

PRINTEMPS JULIA

Mémoire de M2 Professionnel Sciences du Territoire
Mention 'Outils, Gestion et Dynamique du Développement Territorial'

Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie

*UTILISATION DE L'ÉQUATION UNIVERSELLE DE PERTE DE SOL ASSISTÉE D'UN
SIG SUR LES COMMUNES DE VOH, KONÉ ET POUEMBOUT*



Septembre 2007

DIPLÔME DE Master 2 Professionnel OGDDT

SESSION Septembre 2007

TITRE : Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie
- Utilisation de l'Equation Universelle de Perte de Sol assistée d'un SIG sur les communes de Voh, Koné et Pouembout

Autorisation de diffusion de mémoire d'étude par consultation, prêt, divulgation sur le réseau Internet
--

Je soussigné(e), Julia PRINTEMPS

agissant en l'absence de toute contrainte et en sachant qu'en dehors de l'obligation de déposer mes travaux je bénéficie de la liberté de permettre ou non leur diffusion, autorise, sans limitation de temps, l'UFR de Géographie de Grenoble 1 à diffuser les travaux que j'ai effectués lors de mon mémoire de M2 OGDDT, dans les conditions suivantes :

- **Consultation sur place en bibliothèque :** oui non
- **Prêt :** oui non
- **Prêt entre bibliothèques :** oui non
- **Reproduction sous forme numérique:**
 - à des fins de conservation oui non
 - à des fins de diffusion
 - sur le réseau interne oui non
 - sur le réseau Internet oui non

étant entendu que les éventuelles restrictions de diffusion de mes travaux ne s'étendent pas à leur signalement dans le catalogue de la bibliothèque accessible sur place ou par les réseaux.

La présente autorisation de diffusion vaut également autorisation de reproduction limitée aux seules fins des diffusions ainsi définies.

Je renonce à toute rémunération pour les diffusions et reproductions effectuées dans les conditions précisées ci-dessus.

* serveur Internet consultable à l'adresse <http://www.ujf-grenoble.fr> et sous réserve de la fourniture de mes travaux par tout moyen informatique (disquette, cédérom, clé de mémoire USB, stylo de sauvegarde, fichier joint, etc.)

Fait à Nouméa, le 5 septembre 2007

Signature de l'étudiant
Précédée de la mention « bon pour accord »

NOTICE ANALYTIQUE

FILIÈRE :

I.U.P.

Maîtrise

DESS (M2)

DEA Gem

DEA Réseau

AUTEUR	NOM	PRÉNOM		
	PRINTEMPS	Julia		
TITRE	<i>Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie - Utilisation de l'Équation universelle de perte de sol assistée d'un SIG sur les communes de Voh, Koné et Pouembout</i>			
UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER	Nom et prénom du Directeur de mémoire	Stage sous convention : organisme et lieu		Nom et prénom du Maître de stage
Institut de Géographie Alpine	M. Rachid NEDJAI	IRD - Nouméa		M. Pascal DUMAS
COLLATION	Nb. de pages	Nb. de volumes	Nb. d'annexes	Nb. de réf. biblio.
	71 (avec annexes)	1	5	39
MOTS-CLÉS	Erosion, Equation Universelle de Perte en Sol, SIG, modèle quantitatif, Nouvelle-Calédonie			
TERRAIN D'ÉTUDE OU D'APPLICATION	Voh, Koné et Pouembout en Nouvelle-Calédonie			Année universitaire : 2006-2007

RÉSUMÉ français

L'érosion hydrique des sols, processus naturel en climat tropical et accéléré par les activités anthropiques (feux de brousse, activité minière), est l'un des graves problèmes environnementaux (pollution du lagon) de Nouvelle-Calédonie. L'étude s'intéresse particulièrement à la quantification du phénomène en élaborant une méthodologie reproductible basée sur l'utilisation de l'Equation Universelle de Pertes en Sol couplée à un Système d'Information Géographique. La spatialisation et la quantification de l'érosion potentielle sur la zone d'étude ont été réalisées par le croisement de quatre paramètres : le climat, le relief, la pédologie et le couvert végétal. Ce document servira d'outil d'aide à la décision en matière de gestion du littoral.

RÉSUMÉ anglais

Soil erosion, natural process in tropical climate accelerated by human activities (bush fires, mining activity), is one of the serious environmental problems (pollution of the lagoon) of New Caledonia. The aim of this study is to quantify this phenomenon developing a reproducible methodology based on the use of the Universal Soil Loss Equation associated to a Geographical Information System. Spatialisation and quantification of potential erosion on the study area were carried out by crossing four parameters: climate, relief, pedology and cover management. This document will be used as a decision-making tool for littoral management.

Fiche descriptive du stage

Nom et adresse de l'organisme d'accueil :

Institut de Recherche pour le Développement
101 promenade R.Laroque
Anse Vata - BP A5
98 848 Nouméa Cedex
Nouvelle-Calédonie

Compétences de l'organisme : Organisme de recherche à caractère scientifique et technologique

Service : Unité 140 ESPACE

Responsable du stage, sa fonction :

M. Pascal DUMAS, maître de conférence en géographie/géomatique à l'Université de Nouvelle-Calédonie, chercheur associé à l'IRD de Nouméa

Ses coordonnées (facultatif) : (00687) 26 08 26

Missions confiées (en insistant le cas échéant sur le caractère innovant ou expérimental) :

- travail méthodologique sur la modélisation de l'érosion : application de l'Equation Universelle de Pertes en Sol (USLE) en Nouvelle-Calédonie
- travail innovant : l'USLE n'a jamais été appliquée en Nouvelle-Calédonie. En effet, les travaux sur l'érosion sont très restreints ce qui augmente les difficultés d'avoir des éléments de validation
- adaptation à un environnement professionnel et à un travail d'équipe ; méthodes de conduite de projet

Mise en œuvre /méthodologie (tâches effectuées, compétences mobilisées en précisant selon trois aspects : conception/réflexion, terrain ou recueil de données, traitement et analyse d'informations) :

- synthèse bibliographique (état de l'art) : esprit de synthèse
- choix d'un modèle, le plus efficient possible : esprit critique
- collecte des données auprès des organismes institutionnels : communication
- mise en œuvre du modèle sous ArcGIS : réflexion sur les choix méthodologiques, maîtrise technique des outils de spatialisation et de programmation
- interprétation des résultats

PRINTEMPS JULIA

Mémoire de M2 Professionnel Sciences du Territoire
Mention '*Outils, Gestion et Dynamique du Développement Territorial*'

Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie

*UTILISATION DE L'ÉQUATION UNIVERSELLE DE PERTE DE SOL ASSISTÉE D'UN
SIG SUR LES COMMUNES DE VOH, KONÉ ET POUEMBOUT*

Mémoire encadré par :

M. Pascal DUMAS :

Maître de conférence en géographie/géomatique à l'Université de Nouvelle-Calédonie
Chercheur associé à l'Institut de Recherche pour le Développement à Nouméa

M. Rachid NEDJAI :

Maître de conférence en géographie/environnement à l'Université Joseph Fourier à
Grenoble (Institut de Géographie Alpine)

Septembre 2007

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout d'abord à Morgan MANGEAS, responsable de l'implantation en Nouvelle-Calédonie de l'Unité ESPACE (Expertise et SPAtialisation des Connaissances en Environnement) à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Nouméa, pour m'avoir accueillie au sein de son unité, pour avoir facilité mon intégration dans l'équipe et pour m'avoir aidée et soutenue durant ma mission.

Je remercie chaleureusement mon maître de stage, Pascal DUMAS, maître de conférence en géographie/géomatique à l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC), pour m'avoir fait confiance, conseillée, transmis ses connaissances et encouragée lors de la réalisation de ce stage.

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance à tous les membres de l'unité qui m'ont fourni leur aide tout au long de mon travail, Marc DESPINOY, pour sa disponibilité et ses conseils, Jean-Brice HERRENSCHMIDT, pour m'avoir fait partager quelques-unes de ses expériences et ses connaissances du monde Kanak, Monique MARTINY, pour son écoute et son professionnalisme, Didier LILLE pour m'avoir permis de l'accompagner sur le terrain ; mais également à toutes les autres personnes qui ont participé à la réalisation de ce stage :

en particulier, Anne-Gaëlle AUSSEIL et John DYMOND, du Landcare Research en Nouvelle-Zélande, pour leur collaboration et leurs conseils,

Isabelle ROUET, thésarde à l'UNC,

Michel ALLENBACH, maître de conférence à l'UNC,

Pierre MAURIZOT, de la Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC),

Luc MAITREPIERRE, de Météo France,

Gilles LECOMTE, du Bureau de la Cartographie à la Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres (DITTT).

Je tiens à saluer tout le personnel de l'IRD pour son accueil et notamment les autres stagiaires pour leur soutien, leur bonne humeur à toute épreuve et les moments partagés à la découverte de la Calédonie.

Enfin, je remercie Monsieur Rachid NEDJAI, tuteur enseignant, pour m'avoir encouragée à postuler pour ce stage et pour m'avoir accordé du temps pour sa préparation.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
INTRODUCTION	3
I. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	5
I.1 CONTEXTE GÉNÉRAL.....	5
I.1.1 <i>La Nouvelle-Calédonie</i>	5
I.1.2 <i>L'Institut de Recherche pour le Développement</i>	6
I.2 LE PROJET PNEC.....	7
I.3 LA SPATIALISATION DE L'ALÉA ÉROSION DANS LE CADRE DE LA GIZC.....	8
I.4 LA PROBLÉMATIQUE.....	9
II. MÉTHODOLOGIE	11
II.1 PROCESSUS ET MÉCANIQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS.....	11
II.2 ÉTAT DE L'ART – CHOIX D'UN MODÈLE.....	12
II.2.1 <i>Les bases du modèle</i>	12
II.2.2 <i>Les principaux modèles hydrologiques de transfert des sédiments</i>	12
II.2.3 <i>Choix d'un modèle pour l'étude</i>	14
II.3 DÉFINITION DE L'USLE.....	15
II.3.1 <i>Historique de l'Équation Universelle de Pertes en Sol</i>	15
II.3.2 <i>Expression de l'USLE</i>	16
II.3.3 <i>Définition des facteurs de l'équation</i>	17
II.3.3.1 <i>Facteur érosivité des précipitations (R)</i>	17
II.3.3.2 <i>Facteur érodibilité des sols (K)</i>	18
II.3.3.3 <i>Facteur topographique (LS)</i>	19
II.3.3.4 <i>Facteur couverture végétale et pratiques culturales (C)</i>	21
II.3.3.5 <i>Facteur des pratiques de conservation du sol (P)</i>	22
III. MODÉLISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE	25
III.1 LE SITE D'ÉTUDE.....	25
III.1.1 <i>Localisation de la zone d'étude</i>	25
III.1.2 <i>Intérêt de la zone d'étude</i>	25
III.1.2.1 <i>Enjeux économiques</i>	25
III.1.2.2 <i>Enjeux environnementaux</i>	27
III.2 MISE EN OEUVRE DU MODÈLE.....	28
III.2.1 <i>Collecte des données</i>	28
III.2.2 <i>Schéma méthodologique</i>	28
III.2.3 <i>Calcul des facteurs de l'équation</i>	30
III.2.3.1 <i>Facteur érosivité des précipitations (R)</i>	30
III.2.3.2 <i>Facteur érodibilité des sols (K)</i>	36
III.2.3.3 <i>Facteur topographique (LS)</i>	41
III.2.3.4 <i>Facteur couverture végétale et pratiques culturales (C)</i>	45
III.2.3.5 <i>Facteur des pratiques de conservation du sol (P)</i>	48
III.2.4 <i>Intégration des couches dans le SIG</i>	48
IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION	51
IV.1 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DU MODÈLE.....	51
IV.2 INTÉRÊT DU RÉSULTAT DANS LE CADRE DE LA GIZC.....	53
IV.3 LES LIMITES DU MODÈLE.....	54

CONCLUSION	57
BIBLIOGRAPHIE	59
WEBOGRAPHIE	61
LISTE DES FIGURES	62
LISTE DES TABLEAUX	62
GLOSSAIRE	63
ANNEXES	64
ANNEXE 1 : METHODOLOGIE GENERALE DE CARTOGRAPHIE DE LA SENSIBILITE DES SOLS A L'EROSION (DUMAS, 2004)	65
ANNEXE 2 : CARTE DE SENSIBILITE DES SOLS A L'EROSION SUR LA BAIE DE SAINT-VINCENT (DUMAS, 2004)	66
ANNEXE 3 : CARTE DE SENSIBILITE DES SOLS A L'EROSION SUR LA BAIE DE SAINT-VINCENT (LUNEAU, 2006)	67
ANNEXE 4 : CONVERSION DES UNITES US EN UNITES SI POUR LE CALCUL DES FACTEURS DE L'EQUATION	68
ANNEXE 5 : ALGORITHME POUR LE CALCUL DU FACTEUR R – EROSIVITE DES PRECIPITATIONS	70

INTRODUCTION

La Nouvelle-Calédonie est un véritable laboratoire de recherche dans les domaines des sciences humaines et de la Terre. Cinquième producteur mondial de nickel en 2005 (*Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement*), le « Caillou » possède environ un quart des ressources mondiales réparties dans le sous-sol de l'île. Depuis les débuts de l'exploitation (vers 1874) jusqu'à aujourd'hui, ce sont plus de 160 millions de tonnes de minerai qui ont été extraits, soit plus de 300 millions de mètres cubes de stériles latéritiques qui ont été remaniés (www.environnement.gouv.fr). Aujourd'hui, c'est la principale source de revenu du territoire et de nombreux groupes internationaux montrent un intérêt croissant pour ce métal. Deux nouveaux projets miniers de grande ampleur sont en phase de réalisation (à Goro en Province Sud et à Koné en Province Nord).

La mise en place de tels projets bouleverse les milieux. Les impacts dus à l'exploitation du minerai et à la construction et au fonctionnement des usines vont concerner l'ensemble de l'environnement, dans ses composantes naturelles et humaines. Cela se traduira en terme de déforestation, d'érosion des sols, d'apport de particules en suspension dans l'espace lagunaire, avec des répercussions évidentes sur l'aménagement du territoire. L'augmentation de la population consécutive aux besoins en main d'œuvre aura des impacts à tous les niveaux : création d'espaces lotis et récréatifs, de services, augmentation de la production de déchets et besoins accrus dans le traitement des eaux usées... Dans ce contexte, les aménageurs ont besoin d'outils les aidant à orienter leurs décisions afin de construire des schémas directeurs.

Parmi les conséquences de l'exploitation minière sur les milieux, la pollution terrigène est à suivre plus particulièrement. En effet, l'exploitation nickélifère entraîne le remaniement et l'érosion de quantités considérables de terres, ce qui se traduit par des apports sédimentaires très abondants au littoral qui induisent des modifications du profil littoral et dégradent les récifs frangeants. Cependant, l'exploitation minière n'est pas la seule cause de l'apport terrigène au lagon. L'érosion naturelle est très importante en Nouvelle-Calédonie du fait du climat tropical (violentes pluies). Pour assurer le suivi et la gestion du littoral, il est indispensable de pouvoir évaluer ce type de pression qui se développe surtout au niveau des bassins versants en amont de la partie terrestre du système littoral, mais qui affecte directement l'environnement côtier. Il convient donc de s'intéresser au phénomène d'érosion.

Afin de spatialiser et de quantifier l'aléa érosion en Nouvelle-Calédonie, c'est une approche basée sur la modélisation qui a été choisie. Dans ce sens, l'Equation Universelle de Perte en Sol - USLE (Wischmeier et Smith, 1978) a été utilisée car, d'une part, c'est le modèle qui requiert le moins de données-sources et d'autre part, il a déjà été largement appliqué sur de nombreux milieux et à toutes les échelles. L'USLE est un modèle empirique simple, conçu pour estimer des taux annuels de pertes en sol sur le long terme dans les zones agricoles. Malgré les défauts et les limites de cette équation, elle est très utilisée, à cause de sa relative simplicité et de sa fiabilité (Desmet et Govers, 1996). En outre, couplée à un SIG, elle permet de produire des documents qui serviront d'outils d'aide à la décision pour les aménageurs. L'objectif de cette étude a donc été de mettre en place une méthodologie reproductible d'application de l'USLE en Nouvelle-Calédonie, dans le but de spatialiser et de quantifier l'aléa érosion.

I. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Afin de formuler précisément la problématique propre à cette étude, il convient tout d'abord de rappeler le contexte dans lequel elle s'inscrit. Après avoir brièvement présenté la situation de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique, lieu de l'étude, ainsi que l'Institut de Recherche pour le Développement, organisme d'accueil, nous nous attacherons donc à définir le Programme National Environnement Côtier (PNEC), cadre institutionnel, et nous verrons l'état d'avancement des connaissances en matière de spatialisation de l'aléa érosion au sein de la Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC).

I.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

I.1.1 La Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie est un ensemble d'îles et d'archipels mélanésiens de l'Océan Pacifique sud, situé autour des coordonnées 21°30'Sud, 165°30'Est, à environ 1 200 km à l'est de l'Australie et 1 500 km au nord-est de la Nouvelle-Zélande. L'archipel du Vanuatu la borde au nord-est (Figure 1, page suivante). La Nouvelle-Calédonie couvre au total 18 750 km² répartis entre une île principale, la Grande-Terre et plusieurs ensembles d'îles plus petites, les îles Belep au nord de la Grande-Terre, l'île des Pins au sud et les îles Loyauté à l'est.

La Grande-Terre est parcourue sur toute sa longueur par une chaîne montagneuse, la "Chaîne Centrale", dont le point culminant, le mont Panié, s'élève à 1 628 mètres d'altitude (Figure 2, page suivante). Elle est bordée par une couronne de constructions récifales immergées large de 100 à 1 000 mètres et représentant une superficie d'environ 8 000 km². La barrière récifale présente un linéaire d'environ 1 600 kilomètres, située entre 10 et 50 km des terres, la classant comme la première plus longue barrière continue et la deuxième plus grande barrière au monde, derrière la Grande Barrière australienne. De plus, on observe à certains endroits un double ou triple récif barrière. Ce phénomène est très rare puisqu'on dénombre moins de 10 cas dans le monde. L'ensemble des formations récifales et lagunaires couvre une superficie d'environ 40 000 km². Les écosystèmes récifaux et littoraux sont extrêmement variés contribuant à la richesse de la biodiversité de la Nouvelle-Calédonie.

Le territoire jouit d'un climat tropical océanique et la température annuelle moyenne est de 22,5°C.

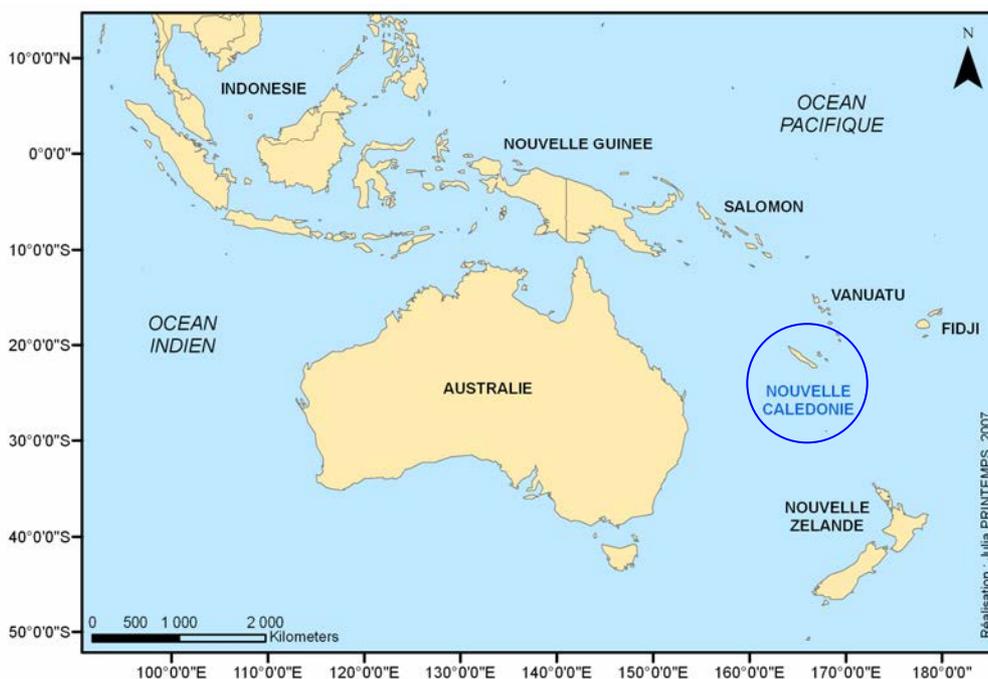


Figure 1 : Situation de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique

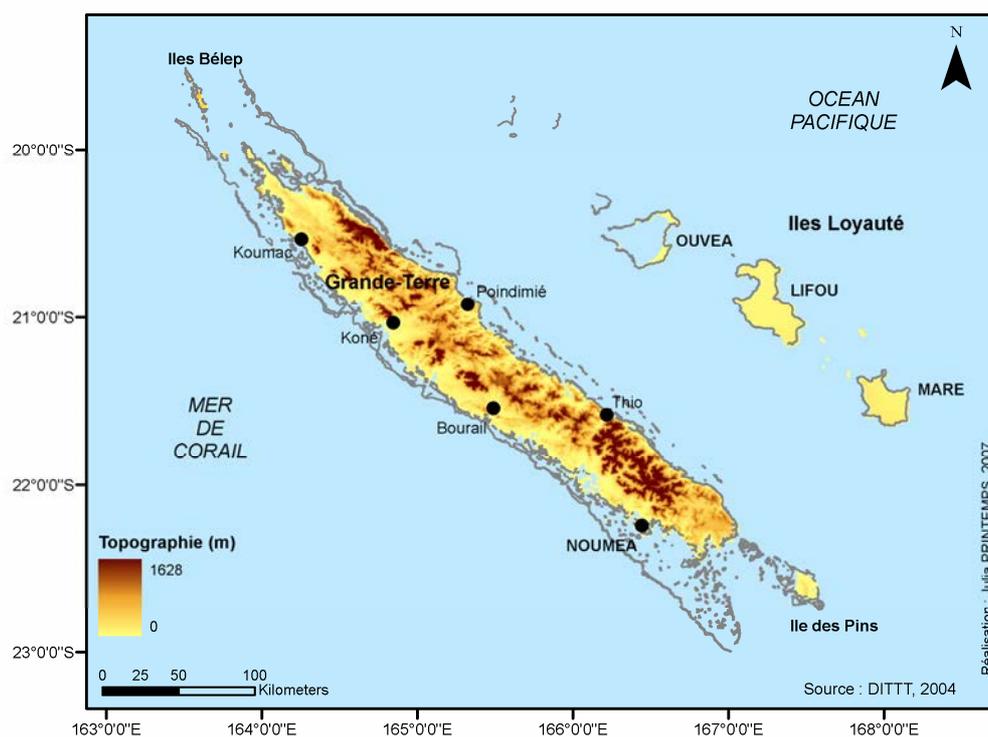


Figure 2 : Géographie physique de la Nouvelle-Calédonie

I.1.2 L'Institut de Recherche pour le Développement

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) est un établissement à caractère scientifique et technologique, placé sous la double tutelle du Ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la

Recherche et du Ministère délégué à la Coopération, au Développement et à la Francophonie. Le centre IRD de Nouvelle-Calédonie, le premier du Pacifique, a été créé à Nouméa le 2 août 1946 sous l'appellation d'Institut Français d'Océanie et est devenu en 1998 le Centre IRD de Nouvelle-Calédonie. Il rassemble de nombreuses disciplines scientifiques : océanographie, écologie marine, géologie, géophysique, pharmacologie, agronomie, botanique, entomologie, archéologie, etc... Sa renommée est internationale, non seulement dans la zone du Pacifique Sud-Ouest mais également dans toute la ceinture intertropicale. Les recherches sont menées en partenariat avec des institutions locales (Université de la Nouvelle-Calédonie, Institut Agronomique néo-Calédonien, IFREMER, Institut Pasteur, CNRS, etc.) ou régionales (Secrétariat général de la Communauté du Pacifique, University of the South Pacific, CSIRO, Agence Universitaire de la Francophonie, etc.).

Le centre de Nouméa est composé de 13 UR (Unités de Recherche) et de 5 US (Unités de Services). L'Unité de Service "Expertise et SPAtialisation des Connaissances en Environnement" (ESPACE) a pour vocation de développer des méthodes innovantes de spatialisation des données. Les connaissances, utiles à l'aide à la décision et à la gestion de l'environnement, sont mises en oeuvre dans le cadre de projets de développement sous forme d'expertise et de consultance. Il s'agit notamment de spatialiser des données issues des satellites d'observation de la Terre pour créer des indicateurs, produits spatiaux thématiques et des informations pertinentes pour observer, comprendre et gérer des milieux tropicaux fragiles faisant l'objet d'enjeux locaux et régionaux. De plus, cette unité appréhende les logiques d'acteurs par des approches géographiques des territoires et des paysages. Cela a pour but de mettre en oeuvre des approches intégrées du développement à l'échelle locale. Par ailleurs, l'unité intègre des sources d'informations hétérogènes, partage des représentations, rapproche les acteurs et permet la mise en place de scénarios d'aide à la décision.

1.2 LE PROJET PNEC

Le Programme National Environnement Côtier (PNEC), créé en 1999, a pour objectif d'étudier l'impact des activités humaines sur les littoraux. Il développe des recherches fondamentales sur les zones côtières marines de France métropolitaine et d'outremer. C'est un programme financé et dirigé par plusieurs organismes de la recherche publique française (Ifremer, CNRS, IRD, CNES, BRGM, Cemagref) et une entreprise privée (Total), et les disciplines impliquées couvrent tout l'éventail de la recherche scientifique, depuis les sciences chimiques jusqu'aux sciences humaines et sociales, en passant par les sciences de la terre ou la biologie...

Aujourd'hui, la demande croissante des acteurs sociaux et économiques sur les zones côtières nécessite une bonne compréhension de ces milieux. Ceux-ci sont très complexes et actuellement une vision satisfaisante des phénomènes mis en jeu n'est pas encore disponible : l'acquisition de connaissances complémentaires est donc toujours d'actualité.

Le chantier de Nouvelle-Calédonie porte sur le lagon de Nouméa. Il s'agit de déterminer les effets des activités humaines sur le transport et la transformation des apports terrigènes et des apports liés aux activités humaines, et sur la structure et le fonctionnement des organismes et des populations du lagon. En effet, en Nouvelle-Calédonie, 5ème producteur mondial de nickel (CNUCED, 2005), l'écosystème récifo-lagonaire est exposé à des apports massifs de matières organiques et de particules minérales renfermant divers polluants tels que les métaux.

Cette étude s'inscrit plus particulièrement dans la thématique : "Politiques publiques littorales et patrimoine côtier - comprendre les jeux d'acteurs et les interactions entre usages". Au travers de cette thématique, l'accent est mis sur les perceptions et la gestion des risques environnementaux, les processus de décisions publiques et privées, les enjeux liés à la conservation et la valorisation des zones côtières.

1.3 LA SPATIALISATION DE L'ALÉA ÉROSION DANS LE CADRE DE LA GIZC

La Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) veut concilier deux objectifs : un objectif écologique (exploiter d'une manière raisonnée l'espace littoral et les ressources naturelles qu'il contient, préserver la nature...) et un objectif économique (utiliser au mieux cet espace sur le court terme à des fins de profits) (Chaussade, 1999). La gestion intégrée est une notion politique car la gestion relève de l'art de gouverner, dans la mesure où cet art tend à prévoir et anticiper les problèmes à venir (Miossec, 1998a). Le concept d'intégration de la zone côtière appréhende l'occupation de l'espace littoral dans sa globalité et non de manière sectorielle, afin d'éviter les conflits d'usage et asseoir les bases d'un développement durable. Tous les différents secteurs d'activités qui se concentrent sur le littoral (l'environnement mais aussi l'aquaculture, l'urbanisme, le tourisme, les transports...) doivent être pris en compte dans l'élaboration d'une politique de gestion intégrée (Dumas, 2004).

Ainsi, dans le cadre de la GIZC, le littoral est-il considéré comme un système. A ce titre, on distingue deux gestions de ce système : amont et aval. La zone côtière est un espace fragile, sensible à de nombreux facteurs naturels et anthropiques (Goumerlon et Robin, 2005). Afin de la protéger, il convient de s'intéresser à l'érosion - en amont - phénomène aux conséquences sur le littoral non négligeables (apports terrigènes).

Dans ce sens, à travers sa thèse "Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée – Application en Nouvelle-Calédonie", soutenue en 2004, P. Dumas s'est intéressé particulièrement à la cartographie de l'aléa érosion sur les communes de Dumbéa, Païta et Boulouparis au Nord-Ouest de Nouméa. Une carte de la sensibilité des sols a été produite grâce à l'élaboration d'un modèle cognitif, envisagé du point de vue de l'émission potentielle de particules solides.

Ce modèle qualitatif s'est appuyé sur des paramètres simples représentant les principaux facteurs de l'érosion : le relief, la nature et l'occupation du sol (Annexe 1). Avec des traitements utilisant la télédétection et un SIG, un reclassement a été réalisé pour ces trois paramètres. Le résultat obtenu

est une carte de sensibilité des sols à l'érosion sous forme d'un indicateur : sensibilité faible, moyenne ou forte (Annexe 2).

Ce premier modèle a ensuite été complété par les travaux de G. Luneau en 2006 qui a utilisé les outils de la géomatique pour l'élaboration d'une méthodologie reproductible, basée sur une analyse multicritère, permettant de croiser les couches d'informations suivantes : précipitations, relief, nature et occupation du sol, courbures de pentes, surfaces drainées cumulées et pistes (Annexe 3).

I.4 LA PROBLÉMATIQUE

Comme nous l'avons vu précédemment, la connaissance du milieu terrestre en amont de la zone lagonaire permet de prévenir les risques de pollution, notamment par la mise en oeuvre d'actions de gestion sur les bassins versants dans le cadre d'une Gestion Intégrée des Zones Côtières.

En Nouvelle Calédonie, l'érosion des sols est un problème récurrent. D'une part, du fait de son climat tropical et des violents épisodes pluvieux ; d'autre part, du fait de l'action anthropique : les feux de brousse et l'exploitation minière sont les deux pratiques principales jouant un rôle dans ces processus.

A partir des modèles de spatialisation de l'aléa érosion déjà mis en place au sein de l'IRD (voir I.3.), l'objectif de cette étude a été la mise en place d'une méthodologie reproductible permettant de modéliser l'aléa érosion des sols de manière quantitative en utilisant les outils de la géomatique.

II. MÉTHODOLOGIE

Pour répondre à notre problématique, il est nécessaire de connaître les processus qui régissent l'érosion afin de choisir un modèle permettant de la spatialiser et de la quantifier.

II.1 PROCESSUS ET MÉCANIQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît, soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement sont présents généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (Cros-Cayot, 1996). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg.

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992).

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que la dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Des choix sont donc nécessaires pour caractériser chacun des facteurs évoqués. Le plus souvent ces choix résultent d'un compromis entre la connaissance que l'on a des processus, et la disponibilité des différents paramètres.

L'érosion hydrique du sol peut donc se définir comme étant le phénomène par lequel le sol perd, sous l'action de l'eau, certaines ou toutes ses particules. Bien que l'eau soit définie comme un agent morphogène moteur de l'érosion, d'autres facteurs interviennent dans ce processus et conditionnent son impact (Dumas, 2004). 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 : le dépôt des particules (diagramme de Hjulström).

II.2 ÉTAT DE L'ART – CHOIX D'UN MODÈLE

Afin de traiter la spatialisation de l'érosion d'un point de vue quantitatif, il est nécessaire d'utiliser un modèle. Nous nous sommes donc intéressés aux processus de transfert des sédiments depuis le versant jusqu'au réseau hydrographique et aux différents modèles s'y attachant afin de savoir s'il était possible de coupler un modèle hydrodynamique à la spatialisation de l'aléa érosion.

II.2.1 Les bases du modèle

Seulement une proportion, peut-être même plutôt faible, des particules érodées à l'intérieur d'un bassin versant atteint l'exutoire lors d'un événement pluvieux (Dautrebande et Sohier, 2006). Les incertitudes sont grandes quant à l'estimation de cette proportion qui est décrite à l'aide du '*sediment delivery ratio*' (SDR). En outre, des discontinuités temporelles peuvent intervenir au cours du processus d'exportation des sédiments introduisant encore davantage de complexité dans le transfert des sédiments depuis les versants jusqu'aux cours d'eau. Des zones de dépôt appelées zones tampons peuvent apparaître à l'intérieur du bassin versant et modifier considérablement la dynamique de l'érosion.

On distingue deux groupes de paramètres susceptibles d'influencer les modèles d'érosion. D'une part, les paramètres physiques du milieu tels que la pente, la pluie, la microtopographie, le sol et la contribution en ruissellement provenant de l'amont du versant. D'autre part, les paramètres propres à la représentation des processus dans le modèle, c'est-à-dire la façon de calculer les différentes composantes du modèle (par exemple, la manière de calculer l'infiltration de type hortonienne, le ruissellement, le coefficient de frottement, les valeurs de flux de mises en mouvement par splash pour différentes textures de sol...).

Les modèles hydrologiques spatialisés sont basés sur une segmentation de la surface et du milieu souterrain. Les principaux processus étudiés sont les écoulements en milieu non saturé et saturé, le ruissellement de surface sur les versants et les écoulements via le réseau hydrographique. Les paramètres à identifier sont les propriétés hydrodynamiques des sols pour les écoulements en milieu non saturé, la transmissivité pour les écoulements en milieu saturé ainsi que les caractéristiques géométriques (longueur, profil en travers, pente, rugosité) pour les écoulements à surface libre aussi bien sur les versants que dans le réseau hydrographique. A ceci s'ajoute la connaissance des conditions initiales et aux limites du milieu.

II.2.2 Les principaux modèles hydrologiques de transfert des sédiments

Les modèles diffèrent essentiellement par les hypothèses de fonctionnement hydrologique, par la procédure de segmentation du bassin versant, par le mode de représentation des liens entre les versants et le réseau hydrographique, par le mode de représentation des processus hydrologiques, et par les stratégies de paramétrisation, de calage et de validation.

- HYDROTEL (Fortin et al., 1995)

Le modèle hydrologique HYDROTEL simule six processus hydrologiques : interpolation des données météorologiques, évolution et fonte du couvert nival, évapotranspiration potentielle, bilan d'eau vertical, écoulement sur la partie terrestre du bassin, écoulement dans le réseau hydrographique. Pour certains de ces processus, HYDROTEL offre la possibilité de choisir différents sous-modèles en fonction des données disponibles. Ainsi, lorsque suffisamment de données sont disponibles sur un bassin donné, il est possible d'utiliser des sous-modèles plus précis basés sur les processus physiques. Dans d'autres cas, lorsque les données se font plus rares, des sous-modèles plus conceptuels et moins gourmands en données sont disponibles. Ceci permet d'appliquer HYDROTEL à une large gamme de bassins.

- USLE : Universal Soil Loss Equation (Wischmeier et Smith, 1978)

L'équation universelle de pertes en sol s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques anti-érosives.

Malgré les critiques adressées sur l'utilisation abusive de l'USLE dans des conditions autres que celles où elle a été élaborée, il semble, en pratique, que l'approche de modélisation par l'emploi des facteurs de l'USLE demeure une stratégie acceptable pour évaluer l'érosion hydrique des sols.

Par ailleurs, le modèle a été complété par un module prenant en compte le dépôt dans le modèle RUSLE, Revised USLE (Renard et al. 1997). Plusieurs modèles qui simulent la pollution diffuse sont dérivés de l'Équation universelle de perte de sol ou utilisent certaines de ses composantes pour estimer l'érosion des sols.

- SHE : Système Hydrologique Européen (Abbott et al., 1986 ; Bathurst et O.Connell, 1992)

Parmi les modèles à base physique, c'est le plus connu. Il a été développé conjointement par le Danish Hydraulic Institute, le British Institute of Hydrology et la société française SOGREAH il y a une vingtaine d'années. Le modèle SHE, s'appuyant sur une grille de mailles carrées, a pour ambition de capitaliser toutes les connaissances hydrologiques dans un seul modèle mécaniste dans un but de mieux comprendre le fonctionnement complexe du bassin versant. Depuis la version initiale du SHE, de constantes améliorations ont permis de proposer plusieurs versions intégrant notamment la modélisation des processus d'érosion et de transport de sédiments.

- SHETRAN (Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System, Ewen et al., 2000)

Ce modèle recourt essentiellement à trois composantes principales liées à l'écoulement de l'eau ainsi qu'au transfert de sédiments et solutés. La composante « eau » permet la simulation des écoulements de surface ainsi que le transfert de l'eau du sol et des écoulements souterrains. La composante « sédiment » permet d'évaluer les processus d'érosion ainsi que le transfert de particules solides à la surface du sol. La composante « solutés » offre la possibilité de déterminer le mouvement des substances en solution dans l'eau du sol ainsi que leur acheminement en rivière. Ce modèle est

complètement distribué et ceci dans les trois dimensions. Il nécessite de connaître les conductivités hydrauliques et les teneurs en eau à saturation.

- **MHYDAS** : Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSystèmes (Moussa et al., 2002)

MHYDAS n'est pas un modèle unique, mais une plate-forme de modélisation qui a été développée afin de comprendre et de simuler les processus de transfert d'eau et de polluants en milieu agricole. Sa structure modulaire permet à l'opérateur de choisir les modules les plus appropriés à sa problématique. Dans sa version actuelle, c'est un modèle événementiel de crue. MHYDAS propose huit modèles d'infiltration 1D :

- cinq modèles à bases physiques s'appuyant sur les équations de Richards ou leurs simplifications, nécessitant une bonne connaissance des propriétés hydrodynamiques du sol et des conditions initiales d'humidité sur un profil vertical,
- trois modèles basés sur une représentation simplifiée du milieu : modèle à réservoir (Diskin et Nazimov, 1995) ou modèles empiriques (Horton, 1933).

Ces huit modèles nécessitent la connaissance de l'intensité de la pluie, des conditions initiales d'humidité et des propriétés hydrodynamiques de la couche de surface du sol.

- **SWAT** : Soil and Water Assessment Tool (Arnold et Williams, 1995 ; Neistch et al., 2002)

Les algorithmes du modèle de bassin versant SWAT permettent la modélisation du transport et des transformations de l'azote, du phosphore et des pesticides en milieu terrestre. Le transport dépend des masses de sédiments provenant de l'érosion hydrique des sols. La modélisation des cycles a donné lieu à la construction de deux modules informatiques : un module 'azote-phosphore' simule le cycle de l'azote et du phosphore alors qu'un module 'pesticides' simule le transport et la dégradation de pesticides. L'estimation de la réserve utile et de la perméabilité à l'aide de fonctions de pédotransfert est utilisée pour modéliser les flux de pollution dans les sols.

D'autres modèles existent et varient en fonction de l'échelle utilisée, des propriétés hydrodynamiques des bassins versants et de la précision des données disponibles.

II.2.3 Choix d'un modèle pour l'étude

Il existe donc de nombreux modèles hydrologiques. Les modèles mécanistes ont une ambition de compréhension du fonctionnement du bassin, mais essayent de simplifier la complexité du milieu en privilégiant certains processus sur d'autres ou en introduisant de nouveaux concepts.

Par ailleurs, la plupart des modèles ont été développés pour répondre à un objectif particulier : gestion de la ressource en eau sur des bassins versants de taille moyenne (quelques centaines de km²) dans HYDROTEL, transfert de polluants dans SWAT et prise en compte des particularités du milieu agricole dans MHYDAS.

En outre, la modélisation à l'échelle du bassin versant pose essentiellement le problème de la représentation des discontinuités hydrologiques, de la paramétrisation de ces dernières, de la spatialisation sur les différentes unités (donc du maillage).

Enfin, l'utilisation d'une modélisation sur des bassins versants peu instrumentés ne permet pas la description détaillée de tous les processus. Le calage des fonctions des modélisations à base physique sur ce type de bassin ne semble pas permettre une amélioration des résultats par rapport à une approche conceptuelle, du fait d'une variabilité spatio-temporelle importante et difficile à caractériser, qui amène une incertitude élevée sur les résultats.

En conclusion, même si une grande variété de modèles est disponible pour la caractérisation des processus de transfert à l'échelle d'un bassin versant, très peu prennent en compte l'estimation du phénomène érosif. De plus, la plupart des modèles demande tellement de données-sources que leur application pose problème en Nouvelle-Calédonie. En effet, les bassins versants ne sont pas ou peu instrumentés et les données hydrologiques (perméabilité, teneur en eau, conductivité et même débits) nécessaires à la mise en place de modèles tels que ceux vus précédemment sont quasiment inexistantes.

Le premier choix de modéliser les processus de transfert sur les bassins versants de Nouvelle-Calédonie afin de traiter à la fois du phénomène érosif et du transport des sédiments dans le réseau hydrographique semble être trop ambitieux. Nous nous intéresserons donc uniquement à la quantification de l'érosion potentielle.

Tous ces paramètres pris en compte, le modèle le plus approprié afin d'effectuer une première quantification de l'apport sédimentaire dans le lagon dû à l'érosion sur le bassin versant est le modèle USLE.

II.3 DÉFINITION DE L'USLE

II.3.1 Historique de l'Équation Universelle de Pertes en Sol

L'Universal Soil Loss Equation (USLE) est le résultat de plusieurs années de recherche menées par des équipes de chercheurs dans plusieurs régions des Etats-Unis d'Amérique.

Vers le début des années 1900, certaines zones aux Etats-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 ont entamé 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: 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 (Renard et al., 1991).

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 et des pratiques de conservation des sols.

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'érodibilité 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 Whin ont présenté en 1948 une équation dite "rationnelle" d'estimation de l'érosion (Renard et al., 1991).



W.H. Wischmeier

Sous la direction de W.H. Wischmeier, le National Runoff and Soil Loss Data Center fut créé en 1954 à l'université de Purdue avec pour but de développer une équation de prédiction de l'érosion reproductible sur l'ensemble des Etats-Unis.

Après la mise sur pied du centre, plus de 10 000 parcelles par 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. A l'issue des analyses effectuées, de correctifs et d'améliorations, Wischmeier, Smith et d'autres chercheurs ont développé l'Équation Universelle de Perte de Sol (USLE) et ont publié leur équation en 1978 dans le "Agriculture Handbook" No 537 (Renard et al., 1991).

II.3.2 Expression de l'USLE

L'érosion du sol est définie comme la quantité de sol érodé pour une superficie et une durée donnée. Il existe trois types de modèles : empirique, conceptuel et physique. L'USLE est de type empirique puisqu'elle est basée sur des observations et des statistiques. Dans ce sens, les paramètres du modèle doivent être calibrés selon les conditions (climat, etc.) du territoire où il est appliqué.

L'USLE est composée de six facteurs qui permettent d'obtenir une estimation de l'érosion (A) en tonnes/hectares.an par la multiplication de chacun des facteurs :

$$A = R.K.LS.C.P \quad (1)$$

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.an,

K est le facteur d'érodibilité 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.

Le modèle ayant été développé aux Etats-Unis, les unités initiales n'étaient pas exprimées en unités du système international mais en unités américaines. Ceci peut poser problème lors du calcul des facteurs à partir des équations de Wischmeier et Smith. Les coefficients de conversion des unités sont explicités en annexe 4. Par la suite, les unités seront exprimées uniquement dans le système international.

II.3.3 Définition des facteurs de l'équation

II.3.3.1 Facteur érosivité des précipitations (R)

Le facteur R est le facteur climatique déterminant la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations.

Hudson (1981) définit l'érosivité comme étant la capacité potentielle de la pluie pour produire de l'érosion, souvent attribuée à ses caractéristiques physiques. La quantité, l'intensité, la dimension des gouttes de pluie, la distribution de la grosseur de ces gouttes et la vitesse de chute en sont quelques exemples. Ces caractéristiques sont liées. En effet, 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).

Après avoir analysé les données collectées sur des stations expérimentales, Wischmeier et Smith ont déterminé 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. Ils ont donc établi la relation suivante :

$$R = E \times I_{30} \quad (2)$$

où :

R est l'érosivité de la pluie pour un épisode pluvieux en MJ.mm/ha.h,

E est l'énergie cinétique de la pluie en MJ/ha,

I_{30} est son intensité maximale en 30 minutes en mm/h.

Pour calculer E et I_{30} , les épisodes pluvieux de moins de 12,7 mm (ce qui correspond à 0.5 inch) en six heures ont été omis. En effet, ils sont considérés comme n'étant pas agressifs du point de vue de l'érosion des sols. Un épisode pluvieux est donc une période de pluie dont la somme des

précipitations est supérieure à 12,7 mm et qui est encadrée par deux périodes non pluvieuses d'au moins 6 heures.

Le calcul de E s'est fait à partir de l'équation établie par Brown and Foster en 1987 qui ont constaté que l'énergie cinétique de la pluie était une fonction exponentielle de l'intensité de la pluie :

$$E = 0.29 \times (1 - 0.72e^{-0.05 \times I}) \quad (3)$$

où :

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

Il est ensuite possible de calculer R pour une année :

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (E \times I_{30}) \quad (4)$$

où :

N est le nombre d'années utilisées pour le calcul,

k est le nombre d'épisodes pluvieux.

II.3.3.2 Facteur érodibilité des sols (K)

Le facteur K est le facteur d'érodibilité du sol selon un certain type de sol. Ce facteur reflète la résistance d'un sol à l'érosion causée par la force qu'engendrent les précipitations. Contrairement à l'érosivité de la pluie qui est en lien direct avec ses propriétés physiques, l'érodibilité d'un sol est la résultante de plusieurs variables.

En effet, ce sont les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des sols ainsi que leurs interactions qui affectent le facteur K. A ceci s'ajoute une grande variabilité spatiale.

De toutes les méthodes permettant de calculer K, la méthode synthétisée par le nomogramme de sol construit par Wischmeier (Figure 3, page suivante) est la plus utilisée et la plus citée (Renard et al., 1991).

Ce nomogramme est basé sur l'équation :

$$100K = 2,1 \times M^{1,14} \times 10^{-4} (12 - MO) + 3,25 \times (b - 2) + 2,5 \times (c - 3) \quad (5)$$

faisant intervenir les paramètres suivants :

M = (% sable fin + limon). (100 - % argile)

MO est le pourcentage de matière organique,

b est le code de perméabilité (Tableau 1, page suivante),

c est le code de structure (Tableau 1).

Tableau 1 : Signification des codes pour la structure du sol et la perméabilité (d'après Wischmeier et Smith, 1978)

Code	Structure du sol
1	Très fine
2	Fine
3	Moyenne ou grossière
4	Massive

Code	Perméabilité
1	Rapide
2	Moyenne à rapide
3	Moyenne
4	Lente à moyenne
5	Lente
6	Très lente

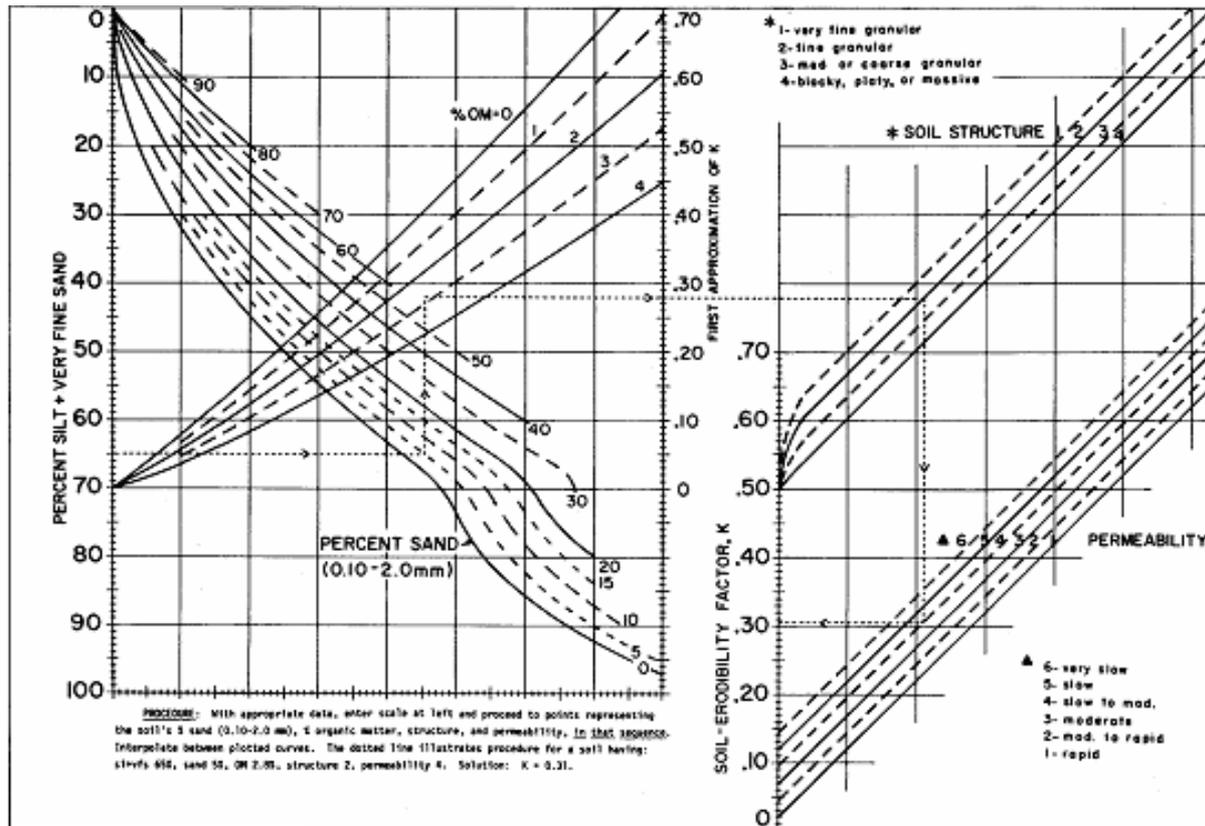


Figure 3 : Le nomogramme de Wischmeier pour le calcul du facteur K

II.3.3.3 Facteur topographique (LS)

Au-delà d'une pente de 2%, l'érosion connaît une croissance exponentielle (McCool et al., 1987) due à la formation de rigoles et à l'augmentation, avec la vitesse de ruissellement, des taux d'érosion diffuse.

La vitesse étant proportionnelle à la distance parcourue, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente. Les particules d'eau qui ruissellent emmagasinent donc une énergie plus importante qui se traduit par la création et le creusement de rigoles. Cependant, même si l'influence de la longueur de la pente est reconnue, il est très difficile de connaître précisément l'exposant qui relie l'érosion et la longueur de la pente. De nombreuses formules ont été proposées, mais elles ne

sont pas applicables de manière universelle. De plus, tout comme pour l'inclinaison de la pente, il faut prendre en compte le type d'érosion pour pouvoir déterminer quelle est l'influence de la longueur de la parcelle (Figure 4).

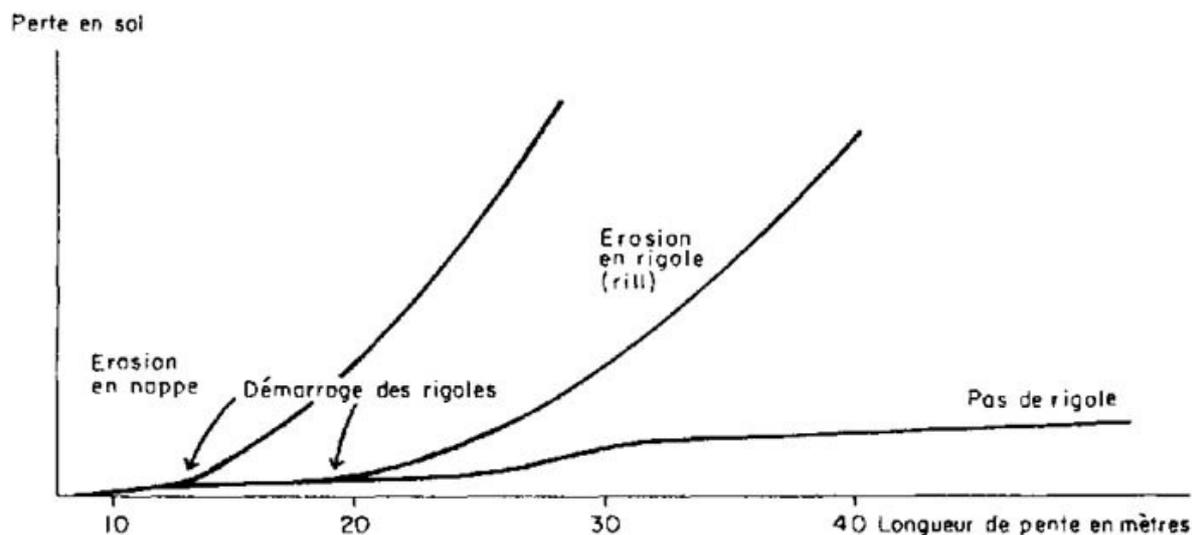


Figure 4 : Perte en terre en fonction de la longueur de la pente et du type d'érosion (d'après Roose, 1994)

Cependant, le facteur topographique LS de Wischmeier & Smith permet de donner des résultats satisfaisants quant à l'influence de la longueur et de l'inclinaison de la pente dans le phénomène érosif. Il prend donc en compte deux éléments : l'inclinaison (S) et la longueur (L) de pente. 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 de l'inclinaison et de la longueur de pente : l'une d'une longueur et d'une inclinaison de pente données, l'autre ayant 22.1 m de long et 9% de pente (parcelle expérimentale de Wischmeier et Smith, 1978).

La relation permettant de calculer le facteur LS est la suivante :

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^m \times (65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065) \quad (6)$$

λ est la longueur de pente en m

θ est l'angle d'inclinaison en %

m est un facteur qui dépend de la pente :

m=0,5 si la pente est \geq à 5%

m=0,4 si la pente est de 3,5 à 5 %

m=0,3 si la pente est de 1 à 3,5 %

m=0,2 si la pente est < 1%.

Les facteurs L et S peuvent être également calculés séparément. La longueur de pente est définie comme étant la distance comprise entre le point où commence le ruissellement et celui où commence le dépôt.

Le facteur L se calcule donc :

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^m \quad (7)$$

Le facteur S est estimé par deux régressions :

$$S = 10.8 \times \sin \theta + 0.03 \text{ si la pente est inférieure à } 9\%, \quad (8)$$

$$S = 16.8 \times \sin \theta - 0.5 \text{ si la pente est supérieure ou égale à } 9\%. \quad (9)$$

II.3.3.4 Facteur couverture végétale et pratiques culturales (C)

Le facteur C prend en compte l'occupation du sol (couvert végétal, aménagements et pratiques agricoles). En effet, l'érosion affecte plus particulièrement certains types de culture tandis qu'elle est moins forte ou tout simplement absente pour certaines activités et aménagements.

Le type de couvert végétal est à prendre absolument en compte puisque c'est de lui que va dépendre l'amortissement des gouttes de pluies, le ralentissement du ruissellement et l'infiltration (Roose, 1994).

Le facteur C dépend donc :

- du pourcentage de sol à nu, l'érosion intervenant majoritairement sur des sols à nus lors d'épisodes pluvieux agressifs ;
- de la hauteur du couvert végétal, il est intéressant d'avoir un couvert végétal, mais si celui-ci est trop élevé, l'amortissement des gouttes de pluies n'interviendra plus. En effet, après une première interception, les gouttes seront de nouveau rejetées vers le sol ;
- de l'architecture des plantes, des plantes en forme d'entonnoir auront tendance à drainer l'écoulement et à provoquer des ravinements. A l'inverse, les plantes dites "parapluie" vont disperser les gouttes d'eau et donc diminuer leur énergie.

Le facteur C est défini comme un ratio de la perte en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à la perte en sol correspondante sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978). Il peut être calculé à l'aide de nomogrammes (Roose, 1994) (Figure 5 page suivante) ou estimé en prenant des valeurs connues pour un certain type de végétation ou de culture (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeur de C pour différents types de couvert végétal (Sadiki et al., 2004)

C	Type de couvert végétal
0,058	reboisement dense
0,13	Forêt moyennement dense
0,17	matorral dégradé, parcours dense
0,18	reboisement clair
0,20	matorral clair, parcours dense,
0,22	Matorral très dégradé
0,32	steppes à alfa
0,70	céréaliculture
1	Terrain nu

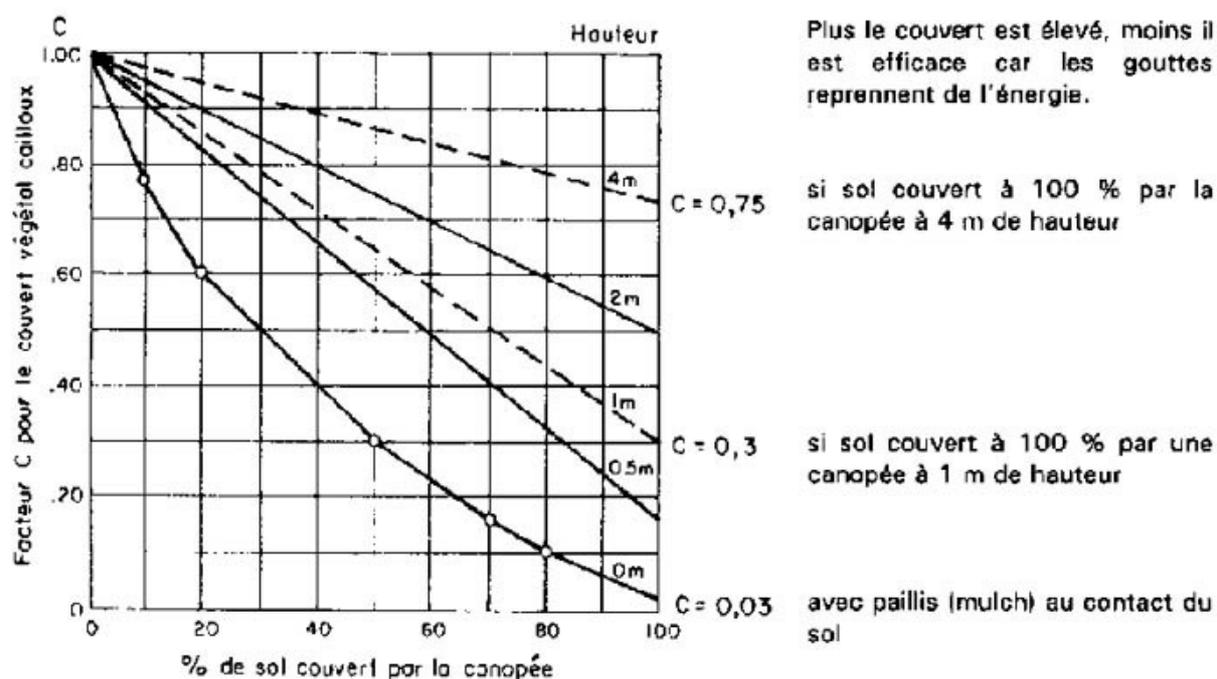


Figure 5 : Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (d'après Roose, 1994)

II.3.3.5 Facteur des pratiques de conservation du sol (P)

Le facteur P prend en compte les pratiques de conservation du sol. Les pratiques anti-érosives concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion.

Parmi ces techniques, on trouve la culture en courbe de niveau (contouring), la pose de bandes enherbées entre deux zones de culture, le paillage naturel ou artificiel, ou la pose de plantes de couverture (Roose, 1994).

Le tableau 3 ci-dessous donne quelques exemples de valeurs du facteur P pour un type de pratique anti-érosive donnée.

Tableau 3 : Valeurs du facteur P (d'après Wischmeier & Smith, 1978)

Type de pratique anti-érosive	Pente	Longueur maximale	Facteur P
Culture en courbe de niveau	1 à 8%	61 à 122 m	0.5
Culture en courbe de niveau	9 à 12%	36 m	0.6
Culture en courbe de niveau	13 à 16%	24 m	0.7
Culture en courbe de niveau	17 à 20%	18 m	0.8
Culture en courbe de niveau	21 à 25%	15 m	0.9
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	1 à 8%	30 à 40 m	0.25 à 0.5
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	9 à 16%	24 m	0.3 à 0.6
Culture en courbe de niveau avec bandes enherbées	17 à 25%	15 m	0.4 à 0.9

Dans le modèle USLE, l'érosion potentielle est donc le résultat du produit de quatre facteurs : le climat, la nature du sol, la topographie, l'occupation du sol et les pratiques de conservation des sols. Les équations permettant de calculer les différents facteurs ont été calibrées pour intégrer la contribution de chacun d'entre eux dans le phénomène érosif. Cependant, la mise en œuvre de l'USLE nécessite des ajustements propres à la zone d'étude.

Après avoir situé la zone d'étude, représentative des pressions exercées en Nouvelle-Calédonie (notamment les enjeux économiques et environnementaux), nous verrons la mise en œuvre de l'USLE. Pour cela, nous calculerons chaque facteur en explicitant les choix méthodologiques. Puis, nous élaborerons des cartes de répartition de ces facteurs sur la zone d'étude. Enfin, le croisement de ces cartes nous permettra d'obtenir une spatialisation et une quantification de l'érosion potentielle.

III. MODÉLISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE

III.1 LE SITE D'ÉTUDE

III.1.1 Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe sur les communes de Voh, Koné et Pouembout, à l'ouest de la province Nord de Nouvelle-Calédonie (Figure 6). Elle constitue un ensemble de 23 bassins versants, couvrant une surface de 1 347 km². Seul le sud de la commune de Voh a été intégré à l'étude, faute d'information sur le nord.

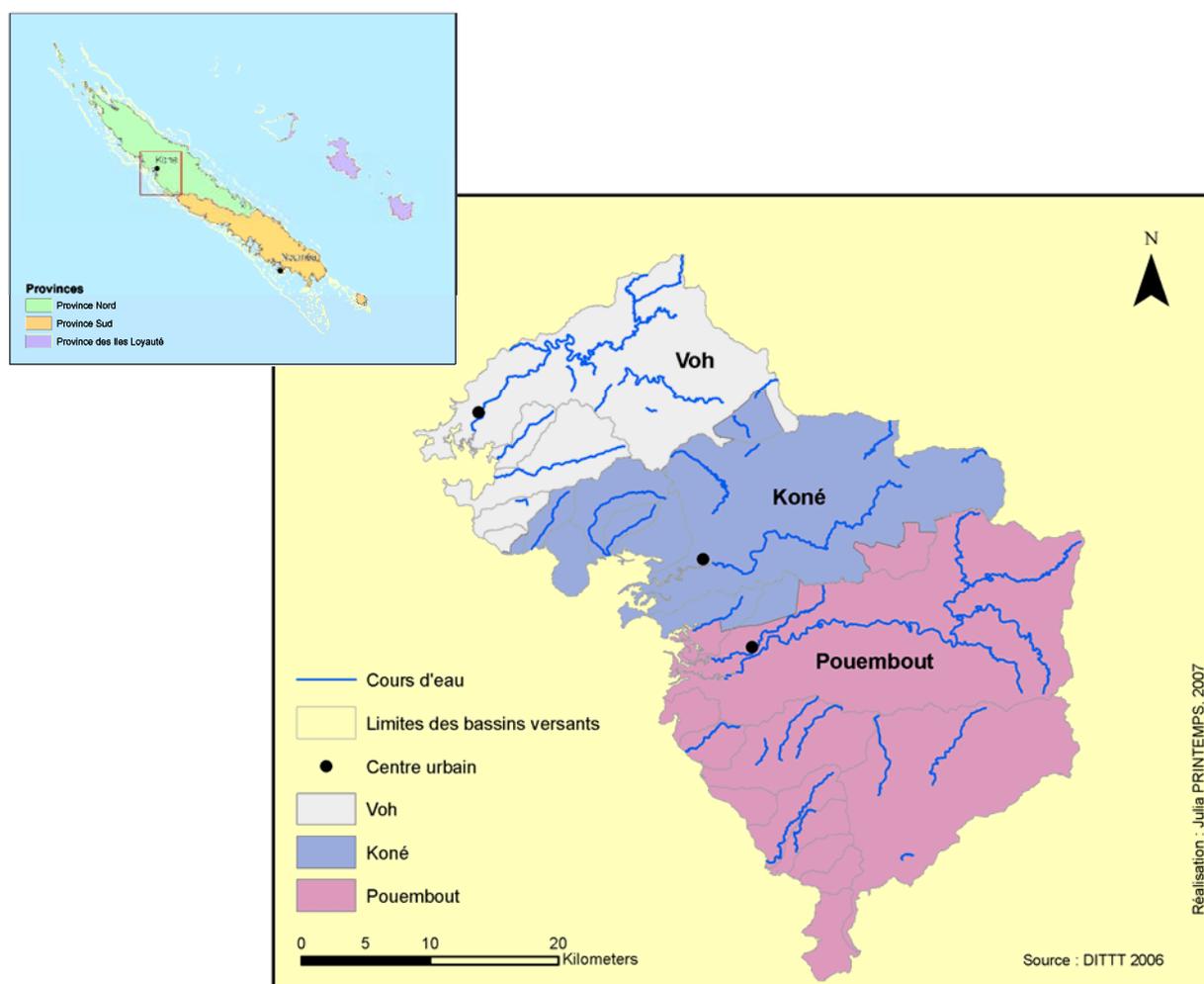


Figure 6 : Localisation de la zone d'étude

III.1.2 Intérêt de la zone d'étude

III.1.2.1 Enjeux économiques

Le territoire de Voh / Koné / Pouembout (VKP) occupe une situation stratégique en Province Nord. Les trois communes sont à la croisée des routes qui irriguent les deux côtes, la Koné-Tiwaka (route

transversale Ouest/Est) étant un outil majeur de désenclavement de l'arrière pays et de la chaîne. Cette situation stratégique est renforcée par l'implantation à Koné du centre administratif et technique de la Province et des équipements associés à son fonctionnement.

La zone VKP détient un ensemble d'atouts qui crédibilise la conception, en Province Nord, d'un véritable pôle de développement. En effet, dans les années à venir, des emplois créateurs d'activités induites seront générés par :

- la mise en valeur sur place des ressources minières par la création d'une usine métallurgique (les ressources du massif du Koniambo, estimées à 150 millions de tonnes avec une teneur supérieure à 2%, garantissent plus de 40 années d'exploitation),
- l'aboutissement de projets agroalimentaires,
- le développement des activités de service aux entreprises et aux particuliers.

Ceci permettra de recréer un contexte économique favorable.

L'exploitation minière n'a pas encore débuté, cette zone constitue donc une « zone pilote » remarquable car elle est un idéal point zéro avant la mise en place de l'usine sur le massif du Koniambo (Figure 7). Elle fait d'ailleurs l'objet d'attentions particulières dans le cadre du Programme National Environnement Côtier (voir I.2) du point de vue de l'analyse des impacts d'un développement rapide sur les ressources vivantes et l'organisation sociale. Parallèlement à l'étude d'impact du projet minier et aux études scientifiques sur cette zone, un schéma directeur d'aménagement urbain a été mis en place ayant pour objet d'organiser et de maîtriser à long terme – pour quinze ans – les évolutions du territoire de ces trois communes. Il garantit une organisation rationnelle de l'espace en servant de cadre à des politiques d'aménagement et de protection.

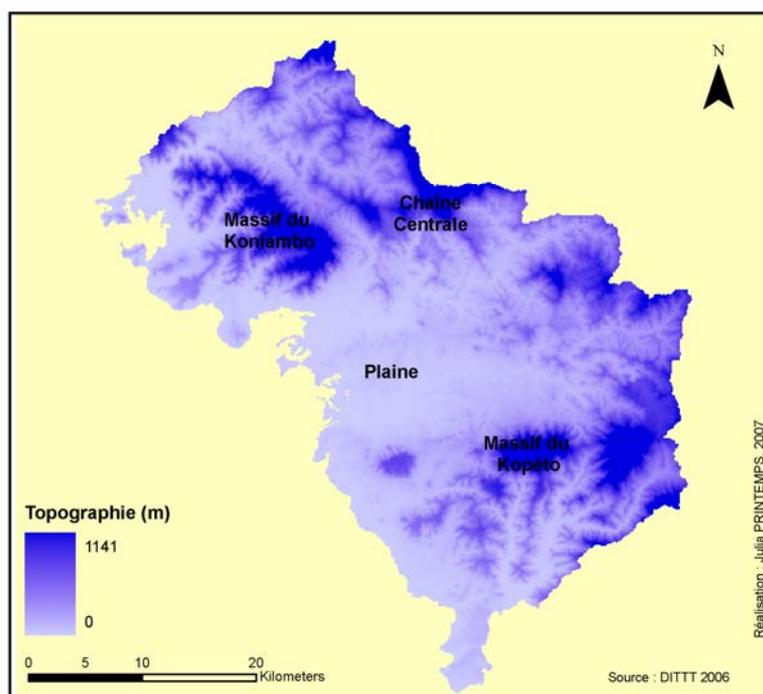


Figure 7 : Topographie de la zone d'étude

III.1.2.2 Enjeux environnementaux

La zone VKP constitue une zone de travail intéressante du point de vue de la diversité des pressions naturelles et anthropiques exercées sur le milieu et jouant un rôle dans les processus érosifs.

Les précipitations abondantes et les fortes pentes de la zone sont les premiers facteurs de l'érosion. De plus, la pression d'autres phénomènes naturels contribue à favoriser l'érosion par la mise à nu de sols protégés par la végétation, comme les feux de brousse durant la période sèche, bien que ceux-ci, qui constituent la plus importante cause de dégradation du couvert végétal, sont souvent d'origine intentionnelle (www.foretseche.nc).

La problématique de l'érosion est aussi accentuée par les actions anthropiques conditionnant particulièrement l'utilisation des sols. La cause majeure de l'influence de l'homme dans les phénomènes érosifs réside dans la richesse géologique de la Nouvelle-Calédonie : le nickel. En effet, l'exploitation minière représente la deuxième cause de dégradation des sols (après les feux).

Depuis 1950, la mécanisation des techniques d'exploitation minière a permis une forte expansion des opérations d'extraction. Les gisements, recouverts de sol latéritique, sont devenus accessibles, et il existe aujourd'hui une production à grande échelle de résidus miniers. Jusqu'au milieu des années 70, faute de réglementation, les compagnies minières brûlaient la végétation lors de leurs opérations de prospection et déviaient systématiquement les résidus en aval (Jaffré et Pelletier, 1992). Lors de forts épisodes pluvieux, ils étaient entraînés le long de la pente, la dégradant fortement (aggravant le phénomène d'érosion naturelle) et formant des ravines, qui entraînaient les sédiments dans les rivières et le lagon du secteur exploité.

Aujourd'hui, de nouvelles techniques d'extraction sont mises en œuvre dans l'exploitation du nickel, pour limiter l'impact de l'érosion, par la mise en décharges stables des déblais de pistes et des stériles. Le découpage des sites d'exploitation par bassins versants et le dimensionnement des ouvrages de collecte et de décantation des eaux, en fonction de la superficie des bassins ont permis de réduire considérablement les entraînements par eau de pluie. Par ailleurs des essais de consolidation des déblais et des terrains par revégétalisation sont en cours mais s'avèrent difficiles à mettre en œuvre. Malgré cela, la maîtrise des pollutions sur les anciens sites, dont l'exploitation a été arrêtée avant 1975, est plus difficile à mettre en œuvre et les mesures prises ne sauraient suffire à empêcher l'entraînement jusqu'à la mer des produits les plus fins mobilisés dans des zones d'altitude. Par ailleurs, la généralisation de ces mesures à l'ensemble des zones minières supposerait un investissement considérable. La persistance, à long terme, des impacts directs de l'extraction et de leurs effets secondaires est donc prévisible (Jaffré, 1994).

L'urbanisation des pentes et la construction d'infrastructures qui en découle (réseau routier, aménagements hydrauliques...) n'ont qu'un impact limité sur l'érosion. Il en est de même pour l'agriculture avec des conditions naturelles en Nouvelle Calédonie peu favorables à son développement (massifs montagneux, plaines sèches et peu fertiles). Il est toutefois important de noter l'impact de la production vivrière traditionnelle dominée par les tubercules et destinée à l'autoconsommation et aux échanges coutumiers. Ces pratiques s'accompagnent de défrichements

par le feu, qui, lorsqu'ils ne sont pas maîtrisés, entraînent la destruction de milliers d'hectares de végétation, diminuant ainsi la protection des sols.

III.2 MISE EN OEUVRE DU MODÈLE

III.2.1 Collecte des données

Les données nécessaires à l'élaboration de cette étude (Tableau 4, page suivante) ont été collectées auprès de divers organismes du gouvernement de Nouvelle-Calédonie :

- la DIMENC : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie
- la DITTT : Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres
- la DTSI : Direction des Technologies et des Services de l'Information
- MétéoFrance.

Tableau 4 : Les données collectées auprès des organismes traitant de l'information géographique en Nouvelle-Calédonie

Données	Emprise géographique	Echelle/Résolution	Organisme Propriétaire
Carte géologique (shapefile)	Voh, Koné, Pouembout	1/50 000	DIMENC
BD Topo (shapefiles)		1/10 000	DITTT
MNT (raster)		10m	DITTT
Précipitations (intensités toutes les 6 minutes en mm)		/	MétéoFrance
Occupation du sol (shapefile)		20m	DTSI
Carte pédologique (format papier)	Pouembout	1/50 000	IRD
Carte pédologique (shapefile)	Nouvelle-Calédonie	1/200 000	IRD

III.2.2 Schéma méthodologique

L'application de l'USLE nécessite l'évaluation des différents facteurs de l'équation universelle sur toute la superficie du bassin versant et leur expression sous forme de cartes thématiques. L'intégration de ces cartes dans un système d'information géographique se fait grâce aux outils d'analyses spatiales.

Le croisement des cartes et l'application des équations mathématiques du modèle de Wischmeier & Smith permettent d'évaluer le taux d'érosion sur tous les points de la zone d'étude et l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol selon l'organigramme méthodologique présenté par la figure 8 (page suivante).

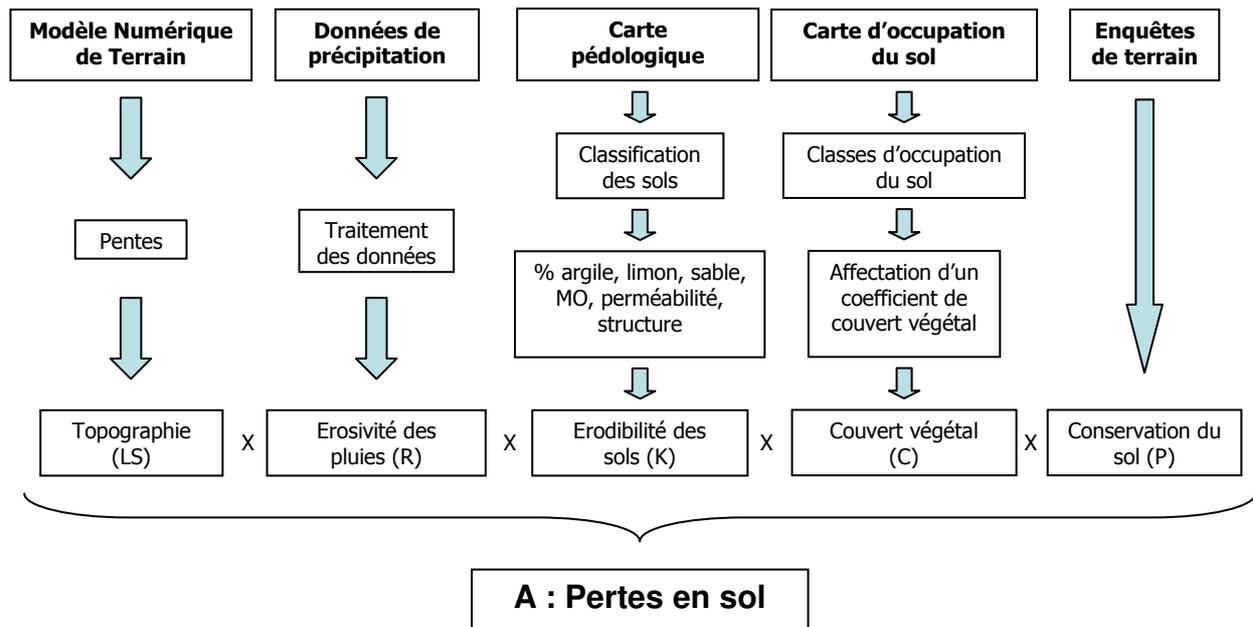


Figure 8 : Organigramme méthodologique de l'intégration du modèle USLE dans un SIG

La première étape de la mise en œuvre de l'USLE a donc été de calculer chaque facteur de l'équation. La deuxième étape fut l'élaboration des produits cartographiques correspondant dans le SIG. Pour cela, c'est le logiciel *ArcGIS Desktop 9.0*® développé par la société ESRI qui fut utilisé.

ArcGIS Desktop® est la principale application utilisée par les professionnels du SIG pour compiler, créer et utiliser les informations et les connaissances géographiques. Elle permet le stockage et la structuration de données géographiques "raster" et "vecteur".

En outre, un ensemble de modules de traitements et d'analyse avancée complètent l'utilisation de ce SIG. Il s'agit notamment de l'extension *ArcGIS Spatial Analyst*® qui offre les outils nécessaires à la modélisation spatiale, par exemple :

- analyse de surface (interpolation en raster, création de zone tampon à une certaine distance des entités, identification de la localisation à une entité, densité de surface et modélisation de potentiel),
- analyse de terrain (pente, exposition, ombrage, définition du bassin versant, analyse de visibilité, champ de vision, génération d'iso-valeur),
- superposition de vecteur sur les rasters, utilisation de masque d'analyse, analyse de surface raster sur des polygones vectoriels,
- calculatrice raster (opération sur les raster).

III.2.3 Calcul des facteurs de l'équation

III.2.3.1 Facteur érosivité des précipitations (R)

L'érosion mécanique des sols est une caractéristique naturelle des îles hautes tropicales soumises à de violentes pluies (Dumas, 2004). En effet, la pluie est le principal facteur de l'érosion. L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent en emportant des particules de terre (Le Bissonnais et al., 2002).

➤ Le climat de la zone d'étude

La Nouvelle-Calédonie est située dans la zone intertropicale, juste au nord du tropique du Capricorne. Très isolée géographiquement et soumise au courant des alizés, elle bénéficie d'un climat relativement tempéré, que l'on peut qualifier de « tropical océanique ». La variation annuelle de la position de la ceinture anticyclonique subtropicale et des basses pressions intertropicales permet de distinguer deux saisons principales séparées par deux intersaisons :

- de mi-novembre à mi-avril : saison chaude et humide, c'est la saison des cyclones. Le territoire subit de fortes pluies.
- de mi-avril à mi-mai : saison de transition, la pluviosité diminue et la température décroît.
- de mi-mai à mi-septembre : saison fraîche.
- de mi-septembre à mi-novembre : saison sèche, pluviosité minimale et température qui augmente progressivement, l'alizé souffle quasiment en permanence.

Les deux côtes de la Nouvelle-Calédonie ne sont pas soumises au même régime de précipitations. En effet, la Chaîne Centrale découpe l'île en deux versants engendrant une dissymétrie bioclimatique. La côte Est, versant au vent, est soumise à de fortes pluies pouvant atteindre 6 000 mm/an. A l'inverse, la côte Ouest, sous le vent, présente un climat plus sec.

La zone d'étude est située sur la côte Ouest. Sa pluviosité varie de 500 mm/an en bord de mer à presque 2 000 mm/an dans la chaîne centrale. La température annuelle moyenne sur la zone est de 23 °C.

➤ Les données utilisées

Pour évaluer l'érosivité de la pluie en calculant, d'une part, l'énergie cinétique et d'autre part, l'intensité maximale des pluies sur 30 minutes, nous avons besoin de données météorologiques détaillées sur la zone d'étude. Six stations météorologiques relèvent les précipitations sur la zone d'étude. Deux stations en bordure de la zone ont également été prises en compte afin d'avoir une meilleure interpolation des résultats (Figure 9, page suivante).

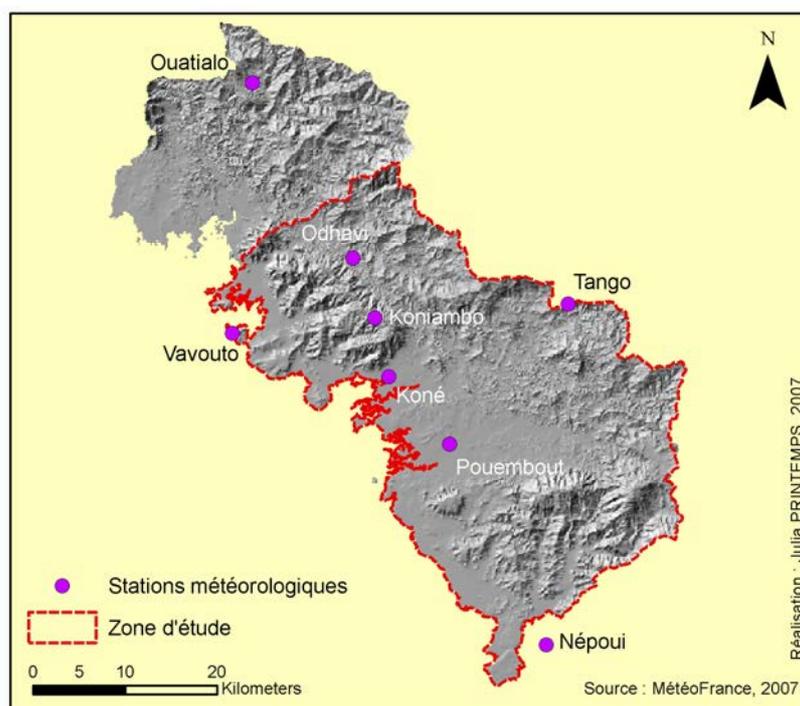


Figure 9 : Localisation des stations météorologiques

Les données issues des stations se présentent sous la forme d'enregistrements de la quantité (en mm) de pluie toutes les 6 minutes. Selon les stations, la période d'enregistrement va de 5 à 13 ans (Tableau 5).

Tableau 5 : Période d'enregistrement des stations météorologiques

Location de la station	Période d'enregistrement
KONE	01/07/1995-31/12/2006
KONIAMBO	06/08/1999-31/12/2006
POUEMBOU	01/01/1993-31/12/2006
VAVOUTO	07/10/2001-31/12/2006
TANGO	12/02/1998-31/12/2006
ODHAVI	21/02/2001-31/12/2006
NEPOUI	01/01/1993-31/12/2006
OUATIALO	24/02/2002-31/12/2006

Afin de déterminer comment dédager les épisodes dits pluvieux et utiliser ces données pour le calcul du facteur R, un premier calcul fut effectué sur une extraction des enregistrements d'une des stations.

➤ Exemple du calcul de R

A partir des données de précipitations P toutes les 6 minutes réunies dans le tableau 6 (page suivante) et des équations (2), (3) et (4) (voir II.2.3.1), il fut possible de procéder au calcul de R pour cet épisode pluvieux.

Tableau 6 : Données pluviométriques pour un épisode pluvieux et calcul de E (Energie cinétique)

Date Heure	Précipitations P (mm)	Durée (min)	Intensité I (mm/h)	E (MJ.mm/ha.h)
23/01/1999 08:00	0.00	/	/	/
23/01/1999 08:06	0.00	6	0	0.000
23/01/1999 08:12	0.00	6	0	0.000
23/01/1999 08:18	0.40	6	4	0.048
23/01/1999 08:24	0.40	6	4	0.048
23/01/1999 08:30	1.00	6	10	0.163
23/01/1999 08:36	0.80	6	8	0.120
23/01/1999 08:42	0.60	6	6	0.081
23/01/1999 08:48	0.80	6	8	0.120
23/01/1999 08:54	1.20	6	12	0.210
23/01/1999 09:00	1.00	6	10	0.163
23/01/1999 09:06	0.40	6	4	0.048
23/01/1999 09:12	0.00	6	0	0.000
23/01/1999 09:18	0.20	6	2	0.020
23/01/1999 09:24	0.00	6	0	0.000
23/01/1999 09:30	0.00	6	0	0.000
23/01/1999 09:36	0.40	6	4	0.048
23/01/1999 09:42	0.60	6	6	0.081
23/01/1999 09:48	0.40	6	4	0.048
23/01/1999 09:54	0.20	6	2	0.020
23/01/1999 10:00	0.40	6	4	0.048
23/01/1999 10:06	1.40	6	14	0.261
23/01/1999 10:12	2.40	6	24	0.545
23/01/1999 10:18	0.20	6	2	0.020
TOTAL	12.80			2.092

L'intensité I en mm/h pour chaque période de 6 minutes est égale à :

$$I = P \times 10$$

L'énergie cinétique E pour cet épisode pluvieux est égale à :

$$E = \sum 0.29 \times (1 - 0.72e^{-0.05 \times I}) \times P$$

La valeur de l'intensité maximale en 30 minutes I_{30} s'obtient en additionnant les valeurs de P pour l'intervalle de temps 08:30-09:00. Soit 5.40 mm d'eau tombée en 30 minutes consécutives. Pour ramener cette somme sur une base horaire, on la multiplie par deux.

La valeur de R en MJ.mm/ha.h pour cet épisode pluvieux est donc :

$$R = E \times I_{30} \times 2 = 2.092 \times 5.4 \times 2 = 22.59$$

Considérant le nombre de données par stations (toutes les 6 minutes sur 13 ans pour certaines, ce qui équivaut à 1 138 800 données !), il a été décidé d'utiliser un logiciel de programmation pour l'analyse de données. Un algorithme a donc été élaboré sous le logiciel R afin de dégager les épisodes pluvieux et de calculer I_{30} , E et R pour l'ensemble des données.

➤ **Elaboration d'un algorithme sous R**

Le projet *R* consiste en une implémentation libre du langage de programmation appelé *S* (Lobry, 2006). Il a été développé depuis les années soixante-dix dans les laboratoires Bell par John Chambers et son équipe et distribué depuis 1993 sous licence commerciale exclusive par Insightful Corp. Initié dans les années quatre-vingt dix par Robert Gentleman et Ross Ihaka (Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande), auxquels sont venus s'ajouter un noyau de chercheurs du monde entier en 1997, il constitue aujourd'hui un langage et un environnement de programmation intégré d'analyse statistique.

L'objectif de ce projet est de fournir un environnement interactif d'analyse de données, doté d'outils graphiques performants et permettant une adaptation aisée aux besoins des utilisateurs, depuis l'exécution de tâches routinières jusqu'au développement d'applications entières.

R est un logiciel libre et gratuit qui fonctionne sur une large variété de plates-formes UNIX, Windows et MacOS (<http://www.r-project.org/>).

L'algorithme détaillé se trouve en Annexe 5. Les principales étapes du code sont les suivantes :

- appel de la fonction pour le traitement des données météorologiques : le logiciel va chercher les données dans le fichier qui les contient,
- identification des métaparamètres : dates, précipitations,
- lecture des données contenues dans le fichier,
- élimination des valeurs erronées issues de problèmes sur la station lors de l'enregistrement,
- initialisation pour la détermination des épisodes pluvieux : définition des variables (type et dimension),
- extraction des épisodes non pluvieux : en créant un vecteur contenant la somme des précipitations toutes les six heures (fenêtre glissante) et en y repérant les indices correspondant à des périodes non pluvieuses (selon la définition donnée dans le II.3.3.1),
- extraction des épisodes pluvieux : création d'un vecteur contenant uniquement les épisodes pluvieux par complémentarité avec les épisodes non pluvieux,
- calcul de l'intensité maximale en 30 minutes pour chaque épisode pluvieux,
- calcul de l'énergie cinétique pour chaque épisode pluvieux,
- calcul de l'érosivité des pluies pour la station.

➤ **Résultats obtenus**

Le code élaboré sous *R* donne directement la valeur du facteur "érosivité des précipitations" pour chaque station. Il est cependant nécessaire d'appliquer un facteur correctif pour obtenir R en unités SI (Annexe 4).

Le tableau 7 (page suivante) présente les résultats obtenus sur les huit stations météorologiques.

Tableau 7 : Les résultats du facteur R pour huit stations météorologiques

Location de la station	Facteur R (MJ.mm/ha.h.an)
KONE	3180.54
KONIAMBO	3940.57
POUEMBOUT	2142.60
VAVOUTO	1168.14
TANGO	5384.04
ODHAVI	2724.59
NEPOUI	1886.16
OUATIALO	2989.48

➤ **Elaboration de la carte du facteur R**

Les résultats obtenus ne sont pas suffisants pour interpoler R sur la zone d'étude.

L'option prise a été de rechercher une relation entre le facteur R et l'altitude des stations qui permettrait d'extrapoler les résultats sur la zone. En effet, il n'est pas rare qu'il existe un gradient de précipitation en fonction de l'altitude. Une droite de corrélation linéaire a donc été tracée sur Excel (Figure 10).

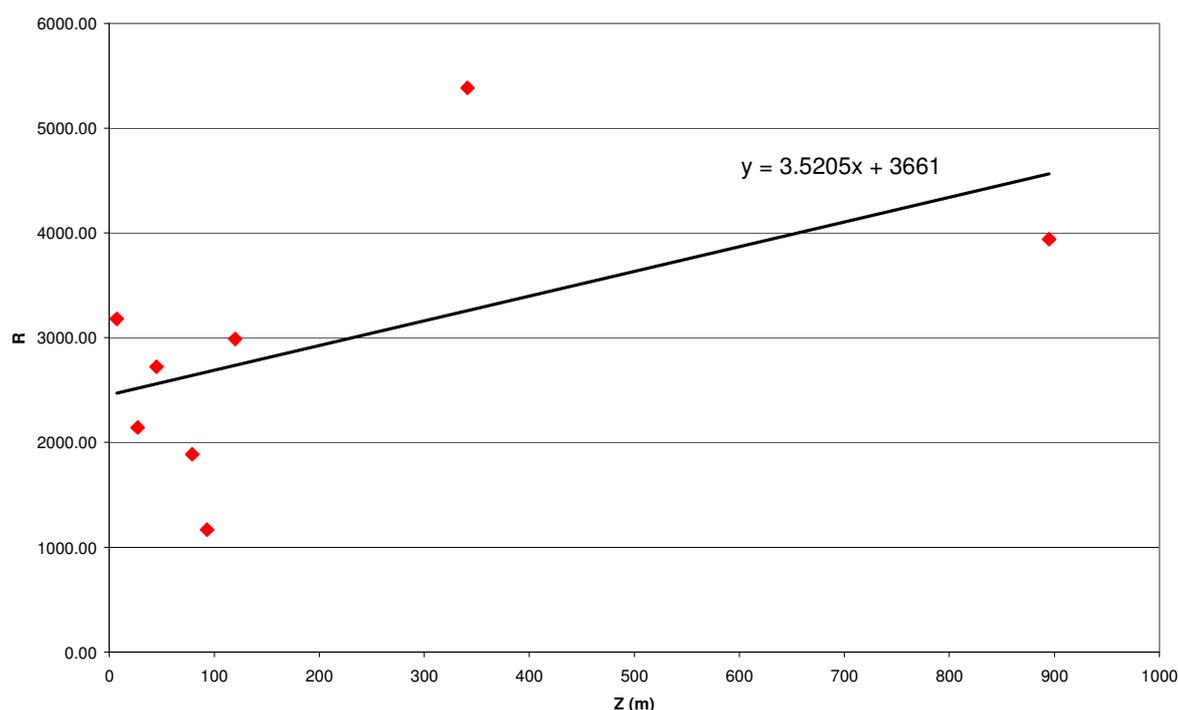


Figure 10 : Valeurs du facteur R en fonction de l'altitude pour les huit stations

A partir de l'équation de la droite de régression : $(R = 3.5205 \times Z + 3661)$, douze stations ont été créées pour avoir une interpolation plus fine et couvrir toute la zone (Figure 11).

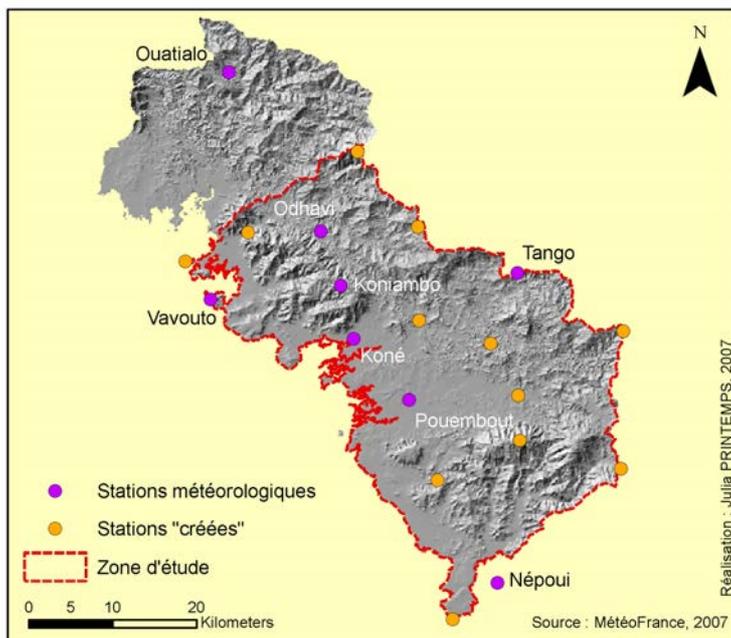


Figure 11 : Répartition des stations météorologiques "créées" sur la zone d'étude

Il fut alors possible d'interpoler R sur l'ensemble de la zone en utilisant la fonction 'spline' de l'outil *Spatial Analyst d'ArcGIS®* (Figure 12).

Dans le domaine mathématique de l'analyse numérique, une spline est une fonction définie par morceaux par des polynômes. Dans les problèmes d'interpolation, la méthode des splines est souvent préférée à l'interpolation polynomiale, car on obtient des résultats similaires en se servant de polynômes ayant des degrés inférieurs, tout en évitant le phénomène de Runge (problèmes d'interpolation de fonctions lorsqu'on augmente le nombre de points d'interpolation).

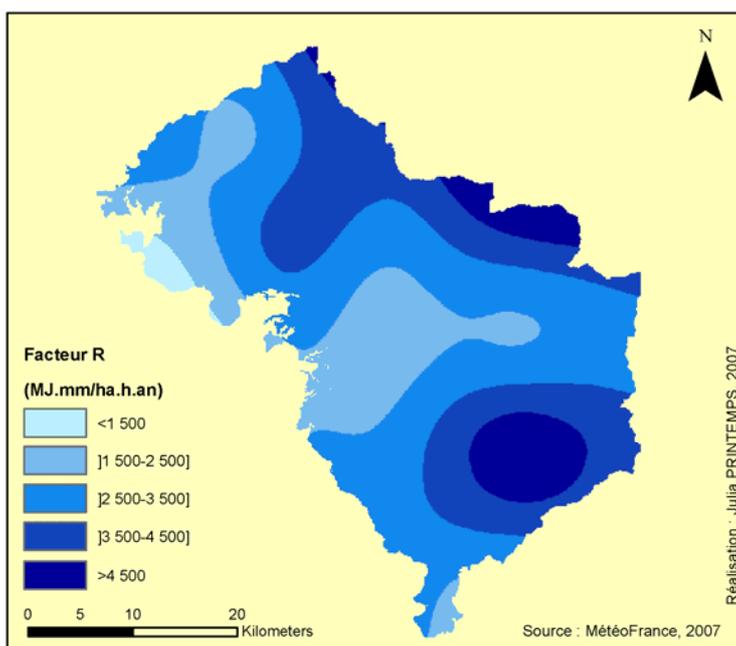


Figure 12 : Carte de répartition du facteur R - Erosivité des précipitations

Comme attendu, les valeurs du facteur R varient en fonction de l'altitude, de 613 MJ.mm/ha.h.an sur le littoral au nord de la zone à 5 876 MJ.mm/ha.h.an dans la Chaîne Centrale. Le massif du Kopéto, au sud de la zone d'étude présente également des valeurs élevées (5 160 MJ.mm/ha.h.an). Cette répartition suit la distribution des pluies sur cette zone puisque la Chaîne Centrale, faisant barrière aux nuages venant de l'Est est l'endroit le plus arrosé de Nouvelle-Calédonie.

Par ailleurs, ces valeurs semblent conformes aux résultats de données scientifiques, par exemple :

- R=60 au Maroc pour des précipitations moyennes de 310 mm/an (Sadiki et al., 2004),
- R=1690 à Toulouse pour des précipitations moyennes de 664 mm/an (Morschel et Fox, 2004),
- R=8098 à Haïti pour des précipitations moyennes de 1900 mm/an (Délusca, 1998).

III.2.3.2 Facteur érodibilité des sols (K)

La nature des sols est un paramètre majeur de l'érosion puisque l'arrachement des particules dépend directement des propriétés du sol et du sous-sol. Les données disponibles pour le calcul du facteur K étaient :

- la carte pédologique au 1/200 000^e (Podwojewski et Beaudou, 1987) à l'échelle du territoire,
- la carte pédologique au 1/50 000^e uniquement sur Pouembout (Denis et Mercky, 1982).

➤ La pédologie de la zone d'étude

A l'échelle du 1/200 000^e, il existe 22 types de sol sur la zone d'étude (Figure 13 et Tableau 8).

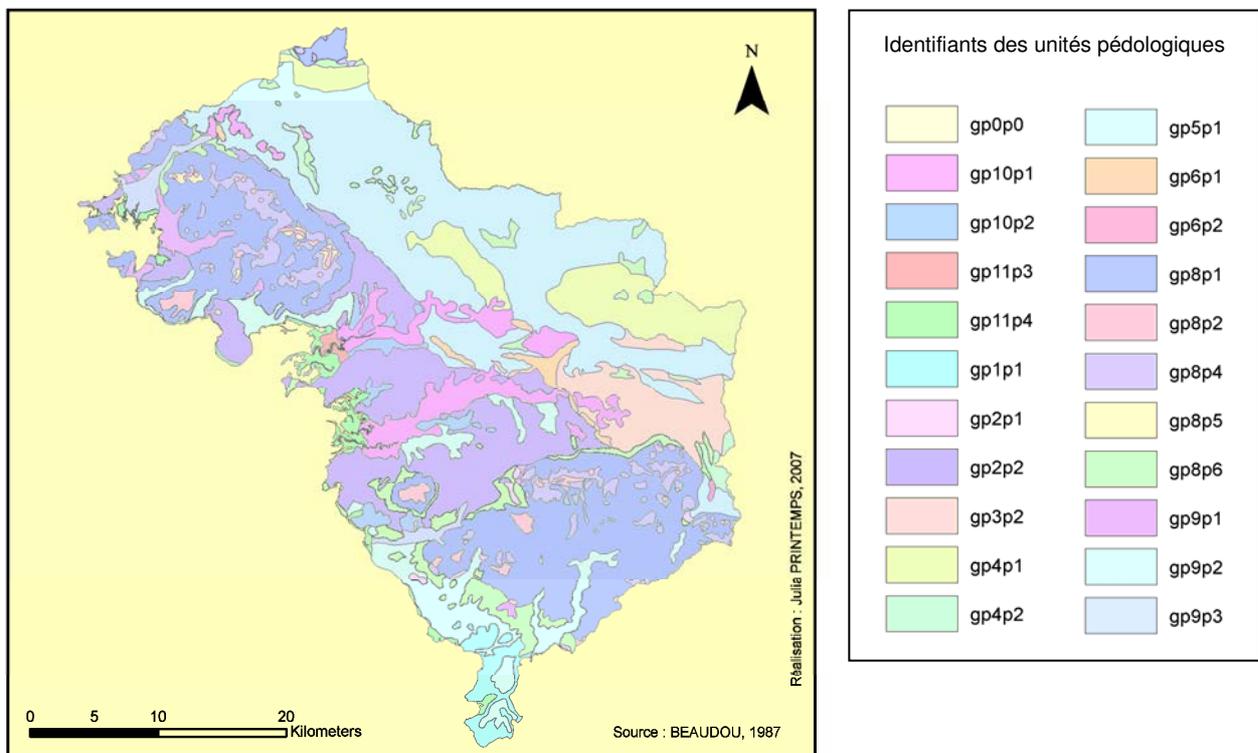


Figure 13 : Carte pédologique de la zone d'étude au 1/200 000ème

Tableau 8 : Type de sol associé à chaque unité pédologique au 1/200 000ème

Identifiant unité	Type de sol
gp0p0	/ (Eau libre : lac, estuaire...)
gp10p1	Sols fersiallitiques non lessivés à faiblement lessivés (Hautes terrasses), Solonetz solodisés, Vertisols halomorphes (moyennes terrasses), Vertisols, Sols peu évolués d'apport alluvial parfois hydromorphes à gley, Sols hydromorphes à gley, Sol minéral brut d'apport alluvial (terrasses récentes et actuelles).
gp10p2	Vertisols, Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphes, Sols peu évolués d'apport alluvial, Sols hydromorphes à pseudo-gley, Sol minéral brut d'apport alluvial.
gp11p3	Sols hydromorphes; Sols peu évolués d'apport alluvial et marin hydromorphes.
gp11p4	Sols minéraux bruts d'apport marin hydromorphes, Sols peu évolués d'apport marins hydromorphes, Sols hydromorphes, Sols de mangroves.
gp1p1	Sols peu évolués d'érosion, Sols bruns, sols bruns vertiques, Vertisols, Sols peu évolués colluviaux aréniques.
gp2p1	Sols minéraux bruts, Sols peu évolués d'érosion, Sols peu évolués colluviaux aréniques, Sols bruns ferruginisés, Sols ferrallitiques.
gp2p2	Sols peu évolués d'érosion, Sols brunifiés, bruns eutrophes (carapace calcaire), Sols bruns vertiques, Vertisols.
gp3p2	Sols peu évolués d'érosion, Sols bruns eutrophes, Sols fersiallitiques, Sols fersiallitiques lessivés.
gp4p1	Sols peu évolués d'érosion régosoliques, Sols bruns acides, Sols fersiallitiques non lessivés, Sols fersiallitiques rouge orangé non lessivés, Sols peu évolués d'apport alluvial, Sols hydromorphes, Sols fersiallitiques non lessivés jaune-orangé, Sols fersiallitiques bicolores jaune et rouge, hydromorphes.
gp4p2	Sols peu évolués d'apport alluvial, Sols hydromorphes, Sols fersiallitiques non lessivés jaune-orangé, Sols fersiallitiques bicolores jaune et rouge, hydromorphes.
gp5p1	Sols régosoliques, Sols peu évolués d'érosion, Sols bruns acides à fersiallitiques, Sols fersiallitiques lessivés.
gp6p1	Sols peu évolués d'érosion, Sols fersiallitiques lessivés, Sols lessivés, Sols lessivés, à évolution podzolique.
gp6p2	Sols minéraux bruts, Sols peu évolués d'érosion, Rendzines, Sols bruns calcaires, Sols bruns eutrophes, Sols bruns vertiques.
gp8p1	Sols minéraux bruts (Lithosols et Régosols), Sols peu évolués d'érosion, Sols ferrallitiques ferritiques souvent rajeunis (Oxydiques ferrugineux), Sols ferrallitiques ferritiques oxydiques.
gp8p2	Sols ferrallitiques ferritiques ou oxydiques ferrugineux, Sols minéraux bruts (cuirasse ferrugineuse affleurante), Sols peu évolués sur cuirasse ferrugineuse.
gp8p4	Sols minéraux bruts (Lithosols et Régosols), Sols peu évolués d'érosion, Sols ferrallitiques ferritiques souvent rajeunis (Oxydiques ferrugineux).
gp8p5	Sols ferrallitiques ferritiques oxydiques, Sols ferrallitiques oxydiques ferrugineux.
gp8p6	Sols peu évolués d'érosion, Sols bruns eutrophes, Sols bruns vertiques, Vertisols.
gp9p1	Sols peu évolués d'apport colluvial à caractères vertiques, (amont) et à caractères hydromorphes (aval).
gp9p2	Sols peu évolués d'apport alluvial à caractères vertiques, Vertisols.
gp9p3	Sols peu évolués d'apport alluvial parfois hydromorphes.

Faute d'analyses structurales et des compositions détaillées sur chaque type de sol présent dans la zone d'étude, il fut décidé de procéder à des regroupements de sol. Pour cela, les caractères principaux de chaque type de sol furent étudiés.

Les sols possédant des caractères similaires, par exemple, les sols ferrallitiques ferritiques, ont été rassemblés. Ceci a permis l'obtention de 5 grands types de sol sur la zone d'étude (Figure 14).

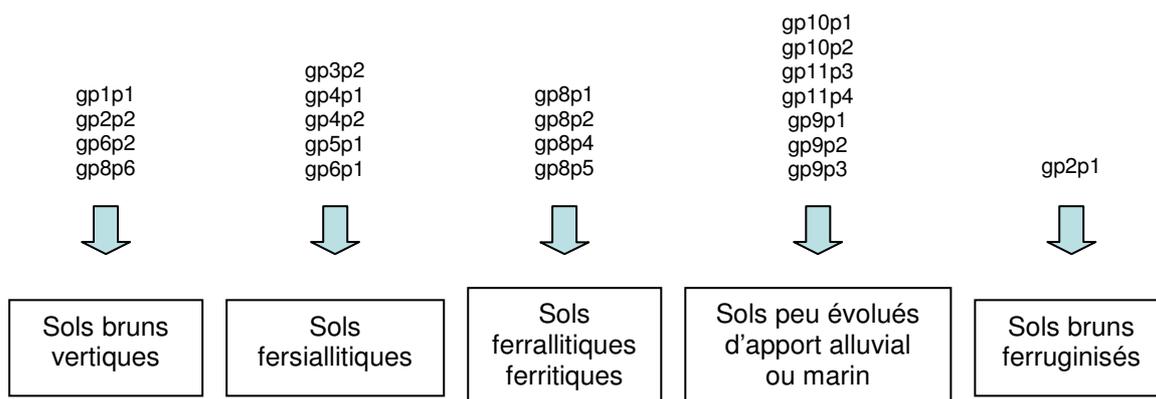


Figure 14 : Création de cinq classes de sols

A partir de ces regroupements, une nouvelle carte pédologique simplifiée fut élaborée sous ArcGIS (Figure 15, page suivante).

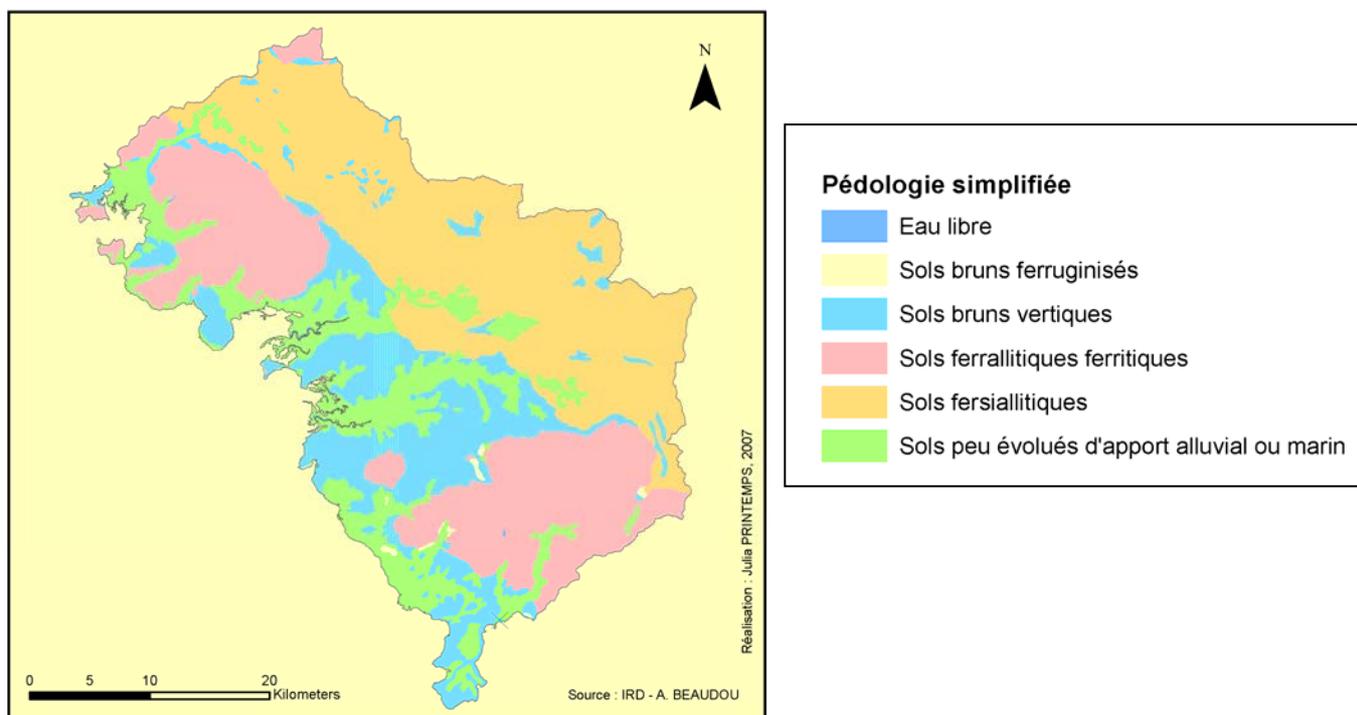


Figure 15 : Carte pédologique simplifiée de la zone d'étude

Cette carte pédologique simplifiée reflète les grands ensembles physiques de la zone d'étude. En effet, on distingue la Chaîne Centrale sur le côté Nord-Est, constituée de sols fersiallitiques, les deux massifs miniers du Koniambo et du Kopéto, formés de sols ferrallitiques ferritiques, et la grande plaine de Koné/Pouembout, aux sols bruns vertiques, parcourue par les cours d'eau du même nom, caractérisés par des sols peu évolués d'apport alluvial.

➤ Détermination du facteur K

A partir de résultats d'analyses de sol donnés par la carte pédologique de Pouembout au 1/50 000^e, il fut possible de déterminer les pourcentages d'argile, de limon, de sable et de matière organique de chaque grand type de sol (Tableau 9).

Tableau 9 : Composition des types de sol à partir de la carte pédologique de Pouembout au 1/50 000^e

	Sols ferrallitiques ferritiques	Sols bruns vertiques	Sols fersiallitiques	Sols peu évolués d'apport alluvial ou marin	Sols bruns ferruginisés
Situation	Massifs miniers	Plaine	Chaîne Centrale	Réseau hydrographique	Ponctuellement sur la zone
% argile	8.4	56.6	20.1	26.3	31.3
% limon fin	10.8	15.0	18.1	36.1	25.0
% limon grossier	5.1	9.4	14.3	15.5	9.5
% limon	15.9	24.4	32.4	51.6	34.5
% sable fin	10.9	8.3	16.2	4.9	6.6
% sable grossier	60.1	10.5	25.0	2.8	9.3
% sable	71.0	18.8	41.2	7.7	15.9
% MO	5.5	3.5	5.9	6.0	16.3

A partir de ces informations, il est possible de déterminer la texture de chaque grand type de sol en utilisant le triangle des textures USDA (Brown, 2003) (Figure 16). Pour cela, il suffit de reporter les pourcentages d'argile, de sable et de limon dans le triangle.

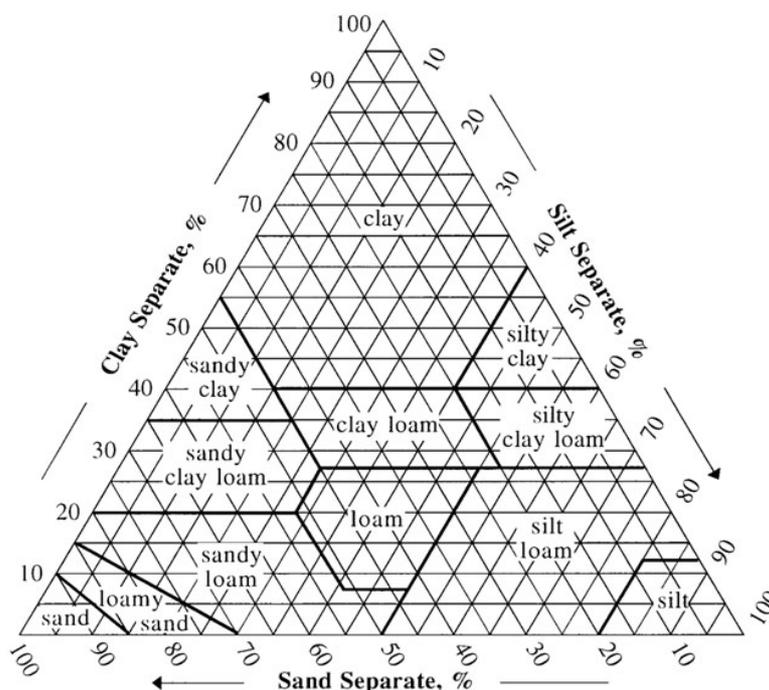


Figure 16 : Le triangle des textures de sols USDA (United States Department of Agriculture)

Cette opération effectuée, il est alors possible d'obtenir le facteur K pour un sol en utilisant le tableau établissant la correspondance entre les textures standards et le facteur K (Stone and Hillborn, 2002) (Tableau 10, page suivante).

Tableau 10 : Le facteur d'érodibilité des sols (d'après Stone et Hillborn, 2002)

Texture de sol	Facteur K (ton.acre.hr/hundreds of acre.ft.tons.in)	Facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm)
Clay	0.22	0.0289
Clay loam	0.30	0.0395
Loamy fine sand	0.11	0.0145
Fine sandy loam	0.18	0.0237
Fine sand	0.08	0.0105
Coarse sandy loam	0.07	0.0092
Loam	0.30	0.0395
Loamy sand	0.04	0.0053
Sandy loam	0.13	0.0171
Organic	0.30	0.0395
Sand	0.02	0.0026
Silty clay loam	0.32	0.0421

La conversion unités US/unités SI se fait en multipliant par 0.01317 (Annexe 4).

Le tableau 11 synthétise les valeurs du facteur K pour chaque type de sol. La valeur zéro a été attribuée aux zones d'eau libre (lacs, étangs, estuaires...).

Tableau 11 : Détermination du facteur K pour chaque type de sol de la zone d'étude

	Sols ferrallitiques ferritiques	Sols bruns vertiques	Sols fersiallitiques	Sols peu évolués d'apport alluvial ou marin	Sols bruns ferruginisés
Classification usda	Loamy sand	Clay	Loam	Silty clay loam	Clay loam
Facteur K	0.0053	0.0289	0.0395	0.0421	0.0395

➤ Elaboration de la carte du facteur K

Dans le fichier « vecteur » contenant les polygones correspondant aux différents types de sol, l'ajout d'un nouveau champ contenant le facteur K permet de spatialiser ce facteur.

La conversion en image « raster » a été réalisée en utilisant l'outil de conversion « feature to raster » de l'ArcToolBox sur ArcGIS. La taille des pixels de ce raster est de 10m par 10m.

La carte de répartition du facteur K obtenue est présentée par la figure 17 (page suivante).

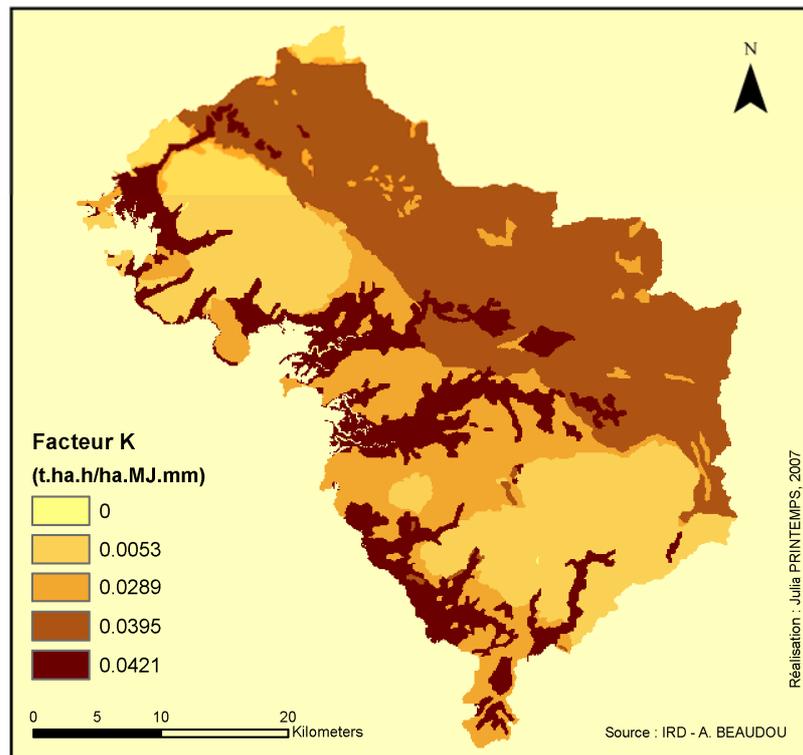


Figure 17 : Carte de répartition du facteur K - Erodibilité des sols

La carte montre une répartition hétérogène du facteur K. En effet, on remarque que le facteur K est faible sur les massifs miniers. Ceux-ci, composés de roches saines, ont une sensibilité à l'érosion faible. *A contrario*, la Chaîne Centrale présente une sensibilité à l'érosion assez forte avec une valeur de K élevée. Ceci s'explique par le fort pourcentage de sable dans les sols fersiallitiques qui la composent, les rendant fragiles. La plaine littorale présente dans son ensemble une sensibilité moyenne à forte à l'érosion notamment dans le réseau hydrographique en présence de formations alluvionnaires étendues possédant une valeur de K forte.

La valeur de l'érodibilité des sols K varie de 0.0053 à 0.0421 t.ha.h/ha.MJ.mm. Ces valeurs correspondent aux valeurs obtenues sur le bassin versant de la rivière Bouyaha à Haïti par Durosier en 1990 puisque celles-ci étaient comprises entre 0.004 et 0.15. Dans son étude sur la ravine Balan à Haïti, Délusca (1998) optient des valeurs de K allant de 0.026 à 0.052 pour des sols fersiallitiques.

III.2.3.3 Facteur topographique (LS)

Le relief est la source de données la plus riche concernant les processus d'érosion. Pour prendre en compte ce paramètre, l'utilisation d'un MNT est indispensable pour pouvoir intégrer les formes des bassins versants (Guermont, 2005).

➤ La topographie de la zone d'étude

La résolution spatiale du modèle numérique de terrain mis à notre disposition par la DITTT est de 10 mètres (Figure 18). A partir du MNT, il est possible d'obtenir la carte des pentes, dérivée première de l'altitude. La pente est certainement le paramètre le plus important concernant les processus d'érosion, à cause de son action gravitaire et de son impact sur les matériaux détritiques (Dumas, 2004).

La carte des pentes a été obtenue sur *ArcGIS* par l'extension *3D Analyst*® (Figure 18).

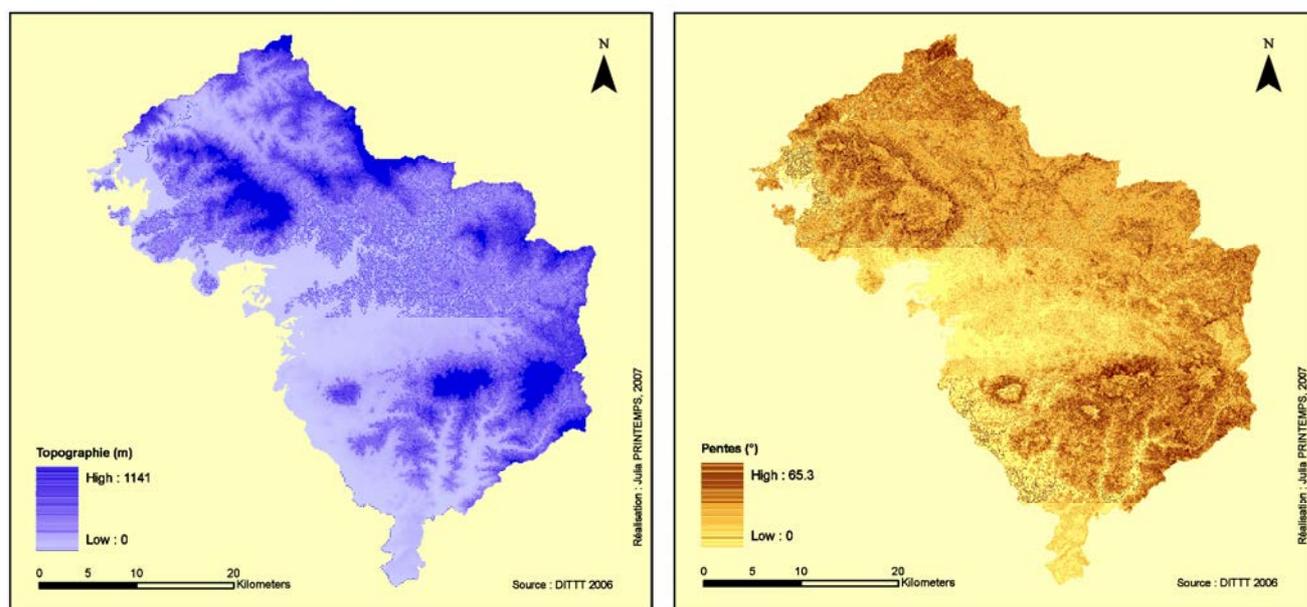


Figure 18 : Modèle Numérique de Terrain et carte des pentes de la zone d'étude

Comme nous l'avons vu précédemment, la topographie de la zone d'étude se caractérise par :

- une grande plaine où s'écoulent de nombreuses rivières telles que la Pouembout et la Koné,
- deux massifs miniers principaux : le Koniambo au Nord Ouest et le Kopéto au Sud (point culminant de la zone à 1 141 mètres) présentant de fortes pentes (supérieures à 50°),
- la Chaîne Centrale, qui borde la zone au Nord-Est.

L'altitude moyenne de la zone est de 208 mètres et la pente moyenne est de 17°.

➤ Calcul du facteur LS

Il existe plusieurs façons de calculer le facteur LS, notamment en utilisant des approximations sur SIG à partir de la carte d'accumulation des flux. Après divers essais, c'est finalement un algorithme existant qui a été retenu comme donnant les meilleurs résultats.

C'est donc l'algorithme de Hickey et al (1994) révisé par Van Remortel (2003) qui fut utilisé. Il s'agit d'un script AML (Arc Macro Language) qui est exécutable sur ArcInfo.

Ce programme nécessite le MNT et un masque de la zone d'étude en entrée. Il faut également lui spécifier les unités du calcul (mètres) et les pourcentages minima de diminution de pentes pour identifier les cellules où il y a dépôt plutôt qu'érosion. Les fichiers de sortie sont au nombre de trois : le facteur LS, la pente et la longueur de pente et sont à diviser par 100.

Le script commence par corriger le MNT en comblant les points bas. En effet, le MNT comporte des points bas dans lesquels l'eau ne peut pas virtuellement se déplacer. Ces zones sont souvent dues à des imprécisions du MNT utilisé. Le traitement de ces zones est alors nécessaire pour permettre les écoulements vers l'aval.

La seconde étape est la création d'un raster de direction des écoulements à partir de chaque pixel vers son voisin de plus faible altitude. Ceci permet ensuite de calculer la longueur de pente ; tout d'abord pour un pixel et ensuite, en cumulé pour chaque pixel.

La troisième étape consiste à calculer les pentes en degrés pour chaque cellule.

En fonction de la pente, l'algorithme calcule la valeur de l'exposant m (voir équation 6 page 20).

Puis, il procède au calcul de S et de L (voir équations 7, 8 et 9 p20-21).

Enfin, il détermine le facteur LS.

L'organigramme de la figure 20 (page suivante) récapitule les étapes du calcul effectué par le script AML.

La figure 19 présente la carte de répartition du facteur LS sur la zone d'étude.

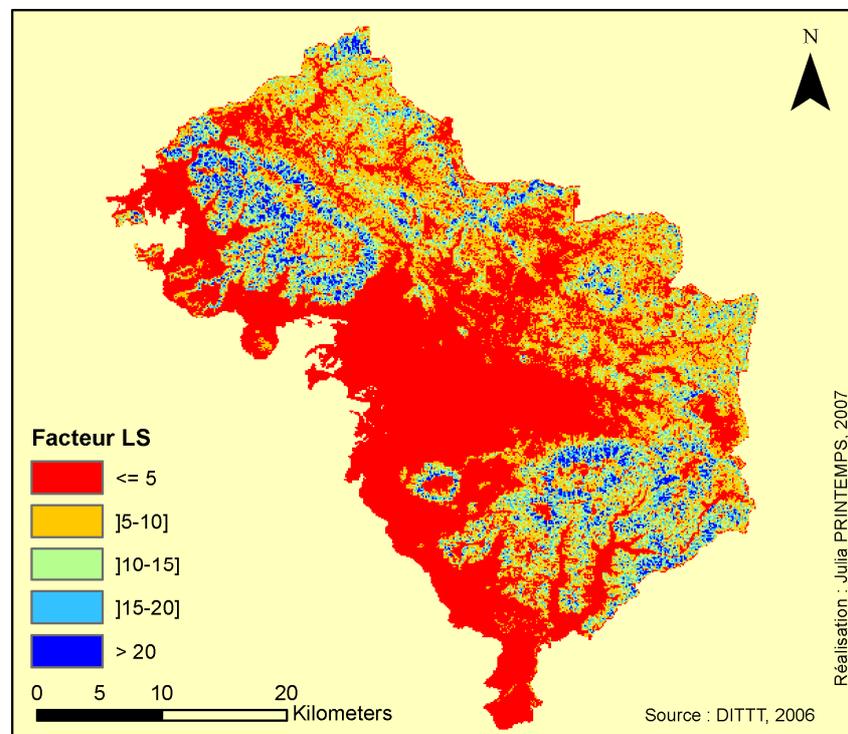


Figure 19 : Carte de répartition du facteur LS - Inclinaison et longueur de pente

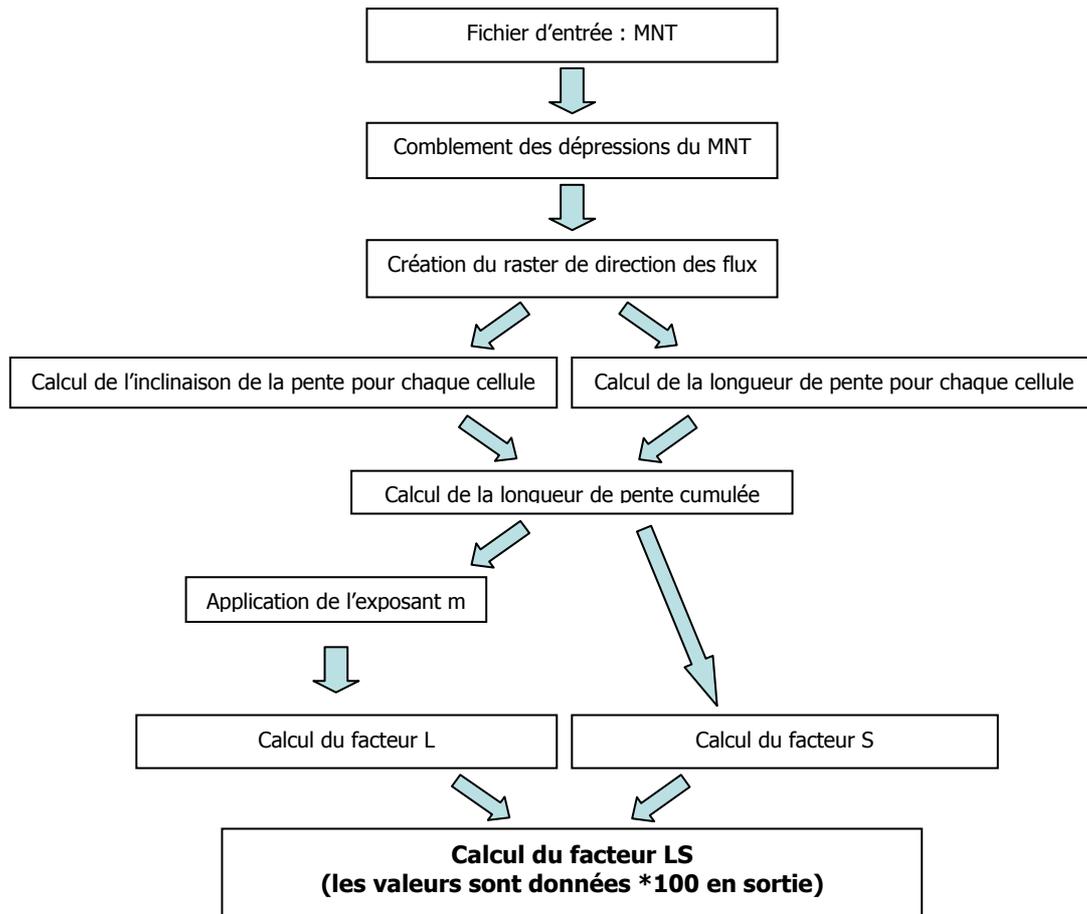


Figure 20 : L'organigramme des étapes du calcul de LS dans le script AML de Van Remortel (2003)

Les valeurs obtenues pour le facteur LS vont de 0 à 104 et la moyenne sur la zone est de 6.4. Ces valeurs ont été regroupées en cinq classes (Figure 21, page suivante).

La plupart des valeurs (58%) sont comprises entre 0 et 5 et correspondent aux zones de plaine. On observe une différence marquée entre la plaine littorale aux pentes nulles et possédant des valeurs de LS faibles (donc peu sensible au phénomène érosif) et les pentes des massifs (Koniambo ou Kopéto par exemple) possédant des valeurs de LS élevées correspondant à un relief escarpé très sensible à l'érosion.

Malgré cela, les terrains très pentus, possédant un facteur LS élevé, restent minoritaires sur la zone d'étude puisque seulement 7% des valeurs de LS sont supérieures à 20.

Ces résultats correspondent aux résultats d'études scientifiques similaires. En effet, les valeurs du facteur LS varient de :

- 0 à 88 au Maroc pour des pentes de 0 à 60% (altitude variant de 625m à 1 622m) (Sadiki et al., 2004),
- 0 à 102 à Haïti pour des pentes de 0 à 60% (altitude variant de 0 à 500 m) (Délusca, 1998).

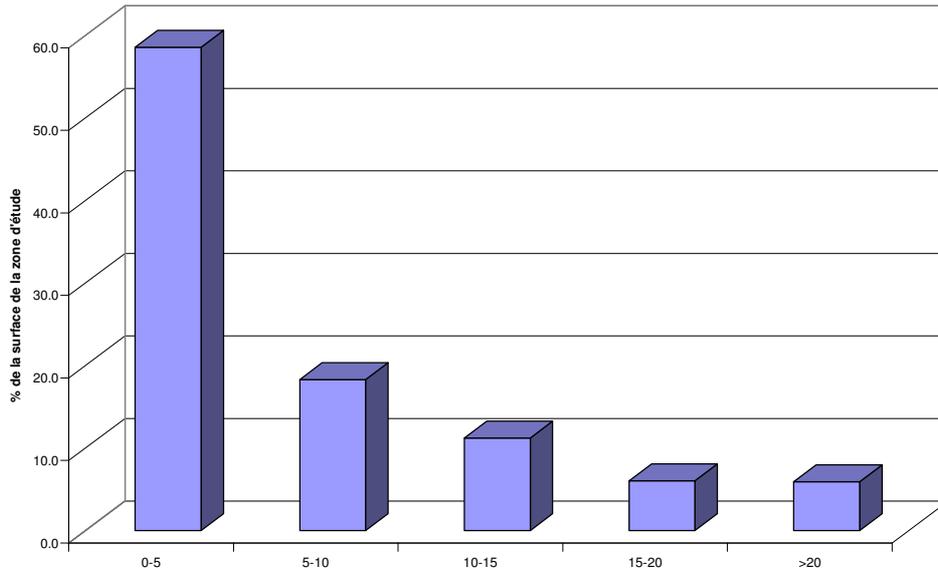


Figure 21 : Distribution des classes du facteur LS sur la zone d'étude

III.2.3.4 Facteur couverture végétale et pratiques culturales (C)

➤ L'occupation du sol de la zone d'étude

Il est possible d'élaborer une carte d'occupation du sol à partir d'images satellites grâce aux outils de télédétection, notamment les classifications supervisées. Faute de temps, cette classification n'a pas pu être réalisée sur la zone d'étude.

C'est donc une classification réalisée par la DTSI qui fut utilisée. Cette classification date de 2003 et est basée sur des images SPOT3 de 1996. La carte obtenue (Figure 22) a une résolution de 20m.

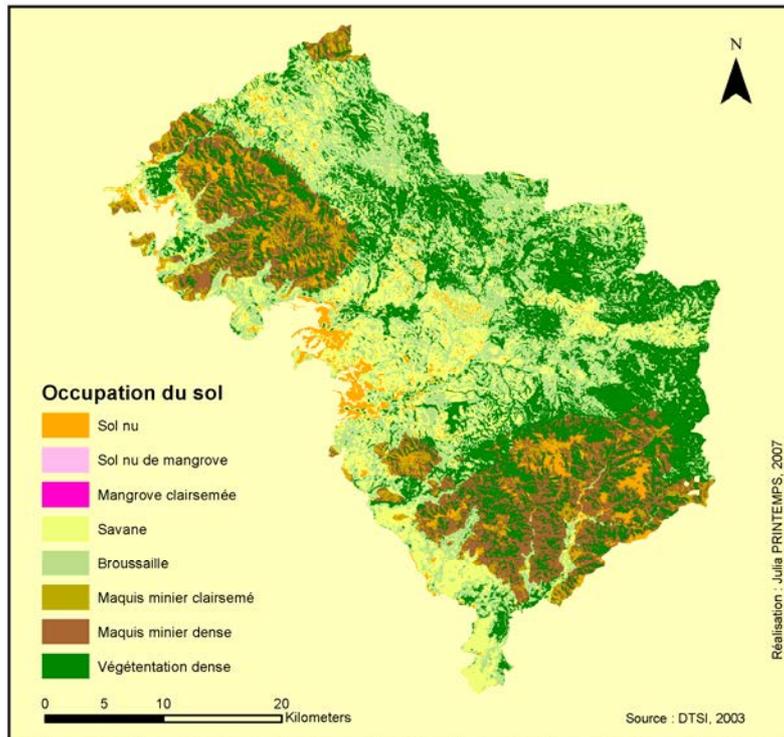


Figure 22 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude

On peut distinguer cinq grands types de formations végétales sur la zone d'étude :

- la savane, principalement en plaine et sur les faibles pentes, caractérisée par des formations de niaoulis,
- les broussailles (Figure 23a) sur les pentes moyennes des massifs miniers et de la chaîne centrale,
- le maquis minier (Figure 23b, c) sur les massifs du Koniambo et du Kopéto,
- la forêt ou végétation dense sur les hauteurs et la chaîne centrale,
- les sols nus (Figure 23d), dus à l'activité minière, aux feux de brousse ou à l'urbanisation.

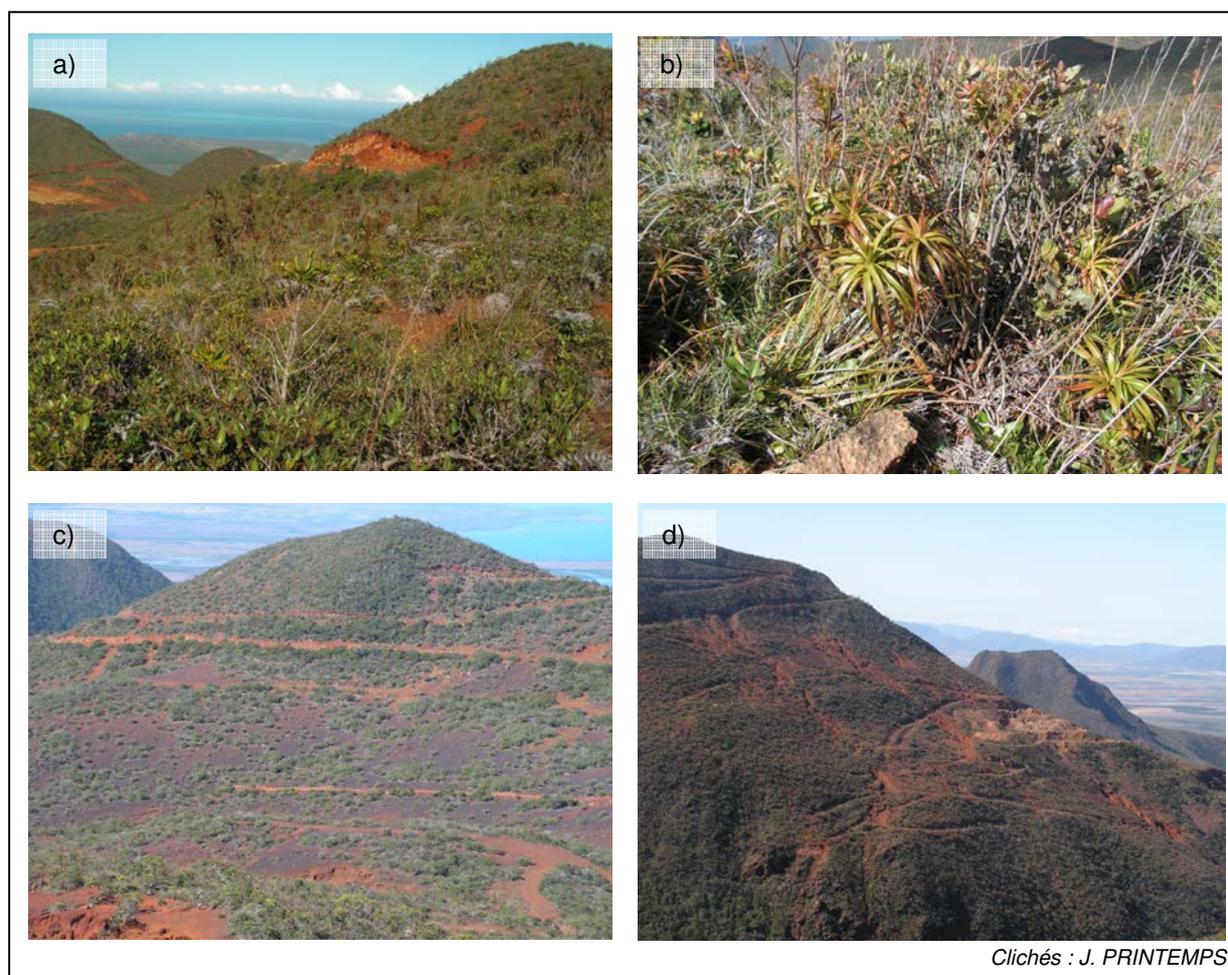


Figure 23 : Maquis minier et traces de l'exploitation minière sur le massif du Koniambo (2007)

➤ **Affectation d'un coefficient C pour chaque type de couverture végétale**

La détermination du facteur C dépend de la couverture de la surface du sol par la végétation et de la hauteur des strates végétales. A partir de données bibliographiques, il fut possible d'affecter un coefficient C compris entre 0 et 1 à chaque type de couverture végétale sur la zone d'étude (Tableau 12, page suivante).

Tableau 12 : Facteur C sur la zone d'étude

Type de couvert végétal	Facteur C
Végétation dense	0.001
Savane	0.04
Maquis minier	0.25
Mangrove	0.28
Broussaille	0.72
Sol nu	1

Les zones nues, représentant la plus grande sensibilité à l'érosion, ont le facteur C le plus fort tandis qu'une couverture végétale dense de type forêt, limitant fortement le processus érosif, va avoir un facteur C faible. La carte de répartition du facteur C fut obtenue selon la même méthodologie que celle du facteur K, c'est-à-dire, par la transformation de données « vecteur » en couche « raster » avec une résolution de 10m pour les pixels de sortie (Figure 24).

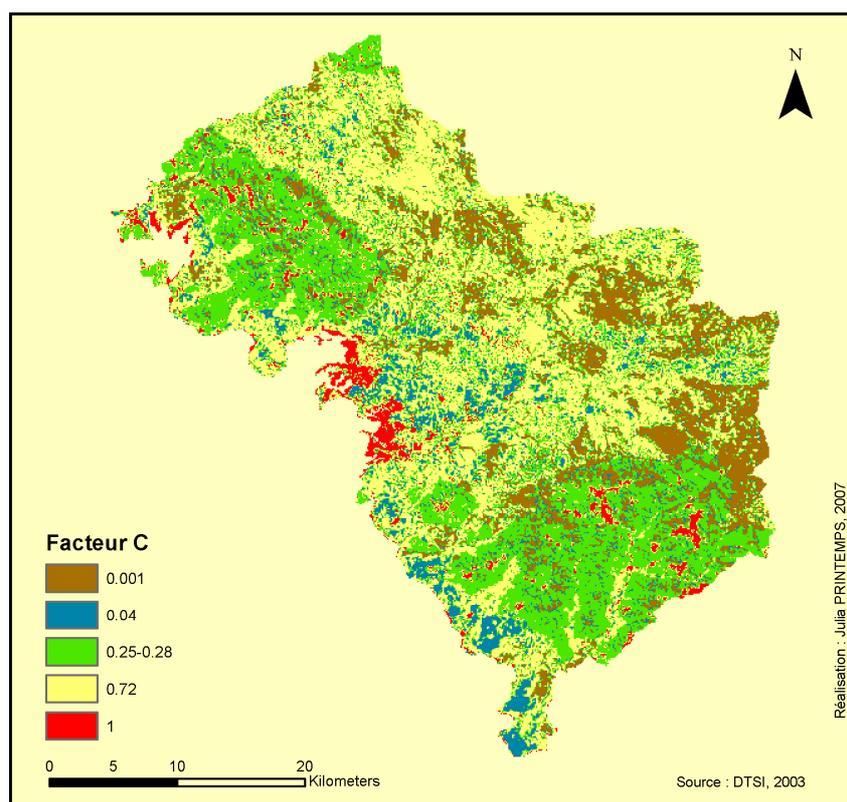


Figure 24 : Carte de répartition du facteur C - Couverture végétale

On remarque que sur l'ensemble de la zone, la répartition du facteur C est assez hétérogène. Les zones nues, les plus érodables, sont principalement situées sur le littoral et sur les massifs dégradés par l'activité minière. Les zones de végétation dense de type forêt sont situées principalement sur les hauteurs de la Chaîne Centrale et des massifs miniers et sont les moins sensibles à l'érosion.

III.2.3.5 Facteur des pratiques de conservation du sol (P)

Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs de P sont comprises entre 0 et 1, cette dernière étant attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée (voir II.3.3.5 p22).

Sur la zone d'étude, les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales anti-érosives. En effet, l'activité principale est l'élevage et quand il s'agit de cultures, elles ne sont pas parallèles aux courbes de niveaux.

Faute de renseignement sur les pratiques de conservation du sol, il fut choisi d'adopter $P=1$ sur l'ensemble de la zone d'étude. Par ce fait, on considère comme nulles les pratiques anti-érosives et ce facteur n'aura pas d'impact sur le produit final.

Les résultats du calcul des pertes en sols seront donc légèrement surévalués par rapport à la réalité.

III.2.4 Intégration des couches dans le SIG

Nous avons analysé chacun des quatre principaux facteurs à l'origine du phénomène érosif sur notre zone d'étude. Il s'agit maintenant d'intégrer les résultats de ces analyses dans le modèle général et de quantifier les pertes en sol.

Le croisement des données prises en compte dans le processus érosif repose sur une combinaison dans un modèle maillé (la taille des pixels est de 10m x 10m). C'est-à-dire que chaque couche d'information est représentée par une image (« raster »), dont la valeur de chaque maille est égale à un niveau de sensibilité à l'érosion pour le paramètre considéré. Ce niveau de sensibilité est représenté par une valeur définie précédemment et différente pour chaque paramètre. L'ensemble de ces images constitue un espace multivarié.

Le croisement des données s'effectue par la multiplication des valeurs des quatre facteurs R, K, LS et C dans la "calculatrice raster" du module *Spatial Analyst* d'ArcGIS.

Le résultat de cette multiplication est une couche « raster » donnant la quantité de terre potentiellement érodable en t/ha.an sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 25, page suivante). Pour des besoins de lisibilité de la carte, les valeurs obtenues ont été regroupées en classes.

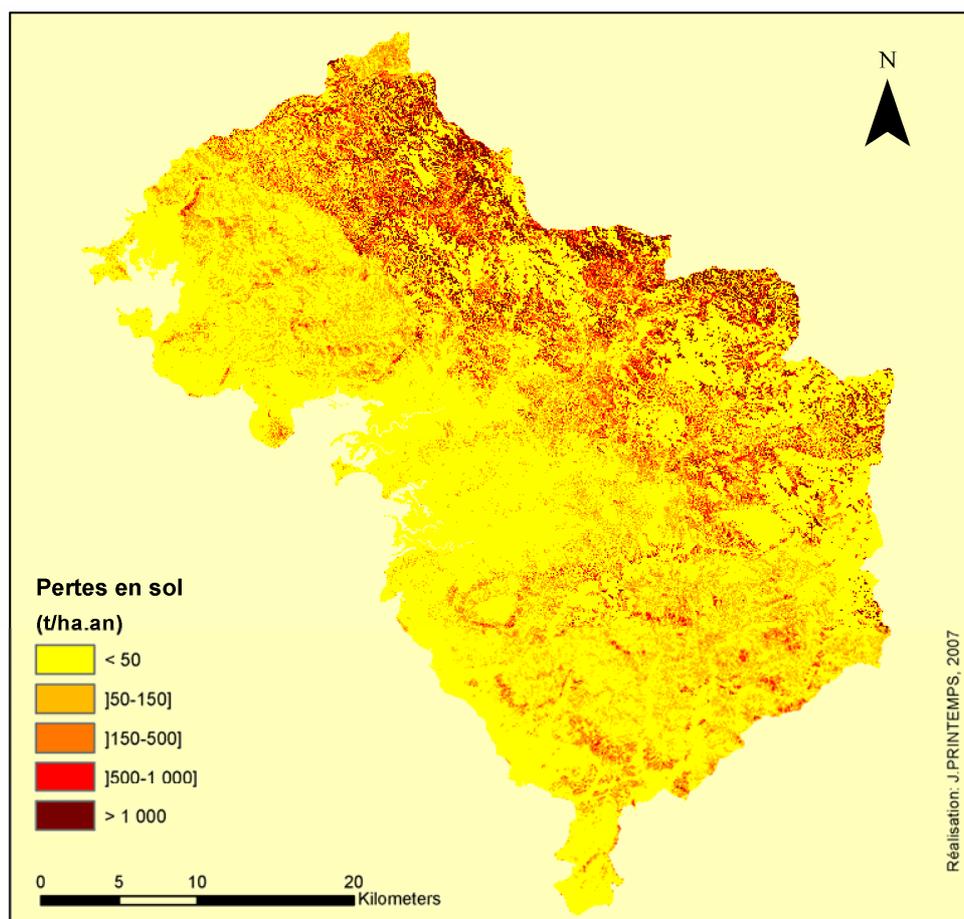


Figure 25 : Carte du potentiel érosif de la zone d'étude

On observe une forte opposition entre la plaine littorale qui subit des pertes en sols faibles (inférieures à 50 t/ha.an) et la Chaîne Centrale soumise à une forte érosion puisque ayant des valeurs supérieures à 1 000 t/ha.an.

Les massifs miniers semblent également être caractérisés par une érosion assez forte puisque les valeurs des pertes en sol sont comprises entre 50 et 1 000 t/ha.an sur ces zones.

La notion de spatialisation de l'aléa érosion prend donc tout son sens puisque l'on observe bien des zones possédant une sensibilité faible et des zones possédant une sensibilité forte au processus érosif.

La mise en œuvre de l'USLE sur les communes de Voh, Koné et Pouembout en Nouvelle-Calédonie a permis l'élaboration d'une carte du potentiel érosif à partir du croisement des facteurs principaux de l'érosion. Il s'agit maintenant d'interpréter les résultats issus de cette carte, de déterminer dans quelle mesure elle répond à nos attentes en matière de GIZC, ceci d'un point de vue critique afin de dégager les limites du modèle.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DU MODÈLE

L'application de la formule de Wischmeier et Smith en tenant compte des valeurs numériques des cinq facteurs donne la perte en sol pour chaque pixel. Les valeurs de l'érosion potentielle sur la zone d'étude sont comprises entre 0 et 11 746 t/ha.an et permettent de mettre en lumière les zones les plus sujettes à l'érosion. La figure 26 présente la répartition des classes de pertes en sol en pourcentage de la surface de la zone d'étude.

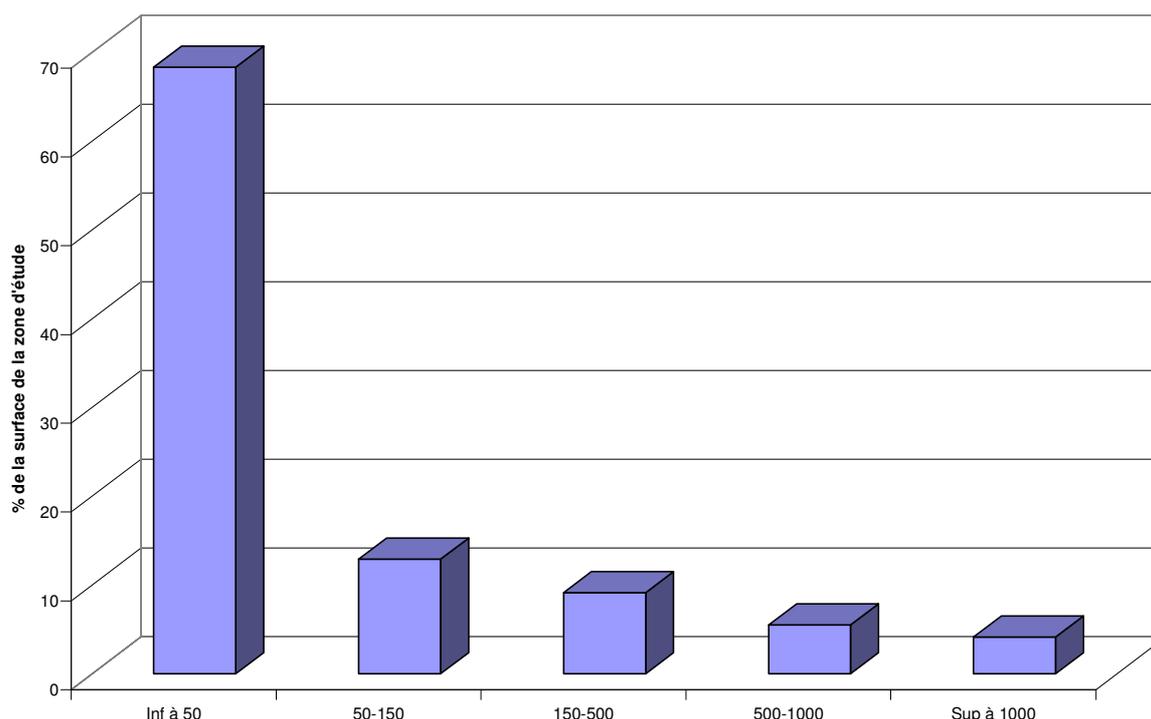


Figure 26 : Distribution des classes de pertes en sol sur la zone d'étude

La moyenne des pertes en sol sur la zone est de 137.8 t/ha.an. 68% des pixels de la zone d'étude (correspondant à une surface de 920 km² sur les 1 347 km² de la zone) ont un taux d'érosion potentielle inférieur à 50 t/ha.an et se situent principalement sur la plaine et en montagne dans les zones couvertes par de la végétation dense.

Seulement 4% des pixels de la zone (53 km²) peuvent être considérés comme étant des endroits de très forte érosion (plus de 1 000 t/ha.an). Ceux-ci sont situés majoritairement dans la chaîne centrale et correspondent à l'association :

- fortes pentes, puisqu'en zone de montagne,
- fortes précipitations, entre 1 500 et 2 000 mm/an,
- et sols typiques du climat tropical, sols fersiallitiques fragiles.

Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux issus d'études scientifiques précédentes donnant :

- 200 à 500 t/ha.an au Burundi (Rishirumuhirwa, 1997),
- 6 à 300 t/ha.an dans le Lauragais (Morschel et Fox, 2004),
- 200 à 400 t/ha.an à Tahiti (Servant, 1974),
- 0 à 40 t/ha.an en Italie (van Der Knijff et al., 2000),
- 55.35 t/ha.an au Maroc (Sadiki et al., 2004),
- 0 à 100 t/ha.an à La Réunion (Association des Professeurs d'Histoire/Géographie, 2007).

L'intégration du modèle dans un SIG présente beaucoup d'avantages, surtout ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'érosion. Cette intégration permet :

- de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données qualitatives et quantitatives relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols ; ceci permet de conclure que les facteurs décisifs de l'érosion sur la zone sont la pente et l'agressivité climatique et à un moindre degré l'érodibilité des sols et la couverture végétale, et que c'est sur ces facteurs que les interventions doivent être focalisées pour lutter contre l'érosion hydrique en nappes ;
- d'éliminer la complexité et l'interdépendance des facteurs déterminant de l'érosion en croisant les couches informatiques relatives aux cartes thématiques de chaque facteur calculé indépendamment des autres ;
- d'introduire la notion d'évolutivité à travers l'enrichissement et l'actualisation permanente des données ; le SIG offre la possibilité de mise à jour continue des données ;
- d'établir une carte synthétique de répartition de la sensibilité potentielle des sols à l'érosion sur l'ensemble de la zone d'étude et d'avoir la combinaison des facteurs intervenant dans le processus érosif pour chaque pixel de 10m x 10m.

Par ailleurs, la poursuite du travail par une phase de terrain permettrait de valider les résultats. Des données terrain seraient nécessaires pour mieux appréhender les différents facteurs.

Les valeurs du facteur K, s'appuyant sur des compositions de sol seraient plus précises à partir d'analyses de relevés de terrain.

De même, concernant la couverture végétale, il serait intéressant de valider la carte d'occupation du sol par des points de vérités terrain.

En outre, des données de précipitations réparties de manière homogène sur la zone nous éviteraient des interpolations grossières.

Par ailleurs, les données concernant les volumes (ou tonnages) de sédiments piégés dans les barrages et décanteurs installés sur le massif du Koniambo permettraient de calibrer le modèle.

Cependant, au-delà des données numériques, la caractérisation des zones présentant un risque d'érosion démontre l'utilité du modèle comme outil de gestion et de conservation des sols. En effet, la comparaison relative parmi des secteurs de la zone d'étude est plus importante que la perte absolue de sol dans n'importe quelle cellule.

IV.2 INTÉRÊT DU RÉSULTAT DANS LE CADRE DE LA GIZC

Comme vu précédemment, toute action de l'homme qui conduit à la destruction de la couverture végétale accentue les manifestations d'instabilités inhérentes au système naturel (Dumas, 2004). L'exploitation minière, première activité exportatrice du territoire, accentue donc les processus érosifs naturels qui s'accompagnent d'importants processus de sédimentation terrigène. Ceux-ci représentent, en période de crues cycloniques, la plus importante source de dégradation des écosystèmes lagunaires et des récifs frangeants en Nouvelle-Calédonie. Malgré plus d'un siècle d'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie, les rejets, la dispersion et le dépôt de métaux dans le lagon demeurent mal connus, qu'ils proviennent d'effluents industriels ou, via les rivières notamment, de l'érosion des massifs exploités.

La spatialisation et la quantification de l'érosion hydrique potentielle sur les communes de Voh, Koné et Pouembout constituent donc des outils dans le cadre de la Gestion Intégrée des Zones Côtières. D'une part, la spatialisation permet de cibler les zones d'aménagement prioritaires, d'autre part, la quantification de l'érosion potentielle constitue une phase préalable à la quantification de l'apport terrigène dans le lagon. À partir de la carte de l'érosion potentielle, il est possible de sommer les résultats par pixel sur l'ensemble d'un bassin versant ou d'une région pour avoir un ordre de grandeur des quantités de terres pouvant atteindre le lagon.

Par la suite, des modélisations prenant en compte les processus de transfert et le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant vont permettre de coupler l'érosion avec le transport des particules jusqu'au lagon afin de quantifier les éventuelles pollutions terrigènes ainsi que de prévoir les quantités de terres qui transitent dans le système hydrologique lors d'événements pluvieux importants (notamment les cyclones). Des mesures effectuées par l'IRD permettent déjà de fixer quelques chiffres à l'échelle d'un bassin versant exploité : l'étude du bassin de la Ouenghi (245 km²) montre qu'en 28 ans, la somme des apports solides résultant de l'érosion naturelle et de l'exploitation minière a été évaluée à 1.000.000 m³ ce qui a conduit à une progression du delta dans le lagon de 300 à 400 m sur un front de 3 km, enfouissant les récifs coralliens sous les sédiments, sur 100 ha.

Ceci confirme l'importance de la mise en œuvre de ce modèle à des fins de gestion de la zone littorale.

Enfin, la simplicité du croisement des couches d'information dans un SIG rend possible l'élaboration de scénarii d'aménagement en fonction de différentes stratégies d'occupation du sol. En effet, il est possible de faire varier le coefficient C sur la zone d'étude en simulant des zones de défrichements, d'urbanisation, de décapage par le feu... Les différents scénarii permettent de prédire quelle sera la perte en terre en fonction des changements d'occupation du sol et de mieux mesurer l'impact de nouvelles situations. Ceci permet d'orienter les décisions des aménageurs lors de l'élaboration de documents d'urbanisme tels que les Plan Urbain de Développement, les Schémas Directeurs d'Aménagement Urbain ou les plans de phasage des travaux miniers.

De même, cet outil permet de tester les conséquences de la mise en place d'aménagements de lutte contre l'érosion en prenant en compte le facteur P de conservation du sol. Par exemple, si l'on prévoit l'installation de terrasses sur les fortes pentes, on peut avoir un ordre de grandeur de la diminution de la perte en terres potentielles sur la zone concernée.

IV.3 LES LIMITES DU MODÈLE

L'utilisation d'un SIG a permis d'estimer le taux de perte en sol pour les bassins versants situés sur les communes de Voh, Koné et Pouembout. Les résultats montrent que les plus fortes pertes se situent dans la Chaîne Centrale et résultent de fortes pentes couplées à d'importantes précipitations et à des sols érodables. A l'échelle d'un pixel et au regard de la moyenne, les résultats semblent corrects. Cependant, à l'échelle d'un bassin versant les résultats obtenus paraissent trop élevés par rapport à la réalité mettant en lumière les limites du modèle.

Tout d'abord, les calculs effectués nécessitent un ajustement et une calibration avec des données de terrain. En effet, les résultats obtenus n'ont pas été vérifiés par des mesures *in situ*. Ceci constitue un manque pour la validation du modèle.

Par ailleurs, le modèle USLE présente un certain nombre de limites intrinsèques (Roose, 1994). En effet, il s'agit d'un modèle empirique développé sur les grandes plaines américaines pour prévoir les pertes en sols dues principalement au ruissellement et à l'activité agricole. Les données qui ont servi à Wischmeier et Smith pour établir ce modèle concernaient des petites parcelles (100 m²) ou des petits bassins versants (quelques hectares). Il faut donc faire attention aux problèmes d'échelles qui peuvent se poser si on veut considérer de plus grandes étendues. Son utilisation dans le contexte calédonien a nécessité des choix méthodologiques et interpolations critiquables, notamment dans la spatialisé du facteur d'érosivité des précipitations. De plus, ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie. Il ne prend donc pas en compte les autres types d'érosion (linéaire, solifluxion, de ravine...). Par exemple, l'érosion en ravines à partir de lavakas est courante dans les paysages calédoniens (Figure 27). De même, les interactions probables entre les différents paramètres ne sont pas prises en compte.



Cliché : J.PRINTEMPS

Figure 27 : Figure d'érosion en ravine sur le Koniambo (2007)

En outre, pour plus de précision, il faudrait utiliser les équations couplant érosion - transport - sédimentation ainsi que flux, débits... basées sur des modèles physiques en trois dimensions. En effet, la modélisation d'un bassin dans un domaine continental implique de déterminer deux lois de transport des sédiments (une loi de transport sur les versants et une loi de transport fluviale) et une loi d'érosion des sols. Le transport sur les versants s'exprime par la loi de diffusion qui dépend d'un coefficient de diffusion et de la pente. Le transport fluviale est un phénomène plus complexe à modéliser et implique dans un premier temps de déterminer le régime d'écoulement de la rivière. En prenant un maillage supérieur au kilomètre, on peut se placer dans un régime d'écoulement permanent et uniforme. Ainsi, à la place des équations de Saint-Venant, il est possible d'utiliser la formule de Manning-Strickler et d'avoir un modèle hydrodynamique plus complet (voir II.2).

Pour finir, la géomatique est une technique en pleine expansion à l'heure actuelle en Nouvelle-Calédonie et les données numériques sont, pour de nombreuses thématiques, encore en état d'avancement et donc indisponibles pour le moment. Les données géographiques nécessaires pour cette étude n'ont donc pas pu être récupérées dans leur intégralité et demandent à être complétées. Par exemple, la carte pédologique au 1/50 000^e n'est pas encore disponible numériquement.

CONCLUSION

La richesse de son patrimoine naturel terrestre et marin, ainsi que son caractère original et unique, font de la Nouvelle-Calédonie un des ensembles mondialement reconnus pour son exceptionnelle biodiversité. Bien que la densité de population demeure faible (environ 12 hab/km²), des menaces liées à l'activité économique (exploitation minière...) et à l'activité humaine (feux de brousse...) pèsent sur ces milieux fragiles. La zone littorale constituant l'interface terre/mer est à suivre particulièrement. En effet, la localisation et la compréhension des processus intervenant en amont du lagon sont des éléments essentiels à la conservation et à la gestion de ce milieu si riche. A ce titre, ces thématiques constituent les enjeux principaux du Programme National Environnement Côtier (PNEC) qui a pour objectif d'étudier l'impact des activités humaines sur les littoraux. Dans ce contexte s'intègre également le concept de Gestion Intégrée des Zones Côtières, ayant pour but de concilier protection des écosystèmes et développement économique. La GIZC insiste particulièrement sur l'importance des relations existant entre le lagon et les bassins versants situés en amont.

Il est donc important de s'intéresser au phénomène érosif, qu'il soit naturel ou lié aux activités humaines. En effet, la sensibilité des sols à l'érosion influence le volume des apports terrigènes susceptibles d'être transférés au lagon qui peuvent perturber la dynamique littorale ou provoquer l'étouffement des récifs coralliens.

L'objet de cette étude a donc été la mise en place d'une méthodologie permettant la spatialisation et la quantification de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie. Cette méthodologie s'est basée sur l'Equation Universelle de Pertes en Sol, empiriquement élaborée par Wischmeier et Smith en 1978 et donnant la quantité de terre (en t/ha.an) susceptible d'être décapée par l'érosion hydrique. Les facteurs de l'équation caractérisant le processus érosif sont l'agressivité des précipitations, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur de pente, la couverture végétale et les pratiques de conservation des sols. Le calcul et la cartographie de chaque facteur ont été mis en œuvre en intégrant une pondération permettant de hiérarchiser la contribution de chacun d'entre eux au phénomène d'érosion. Ces paramètres, intégrés dans un SIG, sous forme de couche d'information thématique, sont ensuite multipliés pixel par pixel à une résolution de 10 mètres. La cartographie obtenue par la spatialisation de l'USLE est une carte de l'érosion potentielle donnant les quantités de sols pouvant être détachées annuellement pour chaque pixel d'un secteur donné.

La mise en œuvre de l'USLE en Nouvelle-Calédonie a été élaborée sur les communes de Voh, Koné et Pouembout. En effet, cette zone reflète les enjeux économiques et environnementaux liés à l'extraction du nickel et à l'implantation d'une usine de traitement. Elle va constituer, dans les années futures, un important pôle de développement. Il est donc intéressant de connaître les apports terrigènes dès maintenant afin d'anticiper les éventuels problèmes liés à un décapage abusif de zones déjà naturellement sensibles à l'érosion.

Les résultats obtenus sur la zone d'étude donnent une perte en sol moyenne de 137 t/ha.an. Cette valeur correspond à une érosion élevée due principalement aux fortes pentes et au climat agressif avec des précipitations importantes et de violents épisodes pluvieux. Ceci est accentué par le

caractère fortement érodible de certains sols et une dégradation du couvert végétal ne jouant plus son rôle protecteur. Outre la quantification du phénomène, sa spatialisation nous a permis de mettre en évidence les zones les plus sujettes à l'érosion, notamment dans la Chaîne Centrale. De ce fait, il est désormais possible de localiser les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire afin d'orienter les plans de gestion et d'aménagement de l'espace.

Cependant, en l'absence de données-terrain, il n'est pas possible de quantifier la précision des estimations obtenues. Cette situation est relativement typique des travaux similaires dans le domaine de l'érosion des sols où les mesures de terrain sont longues et difficiles à obtenir et où la variabilité climatique fait que plusieurs années de suivie sont nécessaires pour obtenir une valeur représentative. Au-delà des difficultés de validation, la méthode présente d'autres limites. La première concerne la précision des données utilisées. Par exemple, la méthode d'interpolation des données climatiques, pourtant très précises, sur la zone d'étude est critiquable étant donné le nombre restreint et l'inégale répartition des stations d'enregistrements. Une deuxième limite est que seule l'érosion en nappe est prise en compte dans le modèle. Pourtant, en Nouvelle-Calédonie, l'érosion par ravine est courante. De plus, la carte obtenue présente uniquement les secteurs à risque de détachement des sédiments en considérant que toutes les surfaces sont soumises à l'érosion si aucun des facteurs n'est nul. Il ne met pas en évidence les zones de dépôts aussi bien de versants que fluviales. Pourtant une partie des sédiments détachés reste à l'intérieur des parcelles ou est transportée sur d'autres parcelles et n'atteint pas les cours d'eau. L'intégration d'un modèle d'écoulement semblerait être un complément nécessaire à la quantification des pertes en terre sur un bassin versant.

Bien que la validité des pertes en sols de l'USLE soit sujette à discussion, la méthode apporte une aide importante aux décideurs et aménageurs pour simuler des scénarii d'évolution de la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion. Ainsi peut-elle par exemple permettre de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

Enfin, au travers de cette étude, nous avons développée une méthodologie de caractérisation de l'érosion hydrique s'appuyant sur une spatialisation et une quantification des principaux facteurs entrant en jeu dans le processus érosif. Cette méthode, innovante en Nouvelle-Calédonie, présente l'avantage d'être reproductible à d'autres espaces. Par ailleurs, étant basée sur l'exploitation de données à référence spatiale, elle permet d'élaborer des documents graphiques pouvant constituer des outils d'aide à la décision pour la gestion du littoral néo-calédonien.

BIBLIOGRAPHIE

- BOBE B.W. (2004) - Evaluation of soil erosion in the Harerge region of Ethiopia using soil loss models, rainfall simulation and field trials, PhD, University of Pretoria, 175p.
- BONN F. (1998) - La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. Cahier Sécheresse, vol. 9, n°3, p 185-192.
- BROWN L.C., FOSTER G.R. (1987) - Storm erosivity using idealized intensity distributions. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 30, pp. 379-386.
- BROWN R.B. (2003) - Soil Texture. Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL-29, 8p.
- CHAUSSADE J. (1999) - De la gestion intégrée au développement durable. Bulletin de l'association des géographes français, n°2, pp 151-157.
- CROS-CAYOT F. (1996) - Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du bassin versant. Contexte Armoricaïn. Thèse de doctorat 'Sciences de l'Environnement', Rennes, 223p.
- DAUTREBANDE S., SOHIER C. (2006) - L'érosion hydrique et les pertes en sol agricoles en région Wallonne. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon, FUSAGx, 122p.
- DELUSCA K. (1998) - Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Equation Universelle de Perte de Sol, assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti. Thèse de maîtrise, Moncton, 110p.
- DENIS B., MERCKY P. (1982) - Carte pédologique de la region de Pouembout au 1:50 000. ORSTOM, Nouméa.
- DESMET P. J., GOVERS G. (1996) - A GIS-procedure for the automated calculation of the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, pp. 427-433.
- DORCEY A.H.J. (1992) - Sustainable development principles for water resources management in Canada: Towards a new consensus in *Resolving conflicts and uncertainty in water management*, Canadian Water Resources Association, 1.1-1.9.
- DUMAS P. (2004) - Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Orléans, 402p.
- DUROSIER J.S. (1990) - Assessment of land degradation and its consequences. A case study of the Bouyaha River watershed, Haïti. Master's thesis. Rural and Land Ecology survey, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, The Netherlands.
- FITZHUGH T.W., MACKAY D.S. (2000) - Impact of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology*, Col. 236, pp. 35-53.
- GOUMERLON F., ROBIN M. (2005) - SIG et littoral. Série Aménagement et Gestion du Territoire, Hermès Sciences Publications, 323p.
- GUERMOND Y. (2005) - Modélisations en géographie, déterminisme et complexités. Hermès Sciences Publications, 389p.

- HICKEY R., SMITH A., JANKOWSKI P. (1994) - Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID: Computers, Environment and Urban Systems, v. 18, no. 5, pp.365-380.
- HUA L., PROSSER I.P., MORAN C.J., GALLANT J.C., PRIESTLEY G., STEVENSON J.G. (2003) - Predicting sheetwash and rill erosion over the Australian continent, Australian Journal of Soil Research, 41, 1037-1062.
- HUDSON N.W. (1981) - Soil conservation. Batsford, UK, 2d edition, 320 p.
- JAFFRE T., PELLETIER B. (1992) - Plantes de Nouvelle-Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers. ORSTOM (IRD) et SLN.
- KING D., LE BISSONNAIS Y. (1992) - Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. Comptes-Rendus de l'Académie Agricole de France, 78, 6, pp. 91-105.
- LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J. (2002) - L'érosion hydrique des sols en France, IFEN, INRA, 106p.
- LOBRY J.R., adapté de Deepayan Sarkar (2006) - Programmation statistique avec R, une brève histoire de S et de R. Université Claude Bernard Lyon I.
- LUNEAU G. (2006) - La spatialisation de l'aléa Erosion des sols en Nouvelle-Calédonie, méthodologie définie sur les communes de Dumbea, Païta et Boulouparis. Mémoire de master2, IRD/Université de Toulouse, 76p.
- MAUZIROT P., DELFAU M. (1995) - Cartographie de la sensibilité à l'érosion, Province Sud de la Nouvelle-Calédonie, Rapport BRGM R38660, 72 p.
- McCOOL D., BROWN L., FOSTER G., MUTCHLER C., MEYER L. (1987) - Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 30, pp. 1387-1396.
- MIOSSEC A. (1998a) - De l'aménagement des littoraux à la gestion intégrée des zones côtières. Géographie humaine des littoraux maritimes, Sedes, Paris, pp 411-466.
- MORGAN R. (1986) - Soil erosion and conservation. D-A Davidson, J. Wiley and Sons Inc., 253 p.
- MORSCHER J., FOX D. (2004) - Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais, Université de Nice, M@ppemonde 76, 11p.
- PODWOJEWSKI P., BEAUDOU A.G. (1987) - Carte morpho-pédologique de la Nouvelle-Calédonie au 1:200 000. ORSTOM, Nouméa.
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., MCCOOL D.K., 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, Agriculture Handbook No. 703, 404 p.
- RISHIRUMHIRWA T. (1997) - Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région du Kirimiro - Burundi). Thèse n°1636, EPFL, Lausanne.
- ROOSE E. (1994) - Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin pédologique de la FAO 70. Première consultation : décembre 2001.
- SADIKI A., BOUHLASSA S., AUAJJAR J., FALEH A., MACAIRE J.J (2004) - Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, n°26, p. 69-79.

- SERVANT J. (1974) - Un problème de géographie physique en Polynésie Française : l'érosion, exemple de Tahiti. Cahier ORSTOM, série Sciences Humaines, vol. XI, n°3/4, pp 203-209.
- STONE R.P., HILLBORN D. (2002) - Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada. Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA).
- VAN DER KNIJFF J.M., JONES R.J.A., MONTANARELLA L. (2000) - Estimation du risque d'érosion en Italie. European Soil Bureau.
- VAN REMORTEL R.D., MAICHLE R.W., HICKEY R.J. (2003) - Computing the LS-Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using C++ executable, Lockheed Martin Environmental Services, Las Vegas, NV.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1978) - Predicting Rainfall Erosion Losses; A guide to conservation planning, Agriculture handbook No. 537. US department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, DC, USA, 163 p.

WEBOGRAPHIE

<http://www.ird.nc/PNEC/>, site du chantier PNEC en Nouvelle-Calédonie.

<http://www.r-project.org/>, site du programme R.

<http://www.yogibob.com/slope/slope.html/>, site de téléchargement du script AML pour le calcul du facteur LS.

<http://www.fao.org/>, site de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture ("Food and Agriculture Organization").

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique	6
Figure 2 : Géographie physique de la Nouvelle-Calédonie.....	6
Figure 3 : Le nomogramme de Wischmeier pour le calcul du facteur K	19
Figure 4 : Perte en terre en fonction de la longueur de la pente et du type d'érosion (d'après Roose, 1994)	20
Figure 5 : Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (d'après Roose, 1994)	22
Figure 6 : Localisation de la zone d'étude.....	25
Figure 7 : Topographie de la zone d'étude.....	26
Figure 8 : Organigramme méthodologique de l'intégration du modèle USLE dans un SIG	29
Figure 9 : Localisation des stations météorologiques	31
Figure 10 : Valeurs du facteur R en fonction de l'altitude pour les huit stations	34
Figure 11 : Répartition des stations météorologiques "créées" sur la zone d'étude	35
Figure 12 : Carte de répartition du facteur R - Erosivité des précipitations	35
Figure 13 : Carte pédologique de la zone d'étude au 1/200 000ème	36
Figure 14 : Création de cinq classes de sols.....	38
Figure 15 : Carte pédologique simplifiée de la zone d'étude	38
Figure 16 : Le triangle des textures de sols USDA (United States Department of Agriculture).....	39
Figure 17 : Carte de répartition du facteur K - Erodibilité des sols	41
Figure 18 : Modèle Numérique de Terrain et carte des pentes de la zone d'étude.....	42
Figure 19 : Carte de répartition du facteur LS - Inclinaison et longueur de pente	43
Figure 20 : L'organigramme des étapes du calcul de LS dans le script AML de Van Remortel (2003)	44
Figure 21 : Distribution des classes du facteur LS sur la zone d'étude	45
Figure 22 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude	45
Figure 23 : Maquis minier et traces de l'exploitation minière sur le massif du Koniambo (2007)	46
Figure 24 : Carte de répartition du facteur C - Couverture végétale.....	47
Figure 25 : Carte du potentiel érosif de la zone d'étude	49
Figure 26 : Distribution des classes de pertes en sol sur la zone d'étude	51
Figure 27 : Figure d'érosion en ravine sur le Koniambo (2007)	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Signification des codes pour la structure du sol.....	19
Tableau 2 : Valeur de C pour différents types de couvert végétal (Sadiki et al., 2004).....	21
Tableau 3 : Valeurs du facteur P (d'après Wischmeier & Smith, 1978)	22
Tableau 4 : Les données collectées auprès des organismes traitant de l'information géographique en Nouvelle-Calédonie.....	28
Tableau 5 : Période d'enregistrement des stations météorologiques	31
Tableau 6 : Données pluviométriques pour un épisode pluvieux et calcul de E (Energie cinétique) ...	32
Tableau 7 : Les résultats du facteur R pour huit stations météorologiques	34
Tableau 8 : Type de sol associé à chaque unité pédologique au 1/200 000ème.....	37
Tableau 9 : Composition des types de sol à partir de la carte pédologique de Pouembout au 1/50 000ème	39
Tableau 10 : Le facteur d'érodibilité des sols (d'après Stone et Hillborn, 2002).....	40
Tableau 11 : Détermination du facteur K pour chaque type de sol de la zone d'étude	40
Tableau 12 : Facteur C sur la zone d'étude	47

GLOSSAIRE

Aléa : Dans son sens le plus général, l'aléa est un terme exprimant la mesure de la probabilité d'une situation, d'un événement ou d'une causalité quelconque. L'aléa est donc l'expression, pour un type d'accident donné, du couple probabilité d'occurrence / effets. Il est spatialisé et peut être cartographié. L'aléa est utilisé pour étudier le risque, en "croisant" les données sur l'aléa et sur les enjeux vulnérables (population, infrastructures...). Il existe un risque lorsque l'aléa menace un enjeu.

Erosion : En géomorphologie, l'érosion est le processus de dégradation et de transformation du relief qui est causé par tout agent externe.

Nickel : Géologiquement, la Nouvelle-Calédonie est constituée pour 40 % environ de roches mères ultrabasiques riches en olivine, pyroxène et serpentine. Exposées pendant plusieurs millions d'années à la chaleur et aux pluies du climat tropical, ces roches ont subi une intense altération géochimique, qui a généré un manteau latéritique épais de plusieurs dizaines de mètres. Lors de la dissolution de la roche saine, le nickel, présent en faible teneur (inférieure à 0,5 %) a été libéré, puis s'est concentré pour former les minerais nickélifères riches en silice (les garniérites) et/ou en fer.

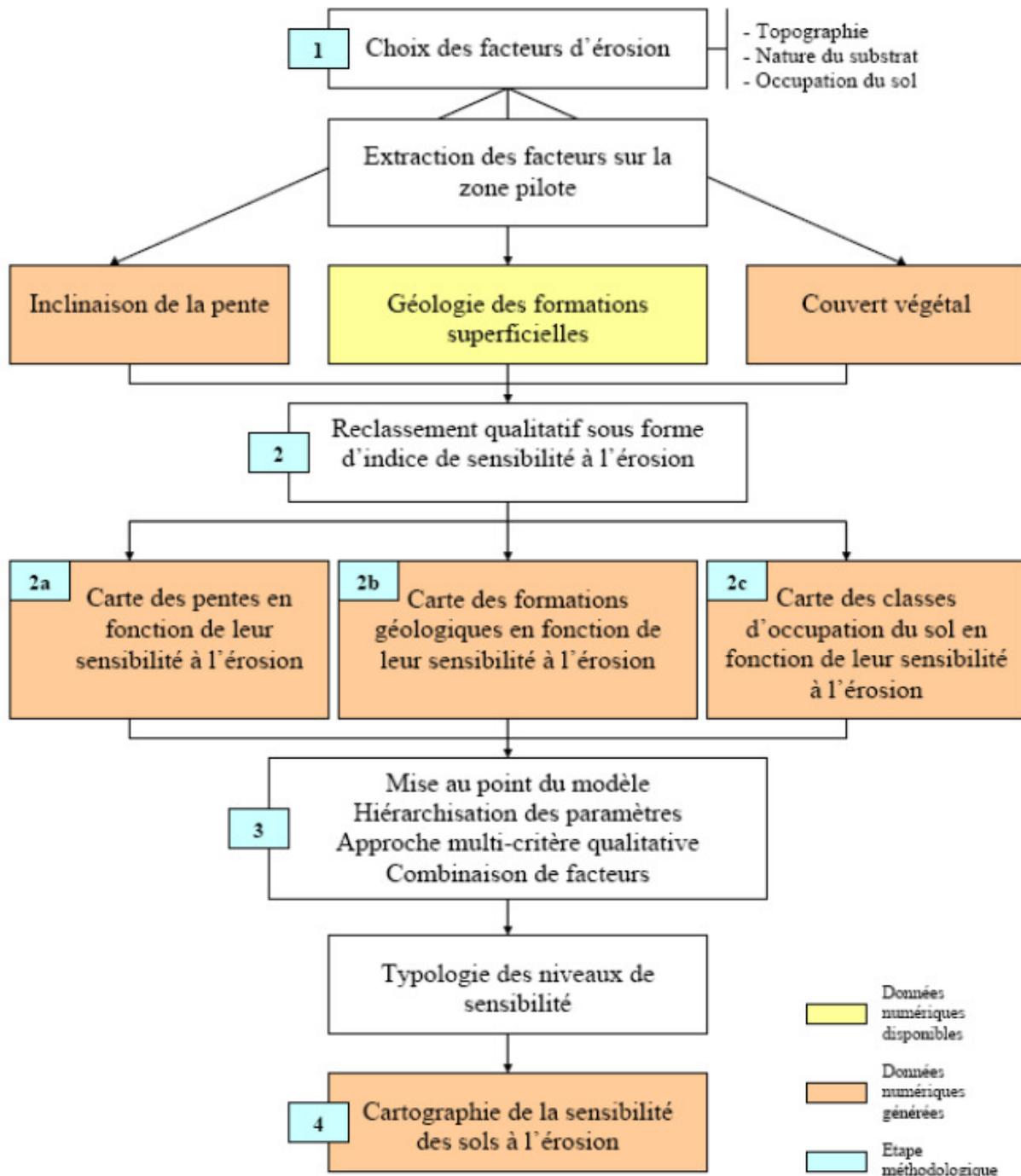
Risque naturel : Le risque est défini comme la conjonction d'un aléa, probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux, et d'une vulnérabilité, qui exprime le niveau de conséquence prévisible sur les enjeux exposés, qu'il s'agisse de personnes, de biens, d'équipement ou de l'environnement. C'est la superposition spatiale entre l'extension d'un aléa et un territoire anthropisé qui crée le risque.

SIG (Système d'Information Géographique) : Système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter, des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace. (*Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*)

USLE (Universal Soil Loss Equation) : L'équation universelle de pertes en sol (*Wischmeier & Smith, 1978*) est un modèle mathématique qui s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes.

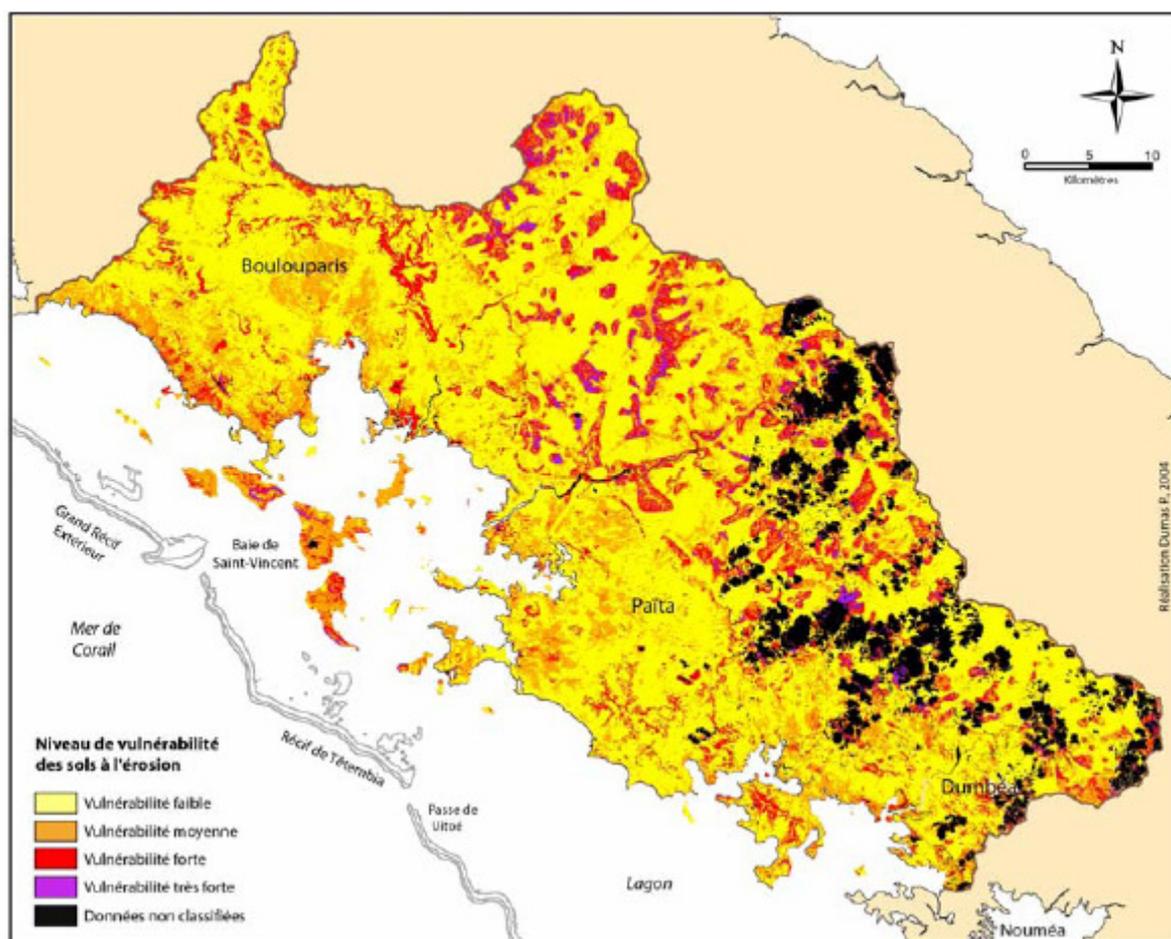
ANNEXES

ANNEXE 1 : Méthodologie générale de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion (Dumas, 2004)



ANNEXE 2 : Carte de sensibilité des sols à l'érosion sur la baie de Saint-Vincent (Dumas, 2004)

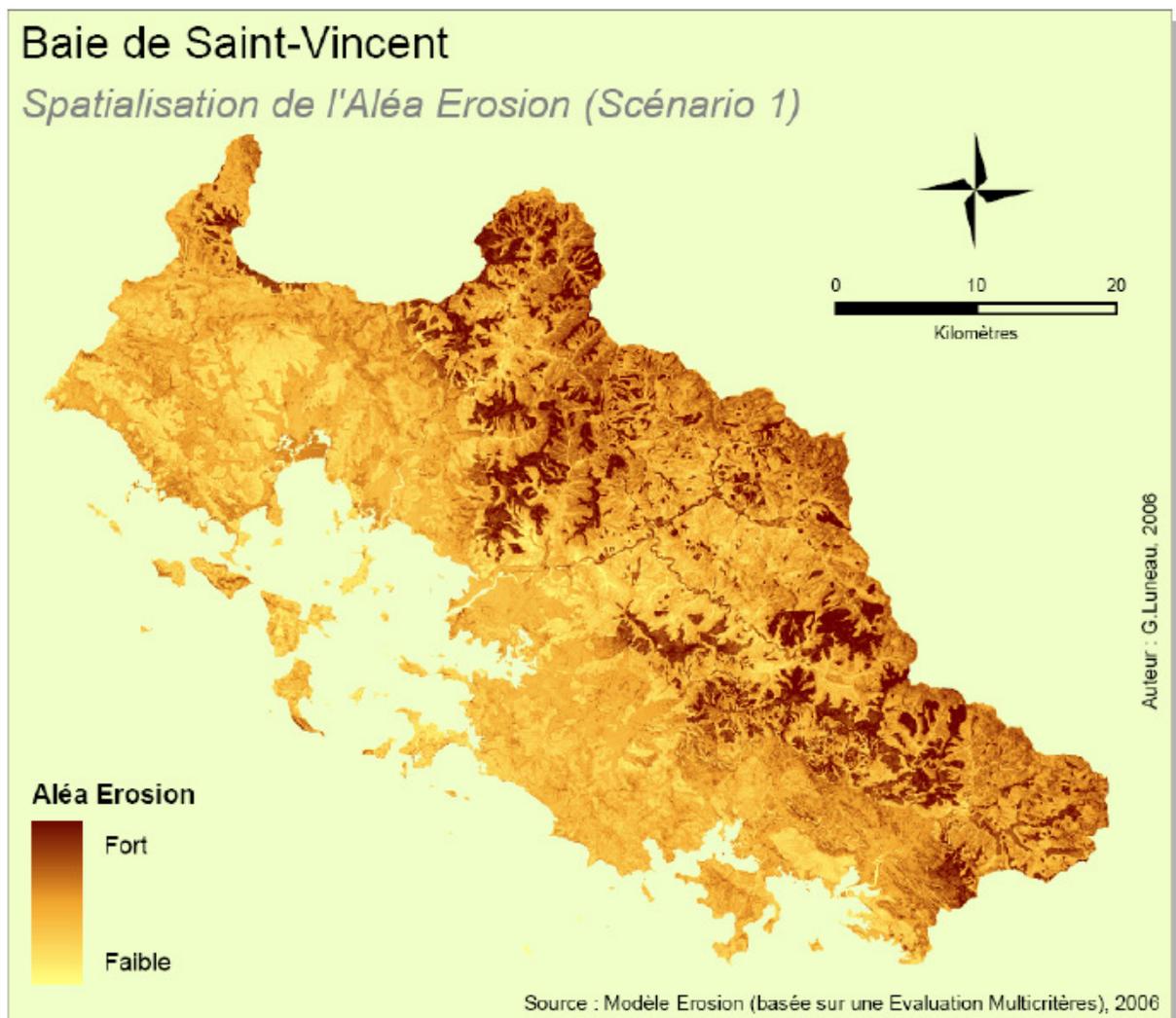
Cette carte est issue de la thèse de Pascal DUMAS, soutenue en 2004. La sensibilité du sol à l'érosion a été obtenue par l'élaboration d'un modèle cognitif basé sur le croisement de trois paramètres : le relief, la géologie des formations superficielles et le recouvrement de la végétation (Annexe 1).



ANNEXE 3 : Carte de sensibilité des sols à l'érosion sur la baie de Saint-Vincent (Luneau, 2006)

Cette carte est issue de l'étude menée en 2006 par Gaëlle LUNEAU dans le cadre de son master 2 en géomatique. La spatialisation de l'aléa érosion a été obtenue grâce à une analyse multicritère, croisant les couches d'informations suivantes : pentes, précipitations, courbures de profil, courbures horizontales, surfaces drainées cumulées, géologie, végétation/occupation du sol et pistes.

Plusieurs scénarii ont été envisagés pour pondérer les couches. Le scénario 1 est celui qui privilégie les précipitations comme facteur principal de l'érosion.



ANNEXE 4 : Conversion des unités US en unités SI pour le calcul des facteurs de l'équation

D'après Renard et al., 1991

To convert from	U.S. customary units	Multiply by	To obtain:	SI Units
Rainfall intensity, i or I	$\frac{\text{inch}}{\text{hour}}$	25.4	$\frac{\text{millimeter}}{\text{hour}}$	$\frac{1}{h} \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ ¹
Rainfall energy per unit of rainfall, e	$\frac{\text{foot} \cdot \text{tonf}}{\text{acre} \cdot \text{inch}}$	$2.638 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{megajoule}}{\text{hectare} \cdot \text{millimeter}}$	$\frac{2}{\text{ha} \cdot \text{mm}} \text{MJ}$
Storm energy, E	$\frac{\text{foot} \cdot \text{tonf}}{\text{acre}}$	0.006701	$\frac{\text{megajoule}}{\text{hectare}}$	$\frac{3}{\text{ha}} \text{MJ}$
Storm erosivity, EI	$\frac{\text{foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour}}$	0.1702	$\frac{\text{megajoule} \cdot \text{millimeter}}{\text{hectare} \cdot \text{hour}}$	$\frac{\text{MJ} \cdot \text{mm}}{\text{ha} \cdot \text{h}}$
Storm erosivity, EI	$\frac{4}{\text{hundreds of foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}} \frac{\text{acre} \cdot \text{hour}}{\text{acre} \cdot \text{hour}}$	17.02	$\frac{\text{megajoule} \cdot \text{millimeter}}{\text{hectare} \cdot \text{hour}}$	$\frac{\text{MJ} \cdot \text{mm}}{\text{ha} \cdot \text{h}}$
Annual erosivity, R ⁵	$\frac{\text{hundreds of foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}}$	17.02	$\frac{\text{megajoule} \cdot \text{millimeter}}{\text{hectare} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}}$	$\frac{\text{MJ} \cdot \text{mm}}{\text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{y}}$
Soil erodibility, K ⁶	$\frac{\text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{hour}}{\text{hundreds of acre} \cdot \text{foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}$	0.1317	$\frac{\text{metric ton} \cdot \text{hectare} \cdot \text{hour}}{\text{hectare} \cdot \text{megajoule} \cdot \text{millimeter}}$	$\frac{\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h}}{\text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}}$
Soil loss, A	$\frac{\text{ton}}{\text{acre}}$	2.242	$\frac{\text{metric ton}}{\text{hectare}}$	$\frac{\text{t}}{\text{ha}}$
Soil loss, A	$\frac{\text{ton}}{\text{acre}}$	0.2242	$\frac{\text{kilogram}}{\text{meter}^2}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

¹Hour and year are written in U.S. customary units as h and yr and in SI units as h and y. The difference is helpful for distinguishing between U.S. customary and SI units.

²The prefix mega (M) has a multiplication factor of $1 \cdot 10^6$.

³To convert $\text{ft} \cdot \text{tonf}$ to megajoule, multiply by $2.712 \cdot 10^{-3}$. To convert acre to hectare, multiply by 0.4071.

⁴This notation, "hundreds of," means numerical values should be multiplied by 100 to obtain true numerical values in given units. For example, $R=125$ (hundreds of $\text{ft} \cdot \text{ton} \cdot \text{in} / (\text{acre} \cdot \text{h})^{-1} = 12,500 \text{ ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{h}$). The converse is true for "hundreds of" in the denominator of a fraction.

⁵Erosivity, EI or R , can be converted from a value in U.S. customary units to a value in units of Newton/hour (N/h) by multiplying by 1.702.

⁶Soil erodibility, K , can be converted from a value in U.S. customary units to a value in units of metric ton $\cdot \text{ha}$ (Newton $\cdot \text{h}$)⁻¹

[$\text{t} \cdot \text{h} / (\text{ha} \cdot \text{N})^{-1}$] by multiplying by 1.317.

Source: Foster et al. 1981

Exemple pour le calcul du facteur R :

Appliquant une formule donnée en unités US avec des précipitations en millimètres, pour avoir des résultats justes en unités SI, il faut multiplier par 17,02 et diviser par 25,4.

En effet :

- 1 inch=25,4 mm et
- la conversion US en SI pour le facteur R est 17,02.

ANNEXE 5 : Algorithme pour le calcul du facteur R – Erosivité des précipitations

La décomposition du code est la suivante (les # précèdent des commentaires pour la compréhension du code) :

- Appel de la fonction pour le traitement des données météorologiques

```
calculR = fonction(nom_fichier) {
```

```
# nom_fichier correspond au fichier qui contient les données de précipitations pour une station
```

- Identification des métaparamètres

```
Seuil.P = 12.7 # mm : seuil au-delà duquel on considère que l'épisode est pluvieux
```

```
Pas.de.temps = 6 # mn
```

```
Pas.fenetre = 60 # pas de temps soit 6h
```

- Lecture des données contenues dans nom_fichier

```
data = scan(nom_fichier, skip = 2, what = list("", 0, 0), sep = "\t")
```

```
date = data[[1]] # Date : date toutes les 6mn (type caractères)
```

```
P = data[[2]] # P pour précipitations (type réels)
```

```
code = data[[3]] # code = 1 si les précipitations ont été correctement enregistrées, 0 sinon (type entier)
```

- Elimination des valeurs erronées

```
ind.code = code != 1 # Recherche des valeurs erronées
```

```
P[ind.code & is.finite(P)] = 0 # Pour éviter qu'une seule donnée manquante n'élimine trop de données  
lors de la somme sur 6h, les valeurs manquantes sont mises à 0
```

- Initialisation pour la détermination des épisodes pluvieux

```
n = length(P) # n : nombre de données disponibles toutes les 6mn
```

```
P.6 = filter(P, rep(1, Pas.fenetre), sides = 1) # somme sur une fenêtre glissante de "Pas.fenetre"  
# P.6 : vecteur des précipitations sommées sur 6 heures  
toutes les 6 minutes (fenêtre glissante)
```

```
P.6[is.na(P.6)] = 0 # Toutes les valeurs d'indices 1 à Pas.fenetre sont mises à 0
```

```
ENP = P.6 < Seuil.P # ENP = Episodes non pluvieux (6 heures avec moins de 12.7 mm de pluie)
```

```
indices.P.6 = 1:n
```

```
ind.EP = indices.P.6[!ENP] # extraction des indices qui correspondent à des épisodes pluvieux
```

- Extraction des épisodes pluvieux

```
# i et l sont des compteurs, nb.EP correspond au nombre d'épisodes pluvieux
```

```
i.min = 0
```

```
i.max = 0
```

```
indices[] = 0
```

```
i = min(ind.EP)
```

```

nb.EP = 0
l = 1
for (i in 2:length(ind.EP)) {
  if (ind.EP[i-1] == ind.EP[i]-1) {
    l = l+1
  } else {
    l=1
  }
}
hh = 0
for (k in 1:nb.EP)
  hh[k] = sum(P[i.min[k]:i.max[k]])
  • Calcul de l'intensité maximale en 30 minutes
I30 = vector("numeric",nb.EP)
for (k in 1:nb.EP) {
  I30[k] = max(filter(P[i.min[k]:i.max[k]],rep(1,5)),na.rm=TRUE)
}
  • Calcul de l'énergie cinétique d'un épisode pluvieux
E = vector("numeric",nb.EP)
for (k in 1:nb.EP) {
  l = 10*P[i.min[k]:i.max[k]]
  PP = P[i.min[k]:i.max[k]]
  E[k] = sum(0.29*(1-0.72*exp(-0.05*l))*PP)
}
  • Calcul de l'érosivité des pluies pour la station
nb.an = n/240/365 # Nombre d'années d'enregistrement (10 mesures en une heure donc 240 mesures
                en une journée)
R = sum(E*I30*2)/nb.an #multiplication par deux pour ramener le I30 à une base horaire
  • Fin du programme
R
}

```

