

**Spatialisation des pluies extrêmes et
cartographie de l'aléa « érosion des sols »
dans les bassins versants en amont du
lagon Saint Gilles (Île de la Réunion)**

SYSTEMES
D'INFORMATIONS
LOCALISÉES
POUR
L'AMÉNAGEMENT
DES TERRITOIRES

Ahmed BATTI



Directeur du projet : Marc LOINTIER (IRD Unité ESPACE S140, Montpellier)



Tuteur SILAT : François COLIN (ENSAM – UMR LISAH)



Rapporteurs : Jöel MICHELIN (UMR INRA –INAPG)
Christian PUECH (UMR3S CEMAGREF Montpellier)

Novembre 2005



INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON



Mastère spécialisé de la Conférence des Grandes écoles

LETTRE DE MISSION

Organisme commanditaire

L'Institut de Recherche pour le Développement
(I.R.D.) de Montpellier
911 avenue Agropolis
BP 64501
34394 Montpellier Cedex 5 France
Téléphone : 04.67.41.61.00
Télécopie : 04.67.41.63.30

Commanditaire (personne physique)

Marc LOINTIER Chargé de Recherche
Chef de projet AGIL (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux)
IRD Unité "Espace" S140
Maison de la Télédétection
500 rue J.F. Breton 34093 Montpellier
téléphone : 04.67.54.87.03
Télécopie :
Courriel : ljointier@teledetection.fr
<http://www.espace.ird.fr/>

Etudiant SILAT

Ahmed BATTI
Maison de la Télédétection
500, rue J-F. Breton 34093 Montpellier Cedex 5
Téléphone : 04.67.54.87.00
Courriel : batti@teledetection.fr,
Ahmed_batti@hotmail.com

Tuteur

François COLIN
ENSAM - UMR LISAH
Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
2, place Pierre Viala 34060 Montpellier Cedex 1
Téléphone : 04.99.61.22.51
Télécopie : 04.67.63.26.14
Courriel : Francois.Colin@ensam.inra.fr

Rapporteur

Christian PUECH
UMR3S, CEMAGREF Montpellier
Maison de la Télédétection
500, rue J-F. Breton 34093 Montpellier Cedex 5
Tel : 04.67.54.87.45
Télécopie : 04.67.54.87.00
Courriel : puech@teledetection.fr

Rapporteur

Joël MICHELIN
UMR INRA-INAPG Environnement et Grandes Cultures, Centre de Grignon
BP1, 78850 Grignon
Téléphone : 01.30.81.54.28
Télécopie : 01.30.81.53.96
Courriel : joel.michelin@grignon.inra.fr

Titre : Spatialisation des pluies extrêmes et cartographie de l'aléa « érosion des sols » dans les bassins versants en amont du lagon Saint Gilles à l'Île de la Réunion.

Présentation

Ce projet s'intègre dans un contexte global, le projet AGIL (Aide à la gestion intégrée des littoraux) regroupant un consortium BRLi, Scot, Ifremer, BRGM, IRD avec l'appui du CNES. Son but est de créer une offre de service dans le domaine de la gestion des littoraux en utilisant les produits de l'observation de la terre et les compétences du consortium. Ces produits et expertises seront accessibles par un système de gestion de l'information distribuée.

Deux sites pilotes ont été identifiés pour réaliser des démonstrateurs : le Languedoc Roussillon et l'Île de la Réunion.

Traiter les questions relatives à la gestion intégrée des littoraux doit aujourd'hui nécessairement prendre en compte le bassin versant, origine des flux arrivant au littoral. La Réunion, où l'IRD est implanté de longue date au sein de l'université, offre un contexte hydrologique tropical particulier, dû à la nature même des terrains volcaniques et aux activités économiques qui s'y développent (canne à sucre, tourisme, urbanisation...). Par ailleurs, le lagon St Gilles et la saline, représentent un enjeu socio-économique local qui est représentatif des conflits d'acteurs rencontrés dans toute approche GIZC (Gestion intégrée des zones côtières).

La commande

L'objectif du projet consiste à apporter un élément cartographique permettant de réaliser une cartographie des types d'érosion et de définir les caractéristiques morphologiques des bassins versants en amont du lagon St Gilles :

- 1 - Elaboration de la carte des intensités de pluie maximales horaires (i60) par régionalisation s'appuyant sur les types de relief tirées du MNT à 10m.
- 2 - Etablir une méthodologie permettant de caractériser l'aléa « érosion des sols ».

Confidentialité : Aucune clause restrictive

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué au bon déroulement de ce projet.

Je souhaite tout d'abord remercier Marc LOINTIER Mon commanditaire, à l'initiative de ce sujet, pour ça confiance et son soutien tout le long de mon travail.

Je remercie également toute l'équipe IRD de l'unité US Espace, en particulier Frédéric HUYNH, Monique MARTINY, Isabelle PELISSIER, Pierre MALARD, Patrick MAILLET pour leur accueil et leur aide. Merci pour votre investissement.

Je remercie également toute l'équipe IRD à l'île de la Réunion, Gilbert DAVID, Aurélie THOMASSIN, Michel SLEPOUKHA, pour leur sympathie et leur présence lors de mon séjour inoubliable , merci.

Je remercie aussi Aurélie Botta qui m'a été d'une grande aide à la Réunion.

Je remercie mon tuteur François COLIN pour ses conseils, Yves LE BUISSONNAIS pour ses avis et son aide et Arnaud MOKRANI pour les éclaircissements qu'il m'a apporté.

Mes remerciement vont également à Luc NEPPEL et à Christophe BOUVIER de la MSE pour le temps qu'ils m'ont consacré, leurs conseils et leur investissement.

Je remercie Laurent TOCQUEVILLE De BRLi pour ses conseils pratiques, DE LA TORRE Ywenn du BRGM pour son soutien, Nicolas VILLENEUVE pour ses conseils et Valérie SOLTI pour sa collaboration.

Merci à toute l'équipe de la MTD, spécialement Jean Stéphane BAILLY et Jaques pour leurs aide et Sylvie BLIN pour sa disponibilité.

Merci à toute l'équipe du SILAT et aux Silatiens de l'année 2004 - 2005,

Je remercie aussi mon ami Kamel SOUDANI qui était toujours là pour me donner ses conseils et son soutien.

Merci à Philippe, Yannis, Agathe, Momar, Enselme, Sophie, Richard, Julien, Carole, Vanina, Denis, Nicolas, Renaud et Merci à tous ceux qui ont contribué à rendre cette année sympathique.

Tables des matières

INTRODUCTION.....	7
Partie 1 - Contexte et objectifs	8
1. Contexte général (le projet AGIL)	8
2. Situation de la zone d'étude	8
2.1 Situation générale.....	8
2.2 La zone d'étude.....	9
3. Objectifs.....	9
Partie 2 - Spatialisation des pluies extrêmes	10
1. Panorama des méthodes d'interpolation spatiale	10
1.2 Méthodes utilisant les seules données mesurées localement.....	10
1.3 Méthodes utilisant une information complémentaire (le relief).....	11
2. Approche opérationnelle pour la spatialisation des pluies	13
2.1 Les données pluviométriques et géographiques	13
2.2 Analyse des données	13
2.3 Caractérisation ponctuelle des distributions d'intensités extrêmes	15
2.4 Distribution spatiale de l'Aléa climatique en relation avec l'environnement topographique	16
3. Conclusion	22
Partie 3 - Cartographie de l'aléa « érosion des sols »	23
1. Etat de l'art.....	23
2. Approche opérationnelle	25
2.1 Présentation des données spatialisées disponibles	25
2.2 Constitution de la base d'informations géographiques.....	25
2.3 Application du modèle	27
3. Analyse des résultats :.....	29
3.1 Analyse de la carte de sensibilité des terrains à l'érosion :	29
3.2 Analyse de la carte de l'aléa « érosion des sols ».....	29
Conclusion et Discussion	30
BIBLIOGRAPHIE	32
ANNEXES	34

Liste des tableaux

TABLEAU 2.1 : Caractérisation des 17 postes pluviométriques.....	13
TABLEAU 2.2 : Paramètres d'ajustement à la loi Gumbel (G_d , P_0).....	16
TABLEAU 2.3 : Correspondance entre les paramètres des pluies et l'environnement topographique.....	20
TABLEAU 3.1 : Facteurs et paramètres de l'érosion.....	25
TABLEAU 3.2 : Classification de l'occupation du sol.....	25
TABLEAU 3.3 : Aptitude au ruissellement.....	26
TABLEAU 3.3 : Modèle de prise en compte des surfaces drainées pour l'amélioration du paramètre pente.....	26
TABLEAU 3.4 : Hiérarchisation des classes pédologiques et géologiques selon leur érodibilité.....	26
TABLEAU 3.5 : Combinaison de la sensibilité des terrains et l'agressivité des pluies.....	28

Liste des Figures

FIGURE 2.1 : Périodes d'observations pour chacune des stations.....	14
FIGURE 2.2 : Localisation des 17 stations pluviométriques.....	14
FIGURE 2.3 : Courbe d'ajustement à la loi Gumbel pour la station 1.....	16
FIGURE 2.4 : La dispersion entre caractéristiques ponctuelles de l'aléa climatique et altitude du poste d'observation.....	17
FIGURE 2.5 : Principe de la caractérisation de l'environnement topographique à partir des composantes principales.....	18
FIGURE 2.6 : Les 5 premiers vecteurs propres du MNT, au pas de 200 m, représentant un environnement topographique de 10 x 10 Km ²	19
FIGURE 2.7 : Contribution cumulée des valeurs propres.....	19
FIGURE 2.8 : Ajustements des modèles Gradex (G_d) et Paramètre de position (P_0) en fonction des composantes principales de l'environnement topographique.....	21
FIGURE 2.9 : Enveloppes de confiance empirique du variogramme par test de permutation.....	22
FIGURE 2.10 : Cartes d'Iso-Gradex et d'Iso- P_0	22
FIGURE 3.1 : Approche globale pour la détermination de l'Aléa érosion.....	27
FIGURE 3.2 : Sensibilité potentielle des terrains à l'érosion.....	27
FIGURE 3.3 : Carte de l'aléa « érosion des sols ».....	28

Liste des Annexes

ANNEXE 1 : Chronogramme.....	35
ANNEXE 2 : Localisation de la zone d'étude.....	35
ANNEXE 3 : Echantillons des valeurs sup-seuils (exemples postes 1 et 2).....	36
ANNEXE 4 : Courbes d'ajustement à la loi Gumbel (exemples des stations 1, 2 et 3).....	37
ANNEXE 5 : Script « R » pour l'extraction des grilles (51 x51) d'un MNT, calcul de la moyenne d'altitude autour d'un poste pluviométrique et sur tout le MNT.....	42
ANNEXE 6 : Représentation cartographique des premières composantes principales du relief.....	43
ANNEXE 7 : Cartes du gradex (G_d) et du paramètre de position (P_0).....	44
ANNEXE 8 : Cartes des intensités extrêmes (mm/h) pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.....	45
ANNEXE 9 : Carte morphopédologiques.....	46
ANNEXE 10 : Carte de l'occupation du sol.....	47
ANNEXE 11 : Carte géologique.....	48
ANNEXE 12 : Paramètre « indice d'aptitude au ruissellement ».....	49
ANNEXE 13 : Paramètre « indice topographique ».....	49
ANNEXE 14 : Paramètre « Erodibilité ».....	50
ANNEXE 15 : Modèle Arborescent pour le calcul de l'Aléa d'érosion.....	51
ANNEXE 16 : Sensibilité potentielle des terrains à l'érosion.....	52
ANNEXE 17 : Carte de l'aléa « érosion des sols » aux bassins versants en amont du lagon St-Gilles.....	53
ANNEXE 18 : Définitions du risque et de l'aléa.....	54

Sigles et abréviations

AGIL : Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux

ACP : Analyse en Composante Principale

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BRLi : Bureau d'études spécialisé dans les domaines de l'eau et de l'environnement

CIRAD : Centre de Coopération en Recherche Agronomique pour le Développement

CNES : Centre National d'Etudes spatiales

MTD : Maison de la Télédétection

I-D-F : Intensités-Durées-Fréquences

IFEN : Institut Français de l'Environnement

Ifremer : L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IRD : Institut de Recherche pour le développement

MNT : Modèle Numérique de Terrain

SCOT : Bureau d'étude en Systèmes d'information géographiques et en observation de la terre

SIG : Systèmes d'information Géographiques

INTRODUCTION

Par son contexte biophysique très particulier, l'île de la Réunion subit une érosion très intense, cette érosion se manifeste par la dégradation des ressources naturelles qui sont en premier lieu les terres agricoles, et indirectement les zones côtières réceptrices des flux. Ce phénomène est aggravé par des conditions climatiques exceptionnelles et par une pression démographique forte entraînant des bouleversements de l'occupation du sol.

Pour gérer efficacement le problème dans des perspectives de durabilité, les décideurs et les aménageurs ont besoin d'une information spatiale fiable qui pourra être offerte par des outils puissants et adaptés.

Nous proposons dans cette étude une caractérisation du phénomène d'érosion à l'échelle spatiale, qu'on appelle « aléa à l'érosion » en utilisant les Systèmes d'informations géographiques.

La cause principale de l'érosion à l'île de la Réunion est l'agressivité des pluies. La première question qu'on s'est posée était donc : « comment caractériser l'aléa climatique dans un milieu fortement contrasté renseigné par un nombre restreint d'information ponctuelles ».

Dans ce rapport nous présentons tout d'abord le contexte et les objectifs de l'étude (partie 1). Puis la caractérisation de l'aléa climatique par régionalisation des pluies extrêmes (partie 2), nous présentons le modèle retenu pour l'élaboration de la cartographie de l'aléa érosion (partie 3) et enfin en conclusion nous discutons l'approche et les résultats obtenus en exposant les perspectives.

Dans ce rapport il sera souvent fait appel au terme Aléa (risk en anglais) à ne pas confondre avec le terme risque.

Partie 1 - Contexte et objectifs

1. Contexte général (le projet AGIL)

Les zones côtières constituent des espaces complexes de part leur situation géographique où interagissent des processus géophysiques à la fois d'origine marine et terrestre. Ils sont aussi les espaces les plus habités par l'homme. Ils constituent ainsi des lieux où les enjeux socio-économiques et écologiques sont forts, générant des conflits entre les partisans du développement économique et ceux de la préservation du milieu naturel. Cette prise de conscience des conflits d'usage a montré la nécessité d'une gestion intégrée des espaces géographiques pour une aide à une prise de décision aux collectivités territoriales.

C'est dans ce contexte de demande nationale et internationale croissante que le programme AGIL, (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux) financé par le Réseau Terre & Espace, a été mis en place. Ce projet qui regroupe dans un consortium IRD, BRLi, Ifremer, BRGM, SCOT, CIRAD avec l'appui du CNES, veut au travers des technologies spatiales d'observation de la terre apporter de nouveaux outils et méthodes nécessaires à la gestion des zones côtières. Deux sites pilotes ont été identifiés pour réaliser des applications « métiers »: le Languedoc Roussillon et l'île de la Réunion.

Traiter les questions relatives à la gestion intégrée des littoraux doit aujourd'hui nécessairement prendre en compte le bassin versant, origine des flux arrivant au littoral (sédiments, ruissellement, pollutions...). La contribution du Projet SILAT concerne le site de la Réunion qui offre un contexte hydrologique tropicale, particulier, dû à la nature même des terrains volcaniques et aux activités économiques qui s'y développent (cane à sucre, tourisme, urbanisation...). Par ailleurs on s'intéresse plus spécifiquement, aux bassins versants en amont du lagon Saint Gilles / la Saline qui coïncide avec le plus vaste ensemble récifal de l'île. Cette zone représente un enjeu socio-économique local qui est représentatif des conflits d'acteurs rencontrés dans toute approche GIZC (Gestion intégrée des zones côtières).

2. Situation de la zone d'étude

2.1 Situation générale

L'île de la Réunion couvre une superficie de 2512 km², elle est située dans la partie sud-ouest de l'océan indien, par environ 21°sud et 55°30' est. L'île demeure durant la plus grande partie de l'année sous l'influence des vents alizés de sud-est dominants, dirigés par l'anticyclone semi-permanent des Mascareignes (ou de l'océan Indien) . On distingue deux saisons :

- L'été austral (décembre à avril) ou l'anticyclone s'éloigne vers le sud, les Alizés faiblissent, un courant de nord-est prédomine le plus souvent, un temps chaud, humide et pluvieux s'établi. Pendant cette saison se manifeste aussi les cyclones tropicaux.
- L'hivers austral (mai à novembre), l'anticyclone est le plus souvent centré au voisinage sud des Mascareignes, le courant d'alizé entraîne l'établissement d'un temps relativement frais et sec.

Outre les zones micro-climatiques très diversifiées, engendrées par le relief tourmenté de l'île, on peut observer plusieurs régions à pluviométrie contrastée de part et d'autre des deux puissantes chaînes montagneuses. La première chaîne, située au nord, de direction nord-ouest/sud-est, elle culmine à 3069 m. La pluviométrie importante diminue progressivement du haut vers le littoral ainsi que d'est en ouest. La deuxième chaîne, le Piton de la Fournaise (volcan encore en activité) s'élève à 2631 m ; Les pluies y sont abondantes et fréquentes, surtout au nord du volcan (Source : Météo France).

2.2 La zone d'étude

Les bassins versants en amont du lagon St Gilles et la Saline sont situés sur le côté nord-ouest de l'île (Annexe 2), faisant partie de la commune St Paul. Ils se caractérisent par la présence du plus grand complexe récifal de l'île (9km de long sur 450 m dans sa partie la plus large) situé aux exutoires de trois grandes ravines (la ravine de St Gilles à écoulement pérenne, celle de l'Hermitage et de Trois-Bassins à écoulement saisonnier) issus de trois bassins versants principaux, St Gille (10.4 km²), l'Hermitage (12.1 km²) et la saline (4.8 km²).

La zone d'étude connaît depuis quelques années une croissance urbaine importante liée en grande partie à l'attraction du site naturel. L'ancienne zone marécageuse située sur la bande littorale s'est transformée en zone urbaine. Mais l'urbanisation ne s'est pas arrêtée là, elle continue de progresser pour envahir les moyennes hauteurs des bassins versants.

Le développement des activités socio-économiques a modifié l'équilibre écologique affectant ainsi la zone récifale qui se caractérise par un écosystème riche et fragile. Le lagon est récepteur de tout ce qui se passe en amont des bassins versants (sédiments, ruissellement, pollution...), d'où l'attention particulière portée à cette zone par le Projet AGIL.

3. Objectifs

L'objectif principal de ce travail est d'établir une méthodologie permettant de cartographier l'aléa « érosion des sol ». On considère que le facteur climatique représente une cause majeure de l'érosion à la Réunion, et surtout les intensités des pluies extrêmes, d'où la demande du commanditaire de spatialiser ces pluies qui est la première étape de ce travail.

Partie 2 - Spatialisation des pluies extrêmes

L'objectif premier étant de spatialiser les pluies extrêmes, je me suis intéressé donc tout d'abord à ce genre de problématique et éventuellement dans des contextes similaires.

Il s'agit de déterminer à partir d'un paramètre mesuré (intensité de pluie) en un nombre de points répartis de manière irrégulière sur un domaine spatial donné, sa valeur en tout point non renseigné par des stations dans ce domaine.

1. Panorama des méthodes d'interpolation spatiale

J'ai pu distinguer différentes méthodes qu'on peut séparer principalement en deux : celles qui se basent uniquement sur l'information apportée par le paramètre étudié fourni par le réseau de mesure ; et celles qui utilisent des informations supplémentaires à caractère spatial (exemple : l'implication du relief).

1.2 Méthodes utilisant les seules données mesurées localement

La méthode classique la plus utilisée consiste à évaluer les valeurs aux points d'une grille régulière par calcul d'une moyenne pondérée des observations en tenant compte des distances entre postes de mesure et points de cette grille.

- méthode du point le plus proche : il s'agit d'affecter la valeur du poste le plus proche au point de la grille.
- Méthode de la valeur moyenne : il s'agit d'affecter aux points de la grille, une valeur obtenue par moyenne pondérée des postes les plus proches : méthode des « polygones de THIESSEN » (1911). Cette méthode, purement basée sur des principes géométriques, consiste à tracer des segments de droite joignant les points de mesure (stations), puis on trace les médiatrices. Nous obtenons ainsi des polygones d'influence autour de chaque mesure (GOOVAERTS, 1999), la valeur du poste contenu dans le polygone est alors affectée à l'ensemble des points du polygone.

Ces deux approches ne tiennent pas compte de la répartition spatiale des postes de mesures.

D'autres méthodes, essayent de tenir compte de la distance géographique entre les postes, en attribuant des coefficients de pondération dépendant des distances. CRESSMAN (1959) limite l'implication de certains postes, il établit un rayon d'influence.

Des méthodes géostatistiques basées sur la théorie des variables régionalisées sont de plus en plus appliquées (GOOVAERTS, 1999), elles permettent d'utiliser la corrélation spatiale entre les observations voisines pour réaliser la spatialisation, ces méthodes de prévision (appelées Krigeage¹.) fournissent des meilleurs évaluations des précipitations que les méthodes conventionnelles (GOOVAERTS, 1999) ; c'est la méthode optimale d'interpolation spatiale (GRATON, 2002). Le krigeage fournit en tout point une valeur du champ qui est une combinaison linéaire des valeurs aux postes d'observation, les poids étant obtenus en résolvant des systèmes d'équations qui dérivent des hypothèses faites sur le champ étudié. On détermine les poids à partir du degré de similarité entre les valeurs du champ (la covariance entre les

¹ méthode portant le nom de son précurseur D.G. KRIGE qui dans les années 50 a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages.

points en fonction de la distance entre ces points). Le variogramme va mesurer une dissemblance entre sites en fonction de la distance. Cependant il y'a deux conditions indispensables à l'utilisation du krigeage, la moyenne et la variance doivent être stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas des positions des points, seulement de la distance entre les points. Cette méthode présente comme avantage une estimation de l'erreur d'interpolation.

1.3 Méthodes utilisant une information complémentaire (le relief)

Plusieurs auteurs affirment que La distribution des précipitations, en plus des facteurs thermodynamiques et dynamiques, est très liée à la configuration de la topographie environnante (MESTRE BARCELO ; JIANG, 2003 ; DROGUE et al., 2002).

Plusieurs auteurs ont exploité ce lien avec différentes approches, on peut citer deux exemples français qui sont les méthodes AURELHY (BENICHOU et LE BRETON, 1987) et PLUVIA (HUMBERT et al., 1994).

La méthode AURELHY consiste à caractériser au départ le champ topographique autour d'un point donné de la grille. Pour se faire, elle délimite un domaine spatial élémentaire autour de chaque point caractérisant ainsi un paysage local. Ainsi nous obtenons autant de paysages que de points de la grille, pour éliminer l'information redondante, une Analyse en Composantes Principales (ACP) est appliquée pour retenir un certain nombre de paysages topographiques de base ou premières composantes, qui vont schématiser la manière dont le relief local est constitué (altitude, encaissement, orientation,...). Ainsi le paysage relatif en chaque point de la grille pourra être représenté en fonction des ses premières composantes. Ces nouvelles variables sont utilisées ensuite afin d'appréhender le lien entre topographie et champs étudié via une régression linéaire multiple. La partie non expliquée par la liaison avec le relief (partie résiduelle du champ) est interpolée par krigeage. La somme des deux champs générés fournit l'interpolation du champ en question.

La méthode PLUVIA est très proche de la précédente avec également une phase d'analyse par régression linéaire multiple, puis une interpolation des résidus par Krigeage. Par contre la manière de coder l'information topographique est différente. Cette méthode se caractérise par une paramétrisation omnidirectionnelle du relief entourant les points de mesures (DUMAS et al., 2003), elle introduit aussi d'autres éléments descriptifs tels que la distance à des grandes lignes de relief susceptibles de jouer un rôle de barrière aux flux perturbés dominants.

HUMBERT et al., (1994) ont effectué la comparaison de PLUVIA avec la méthode AURHELY, au nord-est de la France, ils obtiennent les mêmes résultats sauf pour quelques mois pluvieux là où AURHELY produisait plus d'erreurs ; cela est due probablement aux conditions topographiques spéciales « la barrière vosgienne », AURHELY ne tient pas compte de la distance à une éventuelle barrière.

La méthode PLUVIA a été déjà utilisée dans d'autres études que celle d'HUMBERT et al., (1994), notamment pour établir la répartition des champs pluviométriques annuels et mensuels (DUMAS et al.,

2003), et pour cartographier les pluies orographiques (DROGUE et al., 2002) dans une zone montagneuse au nord-est de la France.

Une autre approche inspirée de la méthode AURHELY a été élaborée par WOTLING et al. (2000). Ils se sont intéressés à la régionalisation des pluies extrêmes à Tahiti en utilisant le relief comme une composante principale. Le domaine spatial de cette étude se rapproche du notre (conditions climatiques et topographiques). L'originalité de cette étude réside du fait que les auteurs ont choisi un échantillonnage des valeurs des pluies extrêmes par la méthode du renouvellement dite «sup-seuil». Il s'agit de retenir toutes les valeurs supérieures à un seuil donné et non le choix d'un maximum annuel pour la détermination des I-D-F (Intensités-Durées-Fréquences). LANG et al. (1997) ont présenté une synthèse détaillée sur cette méthode d'échantillonnage. Ce type d'échantillonnage était utilisé aussi pour la cartographie de l'aléa « érosion des sols » en France (LE BISSONNAIS et al., 1998).

Cependant la difficulté de l'échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil suppose que le processus soit décrit par une loi de poisson, or selon le choix du seuil, il se peut que des valeurs non indépendantes soient sélectionnées (par exemple des valeurs appartenant à un même événement pluvial). Pour pallier ce problème, JAVELLE (2001) propose d'imposer certains critères sur le choix du seuil : soit un critère de re-descente (une valeur minimale atteinte se situant entre les deux valeurs extrêmes, soit un critère de temps écoulé entre les deux. WOTLING et al. (2000) ont choisi pour des intensités de durées inférieures à 24 heures, une durée minimale de 2 heures entre deux événements pour qu'ils soient considérés comme indépendants. Ils ont construit des échantillons statistiques pour des durées allant de 5 minutes à 24 heures. Pour décrire ces valeurs extrêmes de la pluie, ils utilisent la loi GUMBEL, c'est celle qui est classiquement employée pour décrire les valeurs extrêmes (GUMBEL, 1935) ; elle ne comporte que deux paramètres (le Gradex et le paramètre de position). Ils établissent ainsi un ajustement réalisé sur les échantillons « sup-seuil » et cela pour toutes les stations pluviométriques. Pour caractériser l'environnement topographique, ils se basent sur les composantes principales du relief proposées par BENICHOU et LEBRETON (1987). Ils disposent ainsi, pour chaque poste pluviométrique, de différents couples (Gradex, Paramètre de position) caractérisant l'aléa climatique et d'un système de composantes principales décrivant le relief, puis ils utilisent la méthode classique de la matrice de corrélation et la régression ascendante (Stepwise Regression) pour déterminer les différentes composantes principales permettant d'expliquer au mieux la variabilité de l'aléa pluviométrique.

Un modèle d'ajustement des Gradex et des paramètres de position en fonction des composantes principales de l'environnement topographique permet d'établir l'interpolation sur une grille de points. L'interpolation du type « spline » permet de tracer automatiquement les courbes d'iso-Gradex et d'iso-« paramètre de position ».

La méthode de WOTLING et al. (2000), semble être la plus adaptée à notre étude vu les similitudes des conditions climatiques et topographiques.

2. Approche opérationnelle pour la spatialisation des pluies

Puisque les précipitations sont indéniablement l'un des facteurs les plus importants du processus érosif, nous commençons notre analyse par la caractérisation de cet aléa climatique.

Si dans certaines zones du monde les caractérisations ponctuelles de l'aléa climatique peuvent être raisonnablement étendues à des surfaces plus importantes, ce n'est certainement pas le cas à l'île de la Réunion où l'hétérogénéité des pluies est flagrante. Dans cette partie, on cherchera à caractériser ponctuellement les distributions des intensités extrêmes avant d'étudier leur distribution spatiale en fonction de l'environnement topographique.

2.1 Les données pluviométriques et géographiques

Nous disposons de la pluviométrie au pas de temps horaire sur 17 postes, présentant plus de 2 années d'observations et réparties d'une manière plus au moins hétérogène sur la partie ouest nord-ouest de l'île. Les caractéristiques de ses stations sont représentées dans le tableau 2.1 et sur la figure 2.1 (cf. également figure 2.2).

Nous remarquons que les stations 11, 13, 14 et 15 présentent des durées d'enregistrements faibles (<2.8 ans). Les stations voisines 6 et 7 (Petite France), ont des enregistrements complémentaires (lorsque l'une s'est arrêtée, l'autre a démarrée) (cf. figure 2.1).

Concernant les données géographiques, outre les coordonnées (X,Y) et l'altitude (Z) aux postes pluviométriques, nous disposons pour caractériser l'environnement topographique d'un modèle numérique de terrain (MNT) de l'ensemble de l'île au pas de 10 m.

2.2 Analyse des données

Nous retiendrons :

- Que les séries pluviométriques sont de courte durée, ne dépassant pas les 11 années d'observations,

TABLEAU 2.1 : Caractérisation des 17 postes pluviométriques.

Num. Poste	Cod_POSTE	NOM	Coordonnées Gauss-Laborde Réunion		Altitude (m)	Durée Obs. (ans)
			X (m)	Y(m)		
1	97413512	CARREAU-ALFRED	141385.7	52108.94	1375	7.25
2	97413520	COLIMACONS	137577.11	51182.55	790	6.75
3	97413524	MASCARIN	136539.03	50443.23	550	10
4	97413545	ST-LEU CIRAD	136373.83	43615.09	221	6.77
5	97415511	ST-PAUL	138946.48	67054.13	186	6.68
6	97415535	PTE FRANCE - 1	140685.11	60966.1	1125	5.24
7	97415536	PETITE FRANCE	140684.78	61335.17	1200	4.28
8	97415566	PITON MAIDO ONF	145884.6	57832.82	2200	5.12
9	97415590	POINTE DES 3-BA	131338.97	54311.75	7	10
10	97408580	LA NOUVELLE_possession	149868.908	57281.053	1400	11
11	97413550	ETANG-SAINT-LEU (CIRAD)	137237.559	45092.387	420	2.88
12	97413580	PITON SAINT-LEU (CIRAD)	139319.01	40665.615	572	4.82
13	97415550	L'ERMITAGE (CIRAD)	130293.656	58370.028	120	2.65
14	97415516	BDN-SAINT-PAUL	141200.58	65949.01	600	2.52
15	97415541	TAN-ROUGE	136355.84	59116.3	650	2.82
16	97415581	LA SALINE HAUTS	133069.09	55605.95	463	4.77
17	97407520	LE PORT	135127.58	71847.81	11	11

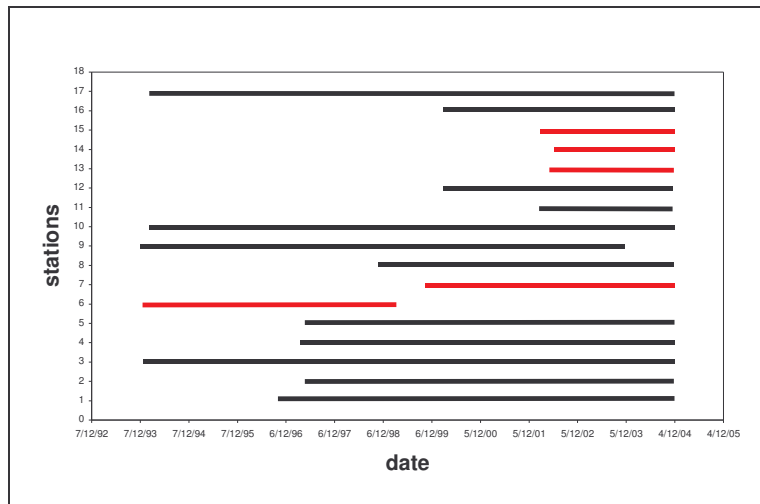


FIGURE 2.1 : Périodes d'observations pour chacune des stations

- Le nombre de poste paraît satisfaisant, mais il est insuffisant pour bien analyser la variabilité pluviométrique qui est très forte dans ce contexte de l'île de la Réunion.
- La répartition hétérogène et la densité des postes, n'autorisent pas une interpolation géostatistique classique des données,
- disponibilité d'un MNT de haute résolution.

Malgré le maque d'information en quantité et en qualité, notre ambition est de dépasser ses limites et d'arriver à une caractérisation spatiale de l'aléa climatique sachant qu'une validation dépend de l'information disponible.

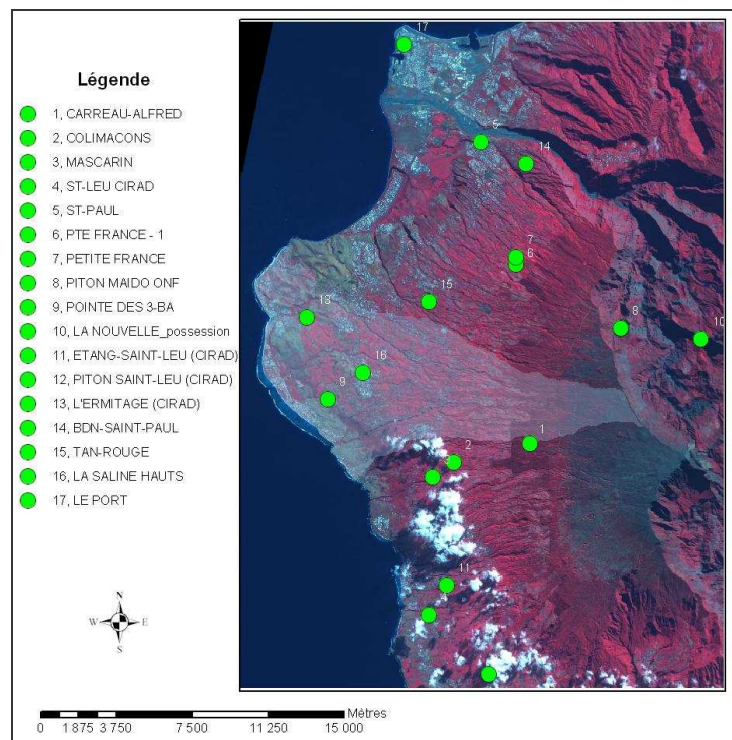


FIGURE 2.2 : Localisation des 17 stations pluviométriques

2.3 Caractérisation ponctuelle des distributions d'intensités extrêmes

Après l'analyse critique des données nous abordons la caractérisation ponctuelle des événements pluvieux extrêmes observés aux différentes stations de mesure.

Nous avons choisi une approche stochastique, en choisissant de déterminer les intensités-Durées-Fréquences (I-D-F). Cela consiste à extrapoler la fréquence des valeurs maximales enregistrées grâce à une expression mathématique de la fonction de répartition ajustée sur les observations (WOTLING et al., 2000). Les lois d'ajustement ou d'extrapolation les plus utilisées pour l'étude des valeurs extrêmes sont les lois Fischer-Toppett (Gumbel et Log-Gumbel) et Log-PearsonIII.

Ces méthodes permettent d'associer une valeur de probabilité à chaque quantile.

2.3.1 Echantillonnage des valeurs extrêmes

Classiquement, la détermination des I-D-F se pratique sur des échantillons contenant une valeur maximale par année. Vu la courte durée de nos séries pluviométriques, nous avons utilisé la **méthode du renouvellement par échantillonnage « sup-seuil »** (LANG et al.,1997) . Cela consiste à retenir toutes les valeurs supérieures à un seuil donné. D'après WOLLING (2000), pour avoir un ajustement robuste, le nombre d'individus dans un échantillon doit être supérieur à $1.65 N_a$, ou N_a désigne le nombre d'années d'observations. Pour appliquer ce type d'échantillonnage, il faut respecter le critère d'indépendance entre les événements. Nous avons considéré que deux événements pluvieux sont indépendants lorsqu'ils sont séparés par une période **sans pluie** d'une durée minimale de **2 heures** (WOTLING et al., 2000). Enfin le seuil au dessus duquel les intensités sont extraites pour la création des échantillons statistiques était fixé à 15 mm/h, cela après quelques essais sur des seuils supérieurs ou inférieurs. Ainsi nous avons 17 échantillons de valeurs d'intensités « sup-seuil » (cf. annexe 3).

2.3.2 Ajustement aux lois de probabilités et définition des I-D-F

La loi que nous avons choisie pour les ajustements est la **loi Gumbel** , classiquement utilisée pour décrire les valeurs extrêmes. Elle présente l'avantage de ne comporter que deux paramètres et une garantie de robustesse de l'ajustement (WOTLING et al., 2000).

La loi Gumbel s'écrit :

$$F(X) = \exp \left[- \exp \frac{X-P_0}{G_d} \right] \quad (\text{Loi Gumbel}) \quad (2.1)$$

avec,

P_0 = Paramètre de position (en mm)

G_d = Gradex (pente de la droite d'ajustement)

Nous pouvons l'écrire autrement :

$$X_p(T) = -G_d \cdot (-\ln(1-1/T)) + P_0 \quad (X_p(T) \text{ est le quantile de période de retour } T) \quad (2.2)$$

En posant $U = -\ln(-\ln(1-1/T))$

L'expression (2.2) devient :

$$X_p(T) = G_d \cdot U + P_0$$

Les ajustements à la loi Gumbel des valeurs « Sup-seuil » des 17 stations ont été réalisés sous le logiciel HYDROLAB¹.

Nous présentons si dessous une courbe d'ajustement (cf. figure 2.3) ainsi que le tableau des Gradex et des paramètres de positions (cf. tableau 2.2). L'ensemble des courbes d'ajustement est présenté en annexe 4.

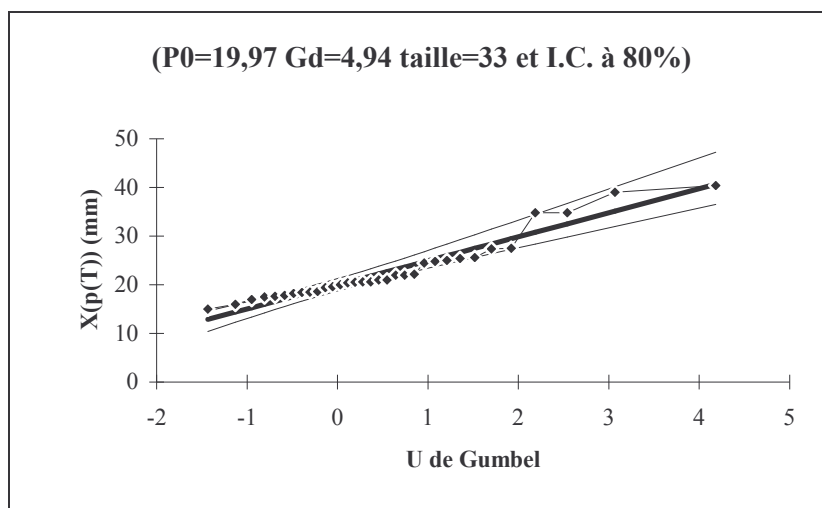


FIGURE 2.3 : Courbe d'ajustement à la loi Gumbel pour la station 1

TABLEAU 2.2 : Paramètres d'ajustement à la loi Gumbel (Gd, P0)

Num. Poste	code Poste	Non du poste	Gd	P0 (mm)
1	97413512	CARREAU-ALFRED	4.94	19.97
2	97413520	COLIMACONS	5.95	20.67
3	97413524	MASCARIN	6.15	20.08
4	97413545	ST-LEU CIRAD	6.24	21.27
5	97415511	ST-PAUL	9.99	19.84
6	97415535	PETITE FRANCE - 1	6.08	21.7
7	97415536	PETITE FRANCE	10.2	22.43
8	97415566	PITON MAIDO ONF	5.31	18.65
9	97415590	POINTE DES 3-BA	7.13	21.84
10	97408580	LA NOUVELLE_possession	8.23	19.77
11	97413550	ETANG-SAINT-LEU (CIRAD)	8.18	22.5
12	97413580	PITON SAINT-LEU (CIRAD)	5.03	20.01
13	97415550	L'ERMITAGE (CIRAD)	6.37	18.57
14	97415516	BDN-SAINT-PAUL	11.48	19.64
15	97415541	TAN-ROUGE	13.53	21.8
16	97415581	LA SALINE HAUTS	10.32	19.95
17	97407520	LE PORT	9.69	22.22

En analysant à première vue les résultats des ajustements, nous constatons que nos échantillons s'ajustent bien à la loi de Gumbel (cf. annexe 4). Nous remarquons aussi que pour les postes 6 et 7 situés au même endroit, les Gradex de pluies présentent une grande différence. Il apparaît que le paramètre de position est relativement stable, pour toutes les stations, avec des valeurs autour de 20 mm. La variabilité spatiale apparaît prononcée au niveau des valeurs du Gradex.

2.4 Distribution spatiale de l'Aléa climatique en relation avec l'environnement topographique

Dans la 1^{ère} partie nous avons exposé les différentes méthodes pour caractériser statistiquement la variation spatiale des précipitations. Dans notre contexte, la forte anisotropie du milieu et la faible densité de stations pluviométriques (faible dans ce contexte) rendent difficile l'identification d'une structure spatiale par une méthode purement statistique. L'intégration du relief paraît indispensable.

¹ HYDROLAB 98.2 : Logiciel réalisé par J.P. LABORDE -Université de Nice Sophia Antipolis.

2.4.1 Caractéristiques de l'environnement topographique

Dans un premier temps nous avons essayé de trouver une relation directe entre la pluviométrie et l'altitude ponctuelle. On constate que la relation est médiocre. (cf. figure 2.4).

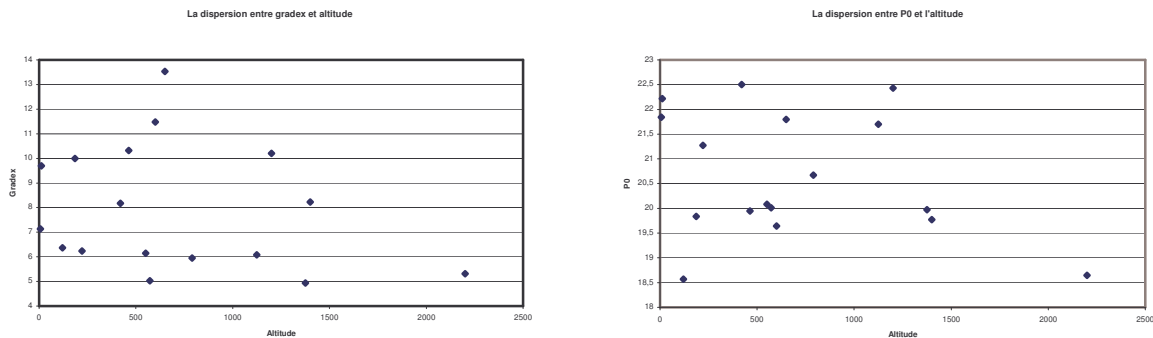


FIGURE 2.4 : La dispersion entre caractéristiques ponctuelles de l'aléa climatique et altitude du poste d'observation

A la place de l'altitude ponctuelle on pourrait utiliser d'autres descripteurs comme l'altitude moyenne autour d'un point sur une fenêtre fixée (HUMBERT et al. 1994), l'encaissement, l'exposition, la pente, la distance à la mer etc... Hors, ces différentes caractéristiques morphométriques nous semblent être bien représentées dans la méthodologie de BENICHOU et LE BRETON (1987) à l'aide **des composantes principales du relief**.

Il s'agit de représenter l'environnement topographique autour d'un point donné de la zone d'étude en fonction des premières composantes principales du relief, c'est à dire, en fonction d'un certain nombre de faciès élémentaires du relief.

La méthode a été appliquée ici à partir d'un extrait du MNT dégradé au pas de 200 m (165 lignes x 120 colonnes) pour faciliter le calcul d'une part, et d'autres part, du fait qu'on estime que les microstructures du relief n'agissent pas sur la pluviométrie.

Pour obtenir ces faciès élémentaires on procède par l'extraction, à partir du MNT, des altitudes sur une grille 51 x 51 (10 x 10 Km²) centrée sur un point. On extrait une grille tout les 2 Km (10 pixels). On obtient ainsi une série de 84 grilles que nous transformons en vecteurs de 2601 valeurs chacun. sur ces vecteurs nous pratiquons une analyse par composante principale (ACP) classique (cf. Fig. 2.5).

Dans notre cas, la procédure d'extraction de grille et de préparation de la base vectorielle, a été faite à l'aide du logiciel « Rgui » grâce à un Script que j'ai développé (cf. annexe 5). Pour l'ACP nous avons utilisé un Script développé sous « Rgui » par R.Sabatier¹. Nous obtenons ainsi les composantes principales et les vecteurs propres associés à cette base vectorielle.

L'environnement topographique en tout point (α) peut être alors représenté par une combinaison linéaire des vecteurs propres (VP) ; les coefficients appliqués aux (VP) sont les composantes principales (CP^α) associées au point (α).

¹ Nom du Script : «acpxqd.R» réalisé par Sabatier R. en l'an 2000 à l'université PIERRE MENDES FRANCE Grenoble 2.

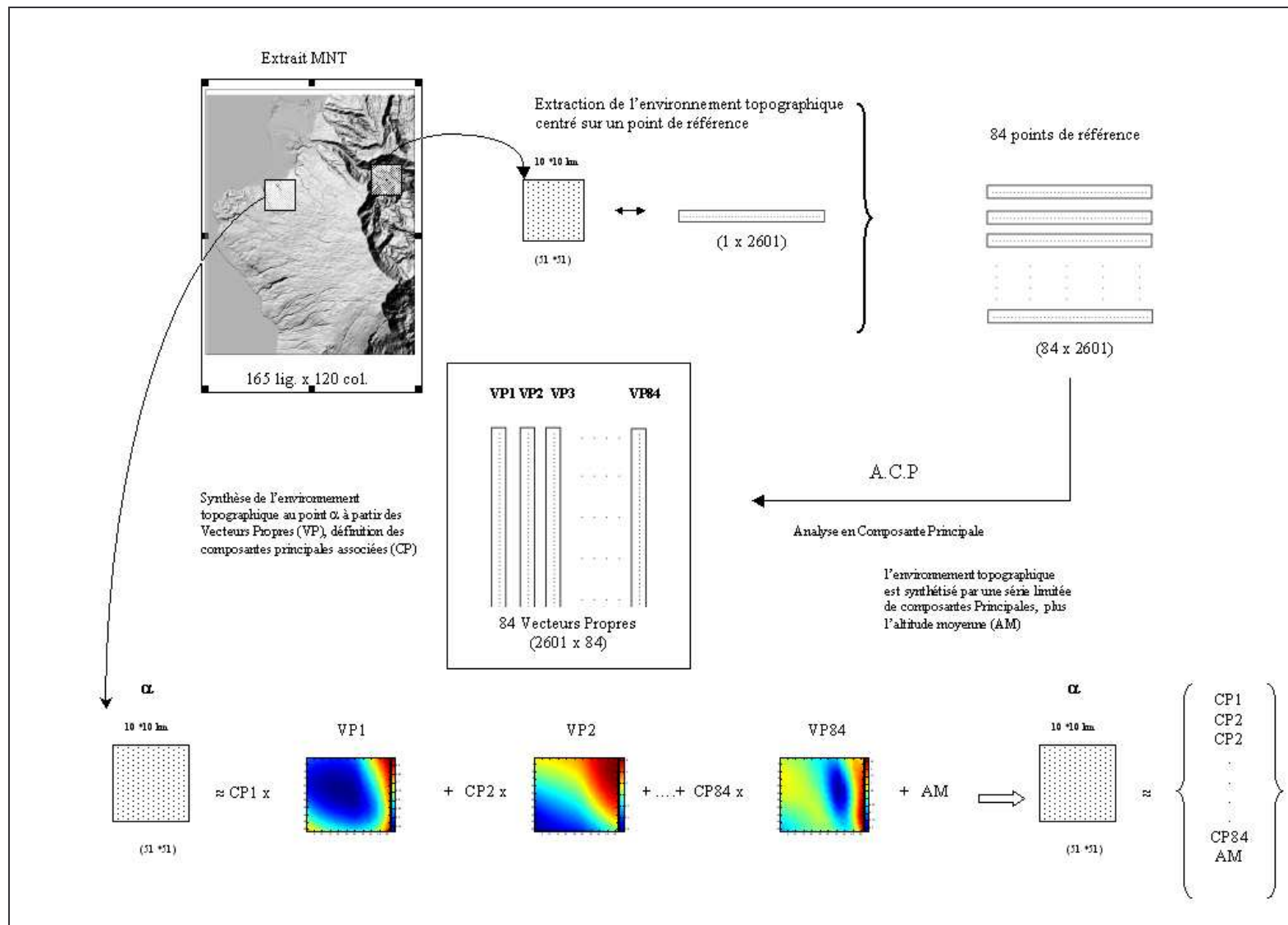


FIGURE 2.5 : Principe de la caractérisation de l'environnement topographique à partir des composantes principales.

Ainsi l'environnement de chaque point (α) peut être synthétisé par une série limitée de composantes principales ($CP_1^\alpha, \dots, CP_N^\alpha$) :

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n = \sum_{p=1}^n (CP_p^\alpha * VP_p) + AM \quad (2.3)$$

$$AM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \text{ l'altitude moyenne autour d'un point.}$$

AM est rajoutée pour reconstituer les données d'origine.

Les 5 premiers vecteurs propres sont représentés dans la figure 2.6.

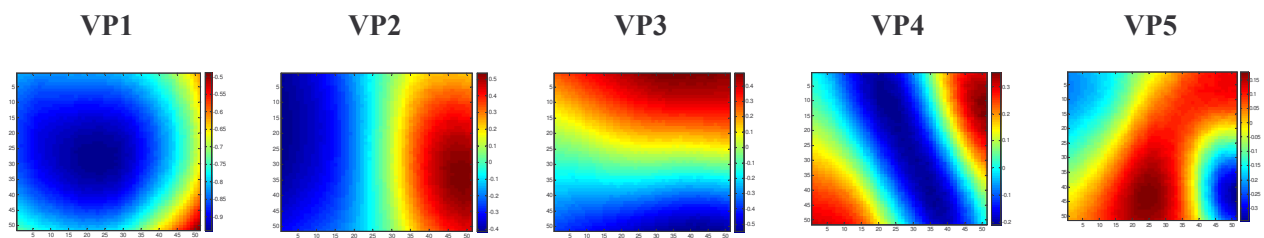


FIGURE 2.6 : Les 5 premiers vecteurs propres du MNT, au pas de 200 m, représentant un environnement topographique de 10 x 10 Km².

Le premier vecteur propre désigne une structure d'encaissement assez large (vallée ou crête) d'orientation nord-ouest sud-est selon le signe de la première composante principale. Le 2^{ème} vecteur propre renseigne une pente d'orientation est-ouest (inversement si CP2 est négative). VP3 désigne une pente nord-sud (inversement si CP3 est négative). VP4 et VP5 renvoient des structures d'encaissement (vallée) ou crête d'orientation réciproquement NO-SE et NE-SO.

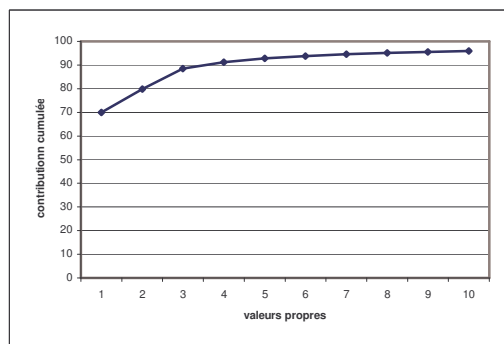


FIGURE 2.7 : Contribution cumulée des valeurs propres

On passe ainsi de 2601 variables altimétriques à 4 variables synthétisant plus que 90 % de l'information topographique (Cf. Figure 2.7). On dispose donc des composantes principale (CP) en 84 points répartie sur l'extrait du MNT. Une interpolation du type spline nous permet de cartographier les valeurs des CP sur l'ensemble de la zone d'étude (cf. annexe 6).

En résumé les vecteurs propres représentent les faciès élémentaires du relief de la zone d'étude et les composantes principales, l'orientation et l'influence relative de chacun de ces faciès dans l'environnement topographique autour d'un point quelconque.

2.4.2 Relation entre l'environnement topographique et la pluviométrie

Nous disposons à ce stade, des paramètres de Gumbel (Gd et P0) en chaque poste pluviométrique, et des composantes principales en chaque point de l'extrait MNT. Nous avons extrait donc les valeurs des CP en chaque poste, nous avons aussi calculé les altitudes moyennes (AM) (cf. tableau 2.3).

TABLEAU 2.3 : Correspondance entre les paramètres des pluies et l'environnement topographique

Postes	Gd	P0 (mm)	CP1	CP2	CP3	CP4	AM
1	4,94	19,97	-53,8722	28,1191	0,3432	-2,1966	1527
2	5,95	20,67	-4,5802	23,8400	10,7478	-2,2827	881
3	6,15	20,08	9,6878	21,1015	13,5896	-0,4317	696
4	6,24	21,27	33,9311	10,8565	13,1396	8,0390	368
5	9,99	19,84	38,7425	2,3914	-9,7236	-1,7266	297
6	6,08	21,7	-11,8770	15,5354	-21,7572	-4,8721	964
7	10,2	22,43	-9,0775	14,5535	-22,1960	-3,8505	925
8	5,31	18,65	-46,2554	-21,3816	-21,3037	3,7112	1389
9	7,13	21,84	43,8811	-0,1306	8,3063	1,4371	226
10	8,23	19,77	-51,4444	2,8068	-26,9869	17,0894	1479
11	8,18	22,5	20,6483	19,5636	15,4580	5,7017	537
12	5,03	20,01	22,9094	8,3899	25,6792	5,1814	503
13	6,37	18,57	47,0956	-3,0473	-1,1928	-2,9988	202
14	11,48	19,64	18,2325	7,7729	-13,0403	1,7891	575
15	13,53	21,8	13,2373	11,0575	-13,0403	0,8686	635
16	10,32	19,95	31,8244	6,9685	4,6161	-1,6881	378
17	9,69	22,22	58,4897	-16,6180	1,2567	-3,2406	18

Nous avons utilisé la méthode de régression multiple pour établir l'ajustement le Gradex (Gd) et les composantes du relief (CP1,CP4, AM). De même pour le paramètre de position P0. Les meilleurs ajustements ont été trouvés avec les 3 premières composantes principales et l'altitude moyenne :

$$\mathbf{Gd = 125 - 1.9 * CP1 + 0.18 * CP2 - 0.15 * CP3 - 0.15 * AM} \quad \mathbf{(2.4)}$$

$$\mathbf{P0 = 63.4 - 0.7 * CP1 + 0.08 * CP2 - 0.03 * CP3 - 0.05 * AM}$$

Nous obtenons des coefficients de détermination (R²) de 93 % pour le Gradex et assez faible pour P0 (44 %) (cf. Fig. 2.8) que nous avons accepté vu que P0 varie très peu (entre 18 et 22 mm), donc n'influence que de peu les valeurs extrêmes de la pluie.

Pour arriver à ces modèles, plusieurs tests ont été effectués, notamment en utilisant différentes combinaisons entre les composantes principales. La station 6 (plus en fonctionnement depuis 1999) et les stations 13, 14 et 15 (de courtes durées d'enregistrements) ont été supprimées.

Concernant le Gradex, l'analyse fait ressortir quatre composantes explicatives, il s'agit respectivement de CP1, CP2, CP3 et AM. CP1 présente un coefficient négatif, cela nous indique que l'aléa pluviométrique est plus important en présence d'une structure d'encaissement crête que dans une vallée ; CP2 présente un coefficient positif indiquant que l'aléa est d'autant plus important que l'exposition Est (pente Ouest-Est) ; CP3 présente un coefficient négatif donc l'exposition Nord augmente l'aléa ; enfin l'altitude moyenne présentant un coefficient négatif, agit en diminuant l'aléa.

On retiendra que les grandes structures morphologiques sont déterminantes par rapport aux organisations plus fines (cf. Fig. 2.6, VP4 et VP5). Ainsi dans la zone d'étude il apparaît que les pluies extrêmes sont conditionnées par l'encaissement (CP1) et un peu moins par le sens et la direction de la pente (CP2 et CP3) et l'altitude moyenne (AM).

Résultats de la régression pour Gd				Résultats de la régression pour P0					
Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)		
(Intercept)	125.04334	31.55903	3.962	0.00416 **	(Intercept)	63.39574	53.66102	1.181	0.271
CP1	-1.88140	0.51828	-3.630	0.00668 **	CP1	-0.68239	0.88126	-0.774	0.461
CP2	0.17703	0.03483	5.083	0.00095 ***	CP2	0.07961	0.05922	1.344	0.216
CP3	-0.14521	0.01750	-8.296	3.36e-05 ***	CP3	-0.02869	0.02976	-0.964	0.363
AM	-0.14805	0.03948	-3.750	0.00563 **	AM	-0.05397	0.06713	-0.804	0.445
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				Residual standard error: 1.124 on 8 degrees of freedom					
Residual standard error: 0.6613 on 8 degrees of freedom				Multiple R-Squared: 0.4359, Adjusted R-squared: 0.1539					
Multiple R-Squared: 0.9309, Adjusted R-squared: 0.8964				F-statistic: 1.546 on 4 and 8 DF, p-value: 0.2777					
F-statistic: 26.95 on 4 and 8 DF, p-value: 0.0001076									

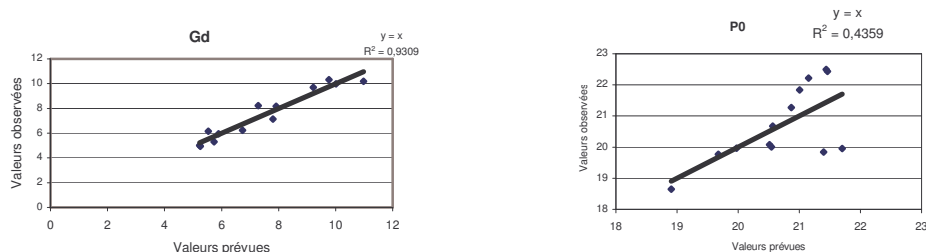


FIGURE 2.8 : Ajustements des modèles Gradex (Gd) et Paramètre de position (P0) en fonction des composantes principales de l'environnement topographique.

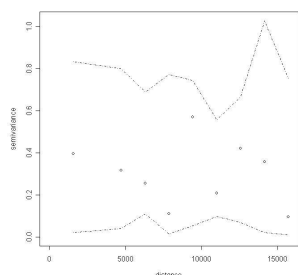
2.4.3 Interpolation et cartographie de l'aléa

Pour interpoler les valeurs ponctuelles du Gd et du P0, nous avons appliqué les modèles précédemment établis (équations 2.4, cf. Fig. 2.8) sur les 84 points de référence régulièrement répartis sur toute la zone d'étude (un point tous les 2 km), pour lesquels nous avons calculé les composantes principales et l'altitude moyenne AM. Une interpolation de type spline permet ensuite d'obtenir une cartographie du Gd et du P0 au pas de 10 m (le même que celui du MNT) (cf. Figure 2.10). Les valeurs aux extrémités de la carte peuvent être insignifiantes (présence de valeurs négatives de Gd). En effet la validité des modèles ne permet pas d'extrapoler indéfiniment en dehors de la gamme de calage. Mais ceci ne pose pas de problème vu la position des bassins versants qui nous intéressent.

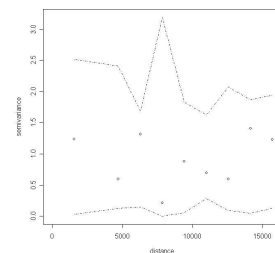
Il aurait été souhaitable de tenir compte des résidus (différences entre valeurs observés et valeurs prévues) pour corriger les valeurs estimées par ajustement sur les observations. Cependant, aucune organisation particulière de ces résidus n'a pu être mise en évidence (cf. Fig. 2.9).

Dans d'autres cas où la liaison avec le relief est moins prononcée et où d'autres facteurs doivent être considérés, pour tenir compte d'une dérive irrégulière, il aurait fallu organiser les résidus puis les interpoler par Krigage et les intégrer dans le modèle final :

$$Gd = a * CP1 + b * CP2 + c * CP3 + d * AM + \epsilon, \quad \epsilon = \text{résidu}$$



H0 = absence de corrélation spatiale.
L'hypothèse H0 est vérifiée pour les résidus du Gradex



H0 = absence de corrélation spatiale.
L'hypothèse H0 est vérifiée pour les résidus de P0

FIGURE 2.9 : Enveloppes de confiance empirique du variogramme par test de permutation

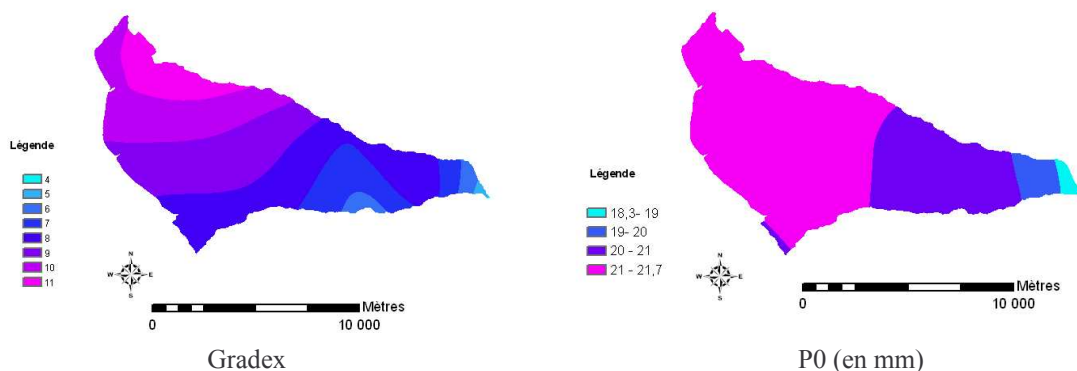


FIGURE 2.10 : Cartes d'Iso-Gradex et d'Iso-P0

Les cartes iso-gradex et iso-P0 sur une zone plus large (zone sur la quelle le calcul a été fait) sont exposées en annexe 7.

Nous remarquons que les valeurs du P0 restent stables autour de 20 mm. Le Gradex est globalement plus élevé au nord.

A partir de deux cartes (cf. Fig. 2.10), nous pouvons calculer grâce à la formule (2.2) les Intensités des pluies extrêmes probables (en mm/h) de période de retour T. Nous les avons calculées pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans (annexe 8), au-delà de 10 ans le résultat devient non pertinent vu la durée des observations pluviométriques disponibles (< 10ans).

3. Conclusion

Il nous semble que la carte des Gradex représente parfaitement l'agressivité des pluies dans notre zone d'étude, c'est donc cette donnée qui sera utilisée pour caractériser l'aléa climatique lors de l'élaboration de la carte aléa « érosion des sols ».

Il aurait été préférable de procéder à une étape de validation des résultats. Cela pouvait être réalisé en isolant quelques stations sur lesquelles on effectuerait la vérification. Mais nous disposons de peu de stations pour procéder ainsi.

Partie 3 - Cartographie de l'aléa « érosion des sols »

En second lieu, le souhait du commanditaire était d'établir une carte de l'aléa à l'érosion, d'ailleurs c'est le but recherché en spatialisant les pluies extrêmes, car on suppose qu'elles font l'essentiel de l'érosion (ZAHAR et LABORDE, 1998), les auteurs ont observé que les valeurs extrêmes de l'érosion sont proportionnelles aux valeurs extrêmes de l'index d'érosivité des pluies (Bassin versant en Tunisie). BEGUERIA et LOPEZ (2001) ont constaté que dans les zones de montagne à fortes dénivellations, les précipitations extrêmes pourraient provoquer des écoulements de boue.

Pour ce qui suit, par érosion, nous entendrons l'érosion des terres agricoles, c'est à dire l'érosion hydrique superficielle des sols (érosion diffuse en nappe et petites formes d'érosion linéaire).

Par aléa nous entendrons la probabilité pour que le processus d'érosion se produise c'est à dire la probabilité pour qu'il y ait arrachement et transport de particule solide (ne pas confondre avec risque).

1. Etat de l'art

Il existe deux types de modèles pour la quantification de l'érosion, nous citons :

- Le modèle empirique de perte en terre de Wischmeier et Smith (USLE), son objectif est la prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre de prévoir les aménagements nécessaires. Ce modèle permet de donner la perte de sol annuelle (en t/ha/an). Ce type de modèle n'est valable que dans les plaines américaines et ne pourra pas être appliqué en zone de montagne (DUCREUX, 2001). En outre, il nécessite de très nombreuses données en entrée, qui ne sont pas disponibles pour cette étude. Ce modèle a été révisé par la suite par Williams : modèle MUSLE (l'équation universelle des pertes en terres modifiée), qui ne tient plus compte de l'agressivité des pluies mais du volume ruisselé.

- Les modèles mécanistes qui s'appuient non plus sur des valeurs moyennes sur un certain nombre d'années mais sur les processus qui se passent au cours de chaque averse élémentaire. Je cite comme exemple le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Model), SIMWE (SIMulation Water Erosion), etc.

D'autres approches sont utilisées par les hydrologues. Cela consiste à mesurer l'érosion par quantification de la charge solide transportée dans le ruissellement concentré de talweg.

Ces modèles sont du type quantitatif et s'appliquent à l'échelle de la parcelle voire plus précis. Cette réduction d'échelle ne permet pas d'intégrer le phénomène dans sa globalité.

Le besoin d'une spatialisation du phénomène a amené l'utilisation d'autres méthodes de travail apportées par le développement des SIG qui permettent d'intégrer de façon dynamique, les informations issues des connaissances des processus. De plus, le passage d'une grande échelle à une petite, peut se faire sous réserve de l'adéquation des données.

Pour l'élaboration de la carte de l'aléa érosif, plusieurs facteurs doivent être pris en compte, principalement la nature du sol, la façon avec laquelle il est travaillé et sa capacité à résister à l'érosion ; le gradient et la longueur de la pente ; la couverture végétale (ARNOLD et al., 1989). Nous pouvons

regrouper ces facteurs en les appelant sensibilité du terrain. Ainsi l'érosion est le produit de l'érosivité des pluies et de la sensibilité des terrains (BROCHOT, 1998).

Dans cette optique je me suis intéressé à la méthodologie développée par l'IFEN et l'INRA (LE BISSONNAIS et al., 1998) qui se base sur un modèle Cognitif (qualitatif) plutôt que quantitatif comme les modèles précédents. Cette méthode prend en compte un certain nombre de facteurs qui en interagissant entre eux conditionnent le processus d'érosion. Ces **facteurs** sont : **le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat.**

Pour caractériser ces facteurs, on définit des **paramètres**, par exemple la pente est un paramètre pouvant caractériser la topographie. Sachant qu'on peut avoir plusieurs paramètres caractérisant un facteur, il est important de bien choisir les paramètres selon leur pertinence et leur disponibilité. A titre d'exemple, il serait probablement mieux de choisir l'énergie cinétique des pluies comme paramètre caractérisant le climat, mais il n'est pas disponible (LE BISSONNAIS et al., 1998).

Les paramètres sont dans un premier temps traités pour en extraire l'information utilisable par le modèle, puis il s'agit, à l'aide d'un arbre de décision, basé sur les dires d'experts, de définir pour chaque combinaison de facteurs, l'intensité de l'aléa érosif.

Les paramètres du modèle sont les suivants :

- **L'occupation du sol**, provenant de la base CORINE Land Cover, regroupé en classes selon la sensibilité à l'érosion ou le degré de protection.
- **La battance** : sensibilité du sol à la dégradation de sa structure superficielle sous l'action des pluies. Elle est liée à l'instabilité structurale des sols, entraîne une diminution de l'infiltrabilité et de la rugosité des sols, permettant au ruissellement de provoquer une érosion diffuse. Cette information est extraite à partir des règles de pédo-transfert (LE BISSONNAIS et al., 1998).
- **L'indice topographique** : A partir du MNT, une pente moyenne (en %) est calculée, ensuite ces valeurs sont regroupées en 8 classes, en fonction de la connaissance du terrain ou des valeurs proposées dans la littérature (LE BISSONNAIS et al., 1998).
- **L'érodibilité** : c'est la stabilité et la cohésion des matériaux parentaux.

A partir de ces paramètres, on détermine une sensibilité du terrain à l'érosion.

Deux autres paramètres combinés sont pris en compte pour caractériser le facteur climatique, ce sont les **hauteurs d'eau mensuelles de précipitations**, et les **intensités de pluies**. Celles-ci permettent d'obtenir une carte pour chaque saison. La méthode a montré aussi son efficacité à petite échelle (LE BISSONNAIS et al., 2004), (MOKRANI, 2005).

Cette méthodologie nous semble la plus appropriée à notre problématique. Cependant il faudra l'adapter au type de données disponibles et à l'échelle de notre travail. Une étude similaire a été faite par le BRGM à l'échelle de toute l'Île de la Réunion (CHEVALIER et al., 2002) se basant sur la construction d'un modèle numérique de l'érosion hydrique basé sur un SIG. La base de données géographiques est alimentée par plusieurs facteurs : le climat, la topographie (la pente), le substratum (le sol, et le sous sol pour les affleurements) et l'occupation du sol. La battance des sols n'a pas été prise en compte. Le

facteur climatique a été représenté par les pluies moyennes mensuelles, ce qui à notre avis n'indique pas totalement l'agressivité de la pluie, les intensités n'étaient pas prises en compte.

2. Approche opérationnelle

Nous avons décidé d'utiliser un modèle cognitif inspiré de la méthode IFEN.

2.1 Présentation des données spatialisées disponibles

Les données qui ont été utilisées dans cette partie du projet sont présentées ci-dessous par thème :

- Climat et hydrologie : Carte de l'agressivité des pluies (cf. partie 1)
- Topographie : Un modèle numérique de terrain au pas de 10 m fourni par le BRGM
- Nature du substratum : nous utiliserons les données issues de la carte géologique au (1/50 000) du BRGM, et la carte morphologique au 1/50 000 du CIRAD (RAUNET, 1988) disponible en format numérique (mode vectoriel).
- Occupation de sol : Les types d'occupation du sol ont été tirés à partir des images à très haute résolution (SPOT 5 THR) (DURIEUX, 2005), cependant certains polygones ont dus être requalifiés (« zones non classées » en zones hétérogènes).

2.2 Constitution de la base d'informations géographiques.

Pendant cette phase je me suis attaché à organiser et calculer les données dérivées des données disponibles pour déterminer les paramètres nécessaires au modèle de l'aléa à l'érosion.

Le tableau 3.1 montre les correspondances qu'on a choisies entre les facteurs de l'érosion et les paramètres qu'on a choisi.

TABLEAU 3.1 : Facteurs et paramètres de l'érosion

Facteurs	Paramètres
Le sol	L'érodibilité, l'aptitude au ruissellement
L'occupation du sol	Occupation du sol
La topographie	Indice de pente
Le Climat	Agressivité des pluie (carte des Gradex)

Dans l'impossibilité d'avoir des données physiques des sols permettant de déterminer le paramètre battance, nous avons choisi un autre paramètre : « l'aptitude du sol au ruissellement », qu'on considère inversement proportionnel à l'infiltrabilité.

Pour délimiter la zone d'étude, nous avons utilisé le MNT pour extraire les bassins versants ayant comme exutoire le Lagon. Toutes les couches d'information sont ensuite basées sur cette délimitation.

Premier paramètre : L'occupation du sol

Nous avons regroupé l'occupation du sol en 7 classes selon le degré de protection de l'érosion (du faible au fort) (cf. Tableau 3.2). les zones urbaines ne sont pas traités.

TABLEAU 3.2 : Classification de l'occupation du sol

Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Vergers et bouquets d'arbres	Zones de friches et végétation éricoïde	Zones hétérogènes	Prairies et savanes	Canne à sucre	Forêts	Urbain

Deuxième paramètre : Aptitude au ruissellement

Trois classes ont été choisies (aptitude faible , moyenne et forte) selon le dire d'experts, à partir de la carte morpho-pédologique (cf. tableau 3.3).

TABLEAU 3.3 : Aptitude au ruissellement

Aptitude au ruissellement	Types des sols
Faible	Les sables
Moyenne	Les sols bruns,
Forte	Les Andosols, les sols peu évolués, les vertisols, les affleurements.

Troisième paramètre : l'indice topographique :

Pour améliorer le MNT, une première étape consiste à éliminer les « puits locaux », pour éviter toute incohérence du type rupture d'écoulement. Ensuite nous avons calculé les pentes (en %). Pour l'amélioration du paramètre pente, nous avons calculé les surfaces drainées. A partir de ces deux couches nous avons calculé l'index combiné de l'érosivité des écoulements, qui représente l'énergie potentielle des ruissellement, selon un modèle se basant sur le tableau suivant :

TABLEAU 3.3 : Modèle de prise en compte des surfaces drainées pour l'amélioration du paramètre pente

Flow Accumulation (Ha)	≤ 3	Entre 3 et 20	> 20	
Slope				
1 (0 – 1%)	1	2	3	Combined Runoff Erosivity Index.
2 (1 – 2%)	2	3	4	
3 (2 – 5%)	3	4	5	
4 (5 – 10 %)	4	5	6	
5 (10 – 15%)	5	6	7	
6 (15 – 30%)	6	7	7	
7 (30 – 75%)	7	7	7	
8 (> 75%)	8	8	8	

Nous avons donc un indice topographique en 8 classes que nous avons regroupé en 4 classes [faible (de 1 à 3), moyen (4 et 5), Fort (6 et 7) très fort (8)].

Quatrième paramètre : l'érodibilité

A partir de la carte morpho-pédologique et de la carte géologique (pour les affleurements), nous avons pu déterminer trois niveaux de sensibilité tirés de la classification établie par le BRGM (CHEVALIER et al., 2002), (cf. tableau 3.4).

TABLEAU 3.4 : Hiérarchisation des classes pédologiques et géologiques selon leur érodibilité

Classes	Types des sols ou d'affleurements
Sols peu érodibles	Coulées (localement vertisols) Sols bruns vertiques Coulées affleurantes , tufs du Maïdo
Sols érodibles	Cônes volcaniques, coulées de lave phase 4 Piton des neiges Escarpements volcano-tectoniques ou intra-flets. Pavage de blocaille sur couche litée de cendres et de lapilli. Sols bruns andiques Sols ferruginisés caillouteux peu épais et nombreux affleurements.
Sols très érodibles	Sols bruns peu épais associés à des affleurements blocailleux sur coulées 'AA'. Andosols, Sables

Pour pouvoir appliquer le modèle, chaque couche d'information est d'abord rasterisée selon une maille unique (10 m , celle du MNT) pour homogénéiser les différentes échelles des sources de données et pouvoir ainsi les croiser spatialement. Les différentes couches sont présentées en annexes 9 à 14.

Nous avons résumé notre approche dans la figure 3.1.

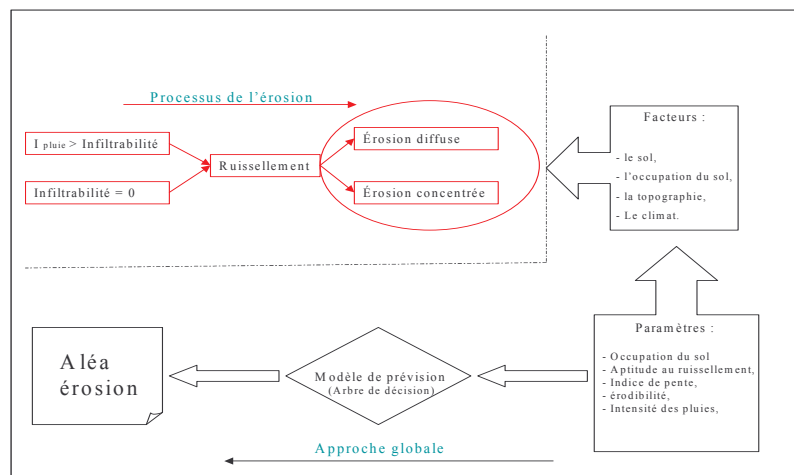


FIGURE 3.1 : Approche globale pour la détermination de l'Aléa érosion

2.3 Application du modèle

Après la superposition géographique des différentes couches d'information, le modèle a été appliqué en deux temps (manipulations faites sous ArcGis 8.3) :

- tout d'abord, nous caractérisons la **sensibilité potentielle des terrains à l'érosion** (cf. Fig. 3.2 et annexe 16), en combinant les différents paramètres selon l'arbre de décision (Annexe 15). L'arbre de décision qu'on a adopté est inspiré de celui utilisé par l'IFEN (LE BISSONNAIS et al., 1998). Le développement d'un tel arbre nécessite l'avis d'experts, pour analyser toutes les possibilités et pouvoir prendre une décision sur la valeur de la sensibilité. Nous n'avons pas eu le temps de développer cette étape nécessitant un séjour de longue durée à l'île et la disponibilité des experts sur place ; mais l'avantage d'un tel modèle est qu'il peut être alimenté et modifié à n'importe quel moment,

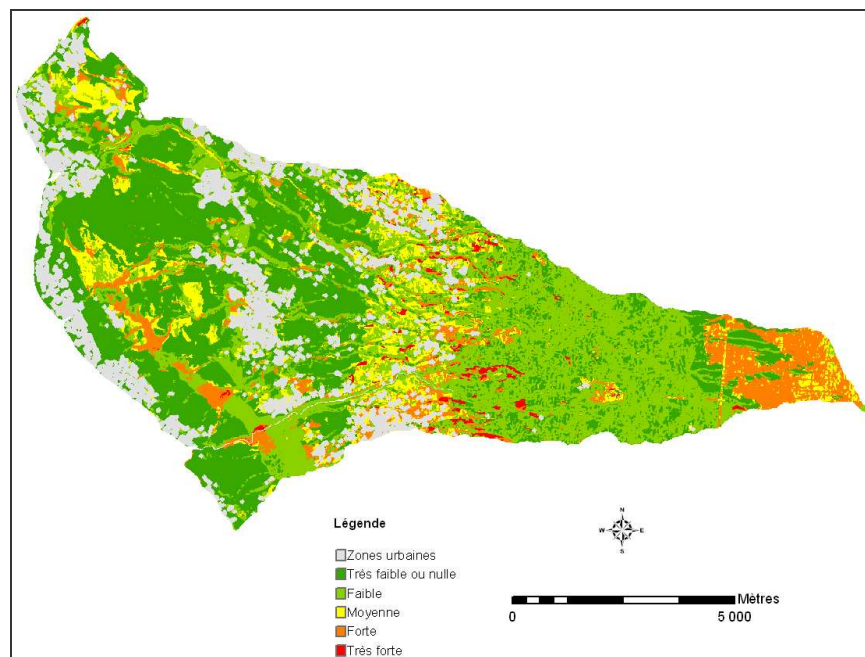


FIGURE 3.2 : Sensibilité potentielle des terrains à l'érosion

- ensuite on combine la **sensibilité** et l'**agressivité des pluies** pour avoir l'**Aléa à l'érosion** à l'aide des règles suivantes (cf. Tableau 3.5) :
 - Si l'agressivité des pluies est faible, la classe Aléa est identique à celle de la sensibilité
 - Si l'agressivité des pluies est moyenne, nous augmentons la classe sensibilité de 1 unité, ce qui nous donne alors la classe Aléa.
 - Si l'agressivité des pluies est forte, on augmente la classe sensibilité de 2 unités (sauf la classe 5 qui ne bouge pas).

TABLEAU 3.5 : Combinaison de la sensibilité des terrains et l'agressivité des pluies

Sensibilité Des terrains	Agressivité des pluies			Aléa à l'érosion
	Faible Gd : [4 , 5]	Moyenne Gd : [6 , 8]	Forte Gd : [9 , 11]	
1	1	2	3	
2	2	3	4	
3	3	4	5	
4	4	5	5	
5	5	5	5	

Nous obtenons ainsi la carte d'aléa « érosion des sols » ci-dessous (cf. Fig. 3.3 et annexe 17)

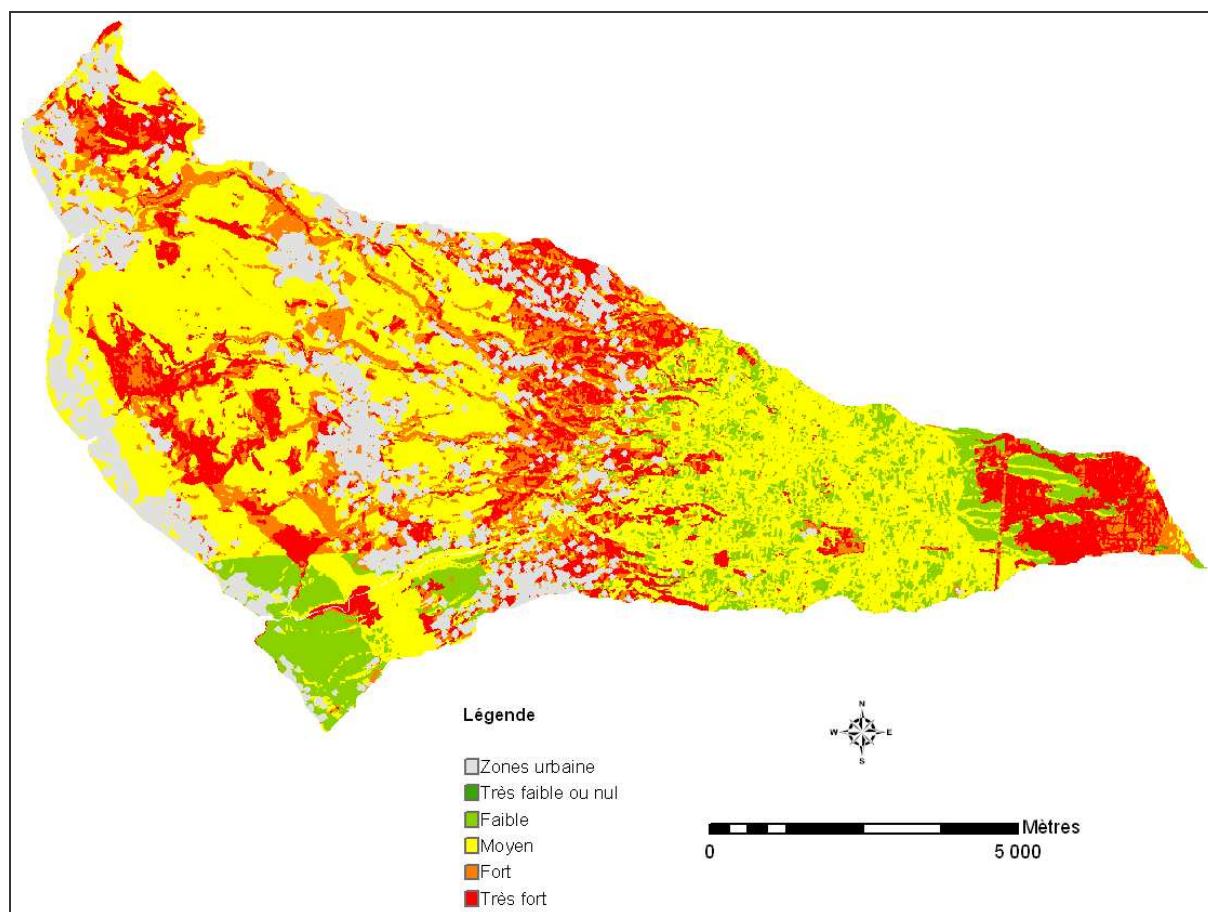


FIGURE 3.3 : Carte de l'aléa « érosion des sols »

3. Analyse des résultats :

3.1 Analyse de la carte de sensibilité des terrains à l'érosion :

En partant des hauts vers les bas des bassins versants, on distingue les zones les plus sensibles qui se caractérisent par couvert une végétation éricoïde peu couvrante sur andosols et affleurements, au niveau de la forêt et des prairies la sensibilité est faible voir nulle sauf à quelques endroits. La zone de transition entre les prairies et la canne à sucre est très hétérogène, la sensibilité varie de faible à très forte, ce sont des zones où se développent des cultures maraîchères sur pentes fortes.

Vers les moyennes altitudes, la sensibilité baisse pour devenir très faible du fait de la présence de la canne à sucre qui est une couverture protectrice.

Jusqu'au littoral la sensibilité est faible à moyenne sauf dans quelques zones de savane où elle est très forte.

Donc nous voyons bien qu'un des facteurs les plus déterminants est l'occupation des sols qui peut être modifiée à tout moment par l'homme.

3.2 Analyse de la carte de l'aléa « érosion des sols »

Rappelant que l'aléa érosion tel que nous l'avons défini est la probabilité pour qu'il ait arrachement et transport de particule solide (cf. définitions en annexe 18). Donc nous avons réuni les conditions extrêmes en intégrant les pluies extrêmes au modèle.

A première vue, en regardant la carte de l'aléa, nous constatons que l'aléa moyen prédomine, l'aléa est très fort à l'Est, il est Fort à très fort dans la zone de transition entre la canne à sucre et les prairies, et dans quelques endroits formant un cordon avant les zones urbaines bordant le littoral. Nous remarquons aussi que l'aléa est fort à proximité des zones urbaines.

Conclusion et Discussion

La première partie de mon travail a été consacrée à la **spatialisation des pluies extrêmes**. Lors de cette partie, nous avons adopté une démarche qui a déjà porté ses fruits dans un contexte similaire, à Tahiti par WOTLING et al. (2000). Cependant, il aurait été préférable d'appliquer la méthode à l'échelle de toute l'île pour prendre en compte l'influence du relief de l'île dans sa globalité. Malheureusement les données météorologiques n'étaient pas disponibles à cette échelle. Une étape de validation auraient été nécessaire, mais non faite pour les mêmes raisons.

Concernant la démarche qualitative adoptée pour la cartographie de l'**aléa érosion**, elle nous a paru la plus exacte, compte tenu du manque de données quantitatives dont nous disposons. D'ailleurs quantifier l'érosion n'a pas été les propos de la commande. D'autres modèles quantitatifs existent déjà. Ils nécessitent des données précises et exhaustives qui ne sont pas toujours disponibles, nous citons à titre d'exemple, en terme d'occupation du sol, le taux de la couverture végétale, des mesures de turbidité dans le lagon etc... L'avantage d'une telle démarche est qu'elle fournit une information spatialisée pouvant être utilisée comme support d'aide à la décision en localisant assez rapidement les zones qui doivent être prioritairement contrôlées et protégées. Nous pouvons même effectuer des simulations sur l'influence des changements de climat ou d'occupation des sols.

Ce type de modèle n'est pas figé mais au contraire peut être alimenté à chaque moment ou à chaque constat de changement possible des paramètres à l'entrée. A titre d'exemple, nous pourrions rajouter le paramètre « battance des sols » une fois que les données physiques des sols sont disponibles.

L'influence des zones urbaines n'était pas prise en compte dans ce travail. Par rapport aux dires d'experts rencontrés sur le terrain, les habitations récentes causent beaucoup de dégâts, en augmentant la surface et le volume des ruissellements. Hors dans notre carte d'occupation des sols, celles-là ne sont pas indiquées. Ce modèle pourra donc être amélioré par la consultation des experts sur place (rectification de l'arbre de décision).

Même si les résultats obtenues semblent raisonnables, vu que l'on utilise plusieurs plans pondérés sur des bases extérieures avec des échelles différentes, il est difficile d'établir une étape de validation. Le seul moyen est le retour sur le terrain avec les experts et comparer les résultats à des observations ou à des données sur l'érosion elle-même acquises par d'autres voies. On pourrait ainsi acquérir des informations plus précises pour effectuer une réelle validation.

Ma visite sur le terrain, parvenue en saison sèche, ne m'a pas permis d'établir un constat sur l'érosion en activité, donc des visites en saison humide s'imposent pour une validation du modèle. Cette visite m'a permis par contre de rencontrer des universitaires et des sociétés privées dans diverses disciplines, les avis sur la problématique convergent vers la complexité du processus, les solutions ne peuvent être

trouvées qu'en réunissant les compétences des différents experts, et à mon avis le type de modèle proposé permet cette confrontation.

Je réponds donc par ce travail à la lettre de commande en fournissant une méthodologie reproductible, la démarche pourra ainsi servir au commanditaire dans d'autres contextes similaires.

BIBLIOGRAPHIE

DURIEUX L. (2002). *Cartographie de l'occupation des sols à très haute résolution 19p.*[In : AGIL, (2005). *Rapport final Réunion.*]

ARNOLD J.B., WALL G., MOORE N., BALDWIN C.S., SHELTON I.J., (1989). *L'érosion du sol - Causes et Effets.* Fiche technique. <http://www.gov.on.ca/OMAFRA/french/engineer/facts/89-064.htm>. Consulté le 10/06/05.

BEGUERÍA, S. et LOPEZ, I. (2001). *Estimation régionale du risque de précipitations extrêmes en zones de montagne.* Communication, XIV Colloque international de climatologie, Sevilla. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/clima_atmosfera/cap2.pdf. pp. 95-96, Consulté le 12/06/05.

BENICHO P., LE BRETON O., (1987). *Prise en compte automatique de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques.* La Météorologie, 7ème série (19), pp. 23-34.

BROCHOT S., (1998). *Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle - Apports des versants et production de sédiments.* Ingénieries - E A T, n° 15, pp. 61-78.

CHEVALIER P., DE LA TORRE Y. HEBERT A., KAUFMANT T., coll. CHABALIER P-F., (2002). *Cartographie de l'aléa « érosion des sols » à la Réunion – Phase2 : Caractérisation et cartographie (1/100 000 à 1/50 000) de l'aléa érosion.* Rapport BRGM RP-52031-FR 2002 SGR/REU 22, 67p., 51 fig., 7tab., 3ann.

CRESSMAN G.P., (1959). *An operational objective analysis system.* Monthly Weather Review Vol. 87, No. 10, pp. 367–374.

DROGUE G., HUMBERT J., DERAISME J., MAHR N., FRESLON N., (2002). *A statistical-topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall.* International Journal of Climatology, 22 (5), pp. 599-613.

DUCREUX J.-M., (2001). *Contribution à la cartographie de l'aléa « érosion pluviale superficielle agricole » à la Réunion -Analyse de méthodologie existantes.* Mémoire de « DESS Sciences et gestion de l'environnement tropicale », Université de la Réunion. 78p.

DUMAS D., MIETTON M., HUMBERT J., (2003). *Le fonctionnement hydroclimatique de la cuvette lacustre de Maharlou (Iran).* Sécheresse. 14 (4), pp.219-226.

GRATON Y., (2002). *Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale* les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, juin 2002. http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf consulté le 13/06/2005.

GOOVAERTS P., (1999). *Performance comparison of geostatistical algorithms for incorporating elevation into the mapping of precipitation.* Proceedings of Geocomputation 99. http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/023/gc_023.htm. Consulté le 10/06/2005.

GUMBEL E.J., (1935). *Les valeurs extrêmes des distributions statistiques.* Annales de l'I.H.P., tome 5, n°2, pp. 115-158.

HUMBERT J., PERRON L., PERRIN J.L., (1994). *Precipitation mapping in mountainous area : comparison of two statistical models.* Proceedings of the International Conference «Developments in Hydrology of Mountainous Areas», FRIEND-AMHY-IHP V, High Tatras, Slovakia, Technical Documents in Hydrology n°8, UNESCO, Paris, pp. 70-75.

JAVELLE P., (2001). *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale.* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1^{er} mars, 253p.

JIANG Q., (2003). *Moist dynamics and orographic precipitation.* Tellus A 55(4), pp. 301-316.

LANG M., RASMUSSEN P., OBERLIN G. & BOBÉE B., (1997). *Échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement.* Rev. Sci. Eau 10 (3) : pp. 279-320.

LE BISSONNAIS Y., MONTIER C., DAROUSSIN J., KING D., (1998). Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. Rapport IFEN-INRA, collection Etudes et travaux n°18, 52p.

LE BISSONNAIS Y., DUBREUIL N., DAROUSSIN J., GROCE M., (2004). *Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale, exemple du département de l'aisne*. Etudes et Gestion des Sols, Vol. 11, 3, pp. 307-321.

MESTRE BARCELÓ A., *report on rainfall spatialisation*. Cost 718 Meteorological applications for agriculture. <http://agromet-cost.bo.ibimet.cnr.it/fileadmin/cost718/repository/mestre2.pdf>. Consulté le 05/06/2005.

METEO FRANCE : http://www.meteofrance.com/FR/climat/fiche_reun.jsp. Consulté le 05/06/05.

MOKRANI A., (2005). *Géoréférencement des zones sensibles au ruissellement et à l'érosion sur le bassin Seine-Normandie*. Mémoire de fin d'études Présenté pour l'obtention du DIPLÔME D'AGRONOMIE APPROFONDIE, Agro. Montpellier, Agence de l'eau Seine-Normandie. 67 p.

RAUNET M., (1988). *Aperçu sur le milieu physique et les sols andiques de la Réunion*, Préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires, séminaire de Saint-Denis mai-juin 1988, pp 53-75.

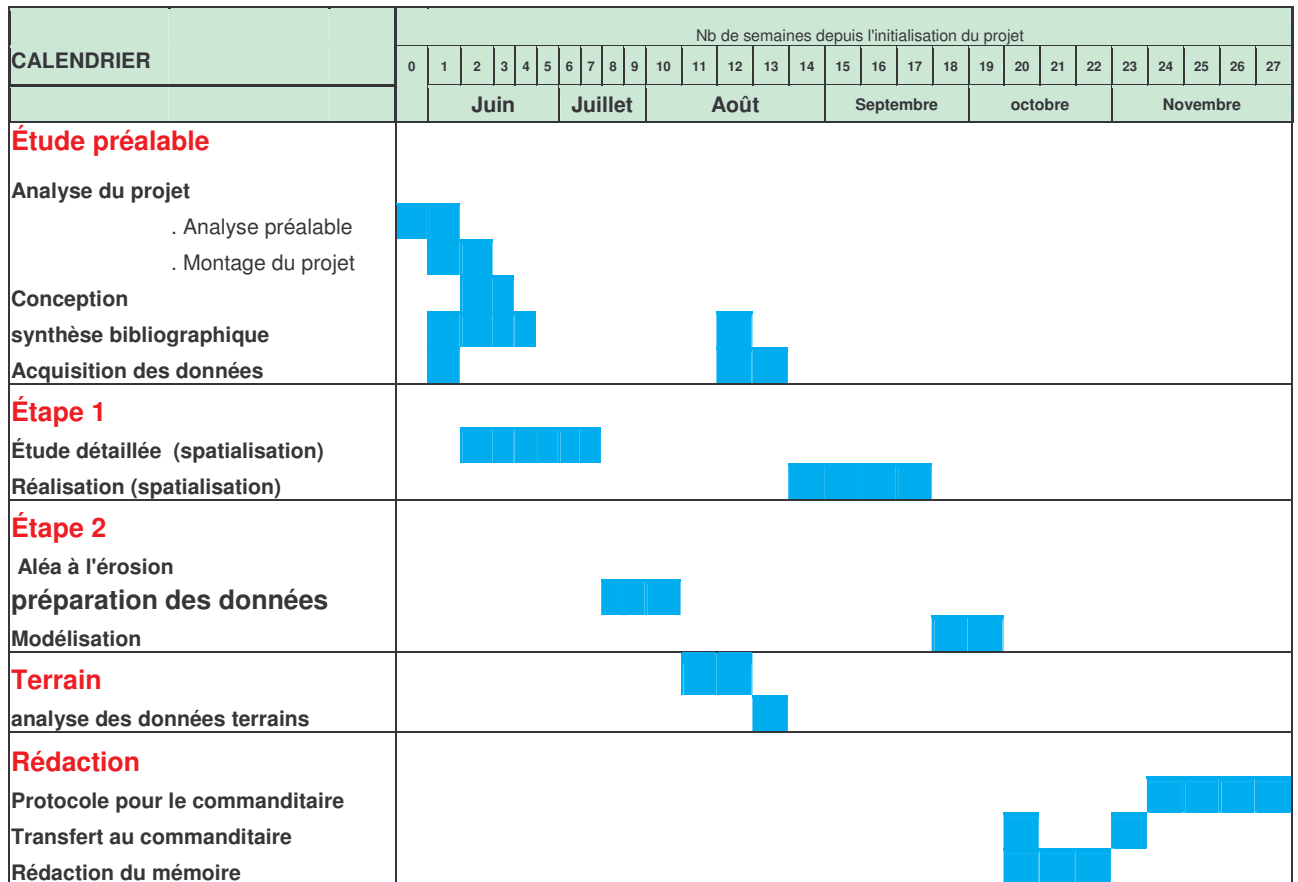
THIESSEN A.H., et ALTER J.C., (1911). *Precipitation averages for large area*. Monthly weather review, Vol. 39, pp. 1082-1084. In : (GOOVAERTS P., 1999).

WOTLING G., BOUVIER CH., DANLOUX J., FRITSH J.M., (2000). *Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment*. J. Hydrol. Vol. 233, pp. 86-101.

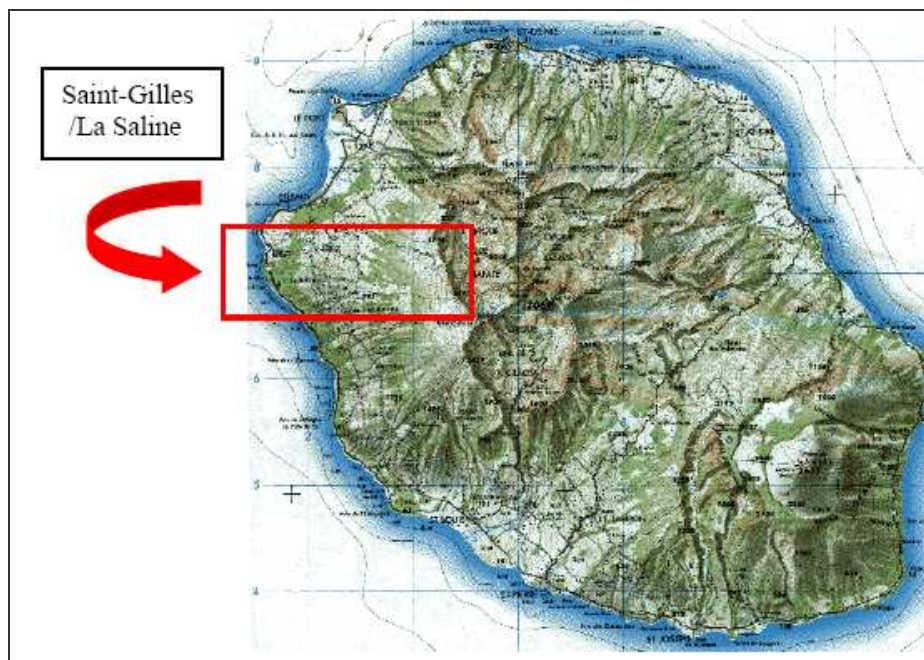
ZAHAR Y., et LABORDE J.P., (1998). *Une méthode stochastique pour la prédétermination des fluctuations probables des durées de service des réservoirs collinaires en Tunisie*. Rev. Sci. Eau, Vol. 11 (1), pp. 25-42.

ANNEXES

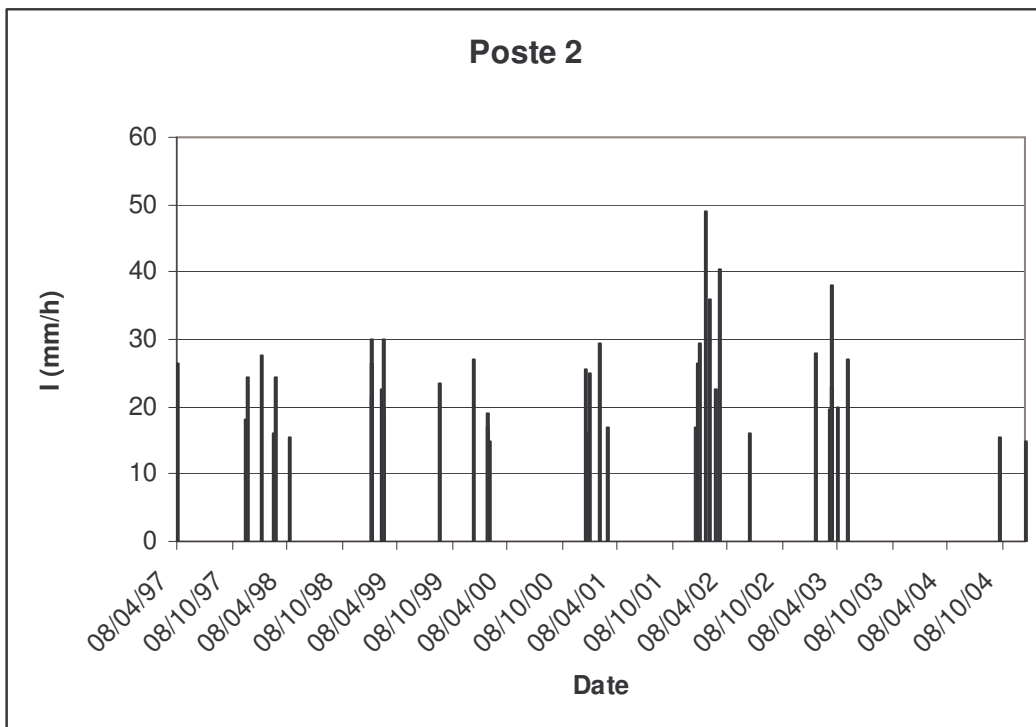
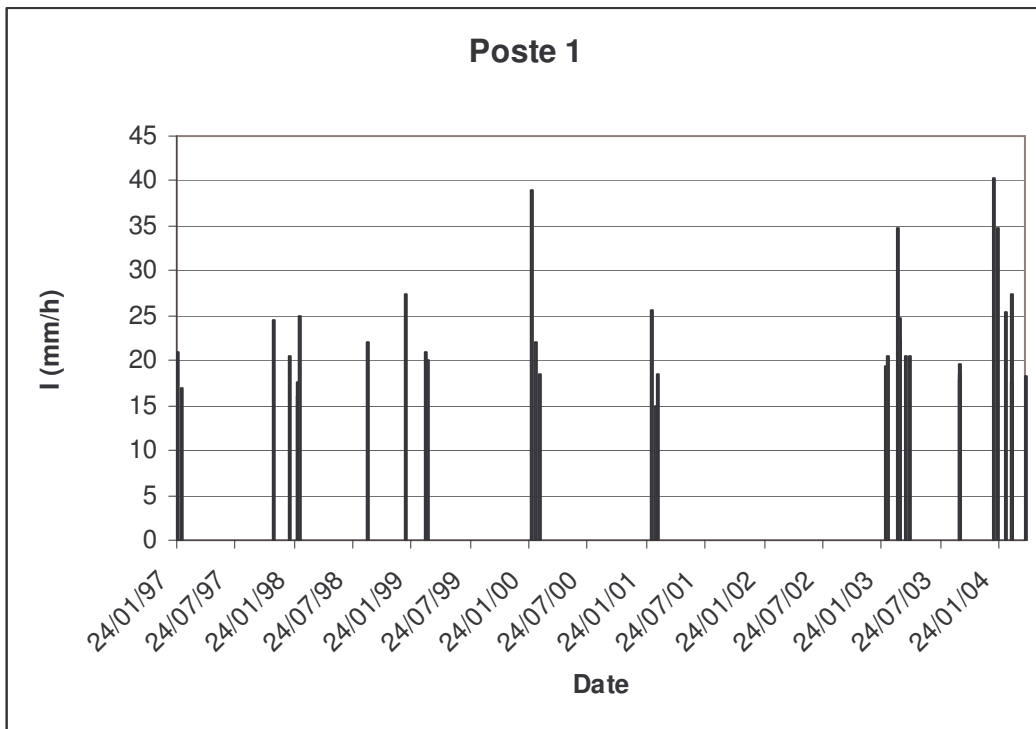
ANNEXE 1 : Chronogramme



ANNEXE 2 : Localisation de la zone d'étude

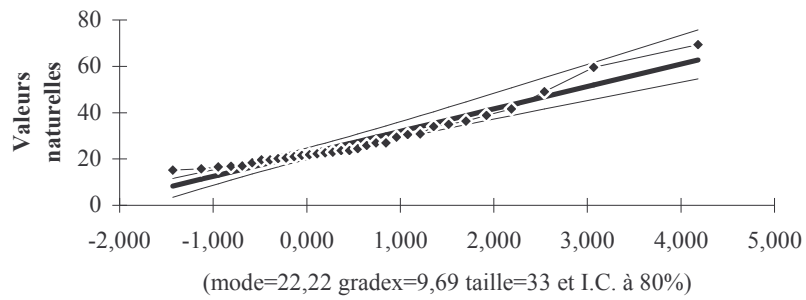


ANNEXE 3 : Echantillons des valeurs sup-seuils (exemples postes 1 et 2)

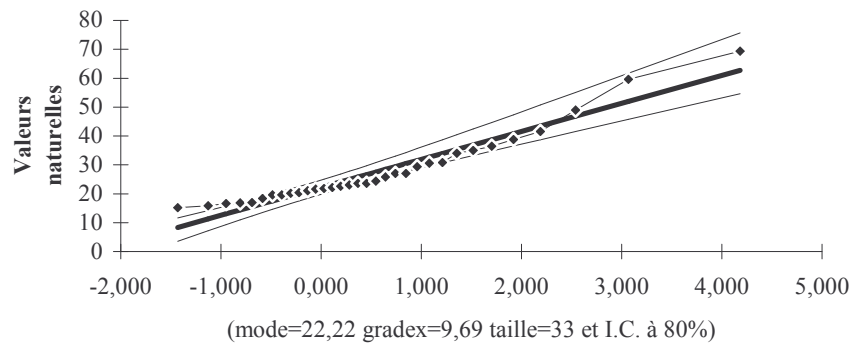


ANNEXE 4 : Courbes d'ajustement à la loi Gumbel (exemples des stations 1, 2 et 3)

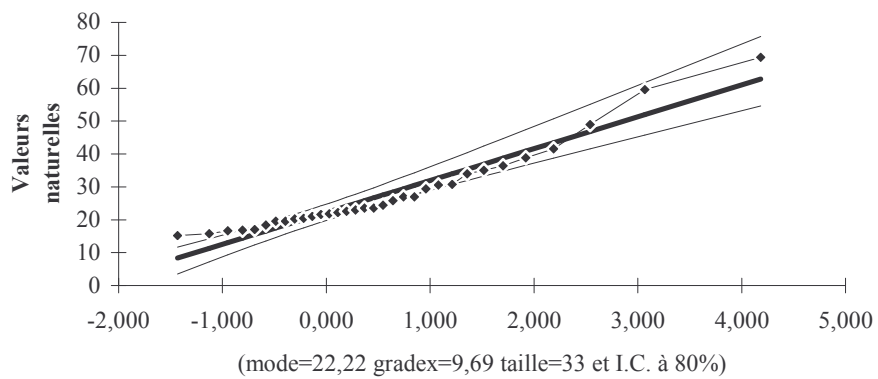
Ajustement à une loi de Gumbel st. 1



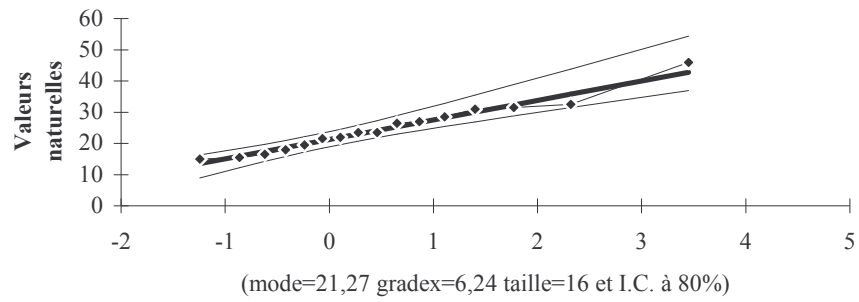
Ajustement à une loi de Gumbel st 2



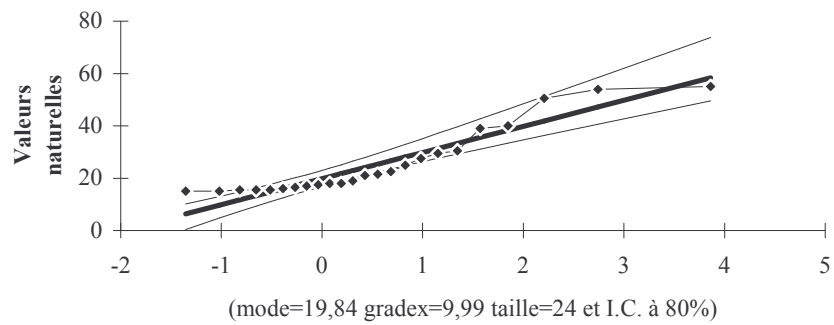
Ajustement à une loi de Gumbel st.3



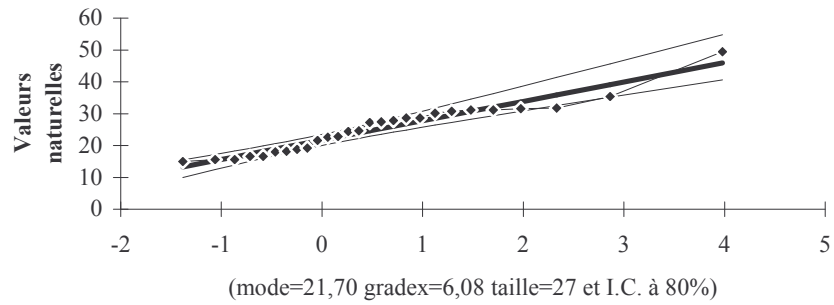
Ajustement à une loi de Gumbel st. 4



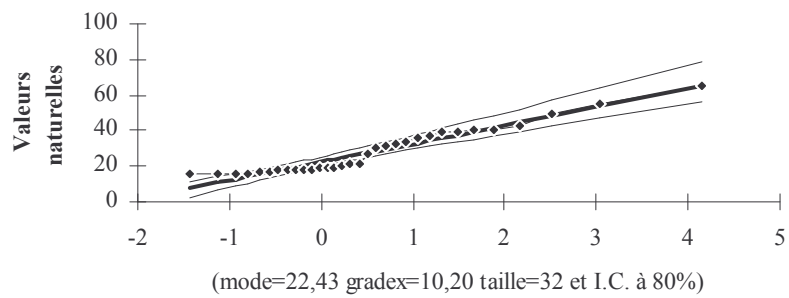
Ajustement à une loi de Gumbel st. 5



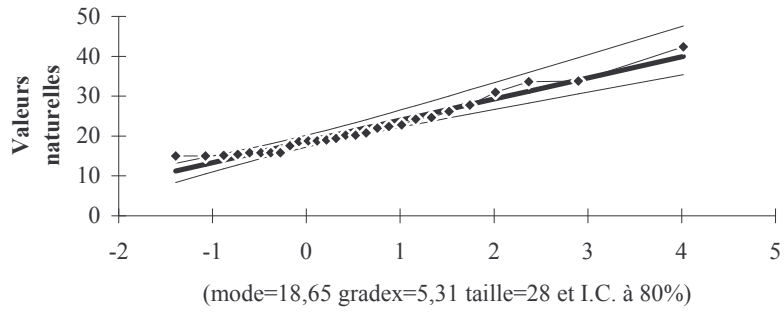
Ajustement à une loi de Gumbel st.6



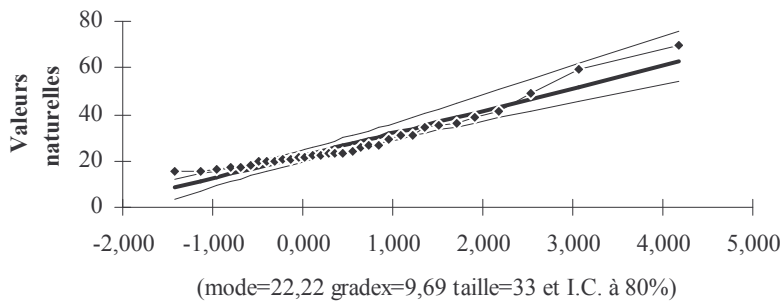
Ajustement à une loi de Gumbel st.7



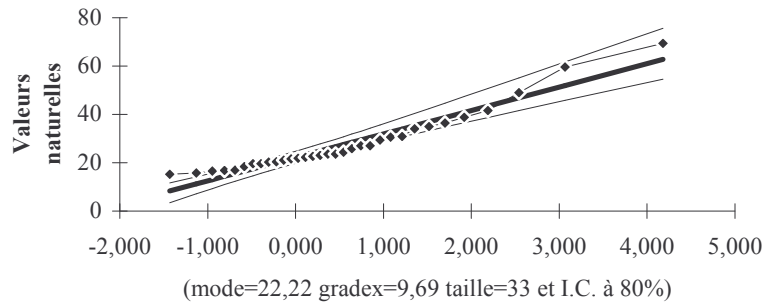
Ajustement à une loi de Gumbel st.8



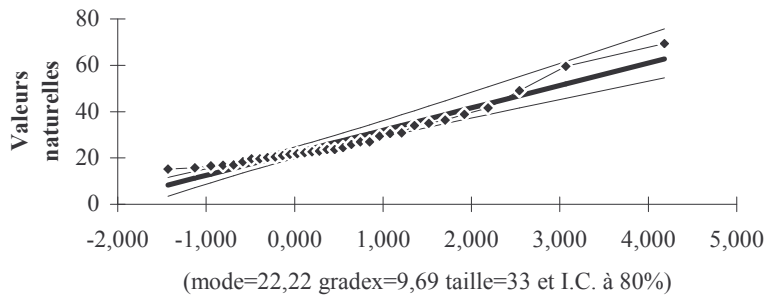
Ajustement à une loi de Gumbel st. 9



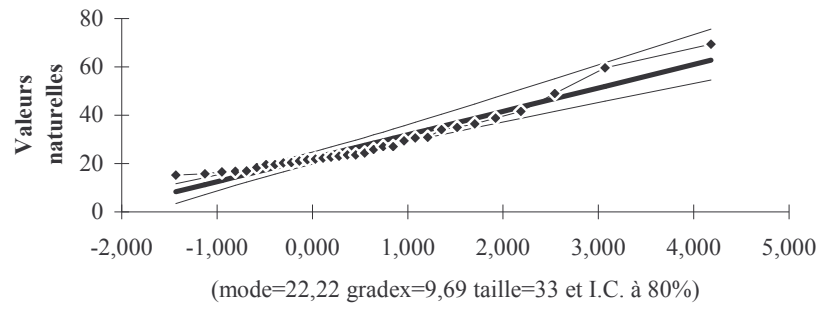
Ajustement à une loi de Gumbel st. 10



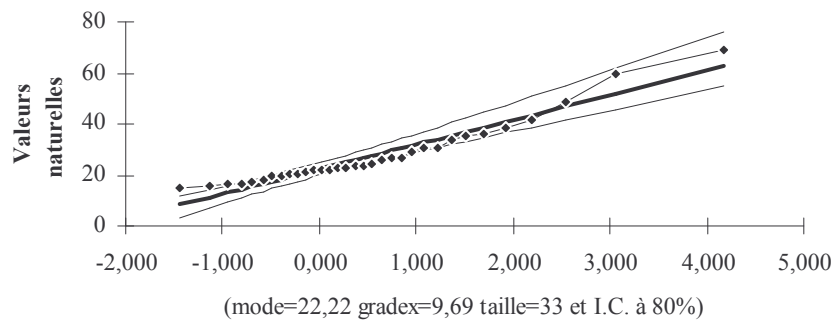
Ajustement à une loi de Gumbel st. 11



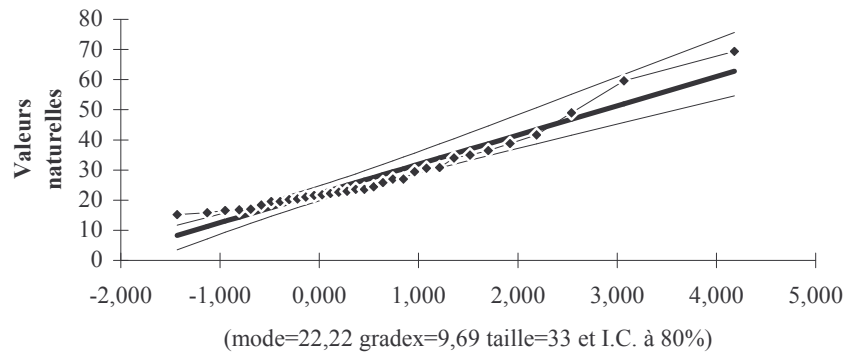
Ajustement à une loi de Gumbel st. 12



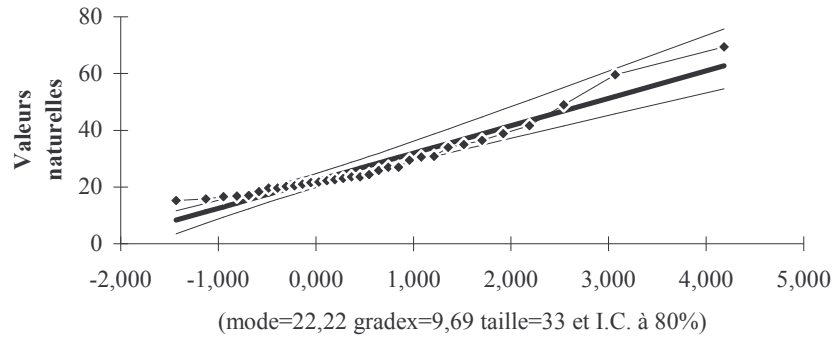
Ajustement à une loi de Gumbel st. 13



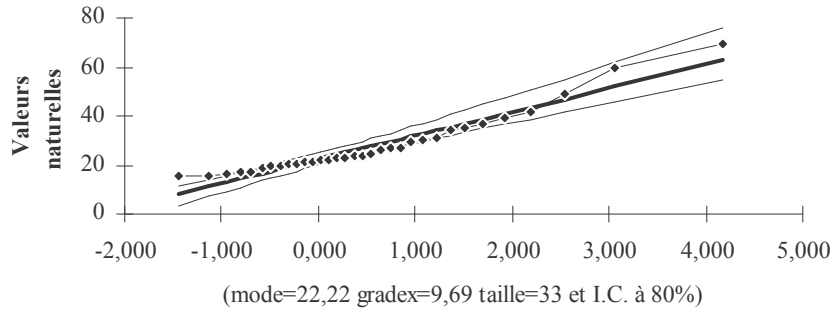
Ajustement à une loi de Gumbel st.14



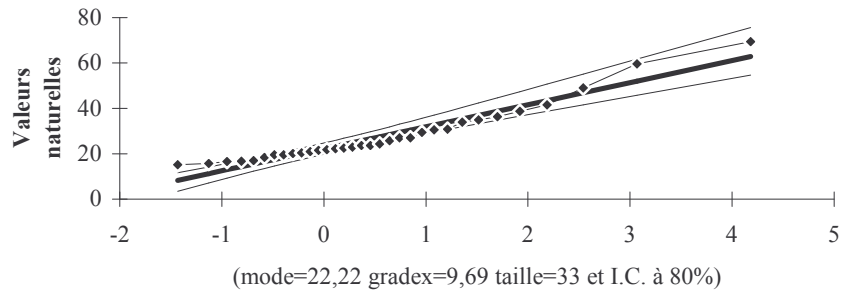
Ajustement à une loi de Gumbel st.15



Ajustement à une loi de Gumbel st.16



Ajustement à une loi de Gumbel St. 17

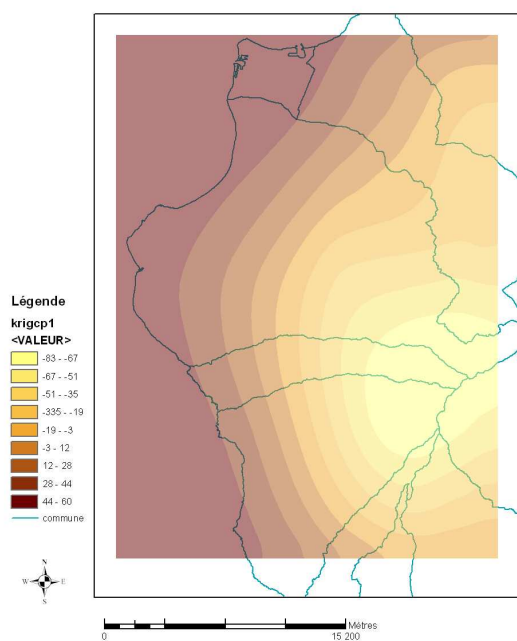


ANNEXE 5 : Script « R » pour l'extraction des grilles (51 x51) d'un MNT, calcul de la moyenne d'altitude autour d'un poste pluviométrique et sur tout le MNT

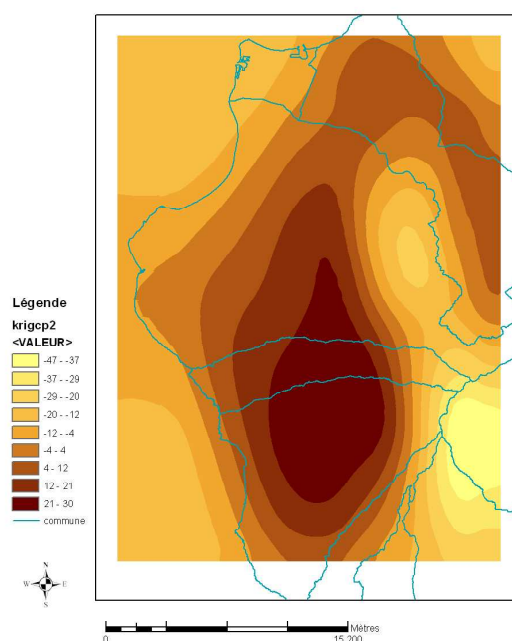
```
#création de la matrice mnt dans R à partir du fichier mnt200.txt#
mnt200<-matrix(scan("mnt200.txt"),ncol=150, byrow=T)
#enlever les valeurs négatives et les remplacer par 0#
mnt200[mnt200<0]<-0
#extraction de grilles et création de la matrice d'entrée à l'ACP#
mat200<-matrix(nrow=660, ncol=2601)
grille<-function(i,j)
{
grille<-c(t(mnt200[i:(i+50),j:(j+50)]))
return(grille)
}
k=1
for(i in 1:33)
{for(j in 1:20)
{l=(5*i)-4
m=(5*j)-4
mat200[k,] <- grille(l,m)
k=k+1}}
#calcul des moyennes sur une grille de 51x51 autour des postes pluviométriques
en connaissant les coord.images (pixels)#
#exemple pour le poste pluviométrique 1#
#initialiser i et j selon les coordonnées pixels du poste#
i=...
j=...
P1<-c(t(mnt200[(i-25):(i+25),(j-25):(j+25)]))
mean(P1) #retourne le moyenne des altitudes autour du point(i,j)#
#Calcul des altitudes moyennes sur le MNT et création de la matrice de réception des moyennes:
moymnt<-matrix(nrow=163, ncol=100)
l=1
k=1
for (i in 26:188)
{for(j in 26:125)
{
P<-c(t(mnt200[(i-25):(i+25),(j-25):(j+25)]))
m<-mean(P)
moymnt[l,k]<-m
k=k+1
}
l=l+1
}
write.table(moymnt, file="moymnt.txt", sep=" ", dec=".", row.names=FALSE, col.names=FALSE)
```

ANNEXE 6 : Représentation cartographique des premières composantes principales du relief

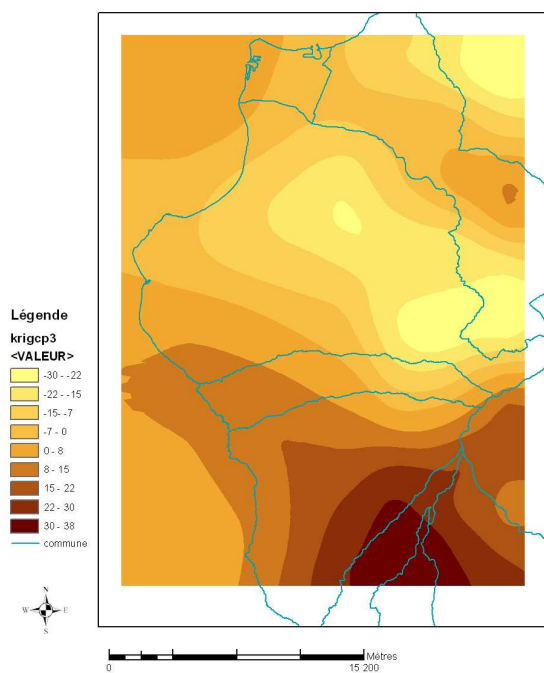
CP1



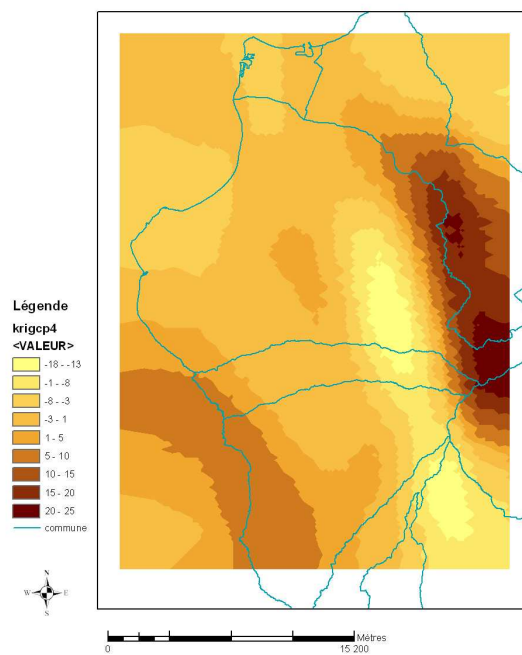
CP2



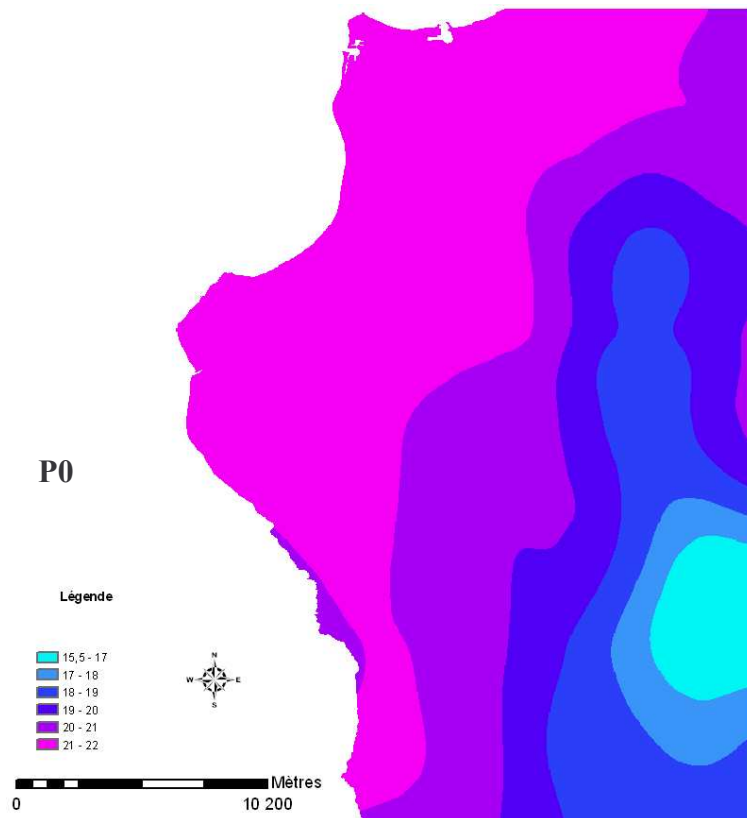
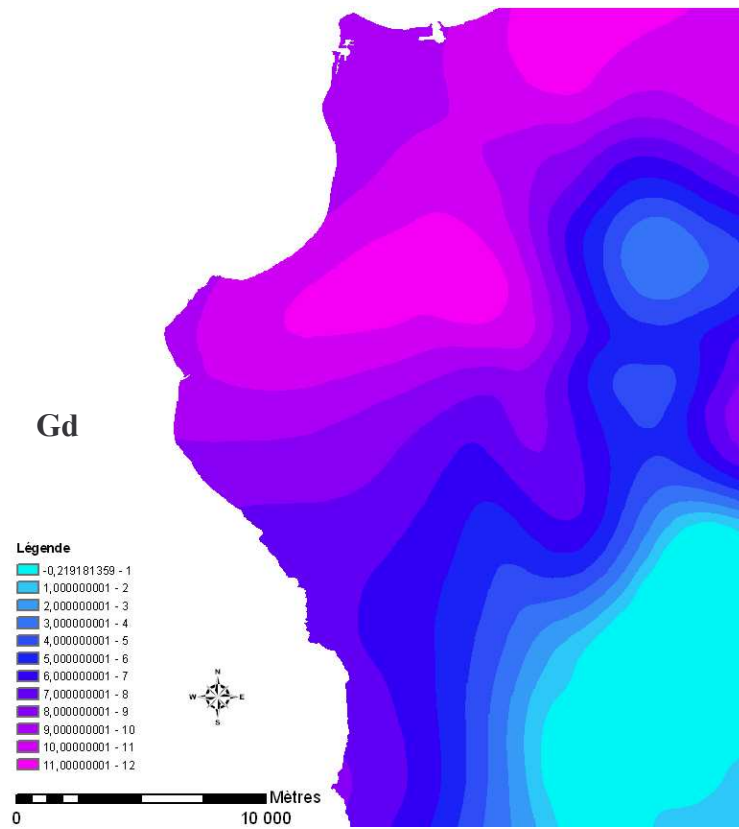
CP3



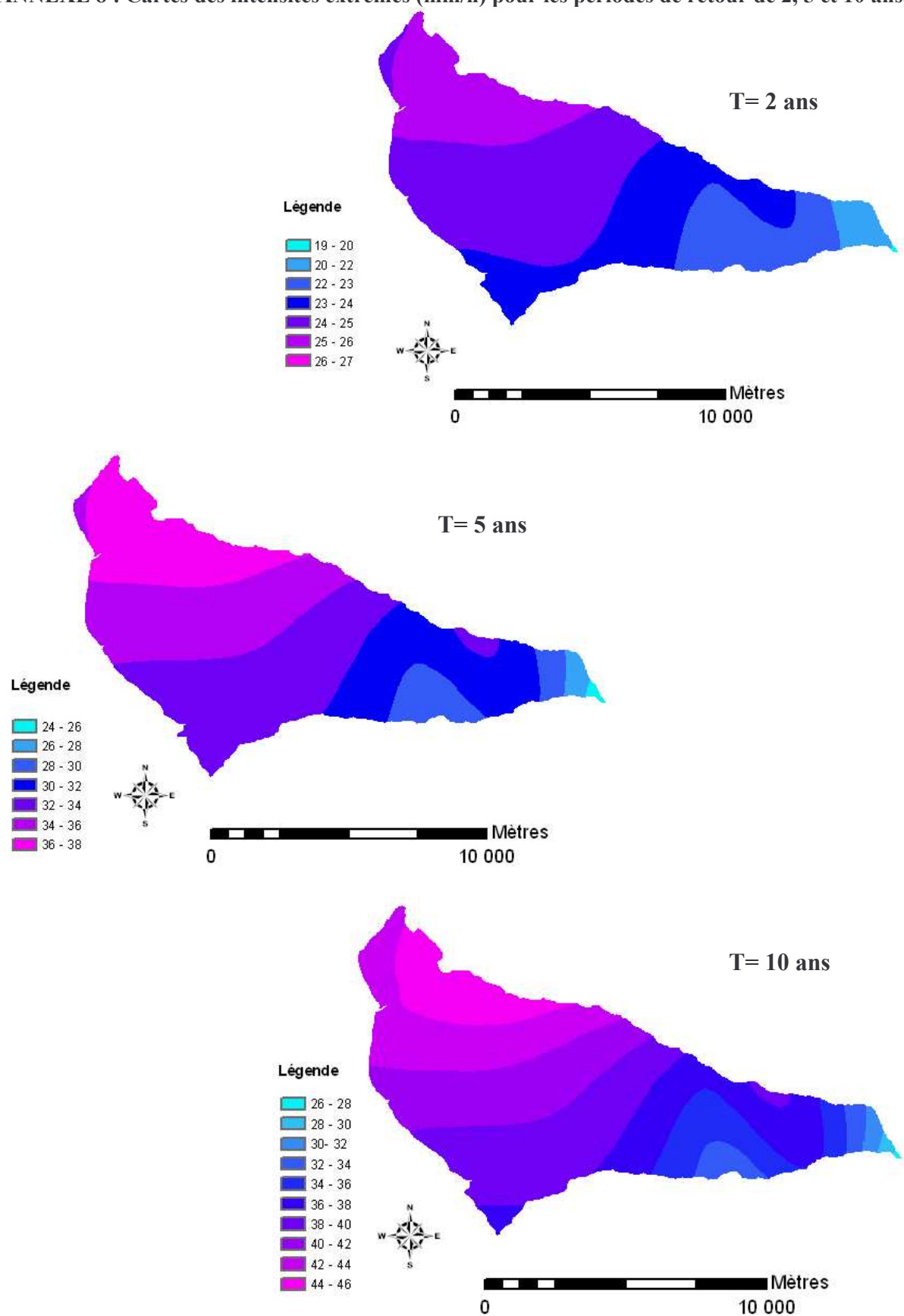
CP4



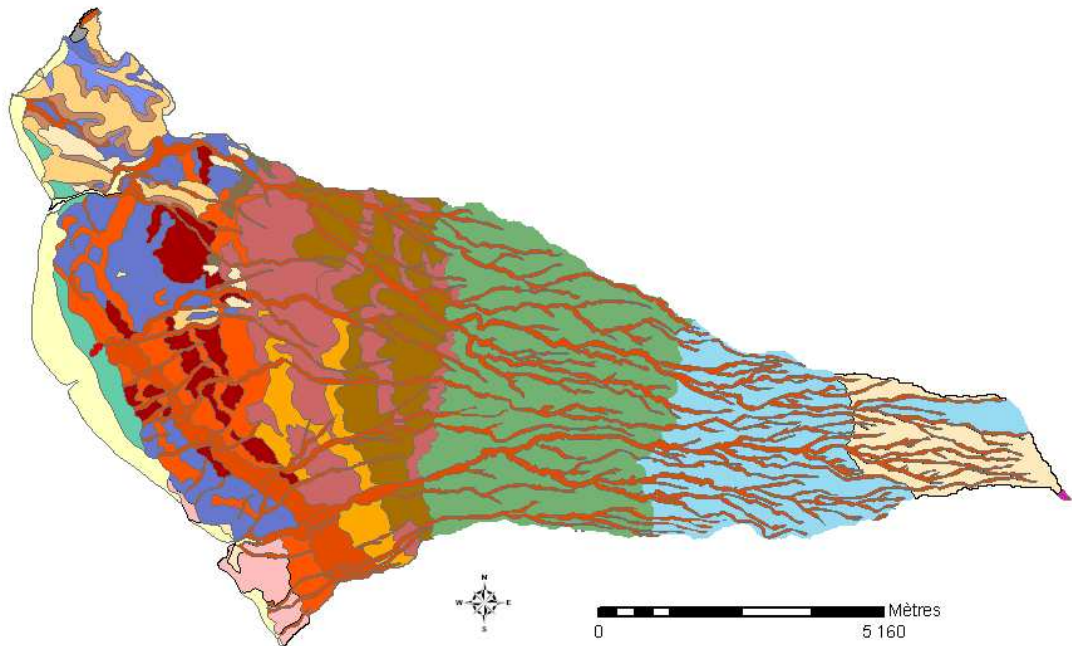
ANNEXE 7 : Cartes du gradex (Gd) et du paramètre de position (P0)



ANNEXE 8 : Cartes des intensités extrêmes (mm/h) pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.



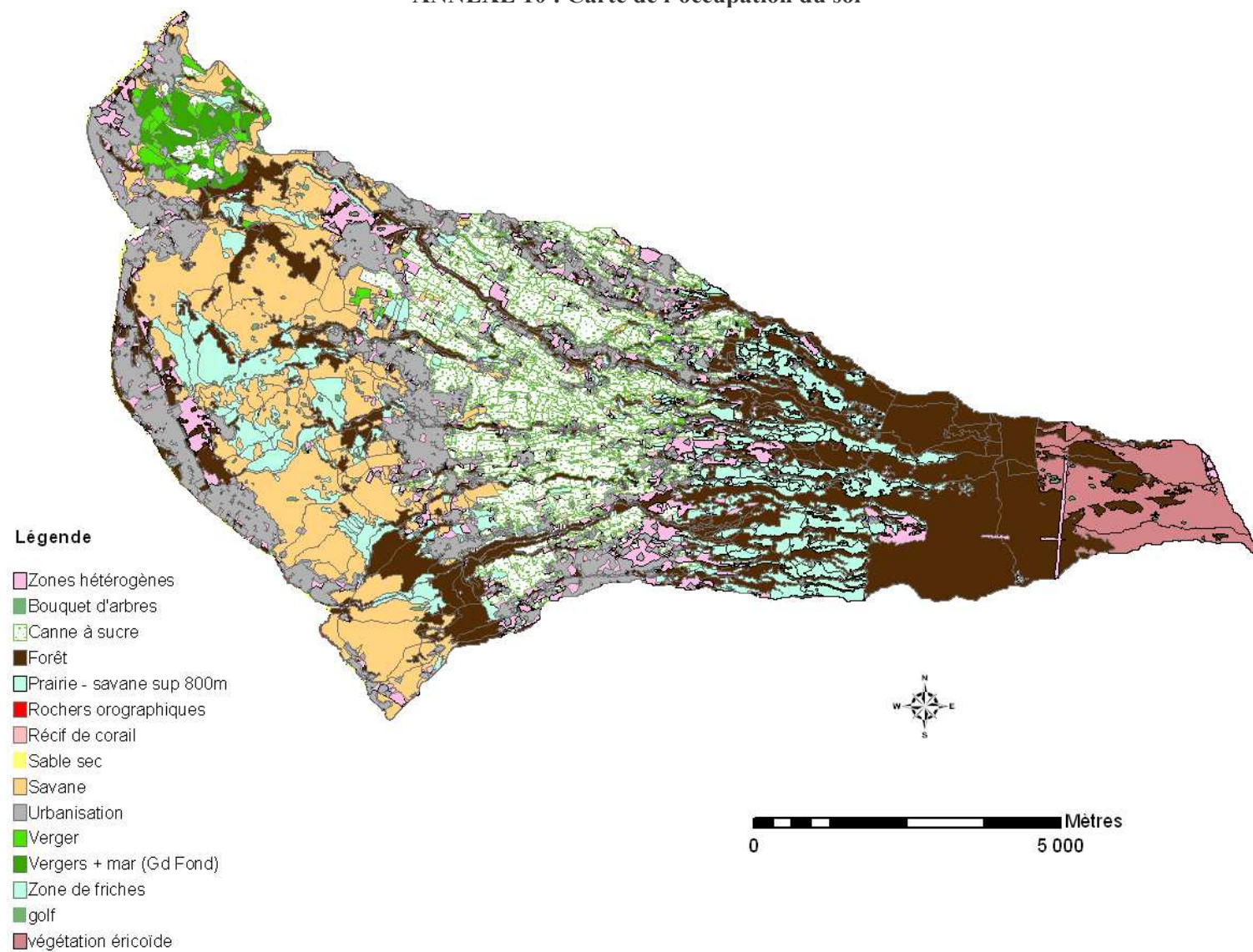
ANNEXE 9 : Carte morphopédologiques



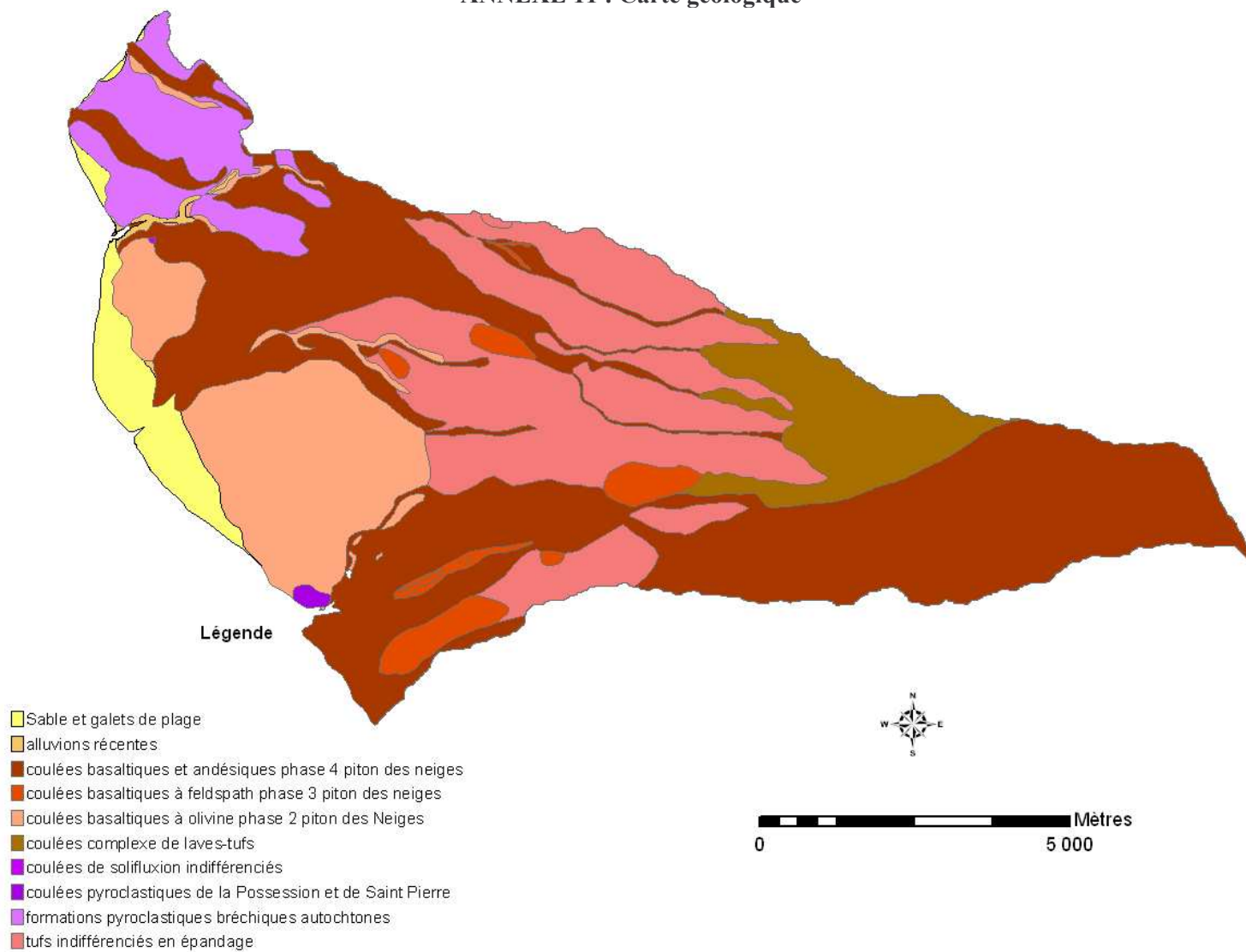
Légende

- Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres épaisses (pentes faibles)
- Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres épaisses (pentes fortes)
- Andosols désaturés perhydratés chromiques sur cendres assez épaisses, associés à des affleurements de graton (pentes fortes)
- Andosols désaturés perhydratés chromiques à 'mascareignite' sur cendres
- Andosols vitriques peu épais très discontinus à mor acide (dalles de tufs soudés à placages cendreux)
- Andosols vitriques peu épais très discontinus à mor acide (poches de cendres et blocailles)
- Coulées affleurantes et quelques poches de vertisols
- Cônes volcaniques de phase IV Piton des Neiges (250000 à 73000 ans; mugéarites)
- Escarpements volcano-tectoniques ou intra-îlets, ravines, talus, anciennes falaises littorales moulées par des coulées postérieures
- Pavage de blocaille sur couche litée de cendres et de lapilli
- Sable à olivine vert noirâtre. Nappe saumâtre en profondeur
- Sables calcaires blanchâtres. Nappe phréatique saumâtre vers 2 mètres
- Sables et galets submersibles
- Sols bruns andiques épais sur cendres, parfois sur tufs
- Sols bruns ferruginisés caillouteux peu épais et nombreux affleurements
- Sols bruns ferruginisés caillouteux sur couche colluviale peu épaisse
- Sols bruns ferruginisés sur couche colluviale assez épaisse
- Sols bruns peu épais associés à des affleurements blocailleux sur coulées 'AA'
- Sols bruns peu épais caillouteux sur 'tuf' compact
- Sols bruns très peu épais ou tuf compact affleurant
- Sols bruns vertiques
- Sols bruns vertiques et vertisols sur colluvions assez épaisses
- Sols bruns épais sur cendres associés à quelques ressauts rocheux (pentes fortes)
- Sols bruns épais sur coulées 'AA'
- Sols peu évolués hydromorphes en profondeur (nappe proche parfois salée) argileux à semelle de galets
- Vertisols et affleurements rocheux
- Vertisols sur colluvio-alluvions

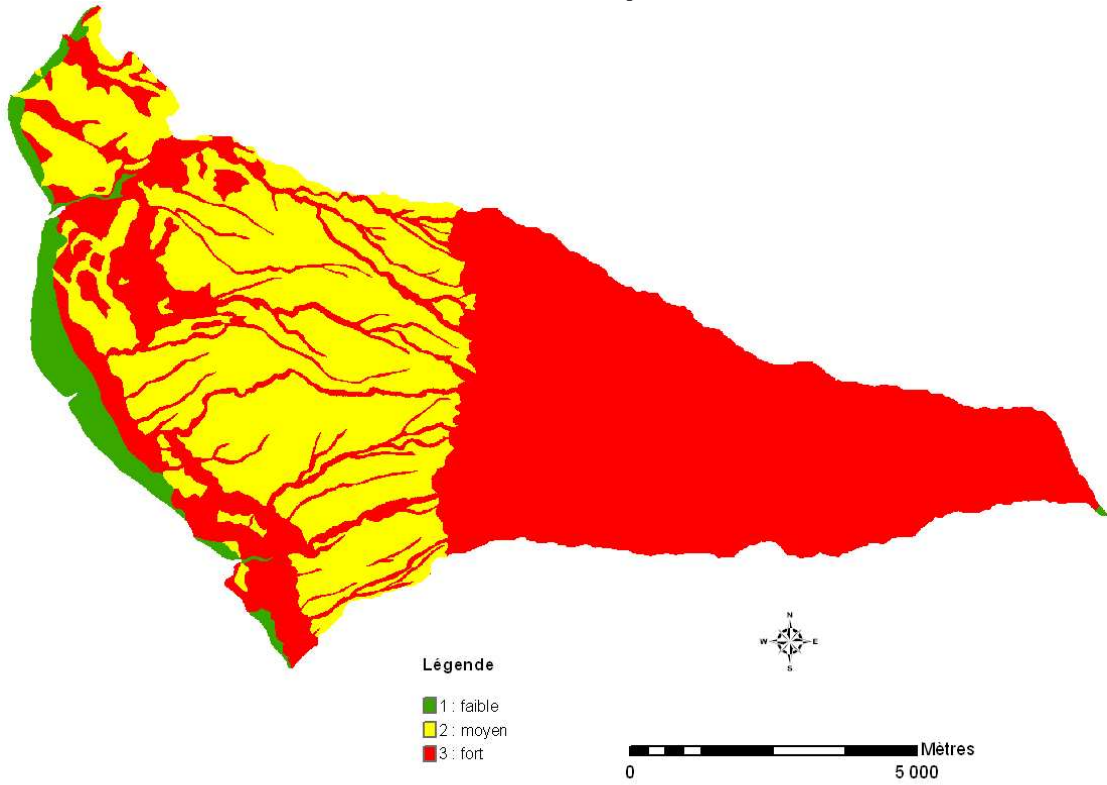
ANNEXE 10 : Carte de l'occupation du sol



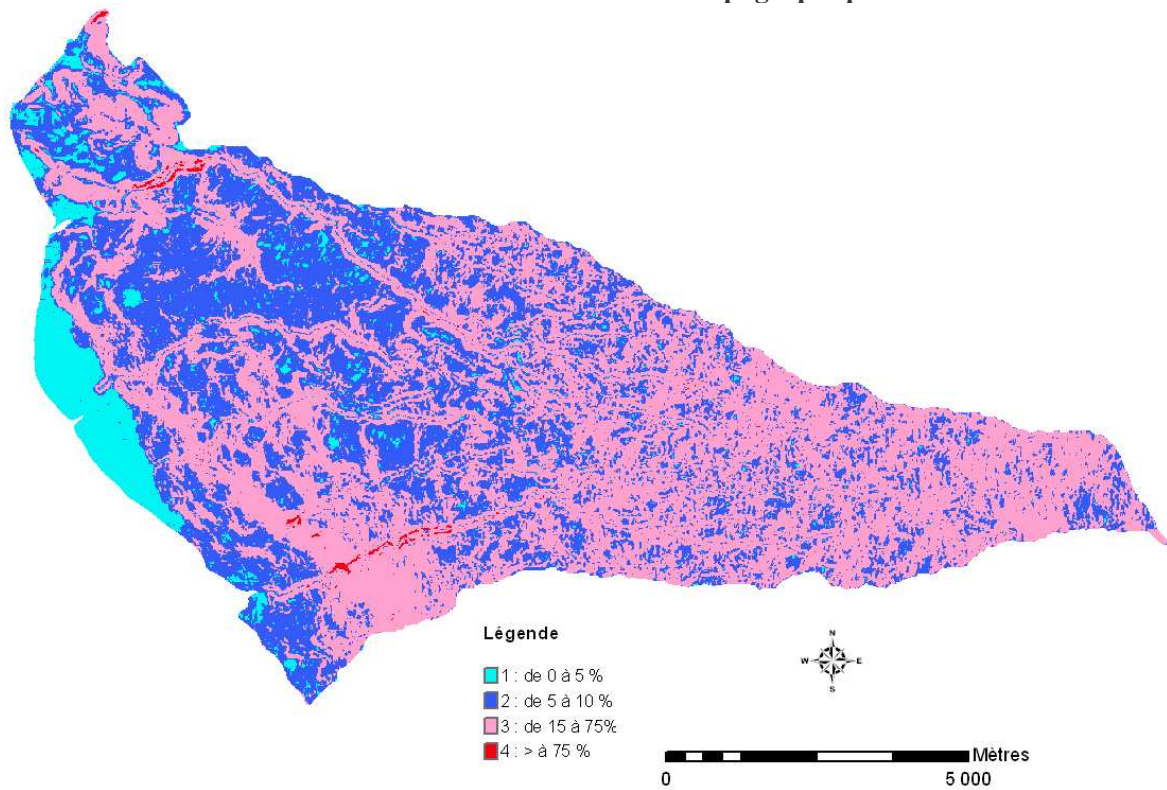
ANNEXE 11 : Carte géologique



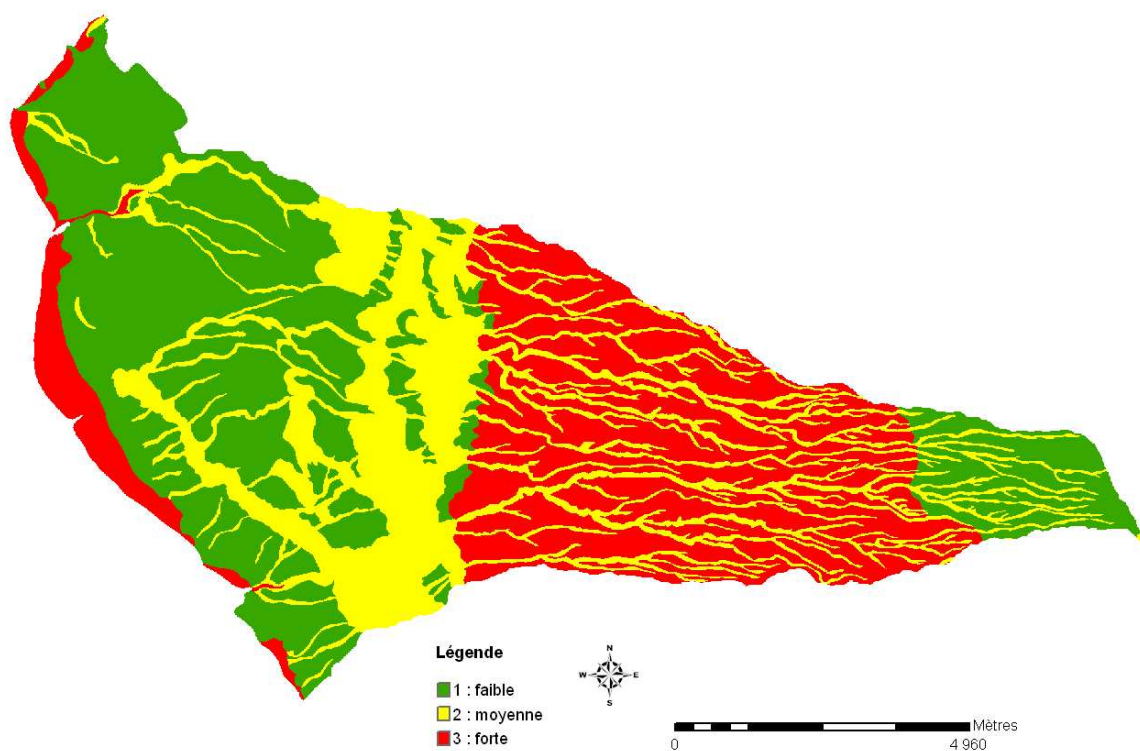
ANNEXE 12 : Paramètre « indice d'aptitude au ruissellement »



ANNEXE 13 : Paramètre « indice topographique »



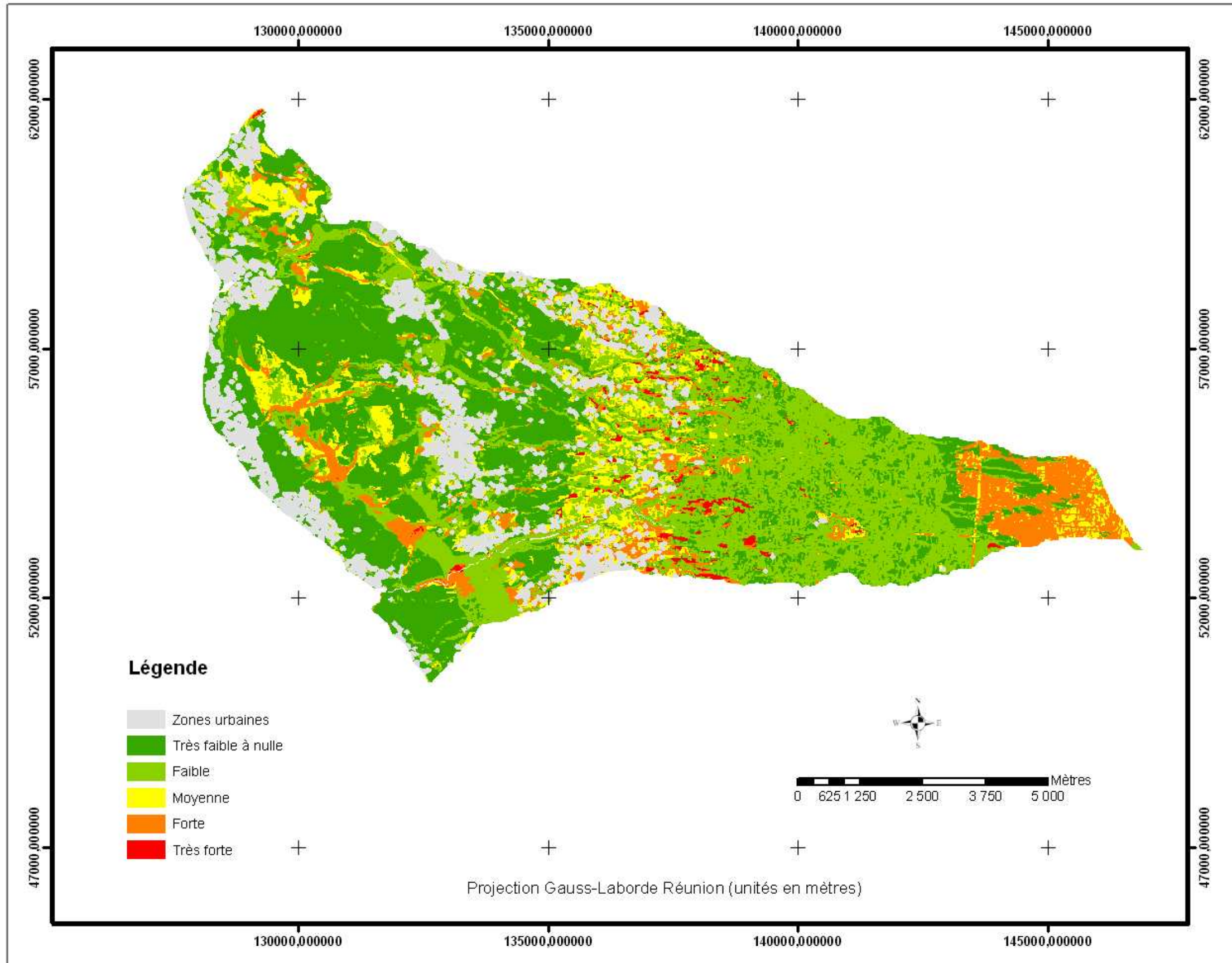
ANNEXE 14 : Paramètre « Erodibilité »



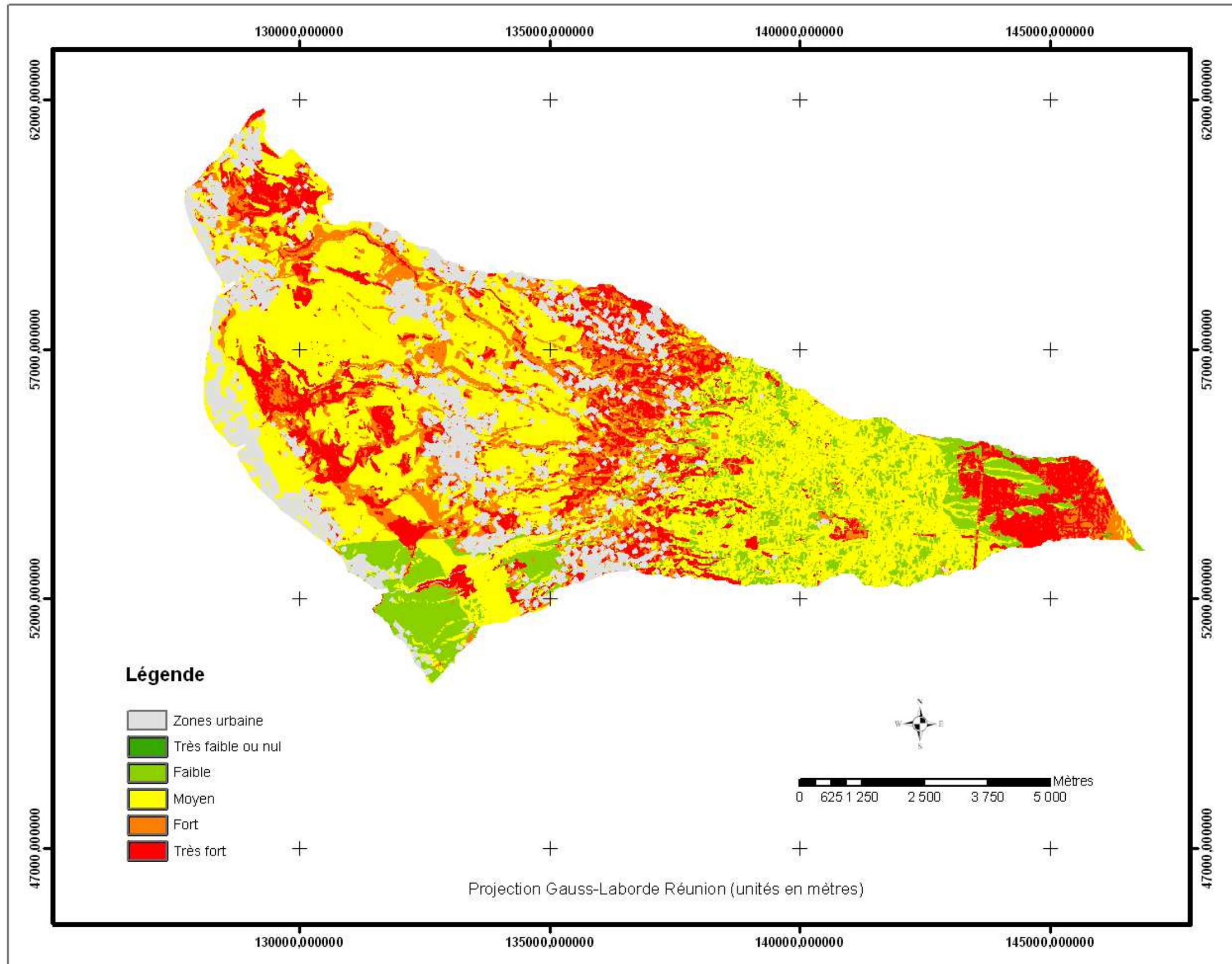
ANNEXE 15 : Modèle Arborescent pour le calcul de l'Aléa d'érosion

Occupation du sol	Aptitude au ruissellement	Indice topographique	Erodibilité	Sensibilité
Vergers et bouquets d'arbres (1)	1	0 - 5		1
		5 - 15		2
		15 - 75	1	2
			2	3
			3	3
		>75	1	2
	2		3	
	3		4	
	2	0 - 5		1
		5 - 15		2
		15 - 75	1	3
			2	4
			3	4
		>75	1	3
	2		4	
3	4			
3	0 - 5		2	
	5 - 15		4	
	15 - 75	1	5	
		2	4	
		3	5	
	>75	1	4	
2		4		
3		5		
Zones de friche (2)	1	0 - 5		1
		5 - 15		2
		15 - 75	1	2
			2	3
			3	3
		>75	1	3
	2		3	
	3		4	
	2	0 - 5		1
		5 - 15		2
		15 - 75	1	3
			2	4
			3	4
		>75	1	3
	2		4	
3	5			
3	0 - 5		2	
	5 - 15		3	
	15 - 75	1	4	
		2	4	
		3	5	
	>75	1	4	
2		4		
3		5		
Zones hétérogènes (3)	1	0 - 5		1
		5 - 15		1
		15 - 75	1	2
			2	2
			3	3
		>75	1	2
	2		3	
	3		3	
	2	0 - 5		1
		5 - 15		2
		15 - 75	1	2
			2	3
			3	4
		>75	1	3
	2		4	
3	5			
3	0 - 5		1	
	5 - 15		2	
	15 - 75	1	3	
		2	4	
		3	4	
	>75	1	3	
2		4		
3		5		
Prairie et savane(4)	1	0 - 5		1
		5 - 15		1
		15 - 75	1	1
			2	2
	>75	3	2	
		1	2	
2	3			
3	4			
Canne à sucre	1	0 - 5		1
		5 - 15		1
		15 - 75	1	1
			2	1
			3	2
		>75	1	1
	2		1	
	3		2	
	2	0 - 5		1
		5 - 15		1
		15 - 75	1	1
			2	1
			3	2
		>75	1	1
	2		2	
3	2			
3	0 - 5		1	
	5 - 15		1	
	15 - 75	1	2	
		2	2	
		3	3	
	>75	1	2	
2		3		
3		4		
Forêts	1	0 - 5		1
		5 - 15		1
		15 - 75	1	1
			2	2
	>75	3	2	
		1	1	
2	2			
3	3			
Zones Urbaines				NA

ANNEXE 16 : Sensibilité potentielle des terrains à l'érosion



ANNEXE 17 : Carte de l'aléa « érosion des sols » aux bassins versants en amont du lagon St-Gilles



ANNEXE 18 : Définitions du risque et de l'aléa

Le risque : définition

Le risque résulte de la superposition localement d'un **aléa*** avec un **enjeu****.

*On entend par aléa la manifestation d'un phénomène naturel (débordements de rivières, glissements de terrains, séismes, ou encore, avalanches, cyclones, éruptions volcaniques...). Un aléa est caractérisé par sa probabilité d'occurrence (décennale, centennale,...) et l'intensité de sa manifestation (hauteur et vitesse de l'eau pour les crues, magnitude pour les séismes, largeur de bande pour les glissements de terrain,...).

**Les enjeux : ce sont les dommages directs comptabilisables dès la fin de l'événement exceptionnel sur les habitations, les infrastructures, les bâtiments commerciaux ou industriels, les cultures ou le cheptel, et, dans les cas les plus dramatiques, les vies humaines. Ce sont aussi les perturbations économiques et sociales qui résident essentiellement dans les pertes d'exploitation dues à la destruction de l'outil de travail ou des récoltes ou l'interruption des communications, mais aussi les atteintes à l'environnement.

Source :

http://www.lorraine.ecologie.gouv.fr/programmes/Risques/risque_d%C3%A9finition.htm

dernière

consultation le 09/11/2005

Définitions relatives aux risques naturels :

Ce que l'on appelle dans le langage courant le risque correspond formellement à la notion d'aléa.

D'après Brugnot, délégué national aux risques naturels au Cemagref (1998) le risque peut se définir comme le croisement entre deux dimensions : aléa x vulnérabilité.

L'aléa est le phénomène physique aléatoire. L'aléa implique une notion de probabilité. La notion de risque s'oppose à la notion de certitude. Certains problèmes environnementaux se posent en terme de risque (la contamination des eaux par les pesticides ou par le phosphore provenant du rusissement sur les sols). D'autres problèmes environnementaux, comme celui de la pollution du réseau hydrographique par les nitrates, ne se posent pas en termes de risque (quand les bilans d'azote sont fortement excédentaires la pollution est une certitude).

La vulnérabilité est le pendant de l'aléa en termes économiques ou en terme de vies humaines de l'aléa en question.

Exemples : risque lié aux avalanches, risque lié aux tornades ou typhons tropicaux.

Dans le langage courant en Français, quand on parle de risque de quelque chose, on parle en fait de l'aléa.

Exemples : risque d'avalanche = aléa avalanche

risque de typhon = aléa typhon.

Le risque est, comme nous le verrons plus tard, pluri-factoriel. Ces facteurs peuvent être de différentes natures ; certains facteurs sont stationnels, d'autres sont non stationnels.

Pour les facteurs stationnels on peut utiliser la notion d'exposition (exposition au risque d'avalanche par exemple). On parle par exemple relativement au risque lié aux avalanches de situation exposée : telle situation (ensemble d'habitations) est dans une situation exposée ; cette situation est exposée à l'aléa avalanche : ceci signifie alors que dans cette situation la probabilité d'avalanche est assez élevée. Notons que si cette situation est construite, elle devient une situation à forte vulnérabilité.

Source :

Notions relatives au risque en environnement. Contribution de Pierre AUROUSSEAU, Professeur, Séance du Conseil Scientifique de l'Environnement du 14 Décembre 1999.

<http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/risque/risque.htm> dernière consultation le 09/11/2005.

Résumé

Le phénomène d'érosion à l'île de la Réunion affecte non seulement les terres agricoles mais aussi les zones côtières réceptrices des flux. C'est dans le cadre du projet AGIL (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux) que nous avons essayé de mettre au point un outil d'aide à la décision. L'objectif de ce projet est dans un premier temps, de spatialiser les pluies extrêmes qu'on estime comme le premier facteur déclencheur des phénomènes érosifs, puis en second lieu de réaliser la carte d'aléa « érosion des sols » aux bassins versants en amont du lagon St-Gilles. Nous avons réalisé le premier objectif en utilisant une méthodologie de spatialisation se basant sur les composantes principales du relief (méthode AURELHY). La méthodologie pour la cartographie de l'aléa érosif est fondée sur modèle Cognitif (qualitatif). Cette méthode prend en compte un certain nombre de facteurs qui, en interagissant entre eux, conditionnent le processus d'érosion. Un arbre de décision basé sur les dires d'experts permet de tenir compte de cette interaction et d'obtenir la sensibilité des terres à l'érosion. Enfin cette sensibilité est combinée à l'érosivité de la pluie, cartographiée lors de la première phase, pour obtenir l'aléa à l'érosion.

Mots Clefs

Aléa, érosion, pluies extrêmes, gestion côtière, SIG, Spatialisation.

Abstract

The phenomenon of erosion in the Réunion island affects not only the arable lands but also the coastal zones receiving the flows. It is within the framework of project AGIL (Aide à la Gestion Intégrée des Littoraux) that we tried to develop a tool of decision management support. The objectives of this project is initially, to spatialize the extreme rainfall which one estimates like the first factor release of the erosive phenomena, then in the second place to realize the map of the erosion risk in « saint-Gilles » Watershed side. We carried out the prime objective by using a methodology of spatialization basing itself on the principal components of the relief (AURELHY method). Methodology for the cartography of the erosive risk is founded on cognitive model. This method takes into account a certain number of factors which while interacting between them, condition the process of erosion. A decision tree based on the statements of experts makes it possible to hold account of this interaction and to obtain the sensitivity of the grounds with erosion. Finally sensitivity is combined with erosivity of rainfall, to obtain the erosion risk.

Key words :

Risk, erosion, extreme rainfall, Seashore integrated management, GIS, spatialization.