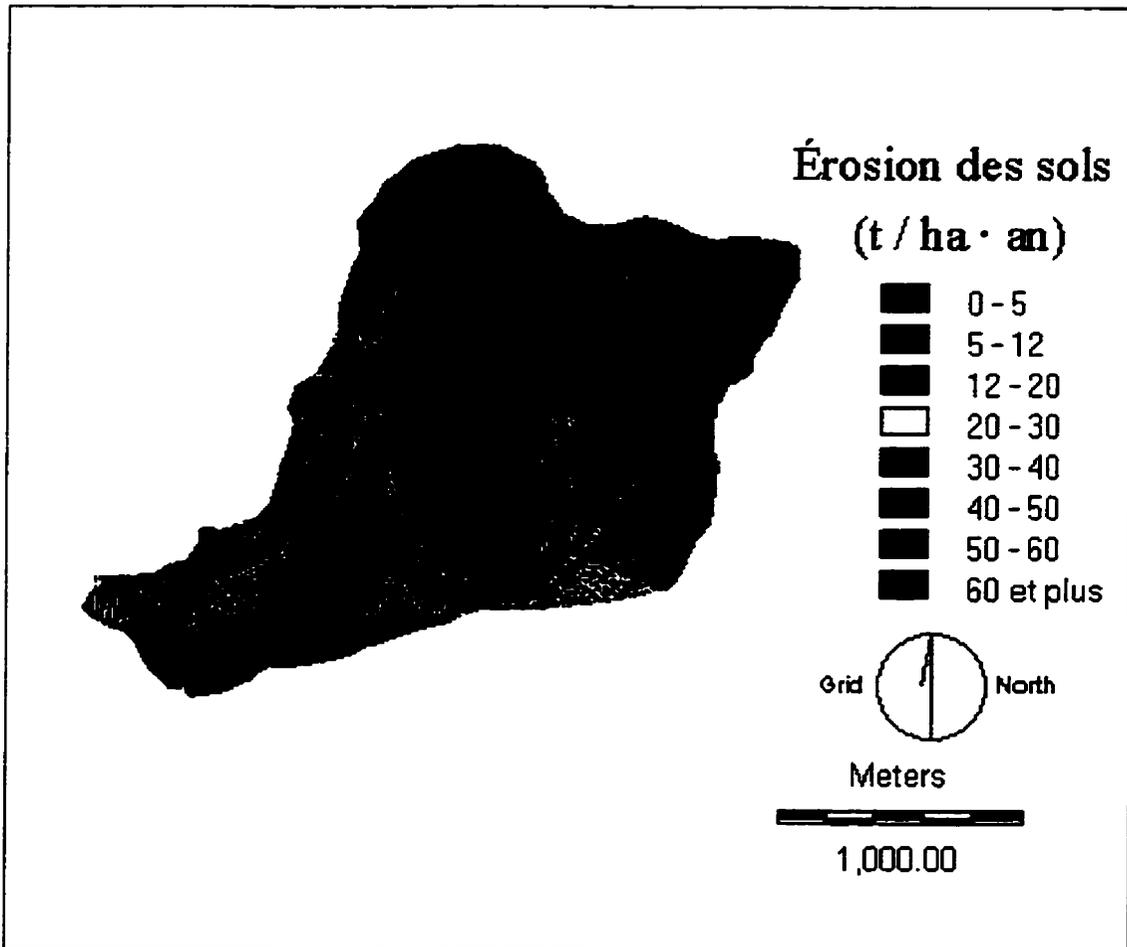


Figure 21. Carte d'érosion pour le scénario des cultures en banquette

Les valeurs d'érosion des sols pour ce scénario ont été comparées à celles de l'érosion estimée sous les conditions actuelles d'exploitation du bassin versant. Cette comparaison présentée au Tableau 16 permet de constater que la superficie occupée par la classe d'érosion supérieure à 60 t / ha · an a diminué avec les cultures en banquette passant de 70% à 65%, mais légèrement plus que celle obtenue avec le scénario 1 (cultures en contour). En effet, il a été démontré que les cultures en banquette donnent des résultats mitigés sur de fortes pentes et ne sont efficaces que lorsqu'elles sont accompagnées de rotations culturales ou d'un type de couvert végétal appropriés (Wischmeier et Smith 1978).

Tableau 16. Érosion sous les conditions actuelles comparée à celle pour le scénario 2

Érosion (t / ha · an)	Superficie (ha) - (%)	
	Conditions actuelles	Cultures en banquette
0 - 5	59.68 - (17%)	59.68 - (17%)
5 - 12	10.79 - (4%)	10.79 (4%)
12 - 20	10.14 - (3%)	10.14 - (3%)
20 - 30	7.69 - (2%)	10.15 - (3%)
30 - 40	5.46 - (1%)	9.54 - (3%)
40 - 50	5.85 - (2%)	10.21 - (3%)
50 - 60	3.97 - (1%)	8.66 - (2%)
60 et plus	243.20 - (70%)	227.61 - (65%)
Total	346.78 - (100%)	346.78 - (100%)

- **Scénario 3:** Contrairement aux deux premiers scénarios où l'on agissait sur les pratiques anti-érosives, le présent scénario porte sur la modification du type de couvert végétal, généralement reconnu comme le facteur C du USLE. Pour le scénario 3, un système d'agroforesterie a été envisagé pour les zones du bassin versant occupé par les associations de cultures vivrières. Avec ce scénario, on n'a que deux valeurs pour C, soit 0.33 pour la zone sous culture du riz et 0.01 pour les zones où les arbres sont associés aux cultures vivrières (agroforesterie). Pour intégrer ces informations dans la base de données spatiales, on a tout simplement modifié le fichier de valeur déjà créé pour C et ensuite le lier au fichier image à l'aide du module ASSIGN.

Une fois réalisée, la carte des valeurs de C pour le scénario 3 a été superposée aux images des 5 autres paramètres du USLE. Cette superposition effectuée à l'aide du module IMAGE CALCULATOR a permis d'avoir l'érosion hydrique des sols si l'agroforesterie était pratiquée là où l'érosion dépasse $60 \text{ t / ha} \cdot \text{an}$. L'image issue de cette superposition est présentée à la Figure 22. La comparaison de l'histogramme de cette image à celle de l'érosion estimée pour les cultures actuellement pratiquées au niveau du bassin versant est présentée au Tableau 17. Ce tableau a permis de remarquer que la classe d'érosion supérieure à $60 \text{ t / ha} \cdot \text{an}$ a considérablement diminué avec le scénario 3. De même, la superficie occupée par la catégorie d'érosion dite tolérable ($0 - 12 \text{ t / ha} \cdot \text{an}$) passerait de 21% (sous les conditions actuelles) à 74%. Toutefois, il faut compter plusieurs années avant que le système agroforestier se stabilise et produise les effets désirés.

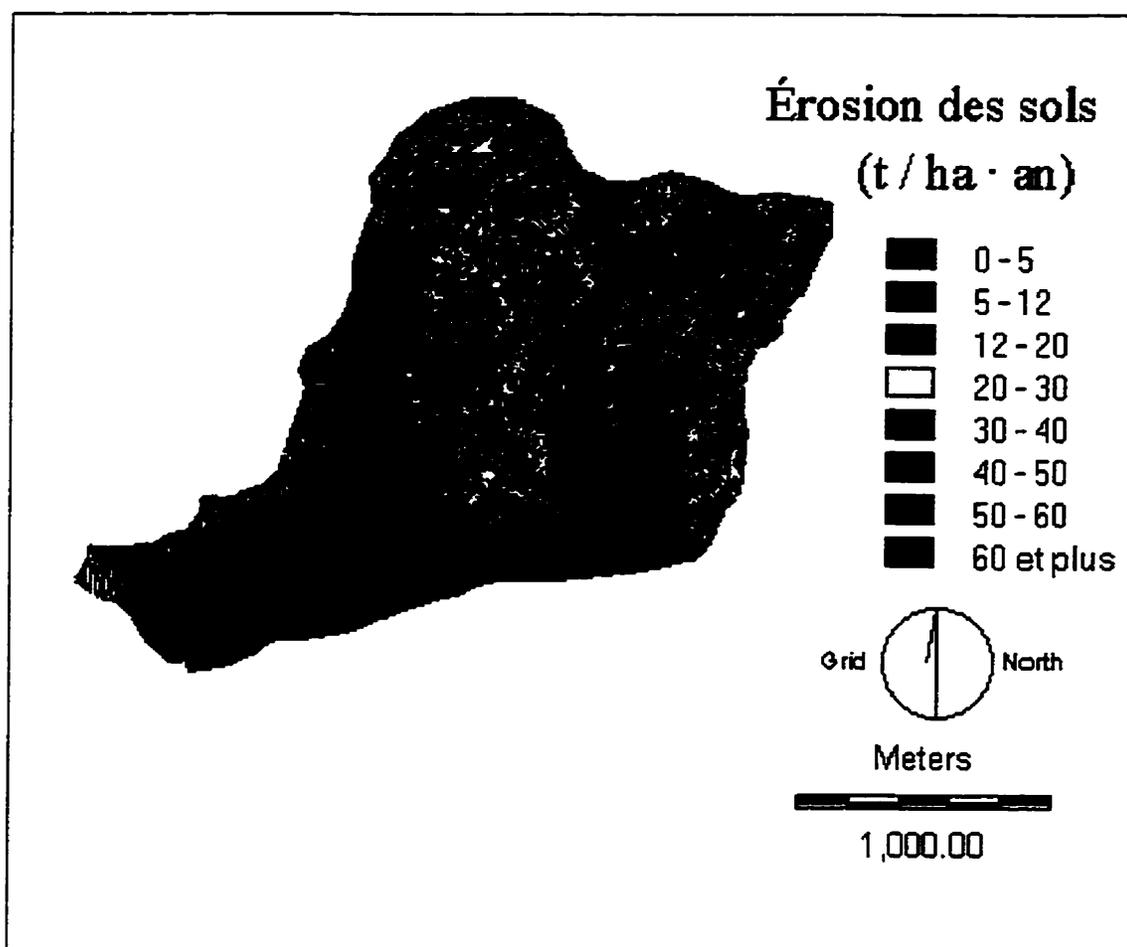


Figure 22. Carte d'érosion pour le système d'agroforesterie

Tableau 17. Érosion sous les conditions actuelles comparée à celle pour le scénario 3

Érosion (t / ha · an)	Superficie (ha) - (%)	
	Conditions actuelles	Agroforesterie
0 - 5	59.68 - (17%)	192.83 - (56%)
5 - 12	10.79 - (4%)	63.02 - (18%)
12 - 20	10.14 - (3%)	33.49 - (10%)
20 - 30	7.69 - (2%)	24.81 - (7%)
30 - 40	5.46 - (1%)	12.71 - (4%)
40 - 50	5.85 - (2%)	7.06 - (2%)
50 - 60	3.97 - (1%)	4.23 - (1%)
60 et plus	243.20 - (70%)	8.63 - (2%)
Total	346.78 - (100%)	346.78 - (100%)

Si les scénarios proposés ici permettent de réduire l'érosion hydrique des sols et augmenter par conséquent le niveau de production agricole au niveau du bassin versant de la ravine Balan, leur application est fortement conditionnée par la situation socio-économique des agriculteurs de la zone. Dans cet ordre de pensée, l'application et la réussite de ces scénarios d'aménagement sous-entend, avant tout, un certain changement dans le système agraire haïtien qui pourrait se faire par:

- l'augmentation de la sécurité foncière des exploitants agricoles,
- le contrôle du processus de morcellement des parcelles,
- l'encadrement et la formation des exploitants agricoles,
- la consultation et la participation des exploitants agricoles,

- l'accès aux semences de bonne qualité,
- l'accès au crédit agricole,
- la disponibilité d'outillages agricoles appropriés,
- le contrôle de l'élevage,
- l'augmentation de la durée de vie des projets de conservation des sols conformément à la logique à long terme de la conservation des sols,
- la mise sur pied de programmes incitatifs (primes aux meilleurs exploitants), et
- la mise en place de parcelles de démonstration en vue d'attirer l'attention des fermiers sur les avantages pouvant découler de l'établissement de structures anti-érosives.

Bien que l'exploitant agricole haïtien soit souvent considéré comme le premier concerné et le premier touché, le contrôle du phénomène d'érosion passe également par une prise de conscience nationale. En effet, malgré les nombreux rapports alarmants sur l'état de l'environnement haïtien, en général, et sur les conséquences de l'érosion, en particulier, le réveil de la conscience nationale se fait attendre. Nombreux sont ceux qui pensent que c'est en accusant le paysan agriculteur qu'on va y arriver. L'expérience de plusieurs décennies a prouvé que ce mode de pensée est loin d'apporter de bons résultats. À cet égard, cette citation de Hilaire (1995) apparaît hautement pertinente: "Ce n'est pas en jetant l'anathème sur les paysans, en faisant miroiter devant eux le spectre de n'avoir, dans un proche avenir, que des roches pour nourriture, qu'on portera les gens à s'intéresser sérieusement aux graves problèmes écologiques. C'est plutôt une tâche colossale qui fait appel à une véritable idéologie".

VI. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats obtenus et d'après les objectifs fixés pour la présente étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Il est possible non seulement d'intégrer les paramètres du USLE dans une base de données spatiales, mais également d'en réaliser une adaptation pour les conditions spécifiques au bassin versant de la ravine Balan.
- Le bassin versant de la ravine Balan possède un haut potentiel érosif. Sur une superficie totale de 346.78 ha, environ 92% possède un potentiel érosif supérieur à 60 t / ha · an.
- Avec les systèmes de production en vigueur, 79% du bassin versant accuse une érosion hydrique des sols qui dépasse le seuil tolérable de 11.5 t / ha · an généralement admis en Haïti.
- Il existe plusieurs systèmes de production permettant de réduire l'érosion hydrique des sols au niveau du bassin versant de la ravine Balan. Parmi les scénarios d'aménagement envisagés, la mise en place d'un système agroforestier vigoureux apparaîtrait comme le plus efficace.

Loin d'être considérés comme des valeurs absolues, les résultats obtenus pour la présente étude ne représentent que des valeurs relatives pouvant aider dans la planification des activités de conservation des sols. La relativité de ces résultats est inhérente aux limitations de la méthodologie utilisée pour la présente étude. Parmi ces limitations, on peut citer :

- l'absence de valeurs spécifiques au bassin versant de la ravine Balan pour les facteurs R, C et P du USLE, et

- le manque de validation des résultats.

Pour pallier à ces problèmes, les orientations futures de la recherche devaient inclure les points suivants :

- L'installation de stations pluviométriques (incorporant des pluviographes enregistreurs) afin d'obtenir les valeurs d'érosivité des pluies spécifiques au bassin versant de la ravine Balan.
- La mise sur pied d'un réseau de parcelles d'érosion afin d'estimer la valeur du facteur C pour toutes les associations de cultures vivrières pratiquées au niveau du bassin versant de la ravine Balan.
- L'établissement de parcelles expérimentales avec les différentes structures de conservation des sols afin de déterminer la valeur du facteur P pour le bassin versant de la ravine Balan.
- La possibilité de détecter à distance les structures anti-érosives, et
- L'installation de récipients collecteurs de sédiment afin de comparer l'érosion estimée à partir de l'intégration des paramètres du USLE dans un SIG à celle effectivement observée.

BIBLIOGRAPHIE

- Anonyme. 1988. Pour une déclaration officielle de l'état d'urgence face à la dégradation de l'environnement national. Ministère d'Agriculture, des Ressources naturelles et du Développement rural, Damien, Haïti.
- Anys, H., et Merzouk, A. 1994. Remote sensing and GIS based mapping and modelling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. *Geocarto International* 9 (1) : 31-40.
- Barry, R. 1997. Notes de cours. Hydrologie générale. École de sciences forestières, Univ. de Moncton, Edmundston, N.-B.
- Bonn, F., Cyr, L., Anys, H., et Chakroun, H. 1994. Une modélisation spatiale des pertes de sol liées à l'érosion hydrique. *Dans* Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. *Édité par* F. Bonn. Presses de l'Université du Québec, Québec. pp. 76-96.
- Bonn, F., Mégier, J., et Ait Fora, A. 1996. Remote sensing spatialization of soil erosion models within a GIS for land degradation quantification: Expectations, errors and beyond... *Dans* Proceedings of the 16th EARSel symposium. *Édité par* A. Spiteri. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands. pp. 191-198.
- Brown, L.R., Abramovitz, J., Bright, C., Flavin, C., Gardner, G., Kane, H., Platt, A., Postel, S., Roodman, D., Sachs, A., et Starke, L. 1996. L'état de la planète. Editions Economica, Paris, France.
- Bureau, J.C. 1986. Note de synthèse sur les actions de conservation des sols en Haïti. Mission Française de Coopération et d'Action Culturelle, Port-au-Prince, Haïti.
- Burrough, P.A. 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12.
- Cyr, L., Bonn, F., et Pesant, A. 1995. Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. *Ecological modelling* 79: 277-285.
- Desmet, P.J.J., et Govers, G. 1996a. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *J. Soil and Water Cons.* 51 (5) : 427-433.
- Desmet, P.J.J., et Govers, G. 1996b. Comparison of routing algorithms for digital

elevation models and their implication for predicting ephemeral gullies. *Int. J. Geographical Information Systems* 10 (3): 311-331.

- Durosier, J.S. 1990. Assessment of land degradation and its consequences. A case study of the Bouyaha River watershed, Haiti. Master's thesis. Rural and Land Ecology survey, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands.
- Eastman, J.R. 1997. IDRISI for WINDOWS, User's Guide, Version 2.0. Clark University, Worcester, MA.
- Engel, B.A. 1995. Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indiana. *J. Soil and Water Cons.* 50 (5) : 477-483.
- Farnum, F.C. 1979. Rainfall-Intensity-Duration-Frequency. Caribbean Meteorological Institute, Husbands, St-James, Barbados. Technical Note 23.
- Felicísimo, A.M. 1997. Modelos digitales del terreno. Cursos sobre SIG. Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Foster, G.R., McCool, D.K., Renard, K.G., et Moldenhauer, W.C. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *J. Soil and Water Cons.* 36 (6) : 355-359.
- Gee, G.W., et Bauder, J.W. 1986. Particle-size Analysis. *In* Methods of soil analysis, Part 1. *Edited by* A. Klute. *Agronomy* 9: 383-409.
- Groupe de Recherche et d'Échanges Technologiques/Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire d'Haïti. 1990. Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne. Editions Tardy Quercy, Paris, France.
- Hilaire, S. 1995. Le prix d'une agriculture minière. Imprimerie Le Natal, Port-au-Prince, Haïti.
- Hudson, N. 1981. Soil Conservation. Second Edition. Cornell University Press, Ithaca, New York.
- Kwong, F.A.L. 1995. Erosion assessment of large watersheds in Taiwan. *J. Soil and Water Cons.* 50 (2) : 180-183.
- Lal, R. 1994. Soil erosion - Research Methods. Second Edition. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

- Madramootoo, C., et Cox, C. 1997. Watershed master planning in St. Lucia using Geographic Information System tools. *Dans* Texte du Congrès annuel de la Société canadienne de génie rural. Société Canadienne de Génie rural, Sherbrooke, Québec. pp. 61-71.
- McKeague, J.A. 1978. Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols, 2ème édition. Société Canadienne de la Science du Sol, Brandon, Manitoba.
- Médard, A. 1994. Evaluación de la producción de sedimentos y del escurrimiento superficial en pequeñas cuencas agrícolas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Mellerowicz, K.T., Chow, T.L., et Ghanem, I. 1994. Soil conservation planning at the watershed level using the Universal Soil Loss Equation with GIS and microcomputer technologies : A case study. *J. Soil and Water Cons.* 49 (2): 194-200.
- Ministère de la Planification, de la Coopération Externe et de la Fonction Publique. 1993. Rapport sur l'état de l'environnement haïtien. *Dans* Texte sur la Conférence de Rio. Ministère de l'Environnement, Port-au-Prince, Haïti.
- Morgan, R.P.C. 1986. Soil Erosion and Conservation. John Wiley and Sons, New York.
- Neicho, G.O. 1985. Universal index for calculating rainfall erosivity. Soil erosion and conservation. Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa.
- Nelson, D.W., et Sommers, L.E. 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. *In* Methods of soil analysis, Part II. *Edited by* A.L. Page. Agronomy 9: 539-594.
- Paskett, J.C., et Philotecte, C.E. 1990. Soil conservation in Haiti. *J. Soil and Water Cons.* 45 (4) : 457-459.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., et Yoder, D.C. 1991. Predicting Soil Erosion by Water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Washington. Agriculture Handbook.
- Roy, R. J. 1996. Towards an ecological georeferenced framework for forest management planning. Ph. D. Dissertation. Faculty of Forestry and Environmental Management, U.N.B., Fredericton, N.B.
- R-WEL Inc. 1992. CAPTURE V3.1- User Manual. Centre for Remote Sensing and

Mapping Science, Univ. of Georgia, Athens, GA.

United Nations Development Program. 1990?. Haïti: Les pays les moins avancés. UNDP, Port-au-Prince, Haïti.

Van Oost, K., Govers, G., et Desmet, P. 1997. LS-Values. Labo voor experimente geomorfologie, Université de Louvain, Louvain, Belgique.

White, T.A., et Jickling, L. 1995. Peasants, experts, and land use in Haiti : Lessons from indigenous and project technology. *J. Soil and Water Cons.* 50 (1) : 7-13.

Wilson, J.P. 1986. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation. *J. Soil and Water Cons.* : 41 (3) 179-184.

Wischmeier, V. H., et Smith, D.D. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil and Water Cons.* 31 (1) : 5-9.

Wischmeier, V. H., et Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. United States Department of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. United States Department of Agriculture, Washington. Agriculture Handbook No. 282.

Wood, A.H. 1963. Northern Haiti : Land, Land use, and Settlement. A geographical investigation of the Département du Nord. University of Toronto Press, Toronto, Ontario.

Zelazny, V.F., Ng, T.M.T., Hayter, M.G., Bowling, C.L., et Bewick, D.A. 1991. Guide pratique de classification des stations forestières au Nouveau-Brunswick. Régions biogéographiques Kedgwick et Restigouche. Ministère des Ressources naturelles et Énergie, Frédéricton, N.-B.

ANNEXES

ANNEXE 1

CALENDRIER AGRICOLE DU BASSIN VERSANT DE LA RAVINE BALAN

Mois												
Cultures	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
BANANE					DL	DS						DR
HARICOT	DR										DL	DS
POIS CONNU (2 récoltes / an)	DL DR	DS				DR				DL	DS	
IGNAME					DL	DS						DR
TARO					DL	DS DR						
MANIOC	DL	DS DR										
PATATE				DR					D L	DS		
MAÏS (2 récoltes / an)	DL	DS					DR		D L	DS		DR
RIZ (2 récoltes / an)	PE	DS			DR PE		DS				DR	

Note:

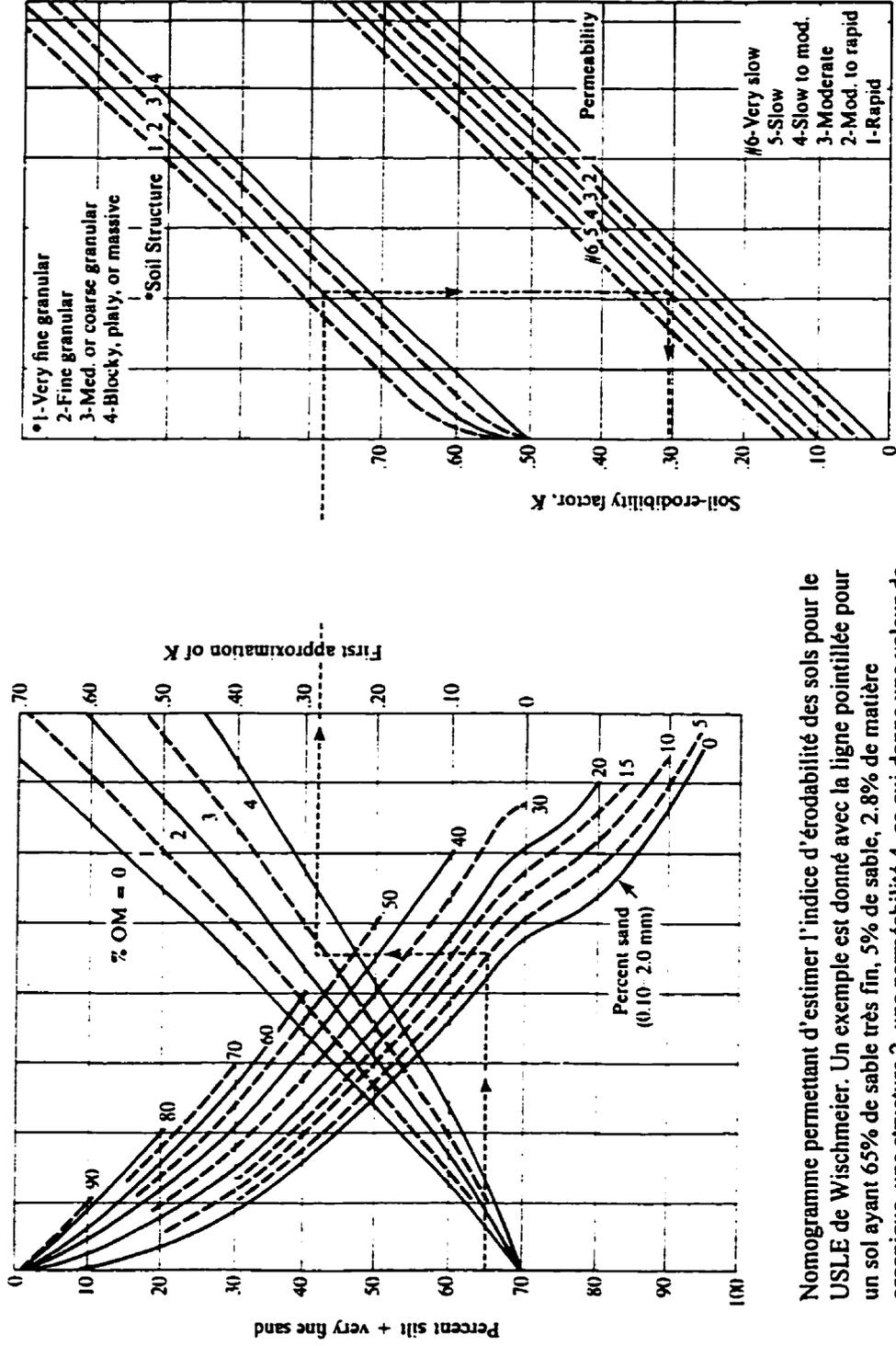
PE = Pépinière

DL = Date de Labour

DR = Date de récolte

DS = Date de semis

ANNEXE 2 NOMOGRAMME DE WISCHMEIER



Nomogramme permettant d'estimer l'indice d'érodabilité des sols pour le USLE de Wischmeier. Un exemple est donné avec la ligne pointillée pour un sol ayant 65% de sable très fin, 5% de sable, 2.8% de matière organique, une structure 2, une perméabilité 4, ce qui donne une valeur de $K = 0.31$ (extrait de Wischmeier et Smith 1978).

ANNEXE 3

FICHE D'ENQUÊTE DE PARCELLE

Nom de l'exploitant:

Date:

Parcelle No.:

Localisation de la parcelle:

MOIS												
Cultures	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D

Note:

DL = Date de labour

DS = Date de semis

DR = Date de récolte

Parcelle No. :

Cultures :

MOIS											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D

Note:

DG = Durée de la germination

DD = Durée du développement

DM = Durée de la maturité

% de COUVERT VÉGÉTAL

Semis - Germination :

Germination - Développement :

Maturité - Récolte :

Type de labour :

% de résidus laissés après la récolte :

ANNEXE 4

CALCUL DU DIAMÈTRE DES PARTICULES DE SOL

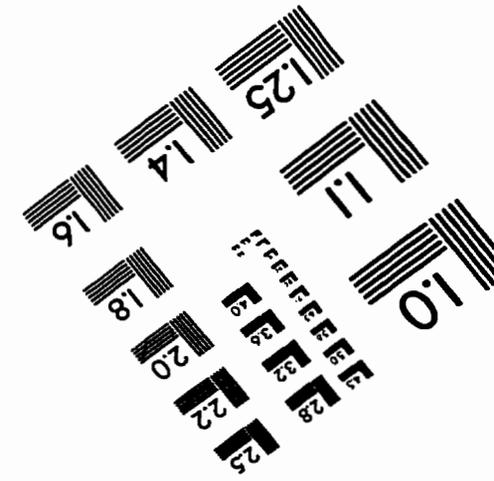
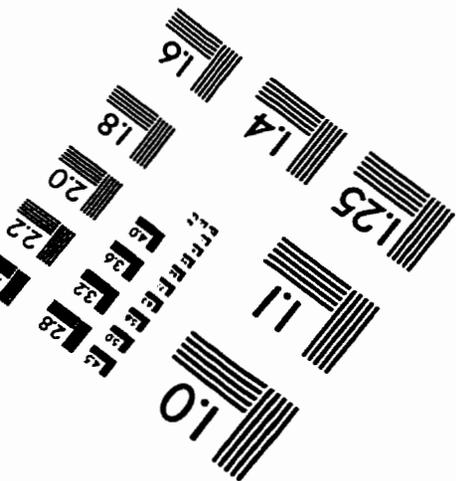
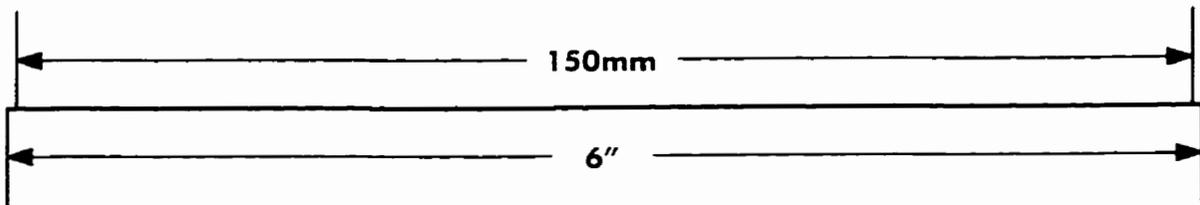
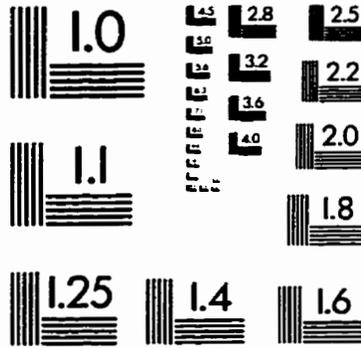
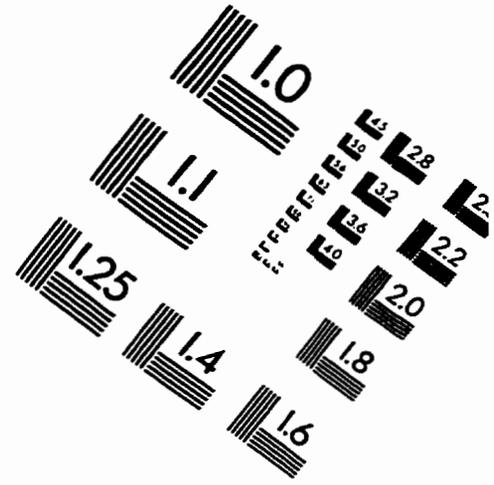
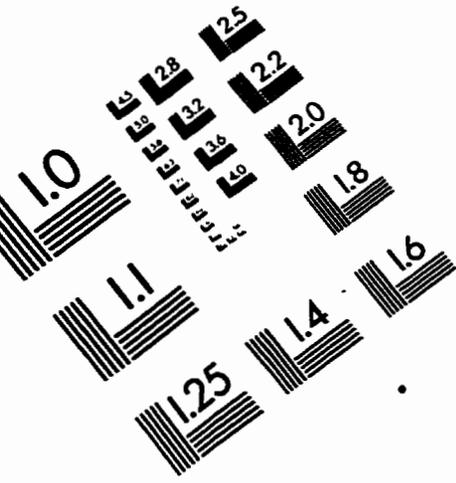
Pour déterminer le diamètre des particules de sol, la procédure résumée dans la fiche ci-dessous a été suivie (McKeague 1978) :

- calcul, pour chaque lecture, de la concentration de la suspension en g / l à partir de l'équation $C = R - RL$,
- calcul du pourcentage cumulatif à partir de l'équation $P = 100 c / c_0$, où c_0 est le poids sec de l'échantillon, et
- calcul du diamètre correspondant des particules à l'aide de l'équation $X (\mu\text{m}) = Y / t^{1/2}$, où t est le temps en minute et Y le paramètre de sédimentation. McKeague (1978) a construit des tableaux où les valeurs de Y à 30°C, ainsi que des facteurs de correction pour Y à diverses températures sont présentés.

Fiche pour les analyses granulométriques

Programme de lecture		Lecture hydromètre	Calcul du diamètre des particules	Calcul du pourcentage cumulatif p (%)		
Temps écoulé (t)-minutes	heure : minute	R	Y (corrigé pour T)	Diamètre (μm)	$c = R - RI$	$p = (c/c_0) \times 100$

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)




APPLIED IMAGE, Inc
 1653 East Main Street
 Rochester, NY 14609 USA
 Phone: 716/482-0300
 Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved