



INA P-G

**INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE  
PARIS-GRIGNON**



**Cemagref  
Unité AEMA**



**Pôle de Recherche Agro-environnementale  
de Martinique**

## **MEMOIRE**

Présenté par : Kevin PINTE

DAA / MASTER : AGER (Agronomie-Environnement)

### **Sujet :**

**Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du  
Robert en Martinique**

**Pour l'obtention du DIPLÔME D'INGENIEUR AGRONOME  
de l'institut national agronomique Paris-Grignon**

Enseignant-Responsable du stage : Yves Coquet

Maître du stage : Pierre Marie

Soutenu le : 8 Septembre 2006

**INA P-G**

16, rue Claude Bernard - 75231 PARIS CEDEX 05 - tél. 01 44 08 16 61 - télécopie 01 44 08 17 00  
BP 1 - 78850 THIVERVAL-GRIGNON - tél. 01 30 81 53 53 - télécopie 01 30 81 53 27  
[www.inapg.inra.fr](http://www.inapg.inra.fr) - Membre de ParisTech



## Remerciements

L'usage, couramment admis par les experts, est de remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin au déroulement du stage. C'est au sens figuré que je prendrais ce postulat en citant toutes ces personnes par ordre de proximité avec mon « bureau » :

Mes premiers remerciements vont donc tout naturellement à mes très proches collègues : Grégory Lucas, qui m'a accompagné aussi bien sur le terrain, dans la réflexion qu'au chinois du coin. Son intérêt et sa curiosité pour mon travail ainsi que ses précieux conseils ont fait de notre travail d'équipe un véritable succès. Pierre Marie, mon maître de stage, qui m'a fait confiance tout au long du stage. Dynamique et motivé, force de propositions, le travail avec lui sur le site atelier de la baie du Robert a été véritablement grisant. Son esprit critique, son sens de la synthèse ont largement contribué à l'achèvement de ce travail.

Je remercie Anne Rizand, responsable de l'unité AEMA du Cemagref Martinique pour la dynamique qu'elle insuffle au sein de toute l'équipe et pour sa confiance envers les jeunes diplômés. C'est ensuite à l'ensemble de l'équipe que je m'adresse pour l'ambiance de travail chaleureuse qu'ils font régner au PRAM (Michel Gayalin, Monique Arnaud, Claude Scherer, Albert Arimone).

Un peu plus loin dans le bâtiment du PRAM, mais tout aussi curieux pour mon travail, je tiens à remercier Philippe Tixier et Raphaël Achard, chercheurs au CIRAD, qui m'ont apporté leurs nombreuses connaissances sur les problèmes environnementaux qui gravitent autour de la culture de la banane. Tous mes remerciements vont également à Erik Braudeau de l'IRD, pour m'avoir aidé à récupérer la carte pédologique. Je remercie d'ailleurs tout le PRAM (Volontaires Civils à l'aide technique, stagiaires, membres du CIRAD, de l'IRD et de l'INRA) pour son accueil. C'est une véritable chance de pouvoir travailler dans ce creuset des sciences agronomiques tropicales.

Un peu plus loin sur l'île mais bien plus près dans mon cœur, je tenais à remercier Lauriane pour sa patience et ses encouragements constants. Je lui dois ce stage tout entier. Je remercie par la même occasion l'ensemble de sa famille qui m'a soutenu, de mon arrivée à l'aéroport jusqu'à la rédaction de *l'abstract* !

Un grand merci également à l'ensemble des agriculteurs rencontrés sur le terrain pour leur disponibilité et leur gentillesse.

C'est maintenant un grand vol vers la métropole pour un immense remerciement à mon tuteur, Yves Coquet, pour sa présence et ses conseils malgré les six heures de décalage horaire. Je remercie également Yves Le Bissonnais pour l'intérêt porté sur notre approche de l'érosion.

Je remercie enfin toute ma famille qui a m'a régulièrement encouragé via la web cam et tout particulièrement mon père pour ses précieux conseils sur le traitement des données climatiques et hydrologiques.





## Sommaire

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Préambule : .....</b>	<b>2</b>
Cadre et contexte du stage : .....	2
Objectifs initiaux du stage .....	3
<b>Partie 1 : Le bassin versant de la baie du Robert au sein d'une île contrastée .....</b>	<b>4</b>
1 L'île de la Martinique, terre de contrastes .....	4
1.1 Contexte Géomorphologique et bioclimatique de la Martinique .....	4
1.1.1 Géographie de la Martinique .....	4
1.1.2 Un climat tropical humide insulaire .....	4
1.1.3 Le réseau hydrographique de la Martinique .....	5
1.1.4 Géologie : une histoire liée au volcanisme antillais .....	5
1.1.5 Pédologie : des sols d'origine volcanique soumis au climat tropical .....	6
1.2 L'homme, acteur du territoire .....	6
1.2.1 Démographie et urbanisation croissante .....	6
1.2.2 Un secteur agricole en pleine mutation .....	7
2 Zoom sur le bassin versant de la baie du Robert .....	7
2.1 Situation du bassin versant et de sa baie au sein de la Martinique .....	7
2.2 Un bassin versant autour d'une baie .....	7
2.3 Milieu physique : entre atouts et contraintes .....	8
2.3.1 Un relief très disséqué .....	8
2.3.2 Un climat peu contraignant .....	8
2.3.3 Des sols très argileux .....	9
2.3.4 Les mangroves : un milieu tampon .....	9
2.4 Développement du bassin : entre ruralité et urbanisation .....	9
2.4.1 Un territoire en pleine mutation .....	9
2.4.2 Une agriculture diversifiée .....	10
Bilan de la partie 1 .....	10
<b>Partie 2 : Comment appréhender l'érosion à l'échelle d'un bassin versant ? .....</b>	<b>11</b>
1 Illustration de la diversité des formes d'érosion sur le bassin versant. ....	11
1.1 Ruissellement et érosion en nappe à grande échelle .....	11
1.2 L'érosion linéaire : le cas des ravines .....	12
1.3 Les mouvements de terrain en Martinique .....	12
2 Comment modéliser l'érosion à l'échelle du bassin versant ? .....	13
2.1 Des modèles quantitatifs inadaptés .....	13
2.1.1 Les modèles physiques sont trop demandeurs en paramètres .....	13
2.1.2 L'approche empirique : l'USLE est-elle adaptable ? .....	14
2.2 Approche experte de la modélisation de l'érosion .....	14



3	Qu'est ce qu'un indicateur de vulnérabilité à l'érosion ?.....	16
3.1	Vulnérabilité, Alea, Risque : Quel terme employer, pour quelle étude ? .....	16
3.2	Indicateur et représentation spatiale .....	17
3.2.1	Définition .....	17
3.2.2	Indicateur et notion d'échelle spatiale.....	17
3.2.3	Le concept d'objet spatial de référence.....	17
	Bilan de la partie 2 .....	18
<b>Partie 3 : Modélisation de la vulnérabilité à l'érosion .....</b>		<b>19</b>
1	Les paramètres retenus pour créer l'indicateur .....	19
1.1	La couverture du sol : le facteur clef.....	19
1.1.1	Les surfaces imperméables.....	19
1.1.2	Le couvert végétal .....	19
1.2	La topographie : une influence qui fait l'objet de discussion .....	21
1.2.1	La pente .....	21
1.2.2	La longueur de la pente .....	22
1.3	L'érodibilité.....	22
1.4	Le facteur climatique : des pluies homogènes sur le bassin ?.....	24
	Bilan .....	25
2	Construction de l'indicateur .....	26
2.1	Modélisation sous Système d'information géographique (SIG).....	26
2.2	Choix des classes et seuils de valeurs pour chaque paramètre.....	26
2.2.1	Catégories de couverture du sol .....	26
2.2.2	Topographie .....	29
2.2.3	Erodibilité.....	30
2.3	Agrégation des paramètres : les règles de décision.....	30
2.3.1	Attribution du nombre de classes .....	30
2.3.2	Attribution de l'indice final de vulnérabilité à l'érosion.....	32
3	Analyse et critiques des résultats .....	33
3.1	De grands ensembles se détachent sur la cartographie brute de la vulnérabilité à l'érosion.....	33
3.2	Agrégation ascendante et cartographie de la vulnérabilité vers de nouveaux OSR.	34
4	Validation du modèle .....	35
5	Bilan et limites de cette modélisation .....	36
5.1	Un modèle souple d'utilisation .....	36
5.2	Limites et améliorations .....	36



<b>Partie 4 : Etude de la dynamique spatiale de l'érosion à l'échelle d'un sous bassin versant .....</b>	<b>37</b>
1 Choix d'un sous bassin versant .....	37
1.1 Comment choisir le sous bassin versant ? .....	37
1.2 Le sous bassin versant de Mansarde-Voltaire .....	37
1.2.1 Situation et structure de ce sous bassin versant.....	37
1.2.2 Représentation schématique des activités .....	38
2 Méthode employée pour l'étude approfondie .....	39
2.1 Décomposition du processus érosif.....	39
2.1.1 Fonction d'émission .....	39
2.1.2 La fonction de transfert .....	40
2.1.3 La fonction de dépôt.....	40
2.2 Définition d'une triple typologie.....	40
2.2.1 Typologie des structures émettrices .....	40
2.2.2 Typologie des connexions (ou réseau d'écoulement) .....	42
2.2.3 Typologie des zones de dépôt .....	42
2.3 Choix des descripteurs (paramètres qualitatifs) pour les relevés de terrain .....	43
2.3.1 Des descripteurs qualitatifs .....	43
2.3.2 Organisation des relevés de terrain .....	43
2.4 Acquisition des données sur SIG .....	44
2.4.1 La production de données cartographiques brutes .....	44
2.4.2 L'organisation en base de données géographiques .....	44
3 Présentation et analyse des résultats.....	45
3.1 L'érosion en zone agricole .....	45
3.1.1 Les bananeraies sont les cultures les plus sensibles.....	45
3.1.2 Les formes d'érosion qui gênent les agriculteurs.....	46
3.2 Un réseau de connexion très dense.....	46
3.3 A-t-on affaire à de véritables zones tampons ? .....	48
3.3.1 Observations des zones tampons.....	48
3.3.2 Quelle part du transport solide arrive jusqu'à la baie ? Premiers éléments de réponse.	49
4 Bilan et perspectives.....	50
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>52</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>53</b>
<b>Liste des sites Web consultés .....</b>	<b>56</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>I</b>



## **Liste des cartes**

- Carte 1 : Relief de la Martinique
- Carte 2: Cumul annuel des pluies sur la Martinique
- Carte 3 : Pédologie de la Martinique au 1/100 000<sup>ème</sup>
- Carte 4 : Relief et réseau hydrographique du bassin versant de la baie du Robert
- Carte 5 : Carte Pédologique simplifiée au 1/20 000<sup>ème</sup>
- Carte 6 : Occupation du Sol sur le bassin versant de la baie du Robert
- Carte 7 : Situation sur la carte au 1/ 25 000<sup>ème</sup> de l'IGN des deux stations pluviométriques de Météo-France utilisées dans l'étude .
- Carte 8 : Occupation du sol reclassée
- Carte 9 : Pentés reclassées et ensembles topographiques
- Carte 10 : Accumulation de l'écoulement
- Carte 11 : Répartition des sols en fonction du type d'argile qui les constituent
- Carte 12 : Vulnérabilité à l'érosion sur le bassin versant et détails
- Carte 13 : Vulnérabilité à l'érosion par sous bassin versant
- Carte 14 : Positionnement du sous bassin versant de Mansarde-Voltaire
- Carte 15 : Surfaces agricoles et intensité observée de l'érosion
- Carte 16 : Situation des ravines et des drains dans les bananeraies avec l'intensité observée de l'érosion.
- Carte 17 : Traces parcourant les terres agricoles et intensité de l'érosion observée
- Carte 18 : Zones tampons répertoriées et structures émettrices associées

## **Liste des tableaux**

- Tableau 1 : Caractéristiques des principaux sols de la Martinique
- Tableau 2 : Description des principales formes d'érosion rencontrées en Martinique
- Tableau 3 : Ordres de grandeurs des pertes de sols causées par les principales formes d'érosion hydrique
- Tableau 4 : Présentation des principaux modèles à base physique
- Tableau 5 : Exemples d'adaptation de l'USLE en milieu tropical
- Tableau 6 : Quelques valeurs de coefficients dans la littérature concernant la couverture du sol
- Tableau 7 : Supports cartographiques ayant servi à la constitution de la base de données
- Tableau 8 : Attribution du nombre de classes du paramètre "inclinaison de la pente" en fonction du type de couverture du sol
- Tableau 9 : Répartition des surfaces du bassin versant par indice de vulnérabilité
- Tableau 10 : Présentation des descripteurs utilisés pour renseigner la typologie sur le terrain





## **Liste des figures**

- Figure 1 : Moyennes des cumuls mensuels sur 13 années de mesure  
 Figure 2 : Organisation des informations pour le diagnostic d'une ressource (CORPEN)  
 Figure 3 : Principe d'élaboration de la grille d'accumulation de l'écoulement  
 Figure 4 : Comparaison du réseau théorique tracé à partir du MNT et du réseau tracé à partir des relevés de terrain  
 Figure 5 : Cumuls annuels de 13 années de mesure sur les stations de Duchêne et Gendarmerie  
 Figure 6 : Répartition des pluies journalières en 5 classes sur 13 années  
 Figure 7 : Schéma fonctionnel du SIG mis en place  
 Figure 8 : Schématisation de la construction de l'arborescence logique  
 Figure 9 : Régimes hydrologiques et transport solide (D'après Meunier, 1999)  
 Figure 10 : Profils en longs des trois cours d'eau principaux du sous bassin versant de Mansarde-Voltaire  
 Figure 11 : Répartition de l'occupation du sol sur le sous bassin versant  
 Figure 12 : Schématisation de l'occupation du sol sur le sous bassin  
 Figure 13 : Schématisation des fonctions d'émission et de transfert de particules solides dans une bananeraie

## **Liste des photos**

- Photo 1 : Témoin d'érosion en nappe (micro demoiselle coiffée)  
 Photo 2 : Griffes d'érosion sur un talus  
 Photo 3 : Rigole d'érosion dans une bananeraie  
 Photo 4 : Ravine dans une bananeraie  
 Photo 5 : Végétation dense (savane)  
 Photo 6 : Végétation rase (Pâturage)  
 Photo 7 : Champs de canne à sucre à différents stades autour de la récolte  
 Photo 8 : Détail d'un champs de cannes quelques semaines après la récolte  
 Photo 9 : Paysage d'habitat diffus :  
 Photo 10 : Bananeraie > 2ans  
 Photo 11 : Bananeraie < 2 ans  
 Photo 12 : Maraîchage  
 Photo 13 : Couverture au sol dans une bananeraie âgée  
 Photo 14 : Griffes d'érosion formée à partir d'un andain de résidus  
 Photo 15 : micro demoiselles coiffées  
 Photo 16 : Bananier effondré dans une ravine  
 Photo 17 : Trace avec début de sapement par une ravine  
 Photo 18 : Trace en terre avec érosion dans les passages de roue



# Introduction

L'érosion des sols est un phénomène naturel qui, à différentes échelles spatiales et temporelles, dégrade, modifie et façonne les milieux terrestres. Cependant, les activités humaines qui se développent sur ces milieux influencent l'intensité du processus, parfois en protégeant les sols, parfois au contraire en favorisant l'action érosive. Lorsque le maintien des caractéristiques générales du milieu est considéré comme un enjeu majeur (maintien des potentialités des sols agricoles, protection des habitations contre les glissements de terrain, maintien de l'état de santé des écosystèmes aquatiques), l'érosion constitue alors un risque potentiel de changement qu'il est essentiel de limiter.

La zone d'étude présente des enjeux environnementaux. Située sur la façade atlantique de la côte martiniquaise, la baie du Robert (du nom de la commune) fait en effet preuve d'une dégradation généralisée de ses écosystèmes (herbiers et récifs coralliens). Plus particulièrement, l'envasement des fonds marins et les changements de bathymétrie caractérisent un apport excessif de particules solides. On parle alors d'hypersédimentation, dont les causes sont essentiellement d'origine terrestre.

Pour répondre à la politique d'aménagement de la commune, soucieuse de conserver un littoral propre, riche et agréable, un « site atelier » a été lancé sur ce territoire, afin de coordonner les équipes scientifiques impliquées et de proposer par la suite des actions préventives et curatives performantes. En conséquence, le diagnostic environnemental de l'hypersédimentation mené par les organismes de recherche marine s'associe à l'étude terrestre des apports solides au niveau du bassin versant.

Réalisé par le Cemagref, ce « *diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert* » pose la problématique suivante : comment caractériser l'érosion des sols de manière qualitative et/ou quantitative afin (1-) de répondre à l'enjeu environnemental marin et (2-) proposer des moyens de lutte anti-érosive destinés à diminuer l'apport de ces sédiments dans la baie.

Le stage présenté ici se place dans ce contexte scientifique. Le plan de l'étude se compose d'un préambule (des précisions sur le contexte du stage et les objectifs de l'étude) et de quatre parties différentes (voir schéma général) :

- La partie 1 est destinée à présenter la zone d'étude, en faisant ressortir la complexité du territoire martiniquais et plus précisément celle du bassin versant.
- La partie 2 montre comment, à partir du territoire d'étude et des exigences en terme de recherche, une méthode de diagnostic qualitatif a été mise au point.
- La partie 3 détaille et critique les résultats obtenus après conception d'un indicateur de vulnérabilité à l'érosion.
- La partie 4 affine enfin le diagnostic sur un sous bassin versant en abordant l'ensemble du processus érosif (émission, mais aussi transfert et zones de dépôt), afin de repositionner l'étude sur l'enjeu marin. L'accent est mis sur le rôle de l'agriculture par rapport aux autres activités présentes sur la zone.

Une cinquième partie, en cours de réalisation, concerne l'ébauche de propositions pour limiter l'érosion des sols et améliorer la rétention des sédiments sur le bassin versant. Cette partie viendra appuyer une réunion avec les agriculteurs et les acteurs communaux destinée à fournir un retour sur les travaux réalisés jusqu'à présent.



# Préambule :

## **Cadre et contexte du stage :**

Le Cemagref est représenté en Martinique par l'unité AEMA (Agriculture et Espace insulaire de la MARTinique), qui travaille entre autres sur des projets de gestion de la ressource en eau à l'échelle de bassins versants côtiers. Cette démarche territoriale implique l'association de problématiques terrestres et marines, dans un contexte d'exiguïté de l'espace et de pressions climatiques fortes (climat tropical humide). Intégré dans cette unité, le stage s'est déroulé en partenariats étroits avec les autres organismes de recherche, qu'ils soient « terrestres » (CIRAD et IRD regroupés avec le Cemagref au sein du Pôle de Recherche Agro-environnementale de Martinique), ou marins (Ifremer et bureaux d'étude spécialisés). Ce partenariat constitue un des piliers du fonctionnement du « site atelier de la baie du Robert ».

Les réflexions du « site atelier » sont issues de rencontres entre scientifiques et décideurs locaux confrontés à la problématique de l'aménagement de la bande côtière en Martinique. Sans aborder en détail le contexte local, la Martinique ne dispose que d'un nombre limité d'équipes capables de répondre aux demandes des collectivités. Jusqu'en 2003, les études étaient alors menées de façon indépendante. Les responsables locaux de l'Ifremer et du PRAM ont choisi depuis de conduire une réflexion pluridisciplinaire autour d'un site test (d'où le terme « site atelier »), choisi pour ses caractéristiques adaptées aux questions d'aménagement. Il s'agit de la baie du Robert, et de son bassin versant.

Les principales questions soulevées à l'échelle de ce territoire sont les suivantes :

1. L'enjeu prioritaire, commun au milieu terrestre et au milieu marin, concerne la qualité de l'environnement et à travers lui la qualité des produits de consommation issus du milieu naturel (fruits, tubercules, poissons et crustacés).
2. Au niveau terrestre, les enjeux secondaires (c'est-à-dire le paysage, le maintien d'un tissu économique rural, etc.) sont liés à l'équilibre entre le développement des différentes activités potentielles sur la zone (productions agricoles, industrielles et habitats) ainsi que leur répartition spatiale.
3. Au niveau marin, la baie est connue comme une zone de nourricerie, caractéristique de fonds peu profonds et riches en biocénoses de type mangrove, coraux et herbier de phanérogames. Elle justifie l'étude et le suivi des molécules polluantes bioaccumulables (métaux lourds, organochlorés et organophosphorés) dans certains organismes vivants considérés comme sensibles.
4. Au niveau environnemental, l'anthropisation du pourtour de la baie se traduit par un développement urbain difficile à contrôler, dont la conséquence majeure est l'émission généralisée d'effluents domestiques divers qui associés aux fertilisants agricoles, peuvent se traduire par une eutrophisation des zones les plus exposées (fond de baie notamment).
5. Une question récurrente concerne enfin l'envasement du fond de la baie, à l'origine d'une forte nécrose des platines coralliennes, et de la dégradation d'autres biocénoses remarquables, telles que les herbiers de phanérogames et certaines ressources halieutiques (augmentation de la mortalité sur certaines espèces).

## Enjeu: Hypersédimentation de la baie

Objectif principal: Conception d'une méthode pour le diagnostic de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant

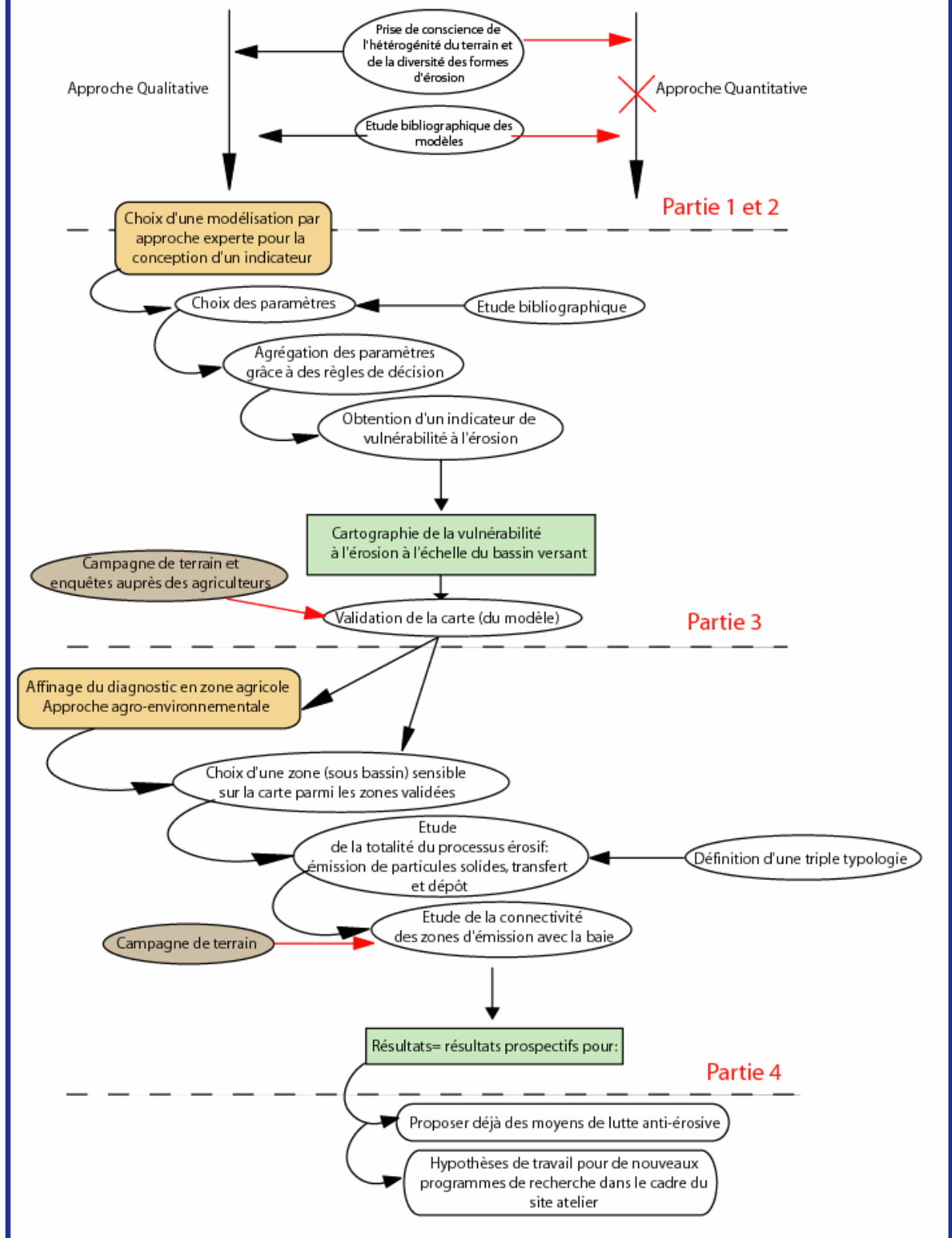


Schéma général du déroulement de l'étude

L'objet du site atelier de la baie du Robert est donc de répondre progressivement à toutes ces interrogations *via* des programmes spécifiques développés à différentes échelles. Le projet LITEAU II fait partie d'un de ces programmes. Il se décompose suivant :

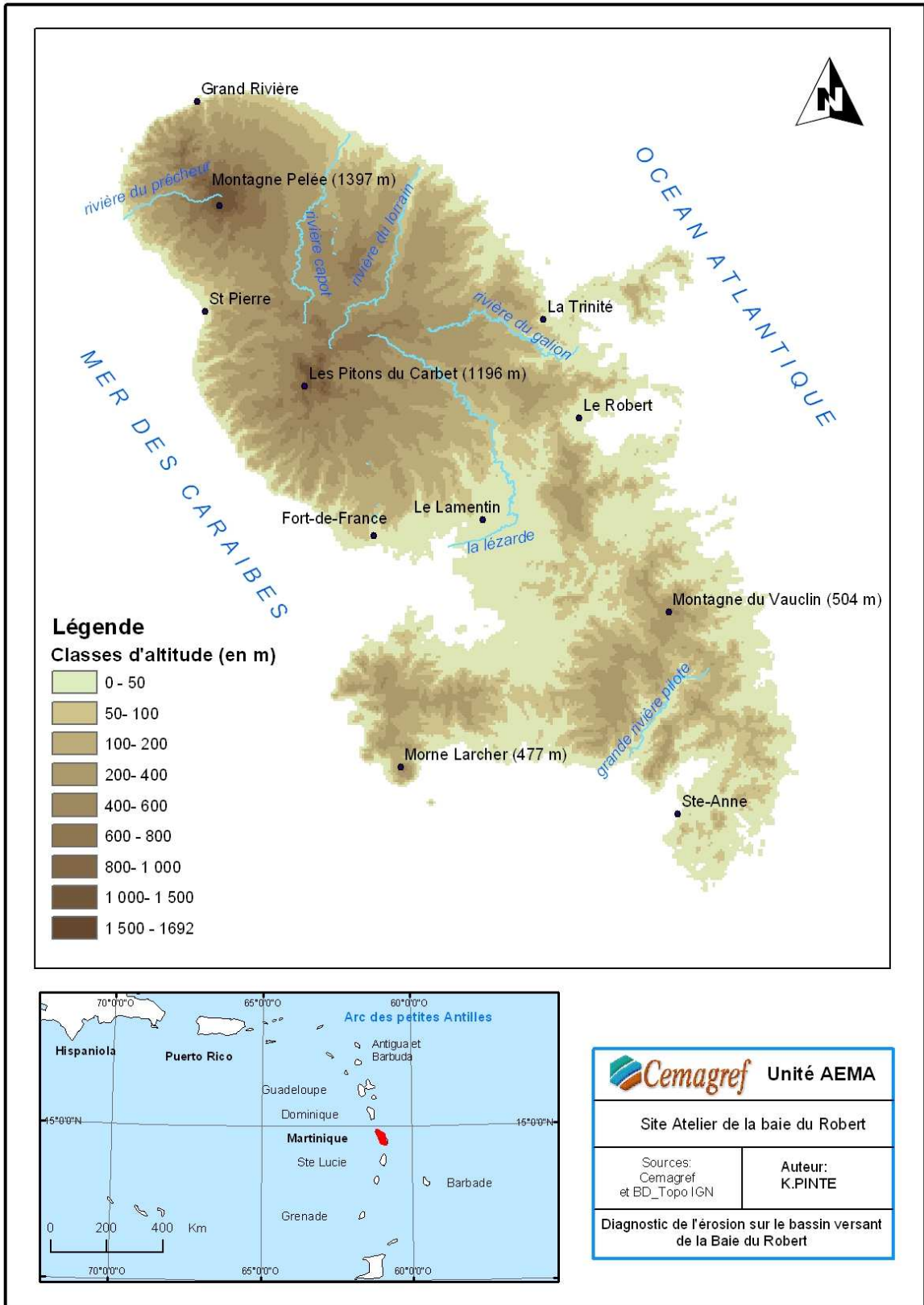
- Une partie marine avec un état des lieux écologique de la baie piloté par l'Ifremer et réalisé par un bureau d'étude local.
- Une partie terrestre sous la direction du Cemagref qui a déjà réalisé une évaluation de la charge polluante liée à l'assainissement. Actuellement, l'étude spatiale des risques environnementaux se subdivise en une évaluation de la charge agricole polluante (achevée en 2005) et un diagnostic spatial de l'érosion. Ce dernier thème fait l'objet du présent rapport.

### **Objectifs initiaux du stage**

1-Mettre en place une méthode à l'échelle du bassin versant, qui puisse intégrer l'ensemble des activités et des occupations du sol, et qui permette de hiérarchiser les zones les plus sensibles au phénomène d'érosion.

2-Instrumenter des micros bassins versants (de l'ordre du km<sup>2</sup>) pour quantifier les apports terrigènes et développer une démarche mécaniste.

Ce dernier objectif a été laissé de côté à mi-parcours du stage, les commandes du matériel de mesure ayant pris du retard. C'est donc en cours d'étude qu'il a été décidé de fixer un nouvel objectif : celui d'affiner la méthode mise en place au préalable en sélectionnant une zone d'étude plus petite et en concevant des propositions de lutte plus adéquates.



**Carte 1 : Relief de la Martinique**

 <b>Unité AEMA</b>	
Site Atelier de la baie du Robert	
Sources: Cemagref et BD_Topo IGN	Auteur: K.PINTE
Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la Baie du Robert	



## Partie 1 : Le bassin versant de la baie du Robert au sein d'une île contrastée

### 1 L'île de la Martinique, terre de contrastes

#### 1.1 Contexte Géomorphologique et bioclimatique de la Martinique

##### 1.1.1 Géographie de la Martinique

La Martinique appartient à l'arc insulaire des Antilles. Sa superficie est égale à 1100 km<sup>2</sup> pour une population d'environ 380 000 habitants. Elle s'est édifiée à la suite d'une succession de phases volcaniques, et fait partie de l'arc géologique récent, exceptées la presqu'île de la Caravelle (en face de La Trinité) et la péninsule de Sainte-Anne, issues de l'arc ancien.

La zone côtière est très découpée et hétérogène. Le plateau insulaire, d'une superficie équivalente à celle de l'île, est principalement développé côté atlantique (75%), et baigné toute l'année par les eaux du courant nord-équatorial dont la température favorise la croissance de récifs coralliens et de toute la faune qui s'y rattache.

Le relief (**Carte 1**) est irrégulier et peut se décomposer en trois ensembles :

- Un secteur septentrional (dit Nord Martinique), composé de hauts reliefs, accidentés et dominés par deux ensembles volcaniques : les pitons du Carbet (1196 m) et la montagne Pelée (1397 m). Entre ces hauts reliefs s'étend une région accidentée où alternent ravines et longues crêtes irrégulières descendant des édifices volcaniques vers les côtes littorales et vers la plaine du Lamentin.
- Un secteur méridional (dit Sud Martinique), où le relief est composé de "mornes", massifs volcaniques anciens de moyenne altitude (Morne Larcher, 477m ; Montagne du Vauclin, 504 m).
- Un secteur central, composé de petites plaines fragmentées (plaine du Lamentin) qui représentent une totalité de 112 km<sup>2</sup>.

##### 1.1.2 Un climat tropical humide insulaire

Si les températures sur l'île sont relativement constantes toute l'année avec une moyenne annuelle de 25°C (Cabidoche *et al.* 2001 ; Khamssouk, 2001), le climat de la Martinique est caractérisé néanmoins par des irrégularités pluviométriques aussi bien temporelles que spatiales.

**Variations temporelles**, car la Martinique est sous influence d'un climat tropical humide avec une saison sèche (dite "carême") et une saison humide (dite "hivernage").

La saison sèche s'étend de janvier à juin. L'anticyclone des Açores apporte des vents réguliers et frais. L'air est sec et les pluies peu fréquentes. Seule la partie nord de la Martinique au relief plus prononcé continue alors d'être arrosée par des pluies orographiques. La saison humide s'étend de juillet à décembre. Le bilan hydrique y est excédentaire. C'est la période de passage des tempêtes tropicales et des ouragans. Entre ces phénomènes, l'île est soumise aux pluies orographiques et au passage des ondes tropicales. Ces ondes amènent des pluies thermo convectives (orages tropicaux), de forte intensité et distribuées assez uniformément sur l'île. En conséquence, les pluies potentiellement érosives sont distribuées à toutes les altitudes (Cabidoche *et al.*, 2001).



**Variations spatiales (Carte 2)**, car le relief tient une part importante dans la variabilité insulaire du climat. On distingue ainsi le nord et le sud de la Martinique. Les cumuls annuels varient de 500 mm (Sainte Anne) dans l'extrême sud de l'île, à plus de 5000 mm dans le nord. D'autre part, on observe à altitude égale des différences entre le côté Nord Atlantique au vent et le côté Nord Caraïbe sous le vent, très sec surtout pendant le carême, et soumis à de forts risques d'incendies.

### 1.1.3 Le réseau hydrographique de la Martinique

De manière générale, on peut distinguer deux types de réseaux hydrographiques calqués sur les différences géomorphologiques et climatiques entre le nord et le sud de l'île.

Au nord, les massifs volcaniques sont parcourus par un réseau hydrographique dense et rayonnant, avec des cours d'eau alimentés par de petits bassins versants. Ces cours d'eau, encaissés et alimentés par des bassins soumis au caractère intense et fréquent des pluies durant la saison humide ont un régime torrentiel (ex : Rivière Capot, Rivière du Lorrain, Rivière du Galion). Khamsouk (2001) reporte que pour la rivière Lézarde, le débit peut passer de 0,3 m<sup>3</sup>/s en étiage à 480 m<sup>3</sup>/s en crue.

Au sud, le réseau hydrographique est moins dense : il est constitué de petites rivières inférieures à 30 km de long. Ces rivières ont un caractère torrentiel dans les mornes puis s'allongent en méandres dans les plaines alluviales proches des côtes.

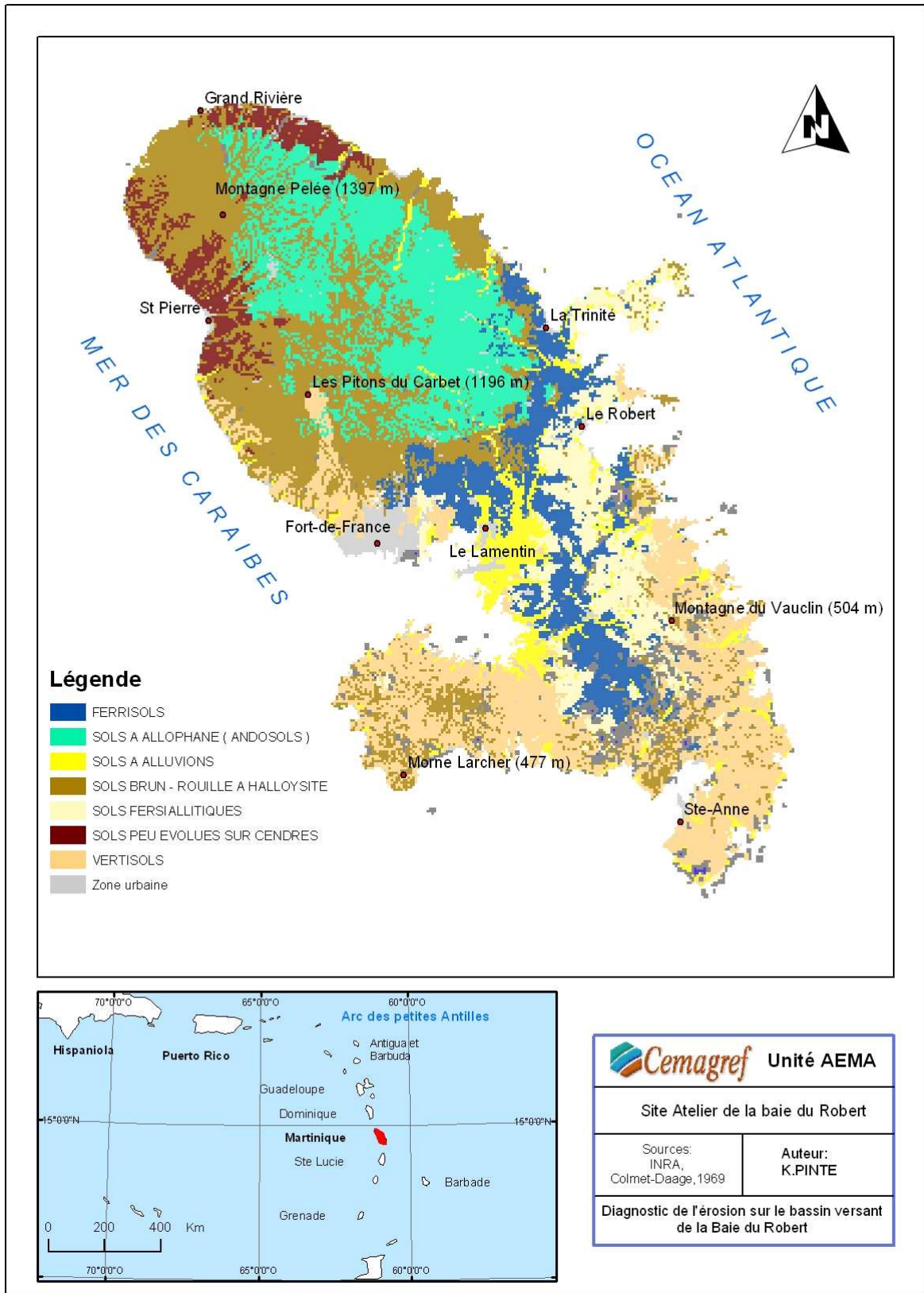
### 1.1.4 Géologie : une histoire liée au volcanisme antillais

Fruit de la subduction de la plaque océanique sous celle de la Caraïbe, la Martinique est une île au volcanisme de type andésitique et explosif (Khamsouk, 2001 ; Cabidoche *et al.*, 2001).

D'après Westercamp et Tazieff (1980), la formation de la Martinique résulte de façon simplifiée de la mise en place successive de trois arcs insulaires distincts :

- L'arc ancien constitué par les presqu'îles de Sainte Anne et de la Caravelle (Oligocène supérieur - début Miocène). Ces formations anciennes sont constituées de tuffs lités (formations détritiques volcano-sédimentaires) incluant parfois des bancs coquilliers et des massifs coralliens.
- L'arc intermédiaire constitué par la montagne du Vauclin et le morne Pitault (Miocène inférieur et moyen). Ces formations intermédiaires sont volcano-sédimentaires avec des bancs de calcaire francs en alternance avec des brèches pyroclastiques.
- L'arc récent constitué par la région nord jusqu'au Morne Larcher (début Pliocène). Ces formations récentes sont des projections aériennes composées d'andésite et de labrodite donnant des tuffs légers, des cendres et des ponces ou brèches.

Il est important d'avoir en tête cette chronologie dans la formation géologique de la Martinique car elle détermine en partie la variabilité spatiale des sols.



Carte 3 : Pédologie de la Martinique au 1/100 000<sup>ème</sup>

### **1.1.5 Pédologie : des sols d'origine volcanique soumis au climat tropical**

Un sol est le résultat de l'interaction entre le substratum géologique, ou roche mère, et le climat, la végétation et la topographie. La roche mère peut se transformer, c'est-à-dire que sa fraction minérale peut évoluer, soit par des processus de désagréments physiques et mécaniques (notamment sous climats froids et désertiques), soit par des processus d'altérations chimiques. Ces altérations consistent en la transformation de minéraux primaires en présence d'eau et d'agents réactifs (dioxygène O<sub>2</sub>, dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, acides organiques, etc.) et en la formation de minéraux secondaires et produits solubles.

La Martinique étant une île volcanique au relief accidenté sous climat tropical humide, le processus majeur d'altération chimique des minéraux est par conséquent l'hydrolyse. Celle-ci est plus ou moins marquée sur l'île selon les conditions de pluviosité (Khamsouk, 2001).

De plus, les sols martiniquais issus d'une même roche mère peuvent évoluer différemment selon le climat, et des matériaux différents mais de composition analogue peuvent donner des sols comparables (Colmet-Daage, 1969).

Globalement, ces auteurs distinguent sept grands groupes de sols (**Carte 3**) qui peuvent être regroupés en deux familles d'âges différents : la famille des sols évoluant sur formations volcaniques anciennes, à savoir les vertisols, les ferrisols et les sols ferrallitiques ; et la famille évoluant sur formations volcaniques récentes, regroupant des sols peu évolués sur cendres et ponces, sols à allophanes (andosols), sols brun-rouille à halloysite et sols sur alluvions.

Le **Tableau 1** détaille un peu plus les principales caractéristiques de ces sols

La texture argileuse de tous ces sols, relativement élevée, en fait des sols peu sensibles à la battance car la structure résiste relativement bien à l'agressivité des pluies.

## **1.2 L'homme, acteur du territoire**

### **1.2.1 Démographie et urbanisation croissante**

La Martinique est la deuxième région française la plus densément peuplée avec une densité de 387 habitants/km<sup>2</sup>. Elle connaît depuis 30 ans une forte croissance démographique (+ 20% entre 1977 et 1999 selon le recensement de l'INSEE). La répartition de la population sur le territoire est assez complexe et est responsable en grande partie du mitage du territoire naturel et agricole par l'urbanisation croissante. Selon Becquet (2004), l'urbanisation rapide et sans planification a provoqué des disparités fortes et en particulier le « déperissement » du nord au profit du sud. L'urbanisme insuffisamment contrôlé, se développant au gré des opportunités foncières, a engendré de nombreux quartiers urbains insalubres et l'apparition de zones d'habitat spontané, plus ou moins diffuses.

	Types de sol	Conditions climatiques d'évolution	Minéraux dominants	Autres caractéristiques	Utilisation par l'agriculture
Sols formés sur formations volcaniques anciennes	<b>Ferrallitiques</b>	Tropical humide à saison sèche modérée de 3 à 4 mois (P=1700-3000 mm)	Kaolinite et parfois méta-halloysite  Sols riches en hydroxydes de fer de type Goethite	-Texture argileuse à très argileuse -2 à 3 % de Matière organique (MO) -CEC= 12 à 20meq/100g de sol	Bananaïeries, canne à sucre et cultures vivrières
	<b>Ferrisols</b>	Climat analogue aux sols ferrallitiques mais plus sec (P=1600–2300 mm)	Kaolinite  Sols riches en hydroxydes de fer	-Texture argileuse (20% en surface à 50-60% en profondeur) -2,5 à 4% de MO -CEC= 15 à 25meq/100g de sol sec	Canne à sucre et bananaïeries
	<b>Vertisols</b>	Saison sèche marquée (P=500–1500 mm)	Montmorillonite (argiles gonflantes)	-Texture argileuse (40 à 80% d'argile) -2 à 4% de MO -CEC = 80meq/100g de sol sec	Canne à sucre, cultures maraîchères, prairies
Sols formés sur formations volcaniques récentes	<b>Sols peu évolués sur cendres et ponces ou lithosols</b>	Sols récents évoluant actuellement sous climat tropical à saison sèche très peu marquée	Dominance de sables et de ponces	Premiers stades des sols à allophanes sans hydroxyde d'alumine	Pas d'agriculture sur ces sols
	<b>Sols à allophane ou andosols</b>	Localisés près des massifs volcaniques où la saison sèche est peu marquée (P=2500–5000 mm)	Allophanes (oxyhydroxyde alumino-silicique), goethite et méta-halloysite	-Forte capacité de rétention d'eau -3 à 5% de MO -CEC = 20 à 40 meq/100g de sol sec	Ananas, canne à sucre, bananaïeries. Seule la pente présente dans ces zones limite l'utilisation de ces sols par l'agriculture
	<b>Sols Brun rouille à halloysite</b>	Climat à saison sèche peu marquée (P=1300-2500 mm)	Méta-halloysite associée à de petites quantités de gibbsite et goethite	Texture argilo sableuse à argileuse 2 à 3% de MO CEC = 8 à 10 meq/100g de sol sec	Ces sols ont une très bonne stabilité structurale et conviennent parfaitement à la culture de la canne à sucre et celle de la banane
	<b>Sols sur alluvions</b>	Localisées principalement dans les plaines centrales	Tous types de minéraux argileux (des argiles gonflantes aux argiles de type kaolinite)		Canne à sucre

**Tableau 1 : Caractéristiques des principaux sols de la Martinique**



## **1.2.2 Un secteur agricole en pleine mutation**

L'agriculture et le foncier agricole subissent en Martinique des contraintes de plus en plus fortes. Pilier économique du département, l'agriculture est en crise depuis les années 1970, années qui marquent le début de la récession de l'économie de plantation. Ainsi, entre 1980 et 2000, la surface agricole utilisée est-elle passée de 44 300 ha à 33 390 ha (Becquet, 2004). Ce mouvement semble encore s'accélérer dans un contexte où les cultures de rentes martiniquaises (banane, ananas) ne sont plus compétitives par rapport aux producteurs des pays en voie de développement et où les subventions aux agriculteurs apportées par l'Europe sont remises en cause par l'Organisation Mondiale du Commerce. La canne à sucre reste plus rentable avec notamment la production du Rhum Agricole qui a obtenu depuis peu le label d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC).

C'est donc dans ce contexte agricole défavorable que les terres agricoles cèdent peu à peu la place à l'urbanisation.

## **2 Zoom sur le bassin versant de la baie du Robert**

### **2.1 Situation du bassin versant et de sa baie au sein de la Martinique**

La commune du Robert fait partie des communes du Centre Martinique. Elle se trouve sur la façade Est de l'île, qui reçoit les vents principaux.

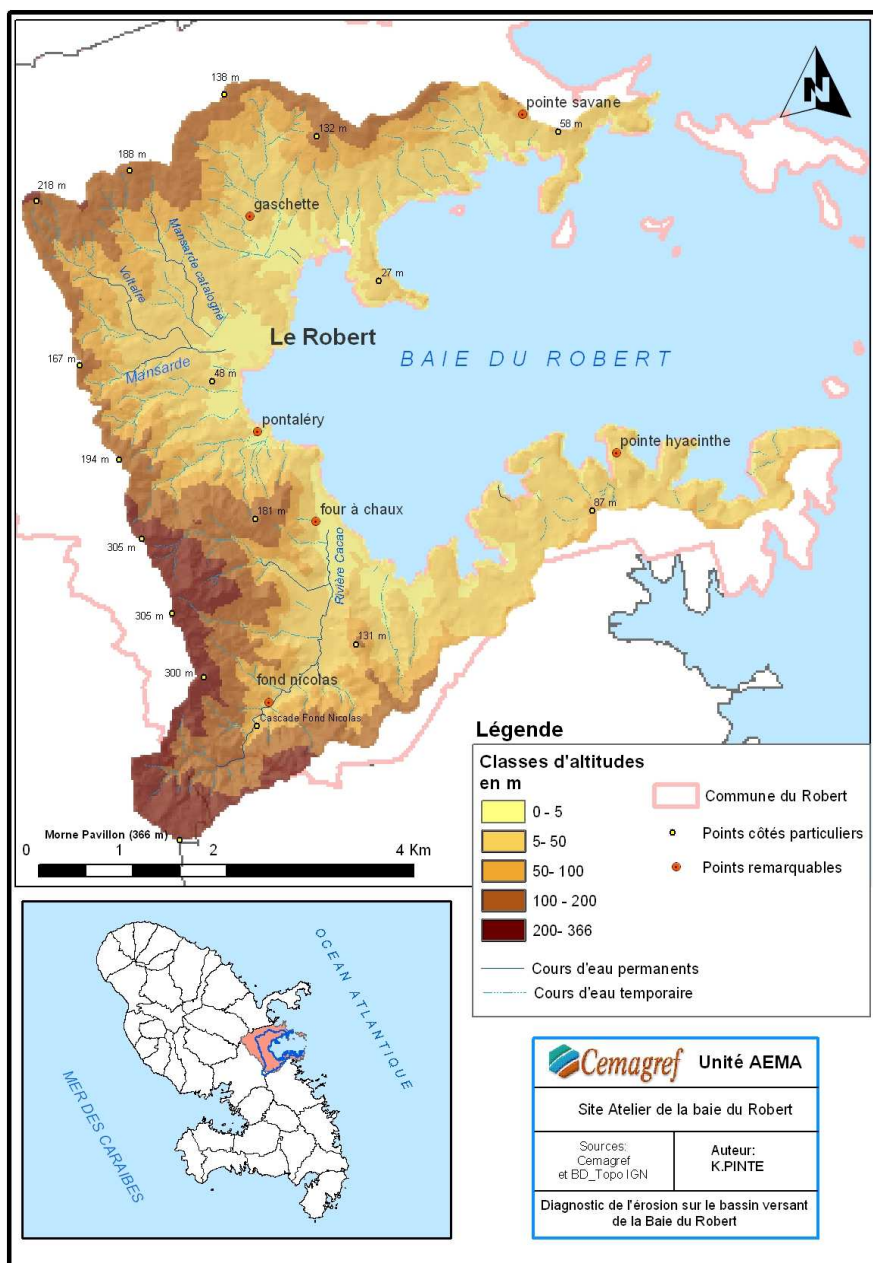
Le bassin versant de la baie du Robert (23 km<sup>2</sup>) se trouve presque entièrement sur le territoire de la commune du Robert (43 km<sup>2</sup>). Seule l'extrémité sud ouest, constituée par la partie amont du bassin versant de la rivière Cacao, appartient à la commune voisine du François. Cette position privilégiée du bassin, par unicité administrative, est un atout en terme de coordination des projets d'étude lancés dans le cadre du site atelier de la baie du Robert.

La portion de la commune non concernée par le bassin versant de la baie est occupée par le bourg du vert pré situé au nord ouest du bassin.

### **2.2 Un bassin versant autour d'une baie**

Le bassin versant de la baie du Robert est très particulier de par sa forme, qui le différencie des bassins versants de rivières. Il est en effet ramassé autour de la baie, qu'on qualifie de semi fermée, et est drainé par un grand nombre de rivières ou ravines auxquelles sont attachés autant de bassins versants élémentaires. On ne peut donc pas le caractériser à l'aide d'indices utilisés couramment en hydrologie, comme l'indice de compacité ou le taux de drainage. Il faut en fait passer par un découpage en sous bassins versants à exutoire unique, que l'on peut alors étudier plus classiquement.

Lors de l'étude précédente, réalisée par le Cemagref (Marie et Lucas, 2005) sur le diagnostic des pollutions agricoles diffuses, un découpage en 22 sous bassins versants avait été réalisé. Ce découpage fait ressortir 3 sous bassins de taille supérieure. Il s'agit des sous bassins comportant les rivières Cacao (6,3 km<sup>2</sup>), Mansarde (4,2 km<sup>2</sup>) et la ravine Gaschette (3 km<sup>2</sup>).



Carte 4 : Relief et réseau hydrographique du bassin versant de la baie du Robert

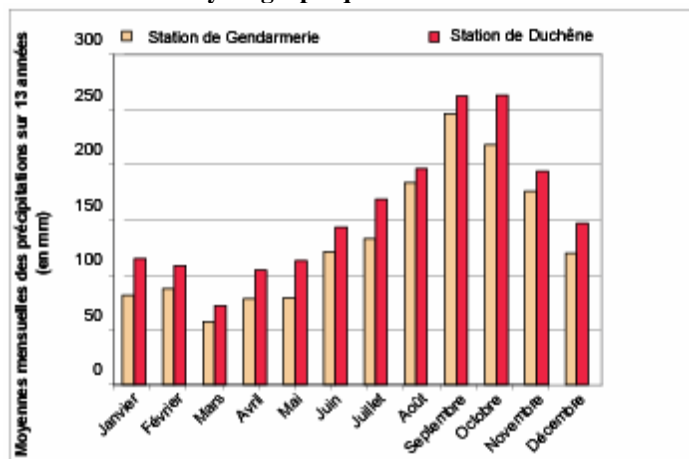


Figure 1 : Moyennes des cumuls mensuels sur 13 années de mesure



## **2.3 Milieu physique : entre atouts et contraintes**

### **2.3.1 Un relief très disséqué**

Le relief (**Carte 4**) s'organise de façon circulaire autour de la baie. La ligne de crête, constituée de mornes, est bien dessinée et culmine à 366 m au niveau de Morne Pavillon.

Dans la partie centrale, une plaine, majoritairement occupée par le bourg du Robert, borde le front de la baie. Dans la moitié sud du bassin (sous bassin versant de la rivière Cacao), la plaine laisse rapidement place à un relief marqué par de très fortes pentes. On constate ainsi 300 m de dénivelé sur environ 2 km de distance au niveau de Pontaléry, soit une pente moyenne de 15%. Dans la moitié nord, la transition entre la plaine et les versants abrupts sous la ligne de crête est plus douce avec une zone intermédiaire de collines, bien visible sur le sous bassin versant de la rivière Mansarde.

On peut ainsi définir, en s'intéressant au paysage géomorphologique du bassin, 3 grands ensembles paysagers :

- Les plaines qui bordent le fond de la baie,
- La zone d'arrière plaine constituée de collines peu élevées avec des pentes moyennes,
- Le fond de bassin avec les mornes de la ligne de crête et les versants longs et abrupts qui arrivent parfois directement à la baie (zone de Four à Chaux).

L'organisation assez simple du relief et le caractère ramassé du bassin font que le réseau hydrographique (**Carte 4**) est constitué de rivières et ravines qui partent des lignes de crêtes et arrivent sans détour jusqu'à la baie. La rivière la plus longue est la rivière Cacao qui depuis les hauteurs de Fond Nicolas jusqu'à son exutoire totalise un linéaire de 4,6 km. Dans les parties amont des sous bassins, le réseau est très encaissé, comme peuvent en témoigner les cascades et gorges de Fond Nicolas sur le sous bassin versant de la rivière Cacao.

### **2.3.2 Un climat peu contraignant**

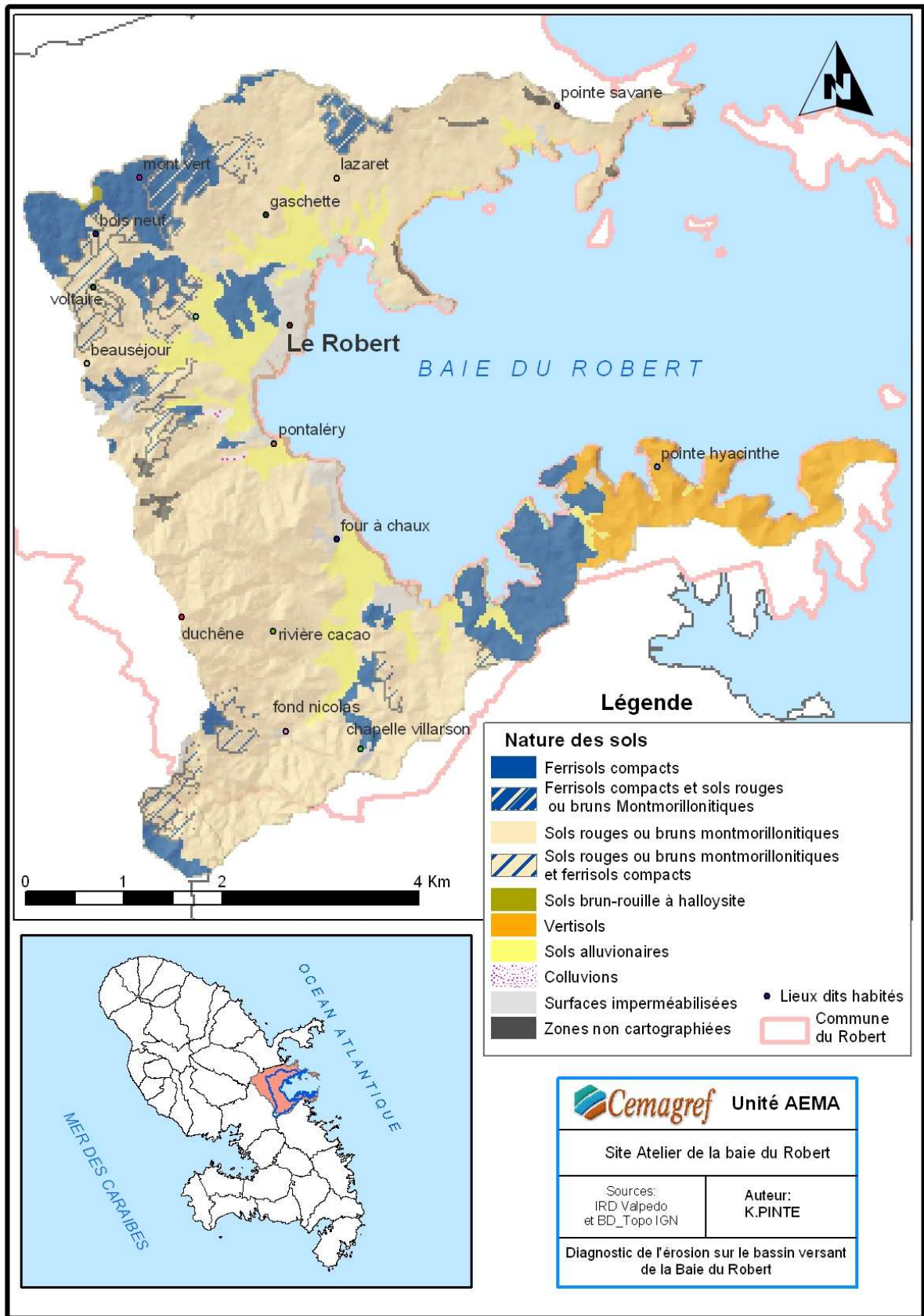
Le bassin versant de la baie est soumis à un climat tropical à saison sèche relativement marquée. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1500 mm à 2000 mm.

Les parties du bassin les plus à l'est, constituées par Pointe Savane et Pointe Hyacinthe sont moins arrosées et ont un carême très marqué. Ces zones, situées à une altitude très faible et éloignées des premiers reliefs, ne reçoivent pas de pluie pendant la saison sèche.

Par contre les parties plus centrales du bassin (fond de la baie, et ligne de crête centrale) ont une saison sèche moins prononcée. Ces zones, à altitude plus marquée ou se trouvant au pied de reliefs, reçoivent pendant la saison sèche de faibles pluies issues de la conjonction entre nuages poussés par les alizés et turbulences formées sur les reliefs. La **Figure 1** résume les moyennes mensuelles réalisées sur 13 années et pour deux stations pluviométriques.

L'ensemble du bassin reste concerné par les épisodes pluvieux d'hivernage plus conséquents (ondes tropicales, tempêtes tropicales et ouragans).

Il est précisé ici que l'étude de l'effet du relief sera approfondie dans la suite de l'étude (Partie 3, Chapitre 1.4).



Carte 5 : Carte Pédologique simplifiée au 1/20 000<sup>ème</sup>

### **2.3.3 Des sols très argileux**

Selon la cartographie de Colmet-Daage (1969) réactualisée par l'IRD (Unité Valpédo de Montpellier), les sols présents sur le bassin versant sont presque exclusivement issus de formations volcaniques anciennes (**Carte 5**). Soumis à un climat relativement humide, ces formations ont subi une altération chimique poussée pour donner des sols très argileux. On rencontre ainsi une majorité de sols brun rouge à montmorillonite et ferrisols compacts. Les vertisols se rencontrent en majorité sur la pointe Sud du bassin (Pointe Hyacinthe), zone occupée d'ailleurs par des pâturages.

Ces sols argileux constituent des terres agricoles relativement bonnes, d'autant qu'elles se situent pour la plupart sur des zones en pente, favorisant le drainage du sol et évitant ainsi leur engorgement. Seules quelques bananeraies entre Four à chaux et Fond Nicolas se trouvent sur des terrains très plats.

### **2.3.4 Les mangroves : un milieu tampon**

Les mangroves constituent un écosystème particulier à l'interface entre milieu marin et milieu terrestre qui se développe au sein de la zone intertidale (Desse et Saffache, 2005). Dans la présente étude, les zones couvertes par la mangrove n'ont pas été considérées comme faisant partie du bassin versant. Néanmoins, il ne faudra pas perdre de vue dans l'étude des apports terrigènes que ces mangroves constituent des zones de dépôts non négligeables. Les mangroves de la baie du Robert font donc partie intégrante de la richesse écologique de la baie grâce notamment au rôle tampon qu'elles peuvent jouer.

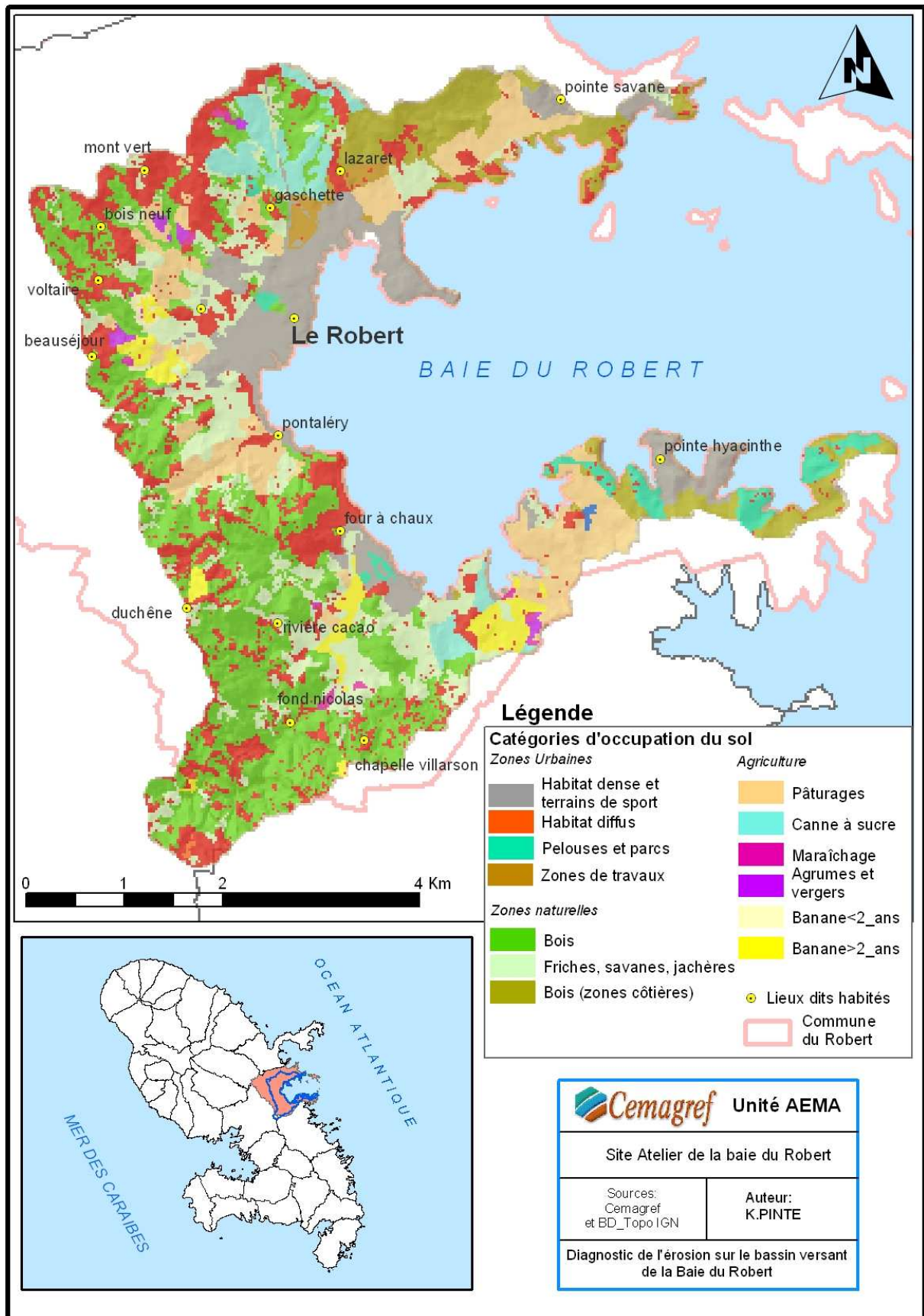
## **2.4 Développement du bassin : entre ruralité et urbanisation**

### **2.4.1 Un territoire en pleine mutation**

Selon Marie et Lucas (2005), la commune du Robert connaît aujourd'hui des modifications territoriales importantes en terme d'habitat, que ce soit sur sa frange littorale ou son arrière pays. Les avantages offerts par la baie du Robert (cadre de vie agréable, activités écotouristiques de plus en plus développées) expliquent en partie l'évolution positive de la démographie.

Depuis cinquante ans, les recensements successifs enregistrent en effet un solde moyen de +15% (Plan local d'urbanisme de la commune, ou P.L.U, 2002). Actuellement, le Robert se classe comme la troisième commune du département, avec une densité de 449 habitants au km<sup>2</sup>.

Cette augmentation de la population n'est pas sans conséquence sur la gestion de l'habitat. On constate ainsi une occupation diffuse du territoire (**Annexe 1**), avec une installation éclatée des nouvelles propriétés. Le bourg lui-même ne concentre que 14% des logements (P.L.U, 2002). Ceci signifie que plus de trois habitants sur quatre vivent dans les mornes de l'arrière pays. On constate donc une mutation de l'organisation urbaine, qui se traduit notamment sur le territoire par un mitage du tissu rural.



Carte 6 : Occupation du Sol sur le bassin versant de la baie du Robert

## 2.4.2 Une agriculture diversifiée

Les informations données ici, sont en majorité issues de l'étude spatiale des risques agro-environnementaux menée par le Cemagref (Marie et Lucas, 2005) dans le cadre du projet Liteau II. Pour mener cette étude, des enquêtes chez les agriculteurs ont été réalisées (correspondant à 68 % de la surface agricole du bassin).

Cette surface agricole ne représente que 24% de la superficie totale du bassin. Le reste du territoire est occupé par l'habitat et les zones naturelles (bois et savanes) comme en témoigne la **Carte 6** de l'occupation du sol. Trois activités agricoles dominent, en terme de surface : l'élevage (57%), la culture de la canne à sucre (14%) et celle de la banane (12%). Les élevages intensifs (porcins, cunicoles, avicoles), les vergers (plantés en goyaves et agrumes) et le maraîchage se partagent le reste de la surface agricole.

Une des principales difficultés dans le diagnostic de l'agriculture sur le bassin versant de la baie (remarque identique pour le reste de la Martinique) est de faire la part entre l'agriculture déclarée et commerciale et l'agriculture non déclarée, pratiquée dans les jardins ou sur des terrains annexes. Ainsi, même si le maraîchage n'occupe que 2% de la surface agricole du bassin, les potagers individuels se comptent-ils en grand nombre sur le territoire.

La taille des exploitations est relativement faible (10 ha en moyenne) mais la répartition des surfaces est très hétérogène selon les activités. Les parcelles de pâturage sont en moyenne plus grandes que celles vouées à la culture de canne et de banane (respectivement 9 ha, 4,5 ha, 2,35 ha). Les parcelles fruitières et maraîchères, toujours identifiées sur des exploitations tournées vers une activité principale différente (banane ou élevage), sont en revanche à la limite du jardin individuel.

L'activité agricole du bassin versant de la baie se caractérise donc par une diversité importante, tant par les activités recensées que par la structure d'exploitation. Le morcellement des parcelles domine (petites surfaces, parcelles en friche), lié en partie à la pression urbaine croissante (Scherer, communication personnelle).

### ***Bilan de la partie 1***

Le bassin versant de la baie du Robert est donc un territoire qui représente à la fois les spécificités de l'île (climat, contraste du relief) mais aussi un certain nombre de particularités qui en font un terrain d'étude tout à fait intéressant. Autour d'une baie aux enjeux économiques et environnementaux multiples, le bassin versant se positionne comme un territoire en mutation dont les activités exercent des pressions sur le milieu récepteur (pollutions diffuses, apports solides terrigènes, etc.). Ce constat a été réalisé alors que la situation devient de plus en plus préoccupante et que l'écosystème de la baie semble réellement menacé.

Cette présentation du milieu d'étude est nécessaire à la compréhension des interactions entre le milieu naturel et les différentes activités se déroulant sur le bassin. En effet, ces interactions engendrent des conflits d'intérêt qui, on le verra par la suite, sont au centre de la problématique de l'érosion des sols.

Devant un territoire contrasté, siège de multiples activités, où le paysage naturel et agricole est mité par l'urbanisation, le défi est de concevoir un diagnostic de l'érosion qui puisse intégrer toute cette variabilité. La partie qui suit amène à expliquer comment s'est opéré le choix d'une méthode de diagnostic.



Les processus d'érosion et leurs formes	Les causes : différentes sources d'énergie	Les facteurs de résistance du milieu	Les zones affectées en Martinique
<b>Erosion en nappe :</b> Formes : pellicule de battance ou de sédimentation, « demoiselle coiffée »	Battance des gouttes de pluie (énergie cinétique des gouttes)	1° le couvert végétal, 2° la pente, 3° le sol, 4° les techniques et structures antiérosives.	Surfaces agricoles et zones de sol nu (travaux)
<b>Erosion linéaire</b> Formes : griffes, rigoles, ravines	L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et du carré de sa vitesse	1° la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité, 2° le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de, 3° la capacité d'infiltration, résistance du profil du sol et des racines.	Surfaces agricoles, zones péri-urbaines, zones naturelles (bois, savanes, etc.)
<b>Erosion en masse</b> Formes : creeping, glissement, coulée boueuse	Gravité, déséquilibre des versants	1° le poids de la couverture au sol + eau + végétaux, 2° l'humidification du plan de glissement, 3° la nature du terrain (lithologie).	Généralisé

**Tableau 2 : Description des principales formes d'érosion rencontrées en Martinique**

## Partie 2 : Comment appréhender l'érosion à l'échelle d'un bassin versant ?

Avant de commencer cette étude, seule l'échelle de travail était fixée : le bassin versant de la baie. Le choix était laissé de réaliser un diagnostic purement qualitatif ou de tenter de quantifier les apports terrigènes. C'est en se rendant compte de la complexité du territoire robertin que nous avons cherché une méthode qui puisse intégrer la diversité des formes d'érosion.

### 1 Illustration de la diversité des formes d'érosion sur le bassin versant.

Négligeable sur le territoire martiniquais, l'érosion éolienne est écartée de cette étude. C'est de l'érosion hydrique dont il sera question. Les paragraphes suivants illustrent les principales formes d'érosion que l'on rencontre en Martinique et plus précisément sur le bassin versant.





#### 1.1 Ruissellement et érosion en nappe à grande échelle

Le ruissellement, agent de l'érosion des sols, apparaît lorsque l'eau des précipitations ne s'infiltre plus dans le sol. Deux théories principales se partagent l'explication de la genèse du ruissellement. Il y a celle du **ruissellement « Hortonien »**, qui explique que le ruissellement naît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. Puis il y a la théorie du **ruissellement par saturation**, qui indique que le ruissellement est dû à des précipitations qui tombent sur un sol saturé en eau, et donc incapable d'en infiltrer plus. En Martinique, ces deux phénomènes coexistent.

La forme d'érosion « universelle » que l'on rencontre sur un grand nombre de surfaces et qui correspond également au stade initial de la dégradation des sols, est l'érosion en nappe. La cause de l'érosion en nappe est l'énergie cinétique des gouttes de pluies, qui arrache des particules de terres au niveau des agrégats du sol. Ces particules sont d'abord transportées par effet « splash » à proximité de leur lieu d'arrachage puis elles sont reprises par le ruissellement en nappe. Si le ruissellement perd de la vitesse, sa capacité de transport diminue et les particules en suspension vont se déposer pour former une croûte de sédimentation. On parle alors de croûte de battance sédimentaire. Cette croûte de sédimentation diminue l'infiltrabilité du sol et favorise ainsi le déclenchement du ruissellement. Comme l'indique le **Tableau 2**, le principal facteur qui limite l'érosion en nappe est la couverture végétale. Etant donné le développement de la végétation sous climat tropical humide, les principales surfaces affectées sont les surfaces agricoles. En effet, les sols cultivés passent souvent par différents états de couverture au cours des cycles cultureux.

En Martinique, le ruissellement et l'érosion en nappe ont été étudiés sous différentes cultures (banane, ananas, canne à sucre, maraîchage), sur des parcelles expérimentales. (Roose et Khamsouk, 1999 ; Saffache, 1999 ; Hubert, 2005). Les observations réalisées sur ces sites expérimentaux montrent que la stabilité structurale des sols argileux martiniquais et la présence d'une litière importante empêchent la formation d'une croûte de battance. Les sols sont en revanche fortement tassés, notamment sous bananeraie, par le passage répété des ouvriers de récolte (Roose, 1999). Les taux d'érosion sous ces cultures couvrantes sont généralement très faibles (entre 0 et 0.05 tonne/ha/5mois) mais peuvent atteindre 75 tonnes/ha/5mois sur sol nu et labouré.

Ces études montrent également que l'érosion linéaire prend vite le relais de l'érosion en nappe sur les parcelles en forte pente.

Formes d'érosion	Ablation de terre (en tonnes/ha/an)	Illustration de la forme d'érosion
<b>Erosion en nappe</b>	1 à 5	 <p data-bbox="699 521 1422 555"><b>Photo 1 : Témoin d'érosion en nappe (micro demoiselle coiffée)</b></p>
<b>Erosion linéaire</b>		<p data-bbox="209 719 344 752">- griffes</p> <p data-bbox="512 719 596 752">5 à 10</p>  <p data-bbox="836 965 1286 999"><b>Photo 2 : Griffes d'érosion sur un talus</b></p> <p data-bbox="209 1061 344 1095">- rigoles</p> <p data-bbox="501 1061 608 1095">10 à 100</p>  <p data-bbox="791 1375 1331 1408"><b>Photo 3 : Rigole d'érosion dans une bananeraie</b></p> <p data-bbox="209 1464 344 1498">- ravines</p> <p data-bbox="491 1464 619 1498">100 à 500</p>  <p data-bbox="842 1839 1278 1872"><b>Photo 4 : Ravine dans une bananeraie</b></p>
<b>Mouvements de masse</b>	>> 1000	

**Tableau 3 : Ordres de grandeurs des pertes de sols causés par les principales formes d'érosion hydrique**



## **1.2 L'érosion linéaire : le cas des ravines**

L'érosion linéaire apparaît lorsque l'érosion en nappe s'organise, ou quand un flux concentré d'eau en provenance d'une surface amont arrive sur une surface aval et augmente la force de cisaillement du flux sur des sols fragilisés. Selon Roose (1994), on distingue les formes d'érosion linéaire en fonction de leur profondeur. On parle de griffes lorsque les canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsqu'ils dépassent 10 cm de profondeur et de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de centimètres (plus de 50 cm).

Par rapport à l'érosion en nappe qui affecte de grandes surfaces, l'érosion linéaire est plus localisée. Si on rapporte les pertes en terre à l'hectare, l'érosion linéaire est en revanche plus importante (**Tableau 3**). En dehors de la perte nette de sol engendrée par l'érosion linéaire, se sont les dégâts qu'elle provoque qui sont beaucoup plus spectaculaires que ceux occasionnés par l'érosion en nappe. Se sont d'ailleurs les seuls problèmes d'érosion pointés du doigt par les agriculteurs. En effet, les ravines sapent les traces et entaillent les parcelles, gênant ainsi fortement leur travail.

Dans le cas de la Martinique, il convient de faire un point particulier sur les ravines qui ont une signification beaucoup plus large. Le terme de ravine est employé pour distinguer les éléments du réseau hydrographique qui ont un écoulement temporaire (seulement pendant la saison des pluies) des rivières permanentes. La limite entre rivière et ravine reste floue car il arrive que certaines ravines coulent toute l'année. Sur le bassin versant de la baie du Robert, on peut noter ainsi le cas de la ravine Gaschette qui a un écoulement permanent (sauf sécheresse extrême).

Dans la suite de l'étude, quand nous emploierons le terme de ravine, ce sera pour faire référence à une forme d'érosion. Nous verrons à ce titre que les formes d'érosion les plus importantes se confondent parfois avec le réseau hydrographique permanent et temporaire.

## **1.3 Les mouvements de terrain en Martinique**

Les propos qui suivent sont extraits pour la majorité de l'ouvrage de Maurice Meunier (1999) intitulé "Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique - Hydrologie des crues, hydraulique et dynamiques torrentielles". Dans la partie qui traite des apports de matériaux solides des versants vers les rivières, l'auteur s'intéresse notamment aux mouvements de terrain, qui de l'avis unanime sont les zones qui procurent en fait l'essentiel des matériaux torrentiels. Ces mouvements de terrain se produisent pour la majorité sur les terrains naturels (boisés) qui se situent sur les pentes les plus fortes. De ce fait, ce sont des phénomènes qui peuvent se produire de manière assez généralisée d'un point de vue spatial, lors des fortes pluies.

Ces mouvements de terrain affectent principalement les zones fortement végétalisées pourtant peu sujettes à l'érosion superficielle généralisée. Ce sont des phénomènes de sub-surface ou souterrains. Il existe un grand nombre de types de mouvements de terrain. Les plus classiques sont les écroulements et les glissements plans ou circulaires dont la surface de rupture correspond à une discontinuité lithologique, pédologique ou structurale.

S'il est reconnu que les mouvements de terrain apportent beaucoup de matériaux aux rivières qui lors des crues reprennent ces matériaux glissés, il est en revanche beaucoup plus difficile de déterminer les volumes solides apportés.

Le risque de mouvement de terrain est cependant bien réel en Martinique compte tenu de l'aléa climatique et du contexte géomorphologique qui vulnérabilise le territoire tout entier.

Description du modèle	SHETRAN	ANSWERS	WEPP	EUROSEM	LISEM	MMF	PLER	KINEROS
<b>Echelle temporelle</b>	Continue	Evènement pluvieux	Continue	Evènement pluvieux	Evènement pluvieux	Annuelle	Continue	Evènement pluvieux
<b>Taille du Bassin</b>	<2000km <sup>2</sup>	<50km <sup>2</sup>	<2,6km <sup>2</sup>	parcelle et petits bassins	petits bassins(10 à 1000 ha)	<1km <sup>2</sup>	50 à 100 ha	petits bassins versants
<b>Unité spatiale d'intégration</b>	Grille Raster	Grille Raster	Grille Raster	Pentes uniformes	Grille Raster	Eléments morpho-paysagers homogènes	Grille Raster	Sub-divisions hydrologiques du bassin versant
<b>Processus simulés</b>								
<i>Ruissellement</i>								
Excès de précipitations	O	O	O	O	O	O	O	O
Saturation de surface/Infiltrabilité	O	N	N	N	O	O	O	O
<i>Processus érosif</i>								
Impact des gouttes de pluie/Ruissellement	O	O	O	O	O	O	O	O
Création de rigoles	N	N	O	O	O	N	N	O
Battance	N	O	O	O	O	N	N	O
Erosion de berge	O	N	N	O	N	N	N	N
Création de ravines	O	N	N	N	N	N	N	N
Mouvements de masse	O	N	N	N	N	N	N	N
<b>Format des sorties</b>								
Taille des sédiments en fonction du temps	O	O	N	O	O	N	N	O
Production de sédiments en fonction du temps	O	O	O	O	O	N	O	O
Carte d'érosion	O	O	O	N	O	O	O	N
<b>Occupation du sol</b>	Tout type de couverture végétale	Agriculture principalement	Grande variété d'occupations du sol	Agriculture principalement	Agriculture principalement	Agriculture principalement	Agriculture principalement	Agriculture et urbain

O = Oui ; N= Non

**Tableau 4 : Présentation des principaux modèles à base physique**

Pour la présente étude, la vulnérabilité du bassin versant aux mouvements de terrain n'a pas été prise en compte directement. La cartographie existe et aurait pu être incorporée mais après consultation de celle-ci, on se rend compte qu'une grande partie du bassin est très vulnérable. Un des principaux critères utilisés pour cette cartographie est la pente. Or la pente est un paramètre utilisé, on le verra par la suite, pour modéliser la vulnérabilité à l'érosion. L'information obtenue par les travaux du BRGM aurait donc apportée une part de redondance. Par ailleurs, le diagnostic qu'il aurait fallu réaliser sur le terrain pour valider l'information sur les mouvements de terrain aurait dû bénéficier d'une étude à part entière, impossible à réaliser dans le temps imparti.

En conclusion, même si les trois principales formes d'érosion hydrique coexistent sur le bassin versant, l'étude de l'érosion a été centrée sur les phénomènes superficiels. Il s'agit notamment de mieux comprendre la répartition des formes d'érosion sur le bassin et de s'interroger sur les moyens disponibles pour les identifier. Pour cela, une synthèse bibliographique a été réalisée sur les travaux scientifiques déjà engagés ayant recours à la modélisation.

## **2 Comment modéliser l'érosion à l'échelle du bassin versant ?**

Dans le diagnostic des apports terrigènes, la démarche initiale choisie, en concertation avec les attentes de la collectivité, consiste à aborder l'érosion à l'échelle du bassin versant tout entier afin d'en avoir une idée synthétique mais également d'en extraire les zones d'intérêt majeur. Pour répondre à cette démarche, l'utilisation de la modélisation est un outil pratique à vocation d'aide à la décision.

Après une synthèse bibliographique des modèles de prédiction de l'érosion (cf détail en **Annexe 2**), nous avons opté pour une approche modélisatrice par indicateurs des phénomènes d'érosion superficielle.

### **2.1 Des modèles quantitatifs inadaptés**

Selon Cerdan (2001), il est possible de regrouper les modèles en deux grandes catégories :

- Les modèles à base physique (approche déterministe),
- Les modèles empiriques.

Ces deux approches modélisatrices ont pour objectif principal, outre la spatialisation des phénomènes, de quantifier l'érosion.

#### **2.1.1 Les modèles physiques sont trop demandeurs en paramètres**

La modélisation à base physique décrit l'érosion au travers de représentations mathématiques des processus (ruissellement, arrachement des particules, dépôt, etc). Le **Tableau 4** présente les principaux modèles utilisés. Nombre de ces modèles (WEPP, LISEM, EUROSEM, STREAM) ont été développés sous climat tempéré dans des régions de grandes cultures fortement soumises à l'érosion en nappe. D'autres semblent plus polyvalents et plus adaptables aux conditions tropicales humides de la Martinique (PLER, MMF). Mais ces modèles sont très demandeurs en paramètres d'entrée avec le danger d'une sur-paramétrisation. Certains simulent par ailleurs les processus érosifs à des pas de temps bien trop précis (de l'ordre de la minute) par rapport à notre objectif.

Publication	Paramètres ajustés USLE
Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assesment in a tropical watershed, <b>Cohen</b> (2004), Kenya, Bassin versant de 330 km <sup>2</sup>	R: Facteur de Fourier : $F_i = p_i^2 / P_i$ ( $p_i$ : précipitations du mois le plus pluvieux, $P_i$ : précipitation moyenne annuelle)
	K: Utilisation des valeurs calculées par d'autres auteurs sur la base des travaux de Wischmeier
	LS: USLE2D, Algorithme de calcul inspiré des travaux de Desmet et Govers (calcul d'accumulation de flux)
	P: Pas utilisé
Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes, <b>Hoyos</b> (2005), Colombie, Bassin versant de 58 km <sup>2</sup>	C: Utilisation des valeurs calculées par d'autres auteurs sur la base des travaux de Wischmeier
	R: Calcul inchangé
	K: Calcul stabilité des agrégats (% d'agrégats stables) et de l'infiltrabilité (infiltromètre)
	LS: USLE2D, Algorithme de calcul inspiré des travaux de Desmet et Govers (calcul d'accumulation de flux)
RUSLE, <b>Millward</b> (1999), Mexican tropical watershed (ordre de grandeur: 100 km <sup>2</sup> )	P: Pas de pratiques conservatrices donc P=1
	Extraction de l'intensité à partir de l'analyse fréquentielle, $R = -0.0334 * P_a + 0.006661 P_a^2$ , ( $P_a$ : précipitations annuelles)
	LS: USLE2D, Algorithme de calcul inspiré des travaux de Desmet et Govers (calcul d'accumulation de flux)
	K: Calcul à partir de données de sols issues de cartes pédologiques et d'anciennes mesures de terrain
	C: Calcul à partir de données et classification Landsat (images satellitaires)
P : Pas de pratiques de conservation donc P=1	

**Tableau 5 : Exemples d'adaptation de l'USLE en milieu tropical**

### 2.1.2 L'approche empirique : l'USLE est-elle adaptable ?

Les modèles empiriques se basent en grande partie sur les travaux de Wischmeier en essayant d'adapter son équation universelle des pertes de sol (USLE, Universal Soil Loss Equation) à des bassins versants. Ces modèles cherchent à caler au bassin une formule de calcul des pertes en terre par l'érosion en nappe.

Cette équation permet de déterminer les volumes de ruissellement et les pertes annuelles de sol (en t/ha/an) dues à l'érosion en nappe et sur des pentes uniformes. Le but de ces travaux était d'étudier l'effet de différentes couvertures de sol et de différentes pratiques agricoles sur la production de ruissellement et de sédiments. Elle a été étalonnée à partir de mesures réalisées sur des parcelles expérimentales de 100 m<sup>2</sup> et dans les conditions de grandes cultures dans le centre des Etats-Unis. De nombreuses adaptations ont été tentées sous climat tropical (Hoyos, 2005 ; Cohen, 2004 ; Millward, 1999) avec plus ou moins de succès (**Tableau 5**).

Ce modèle, qui présente l'avantage d'avoir un faible nombre de paramètres d'entrée, se heurte à plusieurs limites pour son utilisation dans un environnement différent de celui où il a été étalonné. Ces limites sont (Roose, 1994) :

- Ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe.
- L'étalonnage sur des parcelles expérimentales de 100 m<sup>2</sup> pose la question du transfert d'échelle pour l'utilisation du modèle à l'échelle du bassin versant.
- Il ne s'applique que sur des zones de pentes faibles à modérées. En effet, sur les pentes supérieures à 15%, la source d'énergie prédominante devient celle du ruissellement et non plus celle de la pluie.
- La relation entre énergie cinétique et intensité des pluies n'est valable que pour le climat américain.

En marge des modèles empiriques et des modèles à base physique qui aboutissent à une évaluation quantitative de l'érosion, se situent des modèles plus qualitatifs avec une approche cognitive des phénomènes érosifs. Ces modèles sont basés sur une approche dite « experte ».

## 2.2 Approche experte de la modélisation de l'érosion

Le développement de la modélisation de l'érosion par l'approche experte vient du constat que :

- Dans les modèles physiques (De Roo, 1998), il y a un risque de sur-paramétrisation avec de nombreux paramètres qui peuvent interagir entre eux. Il faut ajouter à cela des difficultés et un biais important dans l'estimation et la mesure de tous ces paramètres sur le terrain. De plus, ils sont souvent difficilement utilisables par des utilisateurs autres que les concepteurs et demandent une formation appropriée.
- Les modèles à base empirique aboutissent à une quantification de l'érosion en nappe à partir de situations climatiques et hydrologiques trop éloignées de notre contexte.

Ainsi, De Roo (1998) préconise-t-il l'emploi de modèles plus simples couplés à des SIG et qui simulent les processus dominants. Ce sont Harris et Boardman (1990) qui proposent une approche experte comme approche simplifiée de la modélisation.



Ce type de modélisation a été repris par Le Bissonais *et al.* (2002) utilisant une méthode de croisement de paramètres sous forme de combinaisons logiques. Les paramètres sont hiérarchisés et pondérés à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs. A chaque combinaison est affecté un code de sensibilité à l'érosion des sols. Ce modèle est qualitatif, et il est représentable sous la forme d'une arborescence logique.

L'approche experte est à rapprocher ici de la conception d'indicateurs environnementaux. Le résultat du croisement des paramètres dans l'arborescence aboutit à la création d'un indicateur sur l'aléa érosif. On définira plus précisément ce qu'est un indicateur dans la partie qui suit.

La clef dans une telle approche est la définition des seuils et des classes de sensibilité à l'érosion sur la base de données existantes dans la littérature et par dires d'expert.

Les points négatifs soulevés avec cette démarche sont le caractère qualitatif de la modélisation et la difficulté d'intégrer la variabilité temporelle des processus érosifs. Pour augmenter la performance de ce type de modélisation, il est donc conseillé de l'intégrer à un SIG qui facilite l'actualisation des couches d'informations.

L'approche experte conduit souvent à une modélisation qualitative de l'érosion, cas des travaux de cartographie de l'aléa érosion à l'échelle de la France réalisés par Le Bissonais *et al.* pour l'IFEN. Cette cartographie rend à la fois compte de l'intensité de l'aléa et des types érosifs correspondant, afin de faire ressortir les spécificités régionales. Mais l'approche experte peut également aboutir à une évaluation quantitative de l'aléa érosion. C'est le cas du modèle STREAM (Souchère *et al.*, 2000) développé par les équipes INRA de Science du Sol d'Orléans et de l'UMR SAD APT de Grignon. Ce modèle permet de quantifier le ruissellement et les pertes en terre, tout en localisant les zones où ces phénomènes se produisent. Les échelles spatiales et temporelles de ce modèle sont le bassin versant et l'événement pluvieux. Il est particulièrement adapté à l'érosion sur sols battants dans les zones de grandes cultures. La démarche experte de STREAM repose sur l'existence d'une importante base de données de référence regroupant des expérimentations en laboratoire et au champ, de l'échelle du m<sup>2</sup> à l'échelle du bassin versant (Cerdan *et al.*, 2002).

**Conclusion :** A la suite de l'étude des différents types de modélisation de l'érosion hydrique existant dans la littérature, on peut conclure que la modélisation qualitative par approche experte est la plus adaptée pour évaluer l'érosion à l'échelle du bassin versant. Cette approche est en effet plus souple pour prendre en compte les diverses formes d'érosion dans la modélisation. C'est une approche qui permet également de concevoir un modèle à partir de la connaissance directe du terrain. La modélisation physique, elle, est incompatible avec la taille du bassin et le temps nécessaire pour l'acquisition de certains paramètres quantitatifs est insuffisant. Les essais d'adaptation des modèles empiriques en région tropicale se révèlent par ailleurs bien souvent peu fiables.

Nous avons donc opté pour une approche experte dont les critères répondent mieux aux objectifs de la première phase du diagnostic. Derrière cette approche de la modélisation, c'est la notion d'indicateur qui est sous-entendue. C'est un indicateur de vulnérabilité à l'érosion que le Cemagref a donc décidé de créer pour appréhender dans un premier temps l'érosion superficielle. Avant de détailler sa conception, il est utile de faire quelques précisions sur la notion « d'indicateur ».

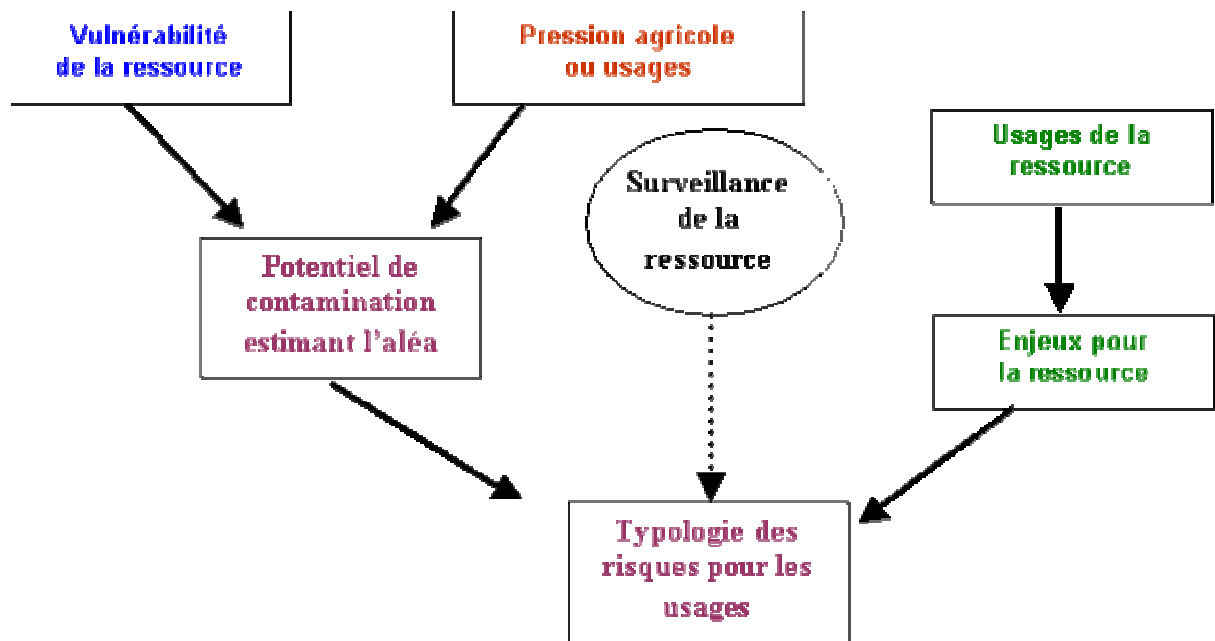


Figure 2 : Organisation des informations pour le diagnostic d'une ressource (CORPEN)



### 3 Qu'est ce qu'un indicateur de vulnérabilité à l'érosion ?

#### 3.1 Vulnérabilité, Aléa, Risque : Quel terme employer, pour quelle étude ?

Dans l'étude et diagnostic des catastrophes naturelles ou des pollutions environnementales, on fait souvent référence aux notions de vulnérabilité, de risque ou d'aléa. Il convient de faire un point sur le sens de ces termes afin d'éviter les confusions.

Le ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD) donne les définitions suivantes :

**L'aléa** : phénomène menaçant d'origine naturelle et/ou anthropique, susceptible d'affecter un espace donné [...]. Il se caractérise par sa nature, son intensité, sa probabilité d'occurrence et sa fréquence (quand elle peut être estimée).

**L'enjeu** : personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, systèmes, etc., susceptibles d'être affectés par un aléa naturel ou anthropique et de subir des préjudices ou des dommages.

**Vulnérabilité** (ou sensibilité): ensemble de conditions et de processus résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui augmentent la sensibilité des enjeux d'une communauté, d'une région, d'une nation aux effets des aléas. La vulnérabilité est un ensemble de **pré-conditions** qui se révèlent au moment de la catastrophe.

**Risque majeur** : le risque majeur est la situation dans laquelle des enjeux vulnérables se trouvent face à la menace d'occurrence d'un aléa qui aurait pour conséquences de graves pertes, dommages et dysfonctionnements.

Si on considère dans notre cas que l'enjeu est la protection de l'écosystème de la baie en évitant l'hypersédimentation, on peut donc décomposer l'étude de l'érosion par celles :

- De la vulnérabilité à l'érosion du bassin versant. Cette vulnérabilité est la conjonction de nombreux facteurs physiques, humains, etc., qui confèrent au milieu une potentialité de fourniture de particules solides.
- De l'aléa. Il est ici représenté par le climat et plus précisément par les événements pluvieux.
- Du risque, combinaison de la vulnérabilité et de l'aléa, et dont le niveau est augmenté par l'importance de l'enjeu. En d'autres termes, s'il ne pleut pas sur le bassin versant, il n'y a pas de risque d'hypersédimentation dans la baie. On peut également dire, qu'en l'absence d'enjeux (l'écosystème de la baie n'est pas menacé par l'hypersédimentation), le niveau de risque est également nul, même si le bassin versant, fortement vulnérable à l'érosion, est soumis à un aléa climatique important.

**Remarque** : Les notions décrites précédemment sont à rapprocher des notions exposées par le CORPEN, dont les idées sont décrites dans la **Figure 2**. Dans le cadre de notre diagnostic, la vulnérabilité à l'érosion croisée à l'aléa climatique donne l'aléa érosif qui se combine ensuite aux enjeux pour aboutir au risque érosif.



## 3.2 Indicateur et représentation spatiale

### 3.2.1 Définition

Ce qui suit est issu du rapport de Lucas G., (2004) qui a réalisé une bibliographie sur ce sujet.

Parmi les diverses définitions d'indicateurs données, on retiendra celle de l'OCDE (1993) pour qui un indicateur est un paramètre ou une valeur dérivée de paramètres donnant des informations sur un phénomène.

L'OCDE a également défini un modèle de représentation des indicateurs suivant l'organisation « Pression-Etat-Réponse ». Dans le cadre du diagnostic, le type d'indicateur choisi est un indicateur de pression destiné à mettre en évidence les zones qui émettent potentiellement des particules solides.

La construction des indicateurs se fait en plusieurs étapes qui peuvent se résumer ainsi :

- Collecte des données brutes après un tri opéré parmi les informations disponibles.
- Analyse des données et choix des descripteurs (ou paramètres).
- Combinaison des descripteurs et conception de l'indicateur. Pour l'indicateur de vulnérabilité à l'érosion, nous concevons un indicateur composite qui est issu de l'agrégation de variables sur la base de règles de décision. On revient ici sur la notion de modélisation à base experte qui offre la formulation de ces règles de décision.

### 3.2.2 Indicateur et notion d'échelle spatiale

Lors de la construction d'un indicateur, il convient de déterminer son échelle spatiale de validité. Pour le site atelier de la baie du Robert, le choix a d'abord été de lancer les études à l'échelle du bassin versant tout entier, dans une logique de diagnostic. L'échelle spatiale de travail est donc le bassin général de 23 km<sup>2</sup>.

Le travail à cette échelle permet d'acquérir des données suivant plusieurs modalités : observations et enquêtes de terrain, interprétation de photographies aériennes, données de l'IGN (BD\_Topo) et Modèle numérique de terrain (MNT). Cette échelle de travail intermédiaire permet de récolter un certain nombre de données sur le terrain mais nécessite en parallèle l'appui de supports à moyenne échelle (photographie aérienne, MNT).

### 3.2.3 Le concept d'objet spatial de référence

Selon Lucas (2004), l'interaction complexe entre l'échelle spatiale (fixée par l'étude) et l'hétérogénéité spatiale (à mesurer ou à représenter) est une difficulté majeure en géomatique. En 1988, Wood *et al.* avancent le concept "d'aire représentative élémentaire" en considérant qu'à un phénomène étudié correspond une aire de travail et une échelle associée idéale. Lorsque l'adéquation est bonne, la modélisation ou l'explication d'un phénomène est alors à la fois plus simple à appréhender et meilleure.

L'Objet spatial de référence (OSR) choisi en premier lieu pour l'indicateur est le pixel (la résolution choisie est de 5m pour l'ensemble des couches d'information, **Figure 7**), qui permet de conserver la couche d'information la plus précise. Par ailleurs, en obtenant un indicateur par agrégation de couches au format raster (pixel), il est possible de faire correspondre ce dernier à un nouvel OSR souhaité, sous bassin versant ou parcelle agricole par exemple.



## **Bilan de la partie 2**

La création d'un indicateur de vulnérabilité à l'érosion répond donc :

- au besoin de modéliser l'érosion à l'échelle du bassin versant,
- à la volonté de représenter qualitativement les phénomènes d'érosion pour cibler les zones les plus vulnérables.

En se limitant à la vulnérabilité, on exclut la prise en compte de l'aléa climatique (justification au chapitre n°1.4 de la partie 3).

Rappelons que l'on ne traite que l'érosion hydrique superficielle (érosion en nappe et érosion linéaire). Les mouvements de masse (glissements) ont été écartés car ils doivent faire preuve d'un diagnostic propre.

La création d'un indicateur de vulnérabilité à l'érosion nécessite désormais:

- de choisir les paramètres qui serviront à concevoir l'indicateur,
- d'établir les règles de décision qui permettront de passer de paramètres indépendants à l'indicateur final.

Ces deux étapes sont détaillées dans la troisième partie.

Facteur: Couverture du sol		
<i>In Vigiak et al., 2005</i>	INT (Interception factor)	<b>BF:</b> 0,2 <b>V:</b> 0,15 <b>F:</b> 0,15 <b>SC:</b> 0,25 <b>B:</b> 0,23
	CC (Canopy Cover Factor)	<b>BF:</b> 0,63 <b>V:</b> 0,25 <b>F:</b> 0,86 <b>SC:</b> 0,30 <b>B:</b> 0,31
	GC (Ground Cover Fraction)	<b>BF:</b> 0,67 <b>V:</b> 0,9 <b>F:</b> 0,94 <b>SC:</b> 0,49 <b>B:</b> 0,16
	C (Crop parameter USLE)	<b>BF:</b> 0,05 <b>V:</b> 0,35 <b>F:</b> 0,01 <b>SC:</b> 0,15 <b>B:</b> 0,40
<i>In Hessel et al., 2005</i>	Plant Cover (fraction)	<b>B:</b> 0,17 <b>V:</b> 0,12 <b>F:</b> 0,95 <b>BF:</b> 0,65
	Leaf Area Index	<b>B:</b> 0,96 <b>V:</b> 0,23 <b>F:</b> 1,73 <b>BF:</b> 1,38
<i>In Hoyos, 2005</i>	Erodibilité moyenne sous couvert (produit de la stabilité des agrégats > 2mm par la probabilité que l'intensité 30 minutes max des précipitations ne dépasse pas le taux d'infiltration à saturation)	<b>Pâturage:</b> 0,00012 <b>BF</b> 0,00011 <b>forêt naturelle:</b> 0,0009

BF: Savane/friche, V: Maraîchage, F: Forêt, Sc: Canne à sucre, B: Banane

**Tableau 6 : Quelques valeurs de coefficients dans la littérature concernant la couverture du sol**

## Partie 3 : Modélisation de la vulnérabilité à l'érosion

### 1 Les paramètres retenus pour créer l'indicateur

Afin de pouvoir construire le modèle expert, il est nécessaire de posséder un certain nombre de données (expérimentales) qui servent de clefs de décision pour la hiérarchisation et le seuillage des paramètres. C'est grâce à une base de données conséquente sur la mesure de l'érosion sur sols battants que Le Bissonais *et al.* (2002) ont pu établir leur modèle par approche experte. Cette partie est destinée à recenser parmi la littérature les données issues d'expérimentations ou d'études dans un environnement similaire à celui de la Martinique. La synthèse de toutes ces informations complétées par l'avis de quelques experts permettra de choisir les paramètres avec les classes et seuils de valeurs.

#### 1.1 La couverture du sol : le facteur clef

Dans cette étude, on distinguera les couverts imperméabilisants (surfaces bétonnées, bâti très dense) des couverts perméables (couverts végétaux).

##### 1.1.1 Les surfaces imperméables

Peu d'études se sont intéressées à juste titre à ce type de surface, puisque aucune érosion ne se produit localement. En effet, le sol totalement couvert ne subit pas l'action de la pluie et est donc entièrement protégé. On verra par contre le rôle négatif que jouent ces surfaces dans la formation et l'accélération du ruissellement, exposant les surfaces situées à l'aval à des risques accrus d'érosion.

##### 1.1.2 Le couvert végétal

D'après Roose (1994), parmi les **facteurs** conditionnels de l'érosion, le couvert végétal est certainement le facteur le plus important puisque l'érosion est multipliée par 1000 lorsque toutes choses égales par ailleurs, le couvert végétal d'une parcelle diminue de 100% à 0%. Toujours selon Roose, quels que soient l'agressivité du climat, l'érodibilité des sols ou l'intensité des pentes, si le sol est couvert à plus de 90%, les phénomènes d'érosion seront négligeables.

Le rôle du couvert végétal est double et répond à la problématique de l'érosion en nappe et de l'érosion linéaire:

- Faire obstacle à l'agressivité de l'impact des gouttes de pluies (diminution de l'énergie cinétique).
- Ralentir le ruissellement, diminuant ainsi sa force de cisaillement.

Les paramètres utilisés dans la littérature pour caractériser la couverture végétale sont nombreux. Le **Tableau 6** donne quelques exemples utilisés dans des modèles empiriques. La valeur de ces coefficients importe peu. Nous retiendrons surtout l'ordre relatif des valeurs pour chaque catégorie de couverture du sol, qui apporte une information utile pour établir le classement du **chapitre 2.2.1, partie 3**.





Les études en Martinique de Khamsouk (2001) sur l'érosion en parcelles expérimentales ont montré le rôle primordial du paillis sous culture dans la lutte contre l'érosion. Ainsi a-t-il mesuré pour des cultures de canne à sucre et banane avec des andains de paille disposés perpendiculairement à la pente, des pertes en terre respectivement inférieures à 0,05 t/ha/an et à 0,5 t/ha/an et ce, pour des pentes de 9% à 40%. Des parcelles de sols nus donnaient, elles, des valeurs de 85 à 150 t/ha/an pour des pentes de 11% à 40%. Les travaux de Khamsouk concluent ainsi sur l'effet positif du paillage et montrent également que les cultures de canne sont légèrement moins sensibles à l'érosion que les cultures bananières. En effet, la canne en dehors des cas où elle est replantée (labour avec enfouissement des résidus) ou brûlée lors de la récolte, présente une couverture végétale très importante procurée par la canne elle-même et par les résidus de la culture précédente laissés au sol (Khamsouk précise que la couverture du sol peut atteindre 98%). Pour la culture de banane, le pourcentage de couverture végétale est fortement lié aux techniques culturales et à l'âge de la bananeraie.

On peut ainsi distinguer tout d'abord (communication personnelle de Khamsouk) les bananeraies établies des petits planteurs. Ces bananeraies (âgées de plus de 2 ans) ne sont jamais entièrement coupées. Les plants sont remplacés au cas par cas quand les rendements diminuent. Ces bananeraies bénéficient donc d'une couverture végétale relativement homogène et constante d'une année à l'autre. Les bananeraies des grands planteurs sont, quant à elles, entièrement replantées dès que les rendements diminuent. L'année qui suit la replantation, la bananeraie est donc plus sensible à l'érosion car la couverture au sol est nettement moins importante (les bananiers ne sont pas au maximum de leur développement et il n'y a pas de résidus).

Selon Roose, (1994), sous les couverts denses (80% de couverture du sol) et complets toute l'année (forêts denses, forêts secondaires arbustives, savanes arborées non brûlées, jachères naturelles, prairies de plus d'un an, les cultures arbustives avec plantes de couverture ou de paillage), l'érosion est toujours négligeable (0,01 t/ha/an à 1,5 t/ha/an).

Enfin, des travaux conduits par Saffache (1999) dans le cadre d'une thèse réalisée sur l'envasement de la baie du Marin en Martinique ont montré que les cultures maraîchères étaient les plus sensibles à l'érosion en les comparant avec les pâturages et les forêts. Des mesures sous simulateur de pluie (20 mm/h pendant 100 heures) ont donné les résultats d'érosion suivants:

- Forêts : 1 t/ha/100h
- Pâturage : 2 t/ha/100h
- Maraîchage : 6 t/ha/100h

**Conclusion :** Le paramètre retenu pour le facteur couverture du sol est donc le type de couverture du sol. Il s'agira à partir de la cartographie de l'occupation du sol de retranscrire chaque classe d'occupation du sol en terme d'intensité de couverture (% de couverture) mais également en terme de structure de couverture (notamment pour les cultures). En effet deux cultures à pourcentage de couverture égal peuvent avoir un rôle de protection contre le ruissellement différent suivant l'organisation du couvert (en rangs, orientation des résidus par rapport à la pente).



## 1.2 La topographie : une influence qui fait l'objet de discussion

La pente est un facteur important dans l'étude de l'érosion. Il est courant de penser que plus la pente est forte plus les phénomènes érosifs sont importants. Il convient toutefois de conserver l'idée que l'érosion peut affecter des pentes faibles. C'est le cas dans la formation des croûtes de battance qui imperméabilisent le sol et provoquent des phénomènes de ruissellement sur des pentes même très faibles. Différents paramètres explicitent le rôle de la pente : forme (non abordé ici), inclinaison et longueur.

### 1.2.1 La pente

Les résultats diffèrent selon les régions et les types de sol. L'inclinaison de la pente a un rôle accélérateur du ruissellement. Selon Roose (1994), au dessus de 15% de pente, l'énergie cinétique du ruissellement l'emporte sur l'énergie cinétique des gouttes de pluie. L'ensemble des auteurs ayant travaillé sur l'influence de l'inclinaison de la pente s'accordent pour dire que l'érosion croît exponentiellement avec la pente (l'exposant varie suivant les régions et les cultures testées) pour des sols nus ou des sols recouverts partiellement pour une culture. Lal (1976) a montré au Nigéria que l'érosion croît exponentiellement avec la pente sur sols ferralsitiques nus mais qu'avec la présence de résidus en surface, l'érosion est négligeable pour des pentes entre 1 et 15%. D'autres mesures laissent à penser que les pentes de 15 à 20% constituent un seuil de pente à partir duquel les phénomènes érosifs s'accroissent. Roose (1980) a montré ainsi en Côte d'Ivoire sur des plantations d'ananas avec des résidus enfouis que l'érosion restait négligeable pour des pentes inférieures à 7% mais dépassaient largement la tolérance au-delà de 20%.

Ces résultats sur l'amplification de l'érosion avec la pente sont à nuancer avec ceux obtenus pour le ruissellement. Plusieurs auteurs (Hudson en 1957, Lal en 1975, Roose en 1973, Khamsouk en 2001) ont observé que le ruissellement se stabilise autour de 20% de pente. Une explication (communication personnelle de Khamsouk et Roose, 1973) viendrait du fait qu'à partir d'une certaine pente, des phénomènes de type creeping (petites coulées boueuses) se forment. Ces coulées découvrent des surfaces de sol non saturées en eau sur lesquelles l'infiltration des pluies se trouve améliorée. Le phénomène de creeping continue à faire augmenter l'érosion mais le ruissellement se stabilise avec la reprise partielle de l'infiltration. Par ailleurs, sur des fortes pentes, la battance sédimentaire est limitée puisque la vitesse du ruissellement empêche les particules arrachées par "effet splash" de sédimenter. Les sols sur fortes pentes conservent donc plus longtemps leur capacité d'infiltration, d'autant plus que les sols sur forte pente sont beaucoup mieux drainés.

Plus que la pente, c'est souvent la position dans la toposéquence qui est importante. Ainsi, des sols en bas de pente sont-ils plus sensibles que le même sol situé en milieu de versant où la pente est maximale. Ceci a été observé notamment sur les versants marneux dans le pré-Rif Marocain par Heusch (1970). Ceci peut s'expliquer par le ruissellement hypodermique qui s'infiltré jusqu'au niveau imperméable et qui ressurgit en bas de pente, créant ainsi des ravines qui remontent par érosion régressive.

Dans notre étude, il sera difficile de tenir compte de ce paramètre.

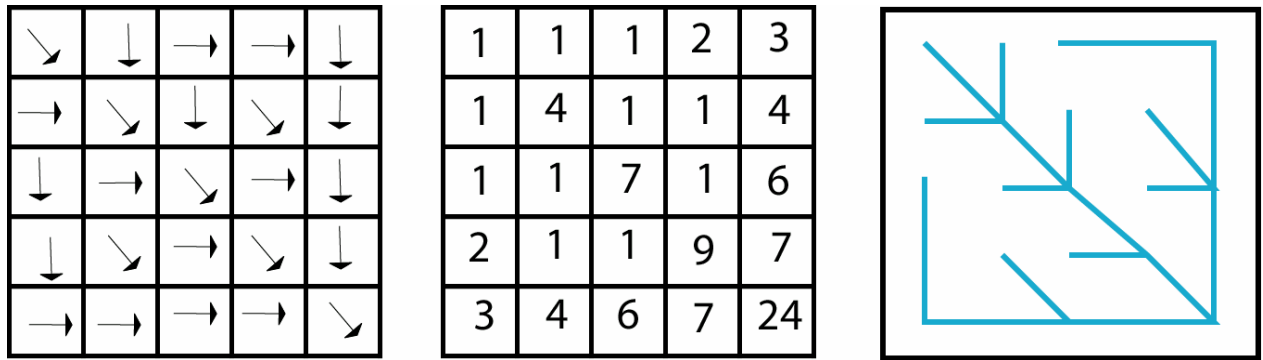


Figure 3 : Principe d'élaboration de la grille d'accumulation de l'écoulement

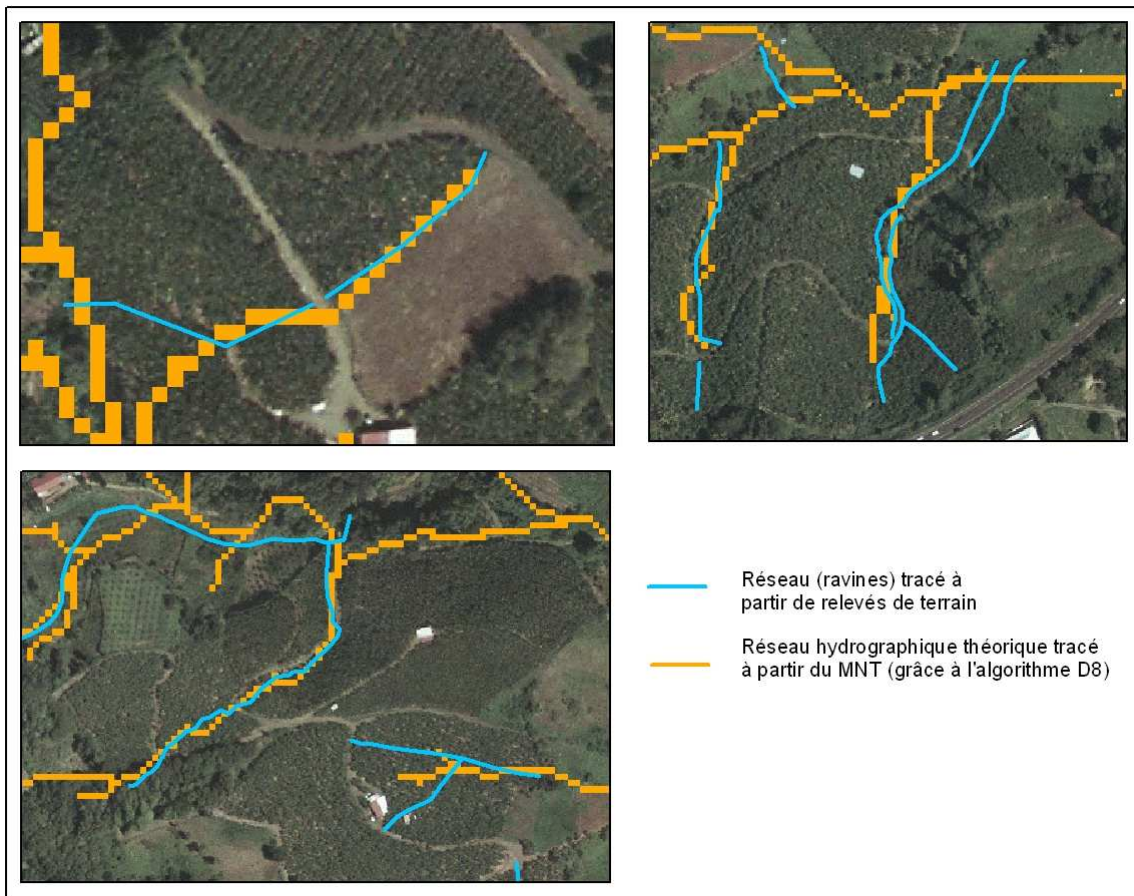


Figure 4 : Comparaison du réseau théorique tracé à partir du MNT et du réseau tracé à partir des relevés de terrain

## 1.2.2 La longueur de la pente

La longueur de la pente est connue comme étant un facteur aggravant de l'érosion. Si les résultats scientifiques concernant la relation entre pente et érosion divergent, notons les relations de croissance exponentielle de l'érosion en fonction de la longueur de la pente qu'ont trouvé Zing (1940) et Hudson (1973). Les auteurs s'accordent à dire par ailleurs que ce paramètre interagit beaucoup avec le type de sol et la végétation.

Selon Roose (1994), plutôt que d'essayer de trouver des relations empiriques ou de les adapter à des milieux de conditions physiques différentes, une observation sur le terrain de la distance à partir de laquelle des rigoles apparaissent peut suffire.

En Martinique, l'influence de ce facteur n'a jamais été étudiée. Néanmoins, il sera pris en compte en calculant l'accumulation des flux à partir du MNT.

La grille d'accumulation des flux est issue d'un MNT traité par un algorithme de calcul appelé « D8 », créé par Jenson et Domingue (1988) et qui permet, par analyse différentielle de l'altitude de tous les pixels, de déterminer le sens des écoulements puis d'additionner les pixels qui s'enchaînent dans l'écoulement. Un pixel à l'exutoire possède la valeur la plus élevée, tandis qu'un pixel sur une ligne de crête possède une valeur très faible (**Figure 3**).

Cette méthode permet donc d'obtenir approximativement un ordre de grandeur de la longueur de pente. Toutefois, il faut nuancer la précision de cette méthode puisque les drains (tranchées à ciel ouvert, servant de canal d'évacuation de l'eau hors de la bananeraie) dans les bananeraies, les routes ou les traces ne sont pas pris en compte alors qu'ils segmentent la pente et par la même occasion le ruissellement. L'utilisation du MNT et de cet algorithme permet par ailleurs de distinguer en reclassant la grille raster les zones où le ruissellement se concentre à l'extrême, « traçant » ainsi un réseau hydrographique théorique.

Le paramètre « accumulation de l'écoulement (ou flux) » apporte donc une information sur la vulnérabilité à l'érosion linéaire. En comparant ce tracé théorique avec le tracé des ravines sur le terrain, on peut être globalement satisfait de ce paramètre (**Figure 4**).

**Conclusion :** Le facteur topographique va donc intervenir à double niveau dans la conception de l'indicateur :

- Avec le paramètre d'inclinaison de la pente (en pourcentage). Ce paramètre intervient dans la formation de l'érosion superficielle en général.
- Avec le paramètre « accumulation de l'écoulement » qui lui intervient pour modéliser la vulnérabilité à l'érosion linéaire.

## 1.3 L'érodibilité

L'érodibilité s'intéresse à l'aptitude d'un sol à résister aux processus érosifs (battance et entaille par le ruissellement). Cette érodibilité est fonction de diverses caractéristiques pédologiques. Les paramètres pédologiques utilisés pour caractériser l'érodibilité d'un sol varient d'un auteur à l'autre. On peut noter ainsi les paramètres utilisés par Wischmeier *et al.* pour déterminer le facteur K de l'Equation Universelle des Pertes de Sol (cf 1.1.1). Dans le MMF modèle de Morgan, les paramètres pédologiques utilisés sont : humidité à la capacité au champ, densité de l'horizon superficiel, profondeur hydrologique effective, index de détachabilité et cohésion de la surface du sol.



Les mesures d'érodibilité sur des sols tropicaux ont été réalisées pour la plupart en Afrique et concernent bien souvent l'érosion en nappe. Roose et Sarrailh (1989-1990) ont par exemple publié un recueil de 20 années de mesure d'érodibilité de sols tropicaux sur parcelles expérimentales. Ces mesures concernent de nombreux sols en climat tropical sub-humide, sec ou équatorial. Ce sont en majorité des sols ferrallitiques argilo-sableux sur granite qui d'après leurs mesures sont plus érodibles que les vertisols argileux. Ces données sont difficilement utilisables pour la Martinique où les sols présents sont très argileux.

Khamsouk (2001) a réalisé pour sa thèse des mesures d'érodibilité sur sol brun rouille à halloysite. Ce sont des sols relativement jeunes destinés à évoluer en sols ferrallitiques et ferrisols. Les résultats des mesures donnent des valeurs de  $K < 0.12$  (0.12 sur des pentes de 11%, 0,05 et 0,03 pour des pentes de 25% et 40%). Ces valeurs classent les sols brun rouge à halloysite parmi les sols très résistants à la battance de la pluie. Ces travaux indiquent également que l'érodibilité diminue quand la pente augmente. Ceci peut paraître paradoxal mais les tests de stabilité structurale réalisés (méthode de Le Bissonais) ont montré que la stabilité augmentait avec la pente. Ceci rejoint les résultats d'autres auteurs qui avaient observé que le ruissellement se stabilisait à partir d'une certaine inclinaison de pente car le processus érosif changeait (ruissellement plus incisif, diminution du risque de battance).

Selon Khamsouk (communication personnelle), les résultats obtenus sur sol brun rouille à halloysite peuvent être étendus aux sols ferrallitiques et ferrisols compacts présents en grande majorité sur le bassin versant de la baie du Robert. Ces derniers sont plus âgés mais leur richesse en argile leur confère une bonne stabilité structurale. Il est donc possible d'attribuer à ces sols un degré d'érodibilité équivalent.

Toutefois, des différences subsistent. Les ferrisols compacts comparés aux sols ferrallitiques sont plus pauvres en argile et plus riches en limon, ce qui les rendrait plus sensibles à une dégradation de leur structure sous l'effet des gouttes de pluie.

Par ailleurs, il faut savoir que tout comme le facteur topographique, l'érodibilité des sols fait l'objet de nombreuses interactions avec les autres facteurs. Roose (1989-1990) décrit ainsi dans sa synthèse sur l'érodibilité des sols tropicaux que ce paramètre varie avec :

- Le temps : les sols secs et encroûtés de la fin de la saison sèche sont moins sensibles que les sols au cœur de la saison des pluies. Cela s'explique par la forte cohésion des sols secs et par la détérioration pendant la saison humide de l'infiltrabilité et de la stabilité structurale des sols (Quantin et Combeau, 1962).
- Les techniques culturales (travaux superficiels, travaux profonds, enfouissement des résidus).
- Le climat : les relations issues de l'analyse des différentes mesures réalisées en milieu tropical sont peu évidentes. Les sols sous climat très humide seraient généralement plus résistants que les sols sous climat tropical sec.

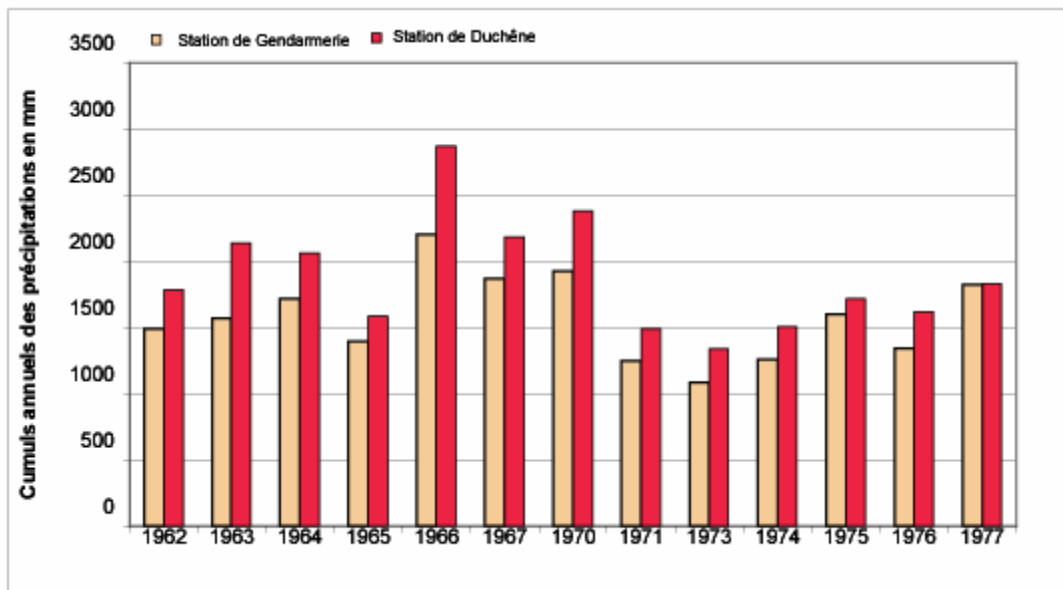


Figure 5 : Cumuls annuels de 13 années de mesure sur les stations de Duchêne et Gendarmerie

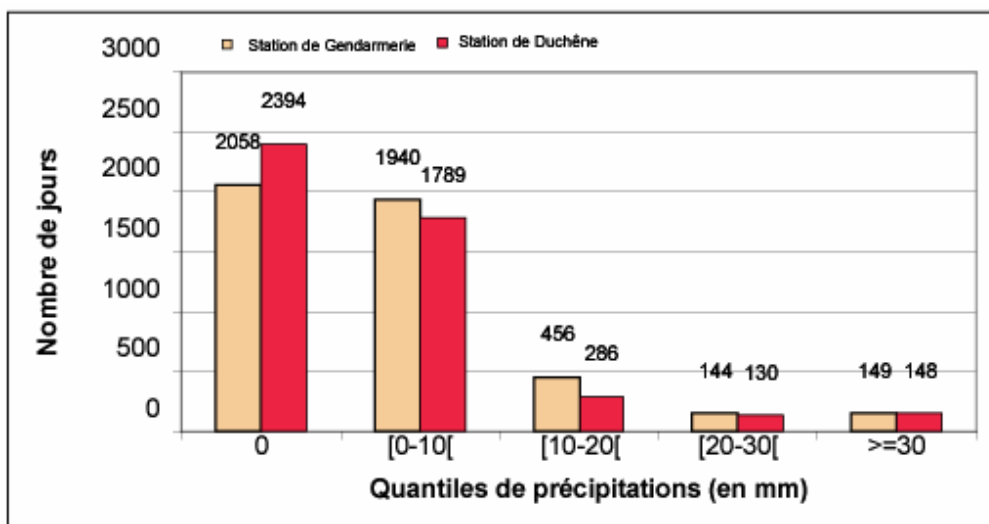


Figure 6 : Répartition des pluies journalières en 5 classes sur 13 années



**Conclusion:** De nombreux paramètres peuvent décrire l'érodibilité d'un sol et ces paramètres sont très variables dans le temps et l'espace. Pour appréhender cette hétérogénéité, des mesures de terrain sont nécessaires. Or, dans le cadre de ce diagnostic, le but était bien de garder un raisonnement qualitatif tout au long de la démarche. Par ailleurs, certains auteurs s'accordent à dire que la différence de stabilité des sols argileux en Martinique par rapport à l'érosion est négligeable ; ce qui fait de l'érodibilité un paramètre secondaire.

Nous avons donc décidé de simplifier énormément le paramètre pédologique en ne tenant compte que du type d'argile que contiennent les différents types de sols. Le type d'argile a été donné par la notice pédologique de la carte de Colmet-Daage (1969) et va déterminer les propriétés de retrait/gonflement du sol.

#### **1.4 Le facteur climatique : des pluies homogènes sur le bassin ?**

L'objectif de cette étude est de voir s'il y a une hétérogénéité des pluies au sein du bassin qui aurait pu justifier l'utilisation dans les chapitres précédents d'une couche d'information sur l'aléa climatique dans la modélisation de l'érosion à l'échelle du bassin versant.

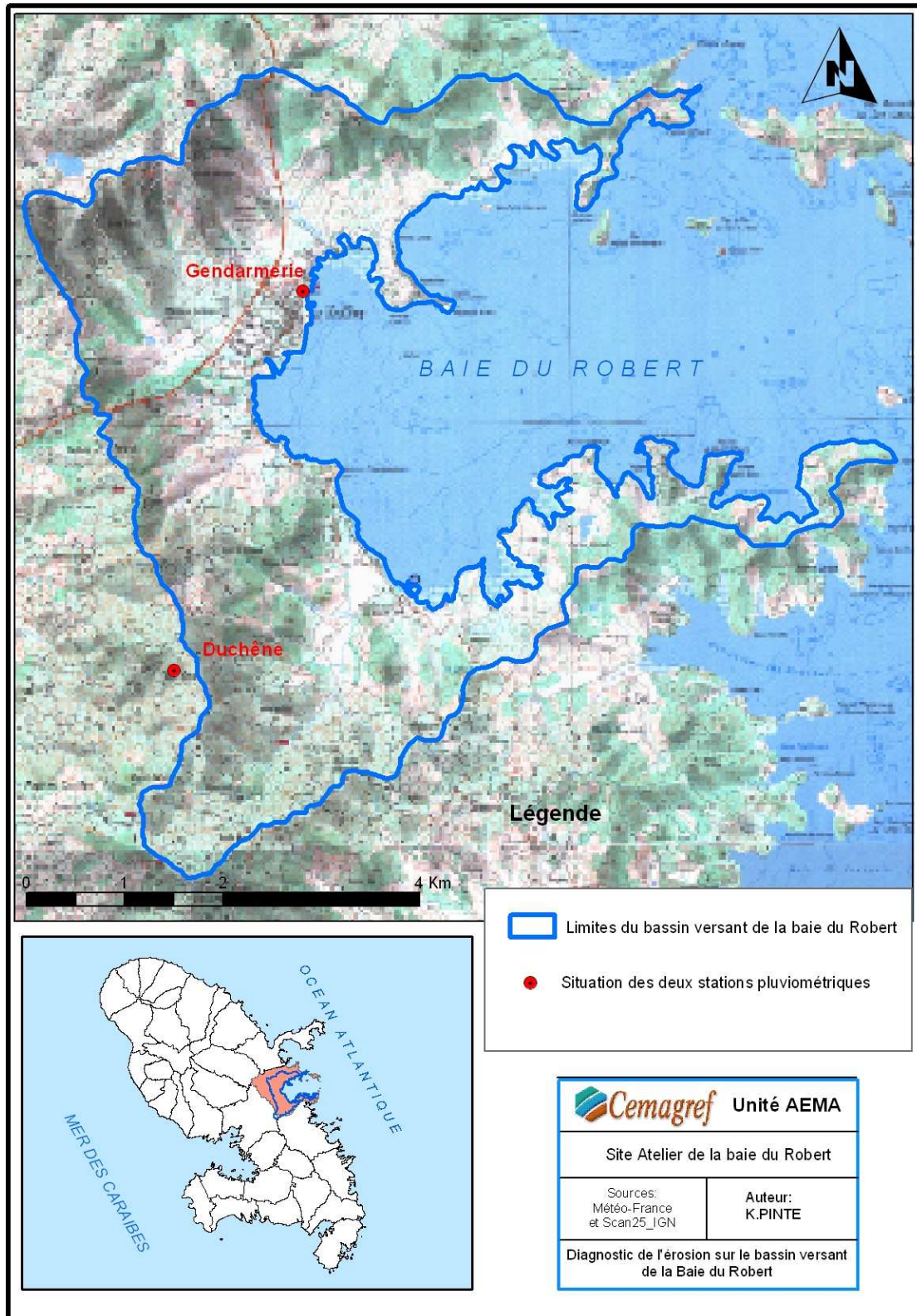
Etant donnée la taille du bassin versant (23 km<sup>2</sup>), une des principales sources d'hétérogénéité potentielle est à chercher du côté de l'influence du relief (effet orographique). L'étude des séries des stations de la Gendarmerie (altitude de 10 m) et de Duchêne (altitude de 230 m) devrait permettre de déceler une éventuelle influence du relief (augmentation des précipitations avec l'altitude).

L'étude des cumuls annuels (**Figure 5**) sur les deux stations indique que la station de Duchêne est chaque année excédentaire par rapport à la station de la Gendarmerie. Cet excédent varie de 669 mm en 1966 à seulement 10 mm en 1977. Cette différence peut être interprétée comme l'effet de l'altitude. Cela se confirme si on regarde pour quel type de cumuls journaliers on observe des différences.

Après avoir établi des classes de précipitations journalières et dénombré les jours dont les cumuls journaliers sont compris dans les classes (**Figure 6**) on s'aperçoit sur 13 années de mesure que :

- La station de Duchêne totalise plus de jours avec des pluies journalières faibles (mais non nulles) que la station de mesure de Gendarmerie.
- Les deux stations totalisent pour des événements majeurs (cumuls journaliers > 20 mm) un nombre sensiblement identique de jours. Pour les événements > 30 mm on arrive même à la quasi égalité avec respectivement 149 jours et 148 jours pour Duchêne et Gendarmerie.

La différence de cumul annuel entre les deux stations s'expliquerait donc par un plus grand nombre de jours où les pluies sont minimales mais non nulles. On peut donner deux raisons à cela qui viennent confirmer les informations données dans la partie 1 sur le régime des pluies en Martinique :



Carte 7 : Situation sur la carte au 1/ 25 000<sup>ème</sup> de l'IGN des deux stations pluviométriques de Météo-France utilisées dans l'étude .

- Le nombre plus important de jours où les pluies sont faibles sur Duchêne (ou le nombre de jours plus important où le cumul est égal à zéro sur Gendarmerie) peut s'expliquer par un effet de l'altitude. Ces faibles cumuls correspondent à des pluies d'origine convective où le relief joue un rôle primordial dans la formation de ces phénomènes.
- Les événements pluvieux majeurs (ondes tropicales, tempêtes tropicales et cyclones) sont des phénomènes beaucoup moins localisés et sont caractérisés par un front pluvieux actif qui balaye l'ensemble du bassin indépendamment du relief. On rappelle que les deux pluviomètres sont distants à vol d'oiseau de 4 km environ.

Une étude fréquentielle des valeurs extrêmes (**Annexe 3**) confirme que la différence pour les événements pluvieux majeurs entre les deux stations n'est pas significative.

**Conclusion** : L'effet orographique sur les pluies affectant le bassin versant du Robert existe mais il ne semble pas discriminant pour notre problématique sur l'érosion. En effet, les principaux phénomènes érosifs ont lieu pendant les événements climatiques majeurs, or les deux stations semblent se comporter de façon identique pour ces phénomènes. Ces résultats nous confortent donc dans l'idée de ne pas prendre en compte pour l'instant le facteur climatique dans l'étude de l'érosion à l'échelle du bassin versant.

## ***Bilan***

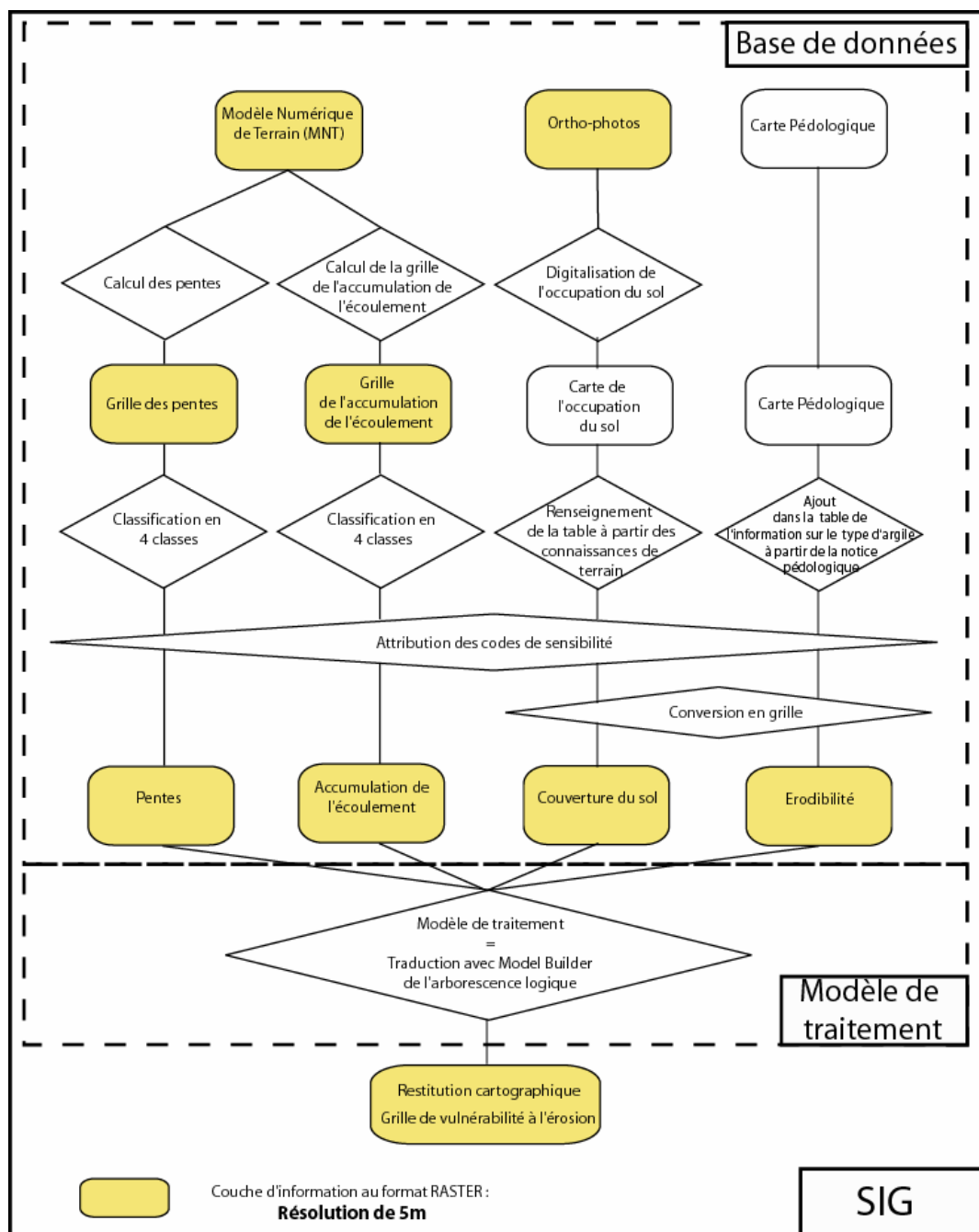
Les paramètres choisis sont ceux classiquement utilisés dans la littérature. Quatre paramètres ont été retenus pour la modélisation du risque érosif :

- L'influence de la couverture du sol (tant en intensité qu'en organisation). L'organisation du couvert fait référence notamment aux pratiques culturales.
- L'inclinaison de la pente (en %).
- L'accumulation de l'écoulement le long de la pente.
- Le type d'argile des sols.

L'ordre précisé ci-dessus correspond à l'importance des paramètres dans le contrôle du processus érosif établi.

Paramètres d'entrée	Support cartographique	Acquisition
Couverture du sol	Carte de l'occupation du sol	Etablie (K.PINTE) par photo-interprétation des ortho photos 2004 et du parcellaire agricole cartographié suite à des enquêtes de terrain réalisées en 2005 dans la première phase du projet (Méthode d'acquisition en <b>Annexe 4</b> ).
Pente et longueur de pente ou accumulation des écoulements	MNT à 25m rééchantillonné à 5m	Issue des travaux d'un précédent stagiaire sous la direction de Sylvain Labbé de la maison de la Télédétection.
Erodibilité	Carte des sols au 1/20 000ème	Obtenu de l'IRD Valpedo de Montpellier dans le cadre de la digitalisation de la carte pédologique de la Martinique au 1/20 000 ème.

**Tableau 7 : Supports cartographiques ayant servi à la constitution de la base de données**



**Figure 7 : Schéma fonctionnel du SIG mis en place**

## 2 Construction de l'indicateur

### 2.1 Modélisation sous Système d'information géographique (SIG)

Pour une approche spatiale à l'échelle du bassin versant, la constitution d'une base de données géographiques semblait indispensable. Ceci d'autant qu'un grand nombre de données étaient déjà digitalisées et géoréférencées. Le **Tableau 7** présente les supports cartographiques desquels ont été tirées les paramètres d'entrée du modèle.

#### **Définition :**

*« Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées. »*

*(F. de Blomac, 1994)*

Le rôle du SIG dans la présente étude peut être décrit selon deux grands axes (**Figure 7**) :

- d'une part, au regard de « la base de données », qui est mise en place en fonction des besoins spécifiques des phénomènes à représenter. Dans ce cas, le phénomène à représenter est la vulnérabilité à l'érosion du bassin versant. Les informations récoltées et compilées dans la base de données sont donc liées aux facteurs qui ont été choisis pour concevoir l'indicateur,
- et d'autre part, sous l'angle du « modèle de traitement », procédure visant à croiser les données en vue d'obtenir une nouvelle information. Le modèle mis en place est ici destiné à l'agrégation des couches d'information suivant les règles de décision données par l'arborescence logique. Le modèle de traitement a été conçu grâce à l'extension Model Builder du logiciel Arcgis 9.1 d'Esri. Cette extension permet de rassembler sous forme d'un modèle l'ensemble des requêtes spatiales à réaliser.

### 2.2 Choix des classes et seuils de valeurs pour chaque paramètre

L'**Annexe 5** indique la correspondance entre les classes des paramètres et les codes de vulnérabilité utilisés pour le modèle de traitement sous SIG.

#### 2.2.1 Catégories de couverture du sol

Elles tiennent compte, dans le cas des surfaces agricoles, des techniques culturales qui notamment pour les bananeraies, peuvent faire varier fortement la couverture du sol par la culture et les résidus. Les grandes catégories utilisées sont présentées ci-dessous. Elles sont classées par ordre décroissant de l'influence de la couverture du sol.

##### 2.2.1.1 Les surfaces urbaines :

Ce sont les zones imperméabilisées sur lesquelles ne se produit que du ruissellement et pas d'érosion. Elles correspondent notamment au bourg du Robert et à quelques lotissements densément construits. La couverture est considérée ici comme égale à 100%. Il faut bien préciser que l'urbain est celui des pays développés c'est-à-dire que le béton et le goudron sont majoritairement utilisés. Il ne faut pas le confondre avec les territoires urbains des pays en voie de développement où les voies de communication restent bien souvent en terre et au sein desquels les phénomènes d'érosion sont très présents et spectaculaires (Tchotsoua et Bonvallot, 2000).





**Photo 5 : Végétation dense (savane)**



**Photo 6 : Végétation rase (Pâturage)**



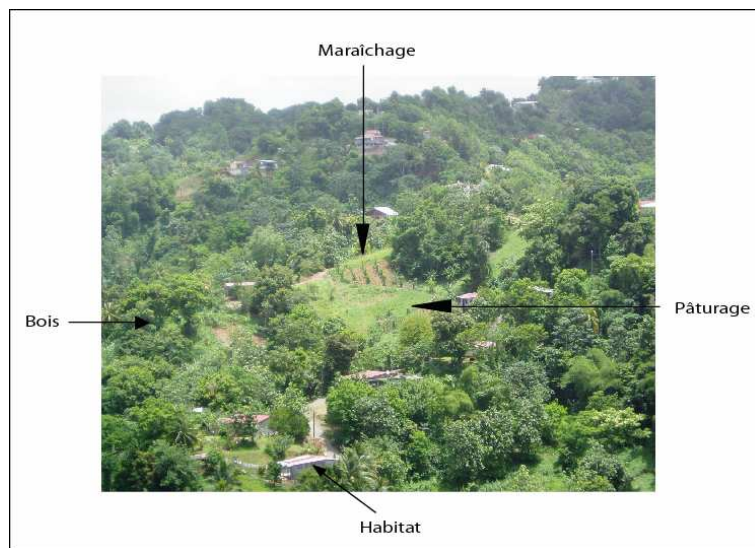
**Photo 7 : Champs de canne à sucre à différents stades autour de la récolte**



**Photo 8 : Détail d'un champs de cannes quelques semaines après la récolte**







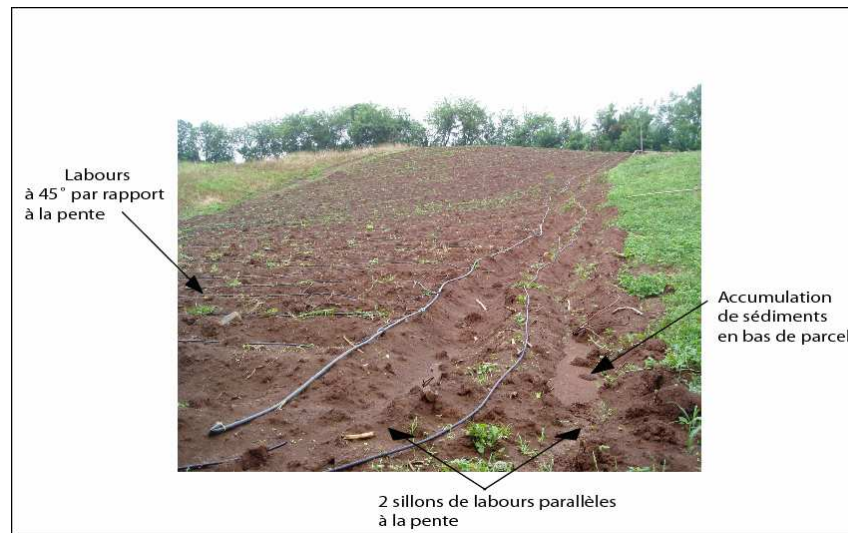
**Photo 9 : Paysage d'habitat diffus :**



**Photo 10 : Bananeraie > 2ans**



**Photo 11 : Bananeraie < 2 ans**



**Photo 12 : Maraîchage**



Les terrains de sport (football et tennis) sont également inclus dans cette catégorie.

#### **2.2.1.2 Végétation dense (Photo 5) :**

Cette catégorie regroupe l'ensemble des surfaces recouvertes à plus de 80% par de la végétation (bois, savanes, friches). On y regroupe également les vergers (agrumes et goyaves) qui sont fortement enherbés.

#### **2.2.1.3 Végétation rase herbacée (Photo 6) :**

Cette catégorie regroupe principalement les pâturages. La couverture végétale est en général bonne sur les pâturages présents sur le bassin. Les traces de surpâturage sont peu fréquentes. Néanmoins, la couverture du sol par la végétation est plus faible que dans les zones de savane et de friche. Certains pâturages présentent des traces de passages répétés des animaux ce qui crée des zones potentiellement érodables et concentratrices du ruissellement. On peut noter que les pâturages situés à proximité du littoral sont en période sèche un peu plus dégradés et avec une couverture végétale légèrement diminuée.

On regroupe également dans cette catégorie les pelouses des grandes propriétés privées disposées sur Pointe Hyacinthe.

#### **2.2.1.4 Canne à sucre (Photo 7) :**

La couverture végétale est très bonne. Elle est fournie à la fois par la canne qui est très couvrante mais également par les résidus laissés au sol après la récolte. En effet sur le bassin versant, les résidus ne sont pas brûlés. La canne à sucre offre donc une bonne protection du sol. Sa phase de couverture maximale correspond par ailleurs à la période humide. L'orientation des rangs de plantation influe peu.

#### **2.2.1.5 Canne à sucre post-récolte (Photo 8) :**

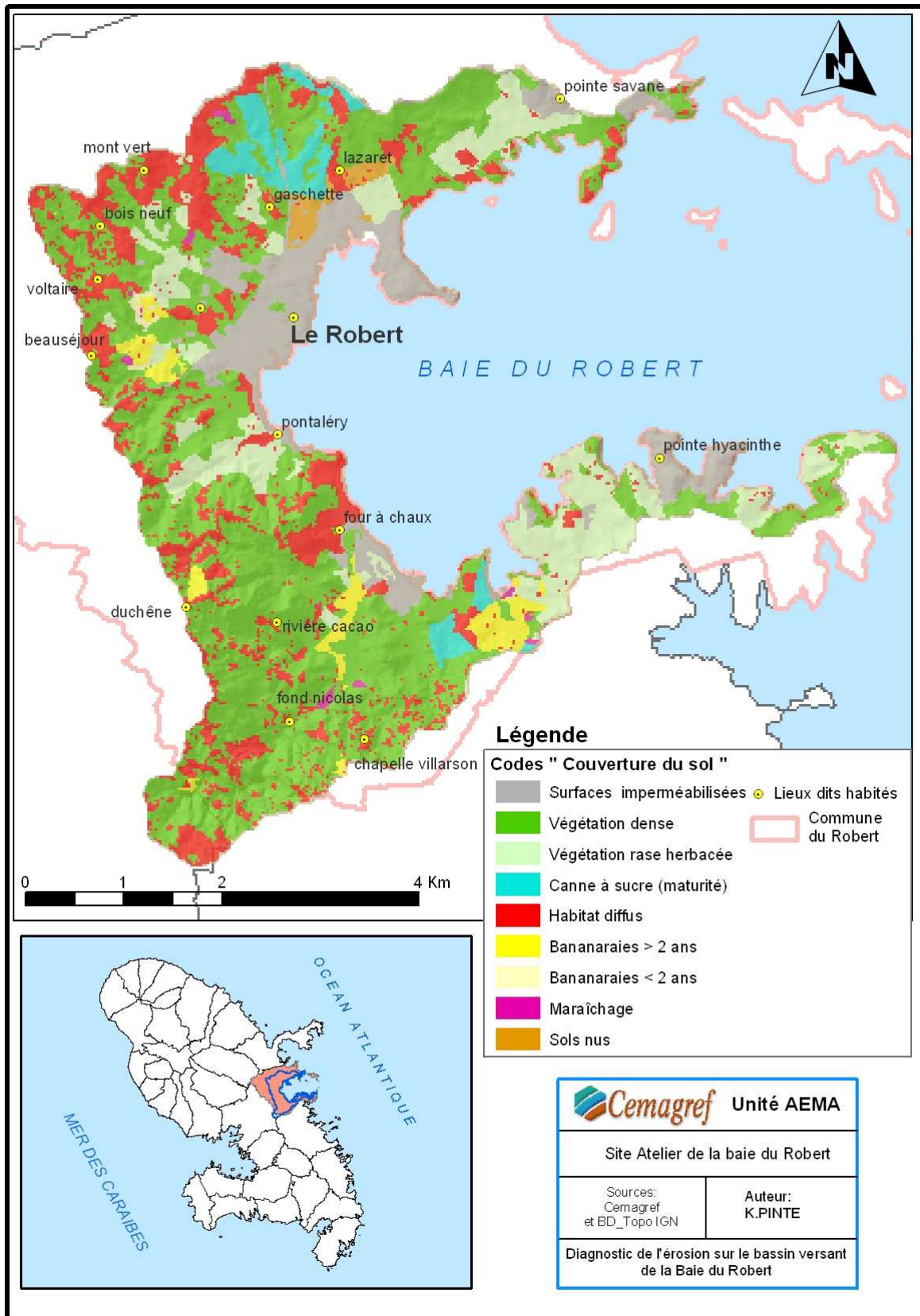
C'est le stade où la culture est la plus sensible à l'érosion. Néanmoins (sauf dans les cas où elle est replantée ce qui entraîne un labour préalable ou si les résidus sont brûlés), si les résidus sont laissés sur place, le sol reste relativement bien couvert. Ce stade s'étale de la récolte (avril sur le bassin) à fin juin, ce qui correspond à la fin de la saison sèche. Mis à part un événement pluvieux majeur exceptionnel à cette période, la canne post-récolte reste donc peu sensible à l'érosion car elle offre une bonne couverture végétale.

#### **2.2.1.6 Habitat diffus (Photo 9) :**

Il n'a été trouvé que très peu d'informations sur les phénomènes d'érosion dans les zones périurbaines. Néanmoins, il a été décidé pour cette étude de prendre en compte ces zones dites d'habitat diffus, car elles sont très représentatives de l'occupation du sol en Martinique.

En parcourant ces zones d'habitat dispersé, on se rend compte de l'importance des jardins potagers familiaux, reliquats du typique jardin créole. On trouve également régulièrement à proximité des habitations des élevages de cochons.

Avec la pression démographique et celle de l'urbanisation, ces zones sont en constante mutation et développement (travaux d'agrandissement des maisons familiales, construction de villas avec vue sur mer, etc).



Carte 8 : Occupation du sol reclassée

Ces zones d'habitat diffus représentent donc une occupation du sol mixte entre surfaces boisées, surfaces découvertes, et surfaces imperméabilisées. Les zones sensibles à l'érosion se situent au niveau des potagers individuels (maraîchage vivrier), des zones de travaux temporaires (construction de nouveaux bâtis, extension, travaux de voirie) et des talus.

#### **2.2.1.7 Bananeraies > 2 ans (Photo 10) :**

Ce sont des bananeraies pour lesquelles le couvert est bien développé et qui possèdent de nombreux résidus au sol (faux troncs du cycle précédent, fleurs, feuilles). Mais la structure du couvert en fait des cultures plus sensibles que la canne. Les nombreuses études du CIRAD ont montré que les bananeraies étaient des cultures assez ruisselantes. Le bananier a tendance à concentrer les pluies et à générer un ruissellement à son pied. Du ruissellement concentré se forme également le long des andains de résidus lorsque ceux-ci sont organisés dans le sens de la pente entre les rangs. Selon Raphaël Achard (communication personnelle), cette concentration des eaux de pluie est maximale pour des bananeraies de 3-4 ans. En effet, au-delà, l'organisation en rangs commence à s'estomper diminuant ainsi la possibilité pour le ruissellement de se concentrer.

#### **2.2.1.8 Bananeraies < 2 ans (Photo 11) :**

Ces bananeraies présentent une couverture végétale du sol réduite. Elles font suite à un labour des parcelles de bananes arrachées. La proportion de sol nu est relativement importante (>50%). L'infiltrabilité sur ces parcelles est meilleure que pour les parcelles en production (labour récent et absence de passages répétés) mais ce sont des surfaces très sensibles pour des événements pluvieux majeurs entraînant une saturation en eau du profil de sol.

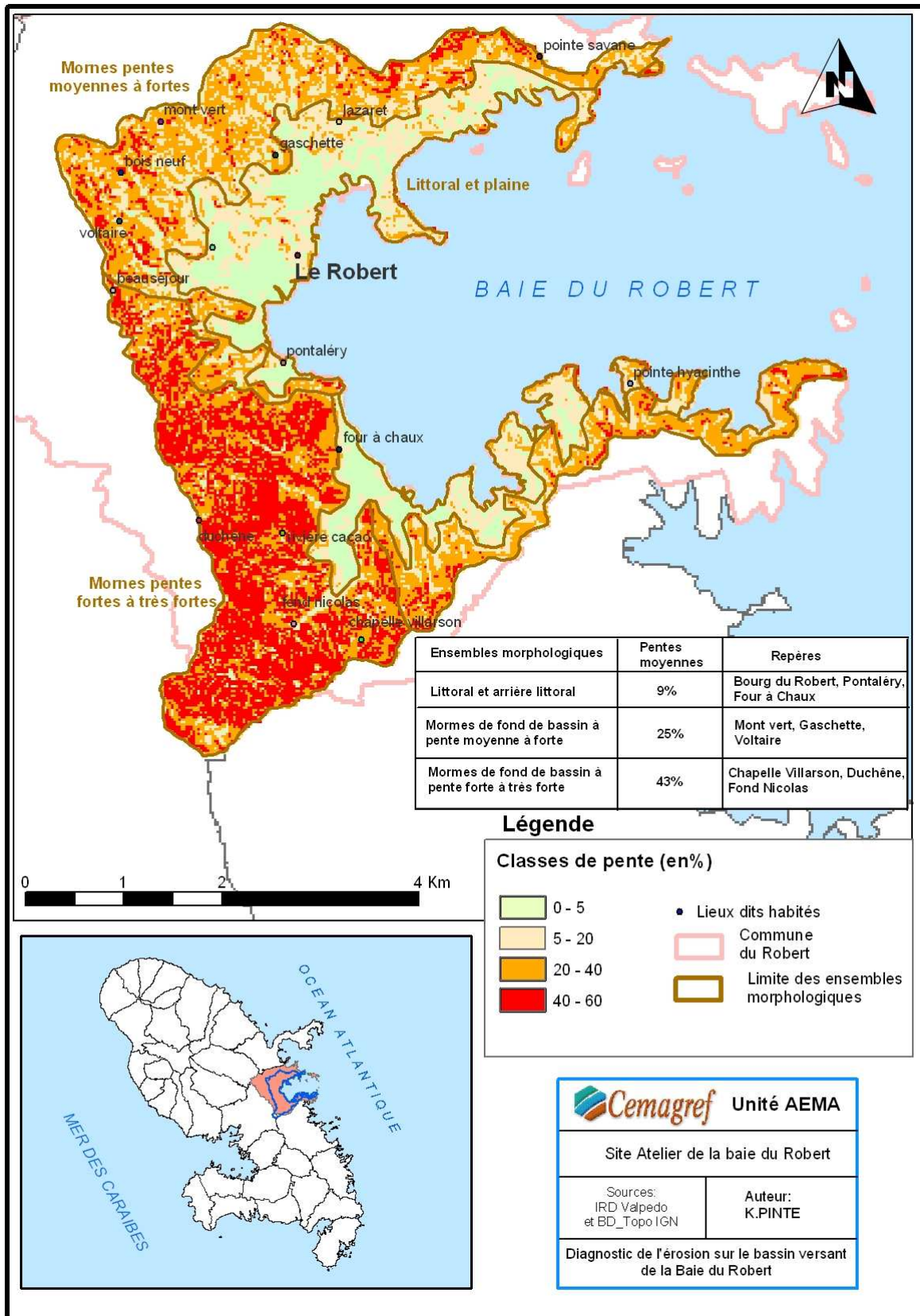
#### **2.2.1.9 Maraîchage (Photo 12) :**

La couverture du sol y est faible. Ce sont par ailleurs des cultures renouvelées 2 à 3 fois par an. Ces parcelles de maraîchage sont donc à découvert une partie de l'année en début de culture. Dans le cas des parcelles dédiées au maraîchage, le sens du labour (ou du travail du sol) par rapport à la pente tient une place importante. Beaucoup de parcelles de maraîchage se situent sur des pentes très fortes et sur lesquelles le sol est travaillé parallèlement au sens de la pente. Rares sont les parcelles travaillées perpendiculairement au sens de la pente. On peut noter quand même certains agriculteurs qui labourent à 45°, ce qui diminue les risques d'érosion en limitant la vitesse du ruissellement.

#### **2.2.1.10 Sol nu :**

Ce sont les zones de travaux et les parcelles labourées. Les zones de travaux sont difficilement cartographiables mis à part les grands chantiers. C'est en partie pour cela qu'il a été choisi de faire une classe habitat diffus qui intègre en terme de vulnérabilité les chantiers mobiles d'habitations personnelles.

La **Carte 8** représente la couverture du sol reclassée.



Carte 9 : Pentes reclassées et ensembles topographiques

## 2.2.2 Topographie

### 2.2.2.1 Inclinaison de la pente :

Intervenant en deuxième position dans la hiérarchisation des facteurs, l'inclinaison de la pente est définie suivant trois classes principales, la quatrième (0-5%) ayant été créée dans un but particulier (cf remarque ci-après). Les seuils définissant les classes ont été établis à partir des données récoltées dans la littérature et à partir des connaissances de terrain. A titre d'exemple, on est habitué dans l'étude de l'érosion sur terrains battants à considérer des classes de pente pour des inclinaisons relativement faibles (<10%). Ceci, parce que les paysages dans lesquels se produit ce type d'érosion comportent bien souvent des pentes faibles. Dans le cadre de notre étude, le contexte topographique et érosif est très différent. Notre bassin possède une pente moyenne de 27% et l'érosion n'a pas pour origine principale la battance des sols. Les seuils de pentes sont donc relativement élevés : 5%, 20% et 40%.

Ces classes permettent de distinguer les grandes tendances topographiques du bassin (**Carte 9**) : « littoral et arrière littoral », « mornes de fond de bassin à pentes moyennes à fortes », et « mornes de fond de bassin à pentes fortes à très fortes ». Le tableau sur la **Carte 9** montre en effet que les pentes moyennes de ces grands ensembles calculées à partir du MNT et par statistique zonale avec le module Spatial Analyst d'Arcgis sont cohérentes et incluses dans l'intervalle des classes.

**Remarque sur l'utilisation d'une classe 0-5% :** Le MNT n'ayant qu'une précision de 25m, le tracé du réseau hydrographique avec la grille d'accumulation des flux est très peu fiable pour les pentes très faibles. Ainsi assiste-t-on à des aberrations assez nettes. Afin de ne pas utiliser l'information sur l'accumulation des flux dans ces zones, on peut isoler dans l'arborescence une classe de pentes de 0-5% qui englobe la grande majorité des erreurs et ne faire qu'une classe correspondante pour l'accumulation des flux.

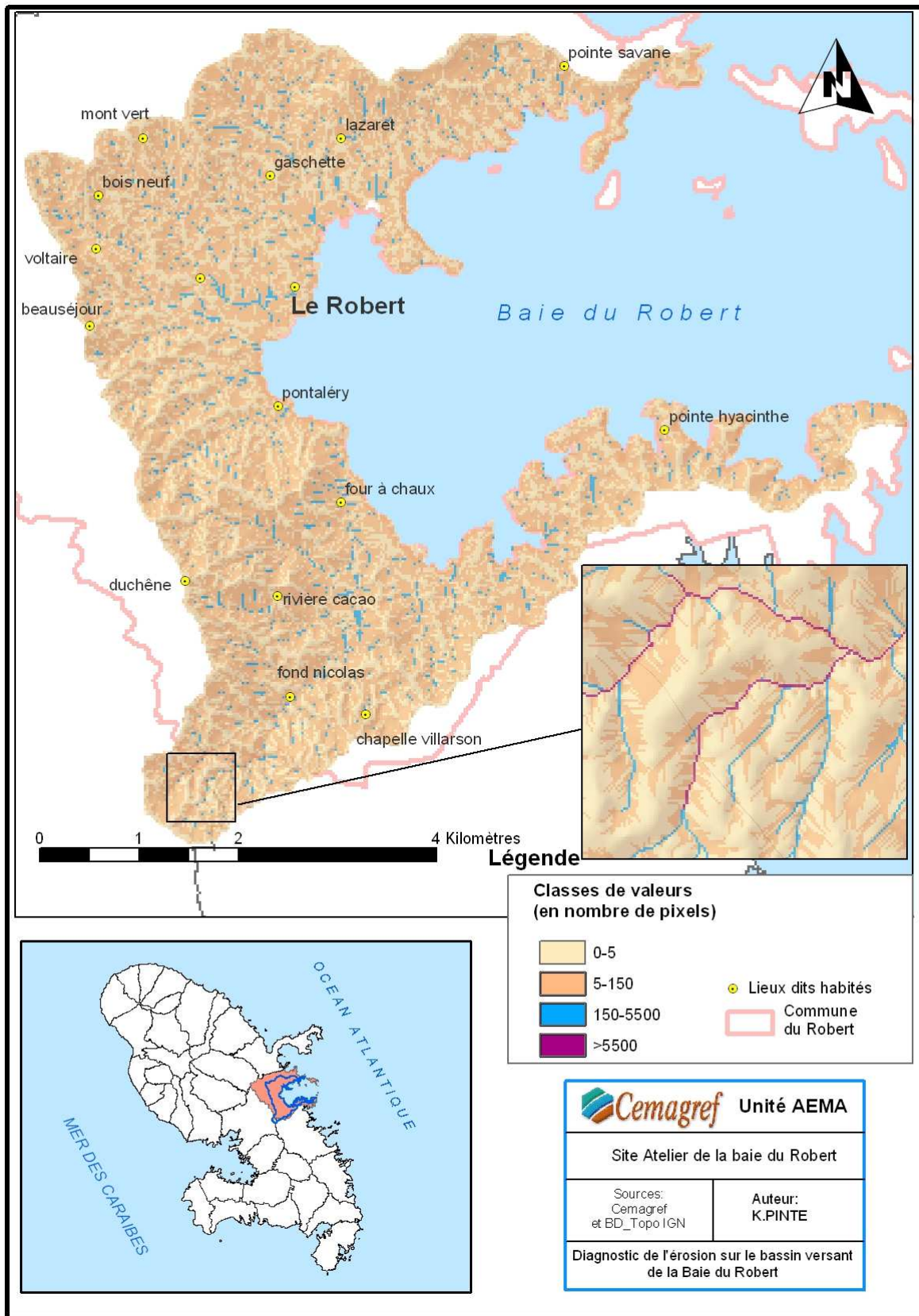
### 2.2.2.2 Accumulation de l'écoulement :

Les classes de valeurs (en nombre de pixels) ont été créées par une reclassification de la grille raster obtenue par traitement du MNT. Cette reclassification a été guidée par les connaissances de terrain. Quatre classes de valeurs ont été créées :

- Les valeurs les plus faibles (0-5) correspondent aux petits versants, hauts de versants et lignes de crêtes. Il y a peu d'accumulation du ruissellement (assimilé à l'écoulement superficiel).
- Les valeurs intermédiaires (5-150) correspondent aux versants le long desquels le ruissellement s'accumule. Ces versants surmontent directement les éléments du réseau hydrographique. Il y a accumulation mais pas concentration du ruissellement.
- Les valeurs élevées (150-5500) correspondent aux talwegs (ligne de collecte des eaux) et ravines temporaires. Il y a concentration du ruissellement.
- Les valeurs très élevées (> 5500) correspondent aux rivières permanentes et ravines profondes. Elles intègrent l'accumulation issue des talwegs et des versants.

La **Carte 10** illustre la répartition des classes d'accumulation de l'écoulement





Carte 10 : Accumulation de l'écoulement

En utilisant ces 4 classes, l'idée est de pouvoir distinguer au sein des versants les parties les moins concentratrices du ruissellement de celles qui commencent à drainer une surface un peu plus importante. Sur les zones incluses dans les 2 premières classes, si du ruissellement se forme, son énergie cinétique ne devrait pas causer plus de dégâts que la formation de griffes d'érosion linéaire. En revanche avec les 2 dernières classes, les zones majeures de concentration du ruissellement sont mises en évidence, en allant du simple talweg à la rivière permanente.

Par ailleurs en isolant les éléments majeurs (permanents) du réseau hydrographique (ravines principales et rivières), on peut mettre en évidence les lieux potentiels où se produisent des mouvements de masse de type glissement de terrain et sapement de berge qui sont directement repris par l'écoulement en période de crue.

### 2.2.3 Erodibilité

L'utilisation d'un critère qualitatif a été préférée à celle d'un critère quantitatif du type taux d'argile car à l'échelle du bassin, il était préférable de simplifier ce paramètre plutôt que d'utiliser une information quantitative trop ponctuelle et non représentative.

Le postulat utilisé pour classer les sols entre eux en fonction du type d'argile est :

**La stabilité structurale (vis-à-vis de l'énergie cinétique du ruissellement) des sols varie en fonction du type d'argile. Les sols les plus stables sont constitués d'argile de type métahalloysite, viennent ensuite les sols constitués d'argile de type kaolinite et enfin les sols à montmorillonite (argiles gonflantes).**

Sur la base de ce postulat et sachant que les sols à halloysite sont quasi inexistant sur la zone d'étude, 2 indices d'érodibilité ont été définis. La **Carte 11** situe les sols en fonction du type d'argile qui les constitue.

## 2.3 Agrégation des paramètres : les règles de décision

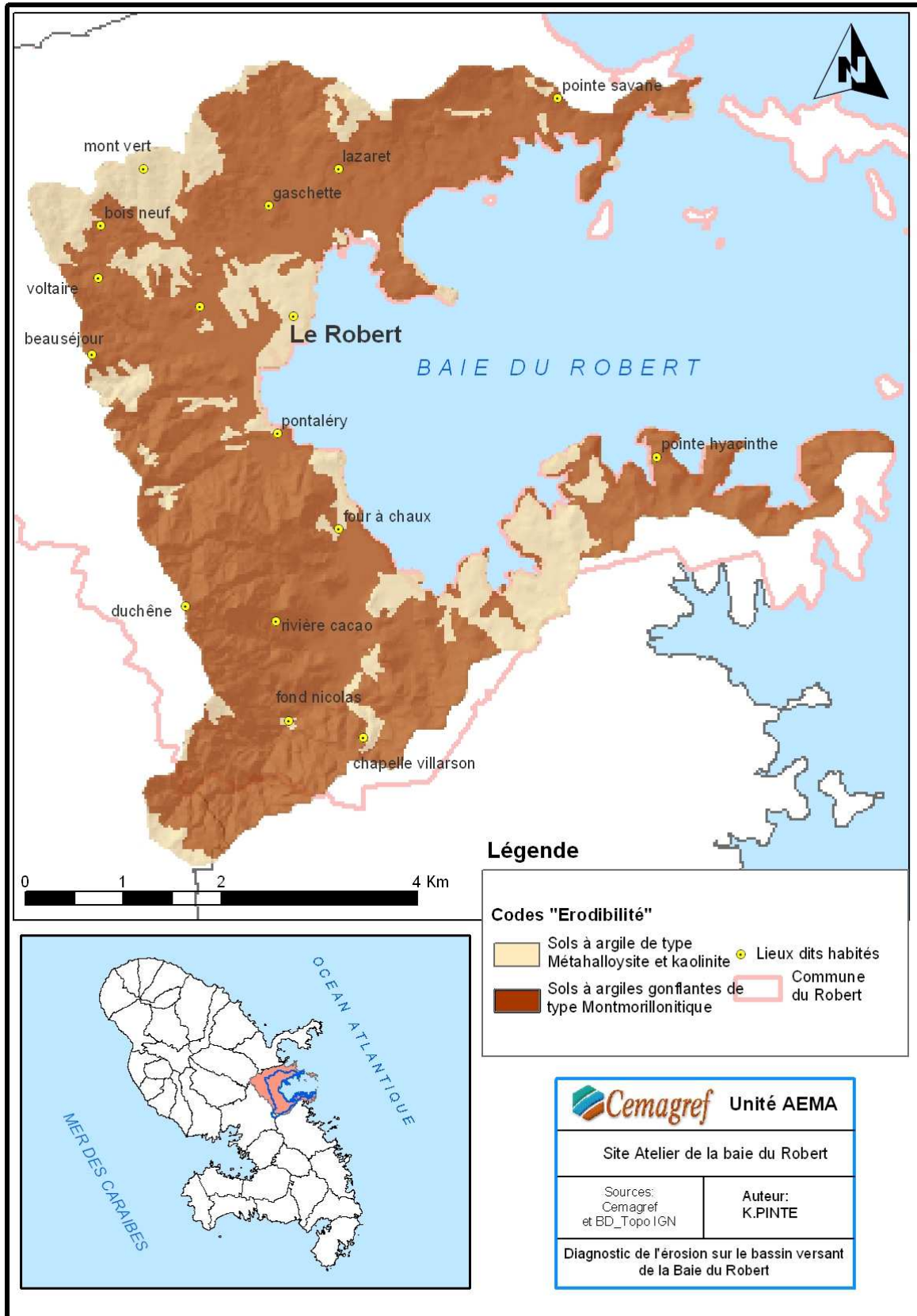
Après avoir choisi les paramètres et les classes de valeurs, il s'agit désormais de combiner les paramètres entre eux pour déterminer l'indicateur final. Cette combinaison se fait suivant deux règles de décision :

- L'attribution du nombre de classes parmi celles définies.
- L'attribution de l'indice final suivant des gradients de sensibilité.

Ces règles font partie du jugement dit « expert » et se basent en grande partie sur la connaissance du terrain.

### 2.3.1 Attribution du nombre de classes

Une façon de ne pas tenir compte ou de diminuer l'importance d'un facteur est de lui attribuer peu de classes, voire une classe unique. Ci-dessous figure le détail des décisions d'attribution du nombre de classes pour chaque facteur.



Carte 11 : Répartition des sols en fonction du type d'argile qui les constituent



### **2.3.1.1 Les pentes**

Les classes de pente et les seuils seront adaptés en fonction du type de couvert végétal. En effet, pour les surfaces fortement couvertes, le rôle de la pente passe au second plan et il convient de ne pas établir trop de classes. En revanche, pour les sols nus, on peut raisonnablement affecter plus de classes dans le sens où il y a une relation exponentielle claire entre pente et pertes de sol.

Suivant le type d'occupation du sol, 3 ou 4 classes de pente sont utilisées. Le critère de décision est le suivant : pour les surfaces possédant une couverture végétale très importante, le facteur pente reste peu discriminant. Par contre, quand le couvert végétal diminue notablement, le facteur pente prend plus d'importance. Une façon de lui donner de l'importance est de le répartir en 4 classes au lieu de 3 (Tableau 8).

### **2.3.1.2 Accumulation du ruissellement**

Pour les classes d'occupation du sol présentant les couvertures végétales les plus favorables au déclenchement des phénomènes érosifs (banane, maraîchage et sols nus), les 4 classes d'accumulation du ruissellement théorique ont été utilisées. En revanche, pour les autres types de couverture végétale, les classes 1 et 2 sont regroupées en partant du postulat que la couverture végétale est telle que pour des accumulations de ruissellement très faibles, les phénomènes érosifs sont mineurs.

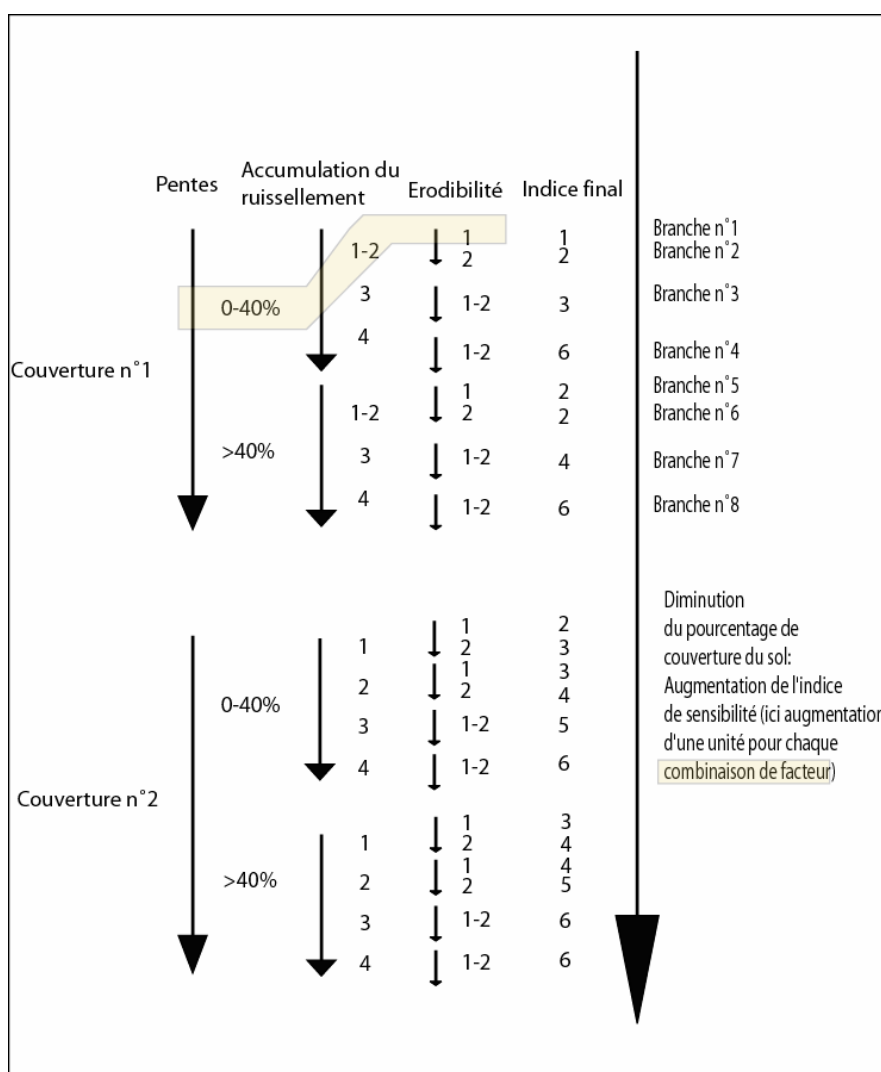
### **2.3.1.3 L'érodibilité**

On se base sur plusieurs postulats :

- Moins il y a de couverture végétale, plus le facteur « sol » prend de l'importance. Ainsi pour les zones boisées où la couverture au sol dépasse les 80%, aucune distinction n'est-elle faite entre les sols. Plusieurs cas font exception : celui du maraîchage et des sols nus pour des pentes très fortes. En effet, la combinaison d'une couverture végétale faible et de pentes très fortes rend inutile le facteur « sol ». Cela concerne également les zones d'habitat diffus pour lesquelles on considère que l'anthropisation est telle que la nature du sol n'a plus grand intérêt.
- Pour les classes 1 et 2 du facteur « accumulation du ruissellement », qui correspond dans la topographie aux versants, on distingue les différentes classes d'érodibilité. En effet, sur le versant, on suppose que la nature du sol intervient sur le déclenchement des phénomènes érosifs. La nature du sol n'intervient plus par contre pour les classes 3 et 4 du facteur « accumulation du ruissellement » car pour ces zones de concentration de l'eau, ce n'est plus la naissance du phénomène érosif qui est considérée mais sa propagation.

Type de couverture du sol	Nombre de classes	Classes
Bois	3	0-5% ; 5-40% ; >40%
Pâturage	3	0-5% ; 5-40% ; >40%
Canne à sucre	3	0-5% ; 5-40% ; >40%
Habitat diffus	4	0-5% ; 5-20% ; 20-40% ; >40%
Banane	4	0-5% ; 5-20% ; 20-40% ; >40%
Maraîchage	4	0-5% ; 5-20% ; 20-40% ; >40%
Sols nus	4	0-5% ; 5-20% ; 20-40% ; >40%

**Tableau 8 : Attribution du nombre de classes du paramètre "inclinaison de la pente" en fonction du type de couverture du sol**



**Figure 8 : Schématisation de la construction de l'arborescence logique**

### 2.3.2 Attribution de l'indice final de vulnérabilité à l'érosion

Cette phase constitue la dernière étape dans la construction du modèle arborescent. Elle consiste à attribuer un indice de sensibilité (entre 0 et 6) à chaque combinaison de facteurs. L'attribution des indices se fait selon plusieurs gradients de sensibilité. Il y a un gradient de sensibilité par facteur comme l'indique la **Figure 8**. Pour une même classe de couverture du sol, une première gradation se fait avec la pente, une deuxième avec l'accumulation du ruissellement et une troisième avec l'érodibilité.

#### *Détail de l'attribution des indices*

##### Couverture n°1 :

Pour la première branche de l'arbre (combinaison des plus faibles classes de chaque facteur), on attribue l'indice le plus faible 1. La deuxième branche diffère uniquement pour l'érodibilité (classe 2) qui est plus forte, ce qui justifie le passage à un indice final plus fort (2). Pour la troisième et la quatrième branche, le facteur discriminant est l'accumulation du ruissellement. Le passage à la classe 3 et 4 justifie l'attribution de l'indice final 3 et 6. On précise que le risque maximum a été attribué aux ravines profondes et rivières (ce qui justifie le passage direct à la classe 6 d'indice final dès lors que l'on se trouve en présence de la classe maximale de l'accumulation du ruissellement).

Pour les branches 5 à 8, on passe à une classe supérieure de pente mais on retrouve les mêmes classes pour les autres facteurs que pour la classe de pente précédente. On attribue donc les mêmes indices finaux, majorés d'une unité.

##### Couverture n°2 :

On reprend les mêmes indices finaux mais majorés d'une unité, à ceci près que l'on schématise avec la couverture 2 l'introduction des 4 classes d'accumulation du ruissellement.

Ceci est la démarche générale d'attribution des indices. Elle fait l'objet d'adaptations dans l'arborescence complète en fonction des connaissances de terrain et selon un jugement "expert".

Par ailleurs, au vu du grand nombre de catégories de couverture de sol (au nombre de 10) comparé au plus petit nombre d'indices finaux (7 classes en comptant la classe « 0 » : absence d'érosion) il n'est pas possible de majorer automatiquement d'une unité tous les indices finaux quand on passe à une couverture au sol moins intense. D'un autre côté, s'il on avait établi un nombre d'indices finaux identique au nombre de catégories d'occupation du sol, les différences d'indices finaux auraient été trop nettes comparées à la réalité de terrain. La définition de sept classes semblait être un juste milieu entre précision et lisibilité.

**Remarque :** L'indice 6 pour les très fortes valeurs d'accumulation du ruissellement (classe 4) correspond à un risque érosif très fort et à un processus érosif bien particulier : il s'agit de l'érosion dans les ravines et plus précisément des sapements de berges et des glissements de terrain qui sont repris dans le lit de la ravine lors des crues. Quel que soit le type d'occupation du sol, le risque d'érosion dans les ravines reste très fort. Ainsi a-t-il été affecté un risque de 6 pour toutes les ravines cartographiées à partir de la grille d'accumulation du ruissellement et ceci sans distinction de l'occupation du sol.

L'**Annexe 6** présente la totalité de l'arborescence

<b>Indice de vulnérabilité</b>	<b>Vulnérabilité</b>	<b>% de la surface du bassin</b>
0	Nulle	11,5
1	Très faible	35,3
2	Faible	35,4
3	Moyenne	10,7
4	Très forte	3,8
5	Forte	1,1
6	Maximale	2,2

**Tableau 9 : Tableau avec répartition des surfaces par indice de vulnérabilité**

### 3 Analyse et critiques des résultats

#### 3.1 De grands ensembles se détachent sur la cartographie brute de la vulnérabilité à l'érosion.

Le résultat de l'agrégation des paramètres suivant l'arborescence aboutit à l'indicateur de vulnérabilité à l'érosion du bassin. Chaque pixel qui compose le bassin possède un indice de vulnérabilité compris entre 0 et 6.

Le (**Tableau 9**) représente la répartition des surfaces du bassin versant par indice.

La carte finale fait ressortir des grandes tendances qui permettent déjà une hiérarchisation des zones du bassin en fonction de leur vulnérabilité à l'érosion.

On distingue les zones urbaines et d'habitat dense pour lesquelles la vulnérabilité est nulle. Ces zones se situent toutes sur le pourtour de la baie.

Les zones à très faible vulnérabilité, d'indice 1, (encadré n° 6 de la **Carte 12**) correspondent aux zones de faibles pentes occupées par le pâturage ou par des savanes et des friches. On rencontre également d'importantes zones très faiblement vulnérables au niveau des zones boisées sur Pointe Savane et Pointe Hyacinthe ou sur les sous bassins de Mansarde et Gaschette. La couverture au sol offerte par les zones boisées y joue un rôle majeur par rapport aux pentes qui dépassent peu les 40%.

*Sur ces zones, l'érosion en nappe serait donc négligeable et le ruissellement, mis à part dans les talwegs, a peu de chance de s'organiser pour former de l'érosion linéaire.*

Les zones à faible vulnérabilité (indice 2) se répartissent principalement en trois ensembles :

- Les pâturages se trouvant sur des pentes moyennes ou sur des sols à argiles gonflantes qui peuvent faciliter la création de rigoles et ravines à partir des fissures de retrait.
- La culture de canne à sucre (encadré n° 2 de la **Carte 12**) qui offre une couverture du sol excellente et diminue le rôle de la pente qui atteint les 40% dans certaines parcelles.
- Les zones boisées sur fortes pentes. Ici, la pente est le facteur majeur. Le ruissellement, malgré la bonne couverture végétale, peut acquérir une certaine énergie cinétique et former de l'érosion linéaire. Malgré tout, ces phénomènes restent faibles. C'est le sous bassin versant de la rivière Cacao qui est principalement concerné avec des pentes très fortes, sur des versants assez longs.

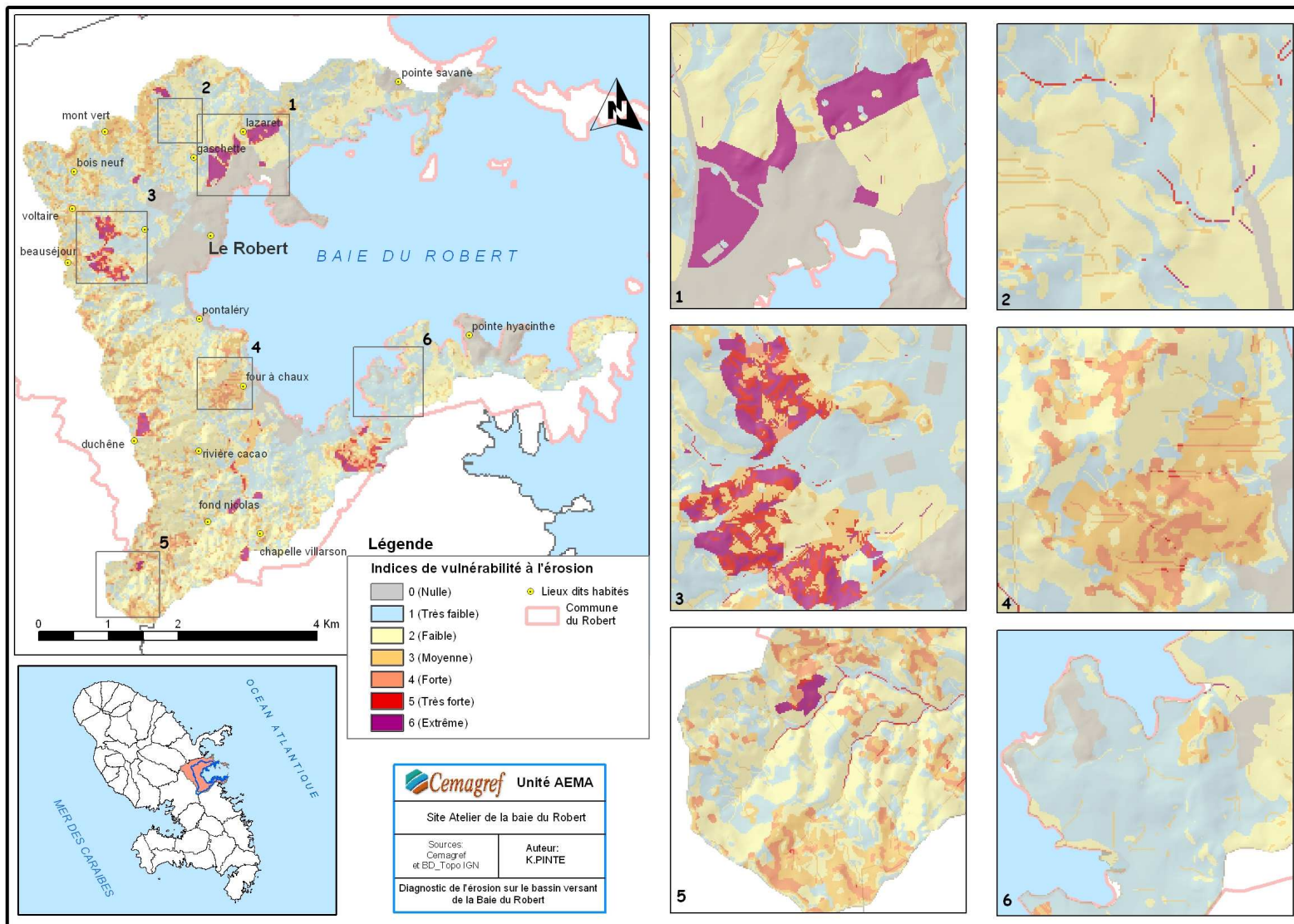
*Sur ces zones, l'érosion en nappe reste négligeable. Leur vulnérabilité, certes faible, provient de l'érosion linéaire qui peut rencontrer des situations favorables à sa genèse.*

Les tendances de répartition des zones à vulnérabilité moyenne et forte (indice 3 et 4) sont :

- Les zones d'habitat diffus sur pentes moyennes à fortes que l'on rencontre principalement sur les hauteurs du bassin versant (encadré n° 5 de la **Carte 12**) ou dans la zone de Four à Chaux où les pentes sont particulièrement fortes. (encadré n° 4 de la **Carte 12**)







Carte 12 : Vulnérabilité à l'érosion sur le bassin versant et détails



- Des zones agricoles sur faibles pentes. C'est le cas des bananeraies se trouvant dans les plaines alluviales (exemple de la rivière Cacao) ou sur des pentes moyennes (certaines parcelles de banane entre les rivières Mansarde et Voltaire ; encadré n° 5 de la **Carte 12**).

*L'érosion en nappe et l'érosion linéaire affectent les zones de sol nu éparses au sein de l'habitat diffus (potagers individuels, zones de travaux, talus).*

Les indices de vulnérabilité très forte (indice 5) à maximale (indice 6) se rencontrent au niveau :

- Des zones de travaux sur lesquelles l'érosion en nappe et linéaire (griffes et rigoles) est maximale (encadré n° 1 de la **Carte 12**). Ces zones se comportent comme des sols nus. Il faut cependant noter le caractère temporaire de ces zones.
- Des bananeraies, se trouvant sur des fortes pentes (encadré n° 3 de la **Carte 12**) et des parcelles de maraîchage. Là aussi, l'érosion en nappe et l'érosion linéaire sont concomitantes.
- Des talwegs, ravines et du réseau hydrographique permanent, où le ruissellement se concentre. Les portions de ces éléments se trouvant sur des pentes inférieures à 5% ne sont pas cartographiées car on le rappelle, le paramètre « accumulation du ruissellement » n'est pas pris en compte.

*Les zones les plus sensibles sont donc relativement ponctuelles sur le bassin versant mais en nombre suffisant pour être signalées.*

**Conclusion :** Finalement l'indicateur de vulnérabilité à l'érosion fait ressortir seulement 7% des surfaces comme étant fortement à extrêmement vulnérable contre plus de 70% des surfaces qui sont très faiblement à faiblement vulnérables. Par contre, dans ces 7% figurent les zones où peuvent potentiellement se développer des ravines. Cette forme d'érosion est locale mais elle fournit plus de particules solides que l'érosion en nappe.

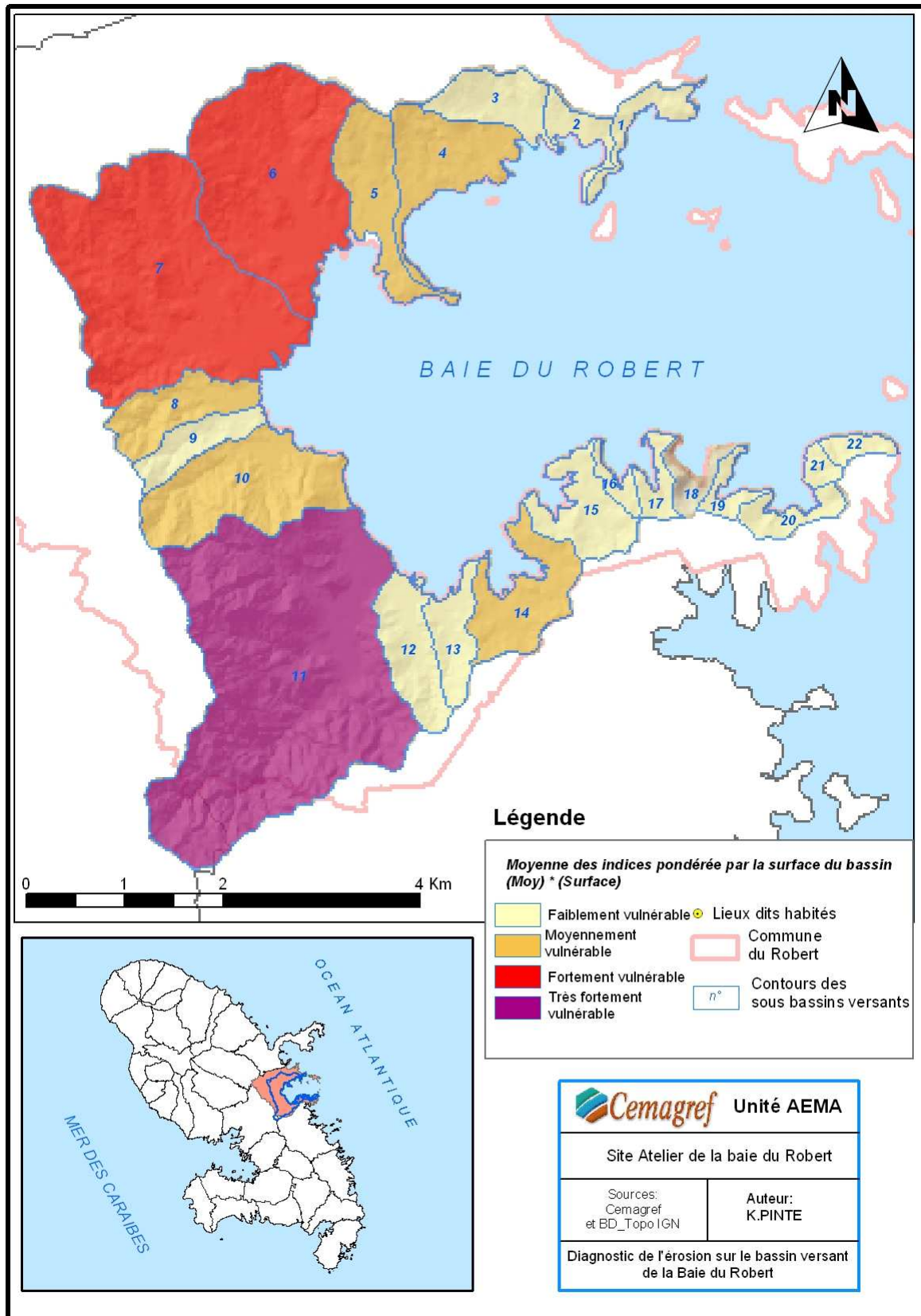
### **3.2 Agrégation ascendante et cartographie de la vulnérabilité vers de nouveaux OSR**

Dans le souci de faciliter l'interprétation de la carte brute (1 pixel = 1 information) et de permettre aux décideurs locaux d'utiliser cette cartographie comme un élément d'aide à la décision pour engager d'éventuelles mesures de protection vis-à-vis de l'érosion, il est envisageable d'agréger l'information des pixels pour la synthétiser suivant des OSR de plus grande taille. Ainsi augmente-t-on la cohérence de l'information scientifique avec les processus décisionnels à engager en cas de lutte anti-érosive.

On peut proposer ainsi la cartographie de la vulnérabilité par sous bassin versant.

Le bassin versant de la baie du Robert n'est pas un bassin versant élémentaire, dans la mesure où les exutoires sont multiples. Un découpage de ce bassin en sous bassins versants (réalisé par l'étude précédente du Cemagref) permet d'individualiser les rivières et de diagnostiquer lesquelles apportent le plus de particules solides dans la baie. Pour cela, l'indicateur doit prendre en compte l'intensité de la vulnérabilité à l'érosion mais également la surface potentiellement émettrice. Plus un sous bassin versant est grand, plus son potentiel d'émission de particules solides est grand.

Le nouvel indicateur créé est issu de la moyenne des valeurs de l'indice final par sous bassin versant, multiplié par la surface du sous bassin.



Carte 13 : Vulnérabilité à l'érosion par sous bassin versant

Sur la **Carte 13**, on remarque que les sous bassins les plus vulnérables sont situés en fond de baie (sous bassins n°6, 7 et 11) où les sédiments sont peu brassés par les courants provenant hors de la baie. Ces sous bassins versants correspondent respectivement aux sous bassins de la ravine Gaschette, de la rivière Mansarde et de la rivière Cacao. Le classement des sous bassins n°4 et n°5 est influencé par la zone de travaux à cheval sur ces deux sous bassins. Le bassin n°14, lui, est sous l'influence majeure des bananeraies et cultures maraîchères qui occupent la majorité de l'espace.

## 4 Validation du modèle

La validation du modèle s'est opérée par des visites de terrain afin de vérifier la cohérence des sorties cartographiques. C'est donc une validation visuelle qui a été choisie. L'avantage de ce type de validation est d'avoir pu parcourir l'ensemble du bassin versant en un temps relativement restreint. Lors de cette validation, l'accent a été mis sur les terres agricoles. Les terrains naturels (bois et savanes) étant inaccessibles. Nous avons pu rencontrer une partie des agriculteurs sur le terrain et discuter des problèmes d'érosion avec eux. Les enquêtes se sont axées auprès des producteurs de banane qui avaient déjà, lors des premières enquêtes réalisées par le Cemagref, pointés du doigt de nombreux problèmes d'érosion. Sur Quatorze producteurs de banane, sept ont été rencontrés pour approfondir les questions relatives à l'érosion et situer les problèmes cités. A l'issue de ces rencontres, les bananeraies sont bien apparues comme étant des surfaces très vulnérables au même titre que les surfaces maraîchères observées chez ces mêmes producteurs. En ce qui concerne les autres surfaces agricoles et notamment les pâturages, aucune trace d'érosion n'a été observée lors de nos visites et aucun agriculteur ne s'était plaint lors des enquêtes préalables.

Pour les zones d'habitat diffus, aucune validation systématique n'a pu être réalisée en raison du nombre et de la dispersion de ce type d'habitat. Néanmoins, ce qui a été vu sur le terrain nous conforte dans l'idée que se sont des zones vulnérables. Elles sont fortement marquées par une agriculture vivrière avec de nombreux potagers. Par ailleurs, on ne compte pas les nouveaux chantiers d'habitation qui sont autant de surfaces sensibles à l'émission de particules solides.

On va voir dans la partie 4 que cette étape de validation du modèle nous a amené bien plus loin que le simple fait de valider une carte.



## 5 Bilan et limites de cette modélisation

### 5.1 Un modèle souple d'utilisation

La modélisation par approche experte de la vulnérabilité à l'érosion a montré de nombreux avantages. Tout d'abord, la conception de l'indicateur a pu se faire à partir de données relativement simples à acquérir et classiquement utilisées dans les études de l'érosion. Le principal travail en terme d'acquisition des données a été la création de la carte d'occupation du sol par photo-interprétation des photographies aériennes. Cette relative simplicité fait que le modèle peut être transposable à d'autres bassins versants en adaptant les règles de décision qui permettent l'élaboration de l'arborescence logique. Ensuite, la mise en forme de cette modélisation sous SIG et l'automatisation des traitements avec Model Builder rendent aisées l'évolution et la modification du modèle. Utiliser le pixel comme OSR de départ dans la modélisation permet également une grande liberté pour l'interprétation des résultats qui peut alors être adaptée aux demandes des utilisateurs en modélisant, par agrégation ascendante, des OSR plus grands. **Ce modèle remplit donc son rôle d'aide à la décision en permettant de cibler les zones les plus vulnérables.**

### 5.2 Limites et améliorations

Au fur et à mesure de la construction de ce modèle arborescent, des campagnes de terrain et des enquêtes réalisées auprès des agriculteurs, plusieurs limites ont été mises en évidence. En effet, un des problèmes majeurs identifié dans la construction de l'indicateur était la difficulté de modéliser à l'échelle d'un bassin versant de 23 km<sup>2</sup> les flux d'eau, vecteurs du transport solide. La cartographie de l'accumulation des flux d'eau à partir du MNT a permis de tracer et de hiérarchiser de façon théorique les zones du bassin versant en fonction du ruissellement qu'elles reçoivent des zones amont. Mais cette cartographie, qui fait apparaître notamment le réseau hydrographique principal et secondaire, ne permet pas de prendre en compte les redirections de flux causés par les aménagements anthropiques : les routes, les fossés ou encore les éléments topographiques n'apparaissant pas dans un MNT à la résolution de 25 m.

Lors des observations réalisées sous la première onde tropicale de la saison des pluies, on s'est aperçu du rôle fondamental que peut jouer le réseau routier et les traces dans la genèse des processus érosifs de type linéaire. En effet, la plupart des ravines affectant des bananeraies sont dues à des arrivées d'eau massives des routes ou zones urbaines amont. Par ailleurs, dans le secteur occupé par la canne à sucre, on s'aperçoit que les problèmes d'érosion sont cantonnés aux traces en terre. Or dans la construction de l'indicateur de vulnérabilité à l'érosion, ces éléments anthropiques n'ont pas été pris en compte.

Enfin, une des principales limites de l'indicateur conçu est l'absence de considération du potentiel des particules solides émises à être transférées jusqu'à la baie, dont l'hypersédimentation constitue l'enjeu de l'étude. Un sous bassin versant dont l'exutoire se situe au niveau d'une mangrove pourra être vulnérable à l'érosion, mais le risque d'apports terrigènes à la baie sera moins élevé que pour un bassin versant dont la rivière à l'exutoire est canalisée.

Fort de ces constats il a été décidé dans un deuxième temps de recentrer une étude plus détaillée des transferts d'eau et de la dynamique des particules solides sur un sous bassin. Le choix s'est porté sur un sous bassin versant où l'activité agricole est bien présente. La volonté est en effet de concentrer le diagnostic sur les terres cultivées et sur leur interaction avec les autres activités. Les connaissances acquises à cette échelle pourront servir à faire évoluer l'indicateur à l'échelle du bassin versant tout entier.





## **Partie 4 : Etude de la dynamique spatiale de l'érosion à l'échelle d'un sous bassin versant**

Dans l'approche prospective réalisée ici, l'idée est de recentrer l'étude sur les enjeux environnementaux autour de la baie tout en affinant le diagnostic réalisé jusqu'à présent. En entamant une réflexion à l'échelle du territoire (bassin versant et baie), on souhaite comprendre la dynamique du processus érosif dans une logique agro-environnementale : approfondir l'étude de l'érosion en zone agricole et évaluer son impact potentiel sur l'envasement de la baie. En développant une méthodologie naturaliste basée sur des relevés de terrain précis, il s'agit de proposer des éléments et des thématiques de recherche pour étendre le diagnostic de l'érosion vers une étude d'impact. L'objectif est également d'apporter des réponses à la question de la gestion des problèmes érosifs. Doit-on développer des méthodes de lutte anti-érosive au niveau des parcelles agricoles, ou à l'échelle du territoire ?

Pour répondre à ces objectifs, nous avons réalisé sur un sous bassin d'intérêt une prospection concernant le processus érosif dans sa globalité. On intègre au diagnostic des zones émettrices l'étude des transferts et des dépôts des particules solides.

### **1 Choix d'un sous bassin versant**

#### **1.1 Comment choisir le sous bassin versant ?**

Le choix du sous bassin versant découle directement de l'analyse de la sortie cartographique du modèle expert. Trois étapes ont été nécessaires et sont reportées dans le schéma général de la démarche d'étude :

- Choisir une zone sur la carte de vulnérabilité qui ressort comme étant fortement vulnérable.
- Valider sur le terrain.
- L'étude de cette zone peut-elle répondre aux enjeux agro-environnementaux ?

#### **1.2 Le sous bassin versant de Mansarde-Voltaire**

##### **1.2.1 Situation et structure de ce sous bassin versant**

Le sous bassin versant de Mansarde Voltaire est en position centrale par rapport au reste du bassin versant de la baie (**Carte 14**). Il se situe juste en amont du bourg du Robert. Il est encadré par deux axes de communication, la route Nationale 1, qui relie la commune à celle du Lamentin et la route de Bois Neuf qui relie le bourg aux hauteurs de Voltaire.

Il est drainé par deux rivières, la rivière Mansarde qui longe la route nationale, et la rivière Voltaire qui prend sa source hors du bassin. La partie amont du sous bassin de la rivière Voltaire n'a pas été pris en compte car il n'y aucune surface occupée par de l'agriculture. L'exutoire du sous bassin est pris un peu à l'aval de la confluence entre la Voltaire et la Mansarde, au niveau de la route nationale. A partir de là, la rivière est canalisée puisqu'elle traverse le bourg. On considérera donc pour les problématiques de transport solide qu'une fois les sédiments arrivés dans la partie canalisée, ils sont entraînés dans la baie.

Le sous bassin est constitué d'une plaine dans sa partie aval, qui fait place en remontant à une zone de piémont (occupée par la culture de la banane) puis à des versants à très fortes pentes jusqu'à la ligne de crête qui marque la limite est du bassin.

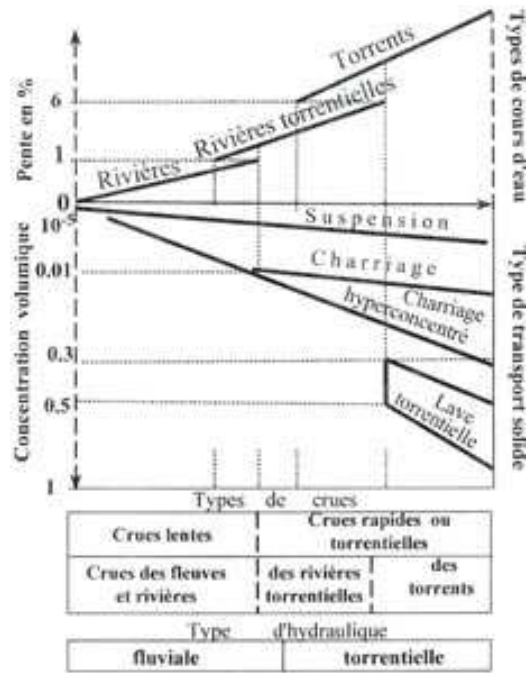


Figure 9 : Régimes hydrologiques et transport solide (D'après Meunier, 1999)

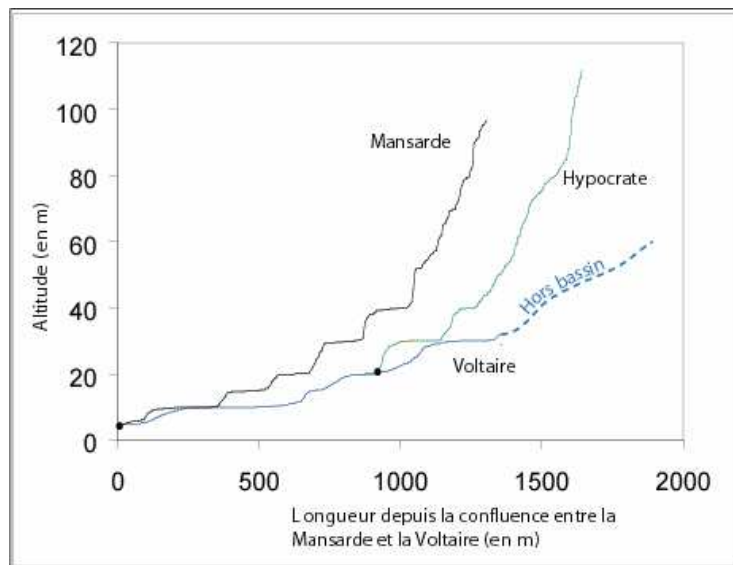


Figure 10 : Profils en longs des trois cours d'eau principaux du sous bassin versant de Mansarde-Voltaire

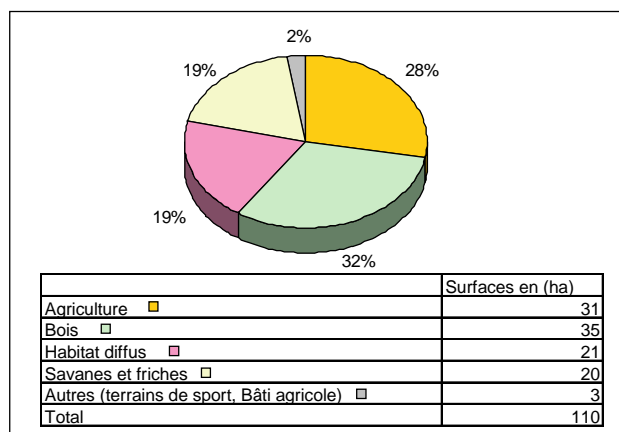


Figure 11 : Répartition de l'occupation du sol sur le sous bassin versant



On peut subdiviser ce sous bassin en trois parties. Le sous bassin de Mansarde, le sous bassin de la Voltaire et le sous bassin de la rivière Hypocrate (du nom de l'agriculteur dont le terrain est traversé par la rivière). Leurs limites ont été tracées à partir du MNT et du module Arc Hydro tools, puis retravaillées par rapport à la réalité de terrain (routes qui bordent le bassin et qui en constituent la limite).

La rivière Hypocrate est une rivière à écoulement temporaire (à sec pendant les mois les plus prononcés du carême), tandis que les rivières Voltaire et Mansarde sont considérées comme permanentes.

L'écoulement est qualifié de torrentiel (**Figure 9**) avec une pente moyenne de plus de 6% pour les rivières Hypocrate et Mansarde et autour de 4% pour la Voltaire. Ces calculs ont été réalisés à partir du MNT et sont visualisables sur les profils en long de la **Figure 10**.

### 1.2.2 Représentation schématique des activités

Lors des visites de terrain réalisées pour la construction et validation du modèle expert, le sous bassin versant de Mansarde Voltaire nous est apparu comme un « concentré » des problèmes d'érosion. C'est notamment lors de la consultation des producteurs de banane présents sur la zone que nous avons pris conscience des dégradations du territoire agricole par l'érosion hydrique.

Par ailleurs, avec l'arrivée des pluies, les observations sur le terrain ont montré la complexité de l'organisation du ruissellement et la multitude des formes de concentration du ruissellement responsables des structures ravinaires.

Sur d'autres sous bassins, comme celui de la ravine Gaschette, principalement occupé par des champs de canne à sucre, le ruissellement sur les traces en terre entre les parcelles semblait participer fortement au transport solide généré en comparaison de celui généré par les champs de canne eux-mêmes. Sur celui de Mansarde Voltaire, la présence de traces et de cultures de banane beaucoup plus ruisselantes laissaient présager néanmoins une concentration des problèmes d'érosion plus importante encore.

L'occupation du sol sur le sous bassin est équitablement répartie entre surfaces agricoles, surfaces boisées et habitat diffus. Les **Figure 11** et **Figure 12** illustrent cette répartition. Il est précisé que ces données sont issues de la cartographie de l'occupation du sol (**Annexe 7**) obtenue par interprétation des photographies aériennes. Le calcul des surfaces ne tient pas compte des traces ni des routes.

Dans la présentation du bassin versant général, il avait déjà été fait mention de l'organisation spatiale des différentes catégories d'occupation du sol. Cette organisation se retrouve parfaitement sur le sous bassin étudié :

- Habitat diffus sur les lignes de crête.
- Bois sur les fortes pentes sous-jacentes aux lignes de crêtes et dans les parties escarpées des vallons.
- Territoire agricole sur les pieds des versants.

Par ailleurs, la pression urbaine croissante repousse constamment les limites en matière de construction. Des habitations se construisent ainsi sur des zones de plus en plus escarpées au détriment des zones boisées.

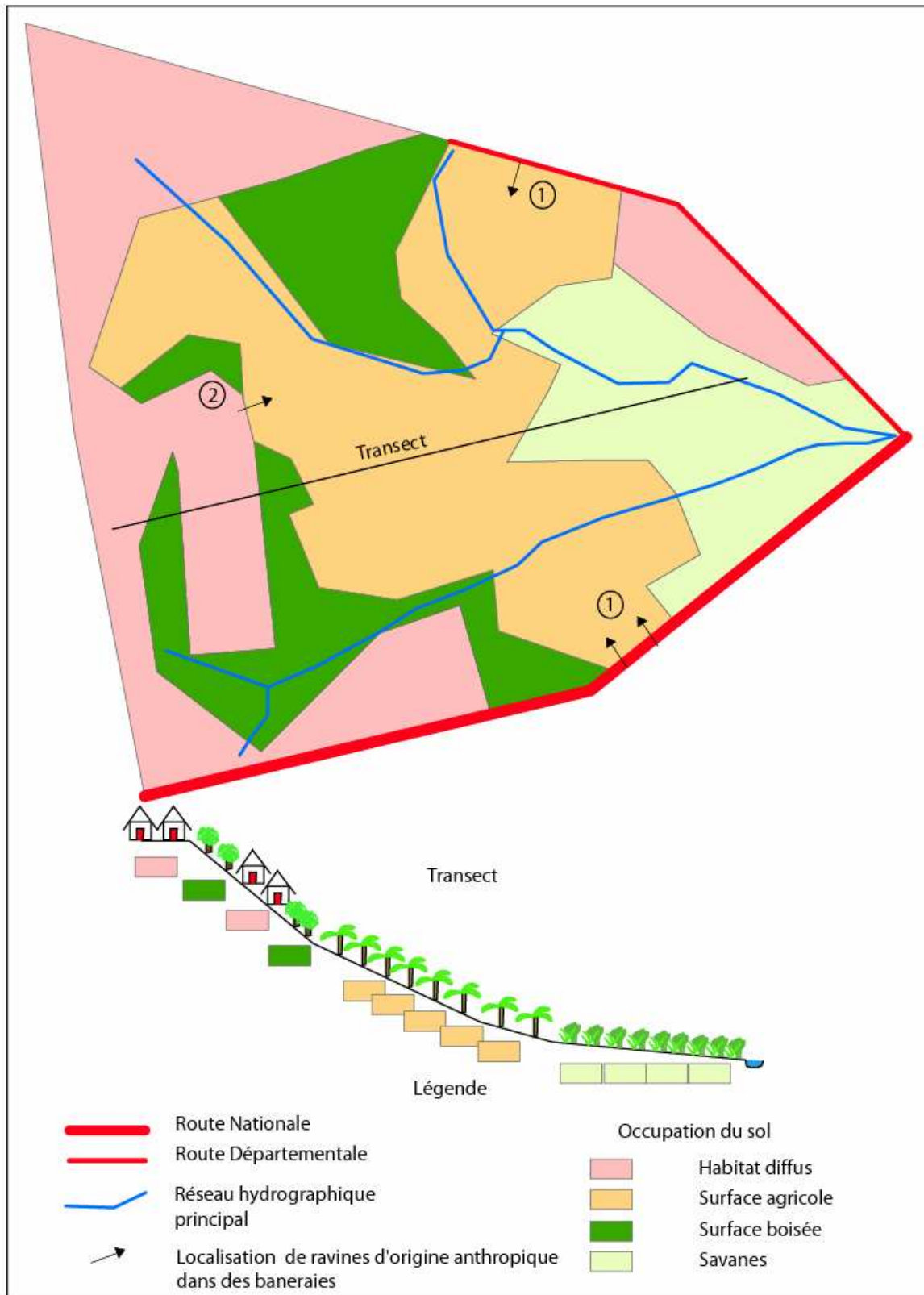


Figure 12 : Schématisation de l'occupation du sol sur le sous bassin

Les cultures de banane ne supportant pas les conditions d'hydromorphie des sols, leur plantation est privilégiée sur les pentes. Ces parcelles se trouvent ainsi prises entre les zones planes occupées par la savane à l'aval du sous bassin et les zones d'habitation en amont.

Il résulte de cette organisation spatiale que les terres agricoles sont soumises à des pressions environnementales de la part des terres urbanisées. Parmi ces pressions, on distingue notamment des flux d'eau massifs provenant des surfaces imperméabilisées telles que les routes, descentes de garage ou toitures des habitations (Cf points 1 et 2 de la **Figure 12**). Des ravines sont également créées quand ces flux d'eau arrivent sur des zones où le sol est peu stabilisé (cas des bananeraies). Ces ravines sont pointées du doigt par les agriculteurs car elles endommagent fortement leurs bananeraies. Sur le sous bassin versant étudié, plusieurs zones problématiques ont été repérées (points numérotés sur la **Figure 12**).

Ces formes d'érosion, spectaculaires, ne sont pas les seules rencontrées sur les terres agricoles. Il apparaissait donc utile de resituer ces observations dans un diagnostic global des processus érosifs rencontrés, en insistant tout particulièrement sur le territoire agricole.

## 2 Méthode employée pour l'étude approfondie

La démarche naturaliste qui va être exposée est en partie inspirée des travaux de Kao *et al.*, 2002 et de Macary et Paulais, 2003.

### 2.1 Décomposition du processus érosif

On entend par processus érosif la succession des trois phases de l'érosion, à savoir : le détachement des particules, le transport solide et la sédimentation. Quelle que soit l'échelle d'étude, du mètre carré au bassin versant, on retrouve ces trois phases mais avec des intensités différentes (Roose, 1994).

Un des principaux objectifs de cette étude est d'analyser le potentiel des sédiments à arriver jusqu'au milieu récepteur final qu'est la baie. Pour cela il fallait donc prendre en compte dans le diagnostic le processus érosif dans sa totalité.

On peut associer trois fonctions aux trois phases qui composent le processus érosif:

- Détachement des particules = **fonction** d'émission.
- Transport solide = **fonction** de transfert.
- Sédimentation = **fonction** de dépôt.

#### 2.1.1 Fonction d'émission

La fonction d'émission est assurée par les différentes formes d'érosion à savoir l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse. Dans le cadre du diagnostic de l'érosion, il s'agit donc entre autres de repérer ces différentes formes. Pour faciliter cette cartographie et établir une méthodologie transposable sur d'autres zones, une typologie des structures émettrices est présentée au paragraphe 2.2.1.

On rappelle que dans le cadre de la modélisation de la vulnérabilité à l'érosion, nous nous étions arrêtés à ce stade du processus érosif.

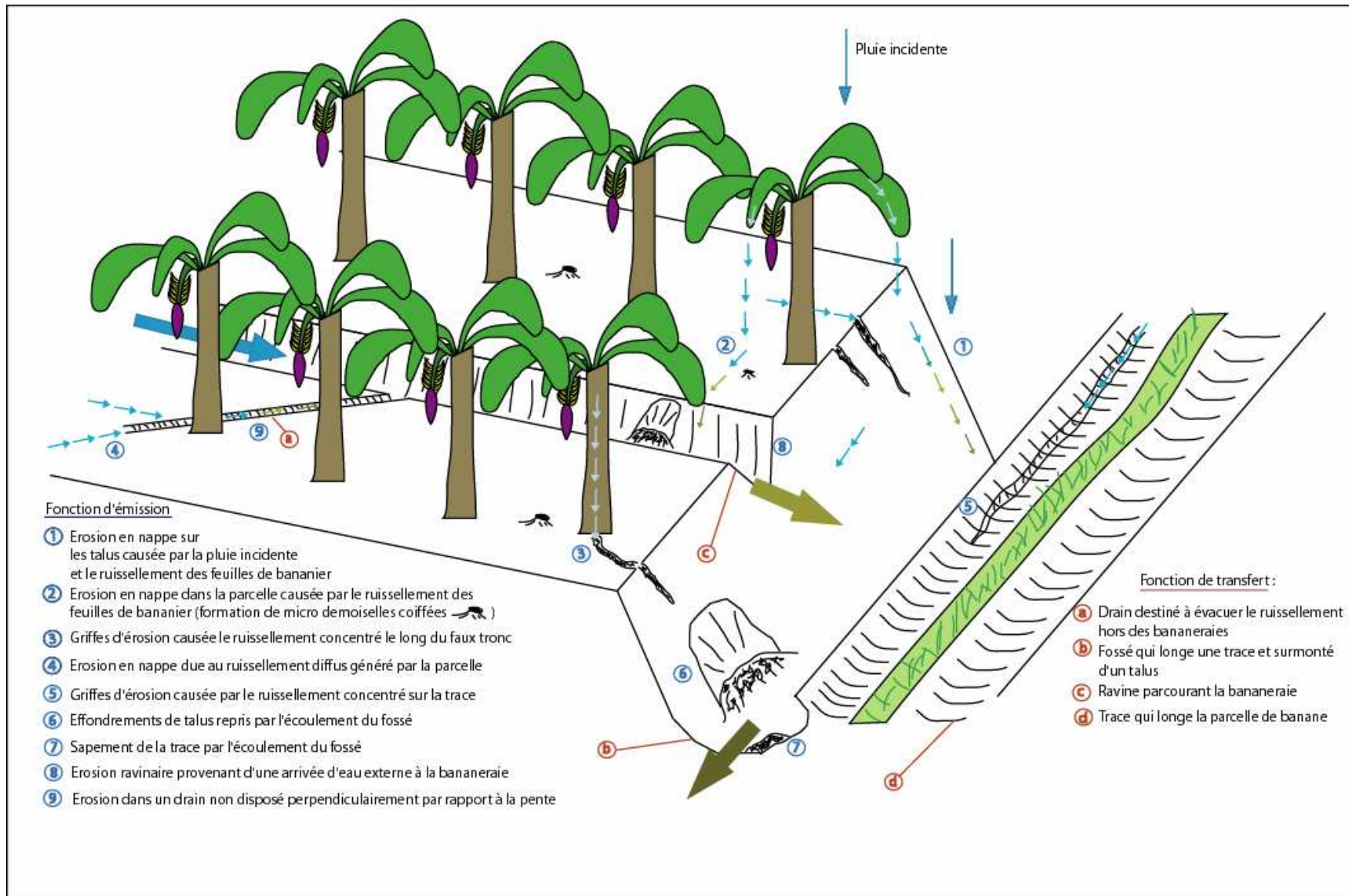


Figure 13 : Schématisation des fonctions d'émission et de transfert de particules solides dans une bananeraie

## 2.1.2 La fonction de transfert

Une fois les particules arrachées au substratum sol, elles sont mises en suspension dans l'eau qui va être l'élément vecteur. Le but de l'étude de la fonction de transfert à l'échelle du sous bassin est d'estimer le degré de connexion entre les surfaces émettrices et le milieu récepteur final. Il s'agit donc de référencer l'ensemble des structures capables de transférer le transport solide.

Il faut noter la complexité de cette fonction. En effet, la fonction de transfert peut être conjointe à la fonction d'émission. Le ruissellement concentré qui se forme dans les réseaux d'écoulement acquiert une capacité de transport solide qui augmente avec la vitesse de l'écoulement mais possède également une énergie cinétique capable d'inciser les surfaces parcourues. Ainsi, de nombreuses structures de transfert (ou réseau d'écoulement) sont-elles aussi des structures émettrices. C'est le cas des ravines, fossés et traces.

## 2.1.3 La fonction de dépôt

Un des objectifs de ce diagnostic est de raccorder l'ensemble des observations au problème central qu'est l'envasement du milieu récepteur. Pour cela, il est important de considérer les zones potentielles de dépôt des sédiments avant leur arrivée à la baie. Le dépôt se fait quand la vitesse de l'écoulement baisse, diminuant ainsi la capacité de transport de l'écoulement. Pour qu'une zone de dépôt puisse jouer le rôle de tampon, il faut que les sédiments déposés puissent être retenus de façon durable. En effet, on peut constater l'existence d'une multitude de zones de dépôt dans le lit des rivières, mais ces dépôts sont provisoires et susceptibles d'être repris très vite lors de la crue suivante.

On peut noter les propos de Meunier (1999) qui écrit dans son ouvrage sur les torrents du Nord-Ouest de la Martinique qu'il est courant d'admettre que toute l'érosion d'origine agricole (en nappe et linéaire), au vu de sa faible granulométrie « va jusqu'à la mer ». Nous tenterons d'apporter des éléments permettant d'infirmer ou de confirmer ces propos.

**Remarque :** Lors de l'étude des dépôts de sédiments, il est primordial de savoir si l'on s'intéresse au transport solide en suspension ou au transport solide par charriage. Ce dernier est loin d'être négligeable (**Figure 9**) dans les conditions d'écoulement torrentiel.

Le repérage et la définition des zones de dépôt principales seront donc abordés de manière très qualitative en notant la présence d'atterrissements au niveau de discontinuités topographiques ou de barrières végétales.

## 2.2 Définition d'une triple typologie

Cette triple typologie provient de la décomposition en trois phases du processus érosif. La **Figure 13** illustre les structures émettrices et de transfert rencontrées sur le terrain.

### 2.2.1 Typologie des structures émettrices

Elle a pour vocation d'identifier l'ensemble des structures émettrices qui devront être repérées sur le terrain. Une structure émettrice est à ce titre caractérisée par sa nature et la forme d'érosion qui l'affecte. On distingue ainsi :



- **La surface parcellaire** (bananeraies et parcelles de maraîchage) dont la couverture offerte par la culture, les résidus et les mauvaises herbes ne protège que partiellement le sol de l'impact des gouttes de pluie. Il faut rappeler également que certaines parcelles de banane sont le siège de plusieurs formes d'érosion, à savoir l'érosion en nappe et l'érosion linéaire. L'érosion linéaire est due au ruissellement qui peut se concentrer en griffes et rigoles au pied des bananiers ou le long des andains de résidus. L'intensité de ce phénomène est fortement dépendante de l'âge des bananeraies qui influe sur la disposition en rangs et sur la quantité de résidus présents au sol.
- **Les talus.** Ils se situent en bordure des traces qui parcourent les bananeraies (**Figure 13**). Ces talus ont une forte inclinaison et en fonction de l'importance de leur couvert végétal, ils sont plus ou moins soumis aux phénomènes d'érosion en nappe et d'érosion linéaire en griffes (quand l'énergie du ruissellement dépasse celle des gouttes de pluie).

**Talus et surfaces agricoles ne sont associés qu'à la fonction d'émission**, contrairement aux structures suivantes qui se caractérisent par une double fonction d'émission et de transfert.

- **Les structures ravinaires.** On les distingue des rigoles par leur profondeur (>50 cm d'après Roose, 1994). Ici, c'est la force de cisaillement de l'écoulement qui entaille le sol et ses horizons. Le régime torrentiel arrache des particules solides du fond et des berges de la ravine.

Dans les bananeraies sur forte pente, les canaux principaux (appelés "maîtresses") creusés pour évacuer le ruissellement peuvent évoluer en ravines.

On peut également observer que certains fossés en bordure de route ou de trace peuvent évoluer en ravines.

- **Les traces.** Les traces sont les voies de communication secondaires. Elles sont empierrées, en terre ou totalement enherbées (par manque d'entretien). Les traces représentent des lieux prioritaires de la concentration du ruissellement. Elles sont parfois, en fonction de leur pente, fortement entaillées par des griffes et donc classées comme étant érosives. Les traces en terre sont les plus sensibles à l'érosion. Si le ruissellement est conséquent, le pavage en pierre de certaines traces peut être détruit et laisser place à la formation de véritables rigoles.
- **Les fossés.** Les fossés récoltent le ruissellement issu des talus, des parcelles et des traces. Certains fossés dont la pente est suffisante peuvent se comporter comme des structures érosives de type ravine. L'écoulement des fossés peut saper la trace qui le longe ou reprendre les effondrements de terre du talus sus-jacent.
- **Les drains.** Traditionnellement, les agriculteurs creusent dans les bananeraies des drains (canaux à ciel ouvert) pour désengorger les sols en cas d'excès d'eau. Dans les bananeraies en pente où le drainage naturel se fait par gravité, certains agriculteurs utilisent cette technique pour casser une partie de l'énergie du ruissellement et l'évacuer hors de la parcelle dans des canaux principaux (maîtresses) ou dans le réseau hydrographique. Mais certains drains sont mal conçus et suivent trop la pente. Le ruissellement capté gagne alors de l'énergie et finit par entailler le fond du drain. Celui-ci se comporte alors comme une rigole d'érosion et peut être classé comme une structure émettrice de sédiments.





### 2.2.2 Typologie des connexions (ou réseau d'écoulement)

La typologie des structures de transfert du transport solide doit aider le repérage sur le terrain de l'ensemble des voies d'eau capables d'apporter les particules solides jusqu'à l'exutoire du bassin. Une structure de transfert se caractérise par sa nature et par sa possibilité d'émettre (ou non) également des particules solides. On retrouvera donc dans cette typologie une partie du vocabulaire employé pour les structures émettrices. On distingue ainsi :

- **Les ravines** : Ce sont des lieux d'écoulement temporaire (à sec systématiquement en dehors des épisodes pluvieux) et torrentiel (pentes du lit supérieures à 10%). Les ravines, en plus d'être des structures émettrices, servent de connexion. Elles collectent le ruissellement de surface issu des bananeraies mais peuvent aussi recueillir les eaux de ruissellement en provenance d'une trace ou d'un fossé.
- **Les traces** : Les traces sont des structures de connexion à ne pas négliger. Leur grand nombre sur le sous bassin est à l'origine d'un maillage assez complexe. En définitive, la présence d'autres structures comme les fossés ou les talus dépend de la présence de traces.
- **Les fossés** : Ils font la connexion entre les surfaces émettrices en bordure de trace (talus) et les autres structures de connexion (ravines, traces). Là encore, les fossés peuvent jouer le rôle de structure émettrice.
- **Les drains** : Ils récupèrent le ruissellement et le transport solide issu de l'érosion en nappe dans les bananeraies.
- **Les routes** : Elles ont le même rôle que les traces mis à part qu'elles ne sont pas émettrices.
- **Le réseau hydrographique** : Il est constitué par les cours d'eau permanents ou temporaires (à sec seulement quelques mois dans l'année). Ces cours d'eau représentent la dernière étape du transit du transport solide avant le milieu récepteur marin. Les rivières concernées à caractère torrentiel sont les rivières Mansarde, Voltaire et Hypocrate. Ces rivières apportent certainement leur contribution au transport solide, mais en l'absence de traces visibles d'érosion, le réseau hydrographique est considéré uniquement comme une structure de transfert.

### 2.2.3 Typologie des zones de dépôt

Sur la zone d'étude est considérée comme zone tampon toute zone capable de retenir les sédiments pendant au moins une année. Il faudra ainsi prendre en considération la variable temps et identifier les types de sédiments qui peuvent être retenus par la zone tampon (fines en suspension ou sédiments plus grossiers charriés).

Pour cibler ces zones, il serait nécessaire de suivre leur évolution (remplissage) sur une année hydrologique (correspondant en Martinique à la saison des pluies) et déterminer ainsi leur capacité de stockage. La présente étude ne s'étalant que sur la première moitié de la saison humide (juin-août), le suivi a été partiel. Le repérage des zones tampons s'est donc réalisé par une estimation de leur capacité de stockage à partir de leur remplissage durant les premiers épisodes pluvieux.

<b>Paramètres</b>	<b>Exemple</b>	<b>Fonction associée</b>
<b>Témoin des formes d'érosion</b>		
<i>Erosion en nappe</i>	Micro demoiselle coiffée Croûte de battance	Emission de particules solides
<i>Erosion linéaire</i>	Griffes (profondeur de 0 à 10 cm) Rigoles (prof. de 10 à 50 cm)	
<i>Erosion en masse</i>	Effondrements de terre, stabilité des berges des ravines	
<b>Couverture végétale</b>	Abondance de résidus et de mauvaises herbes dans les bananeraies, sur les talus, dans les fossés	Emission de particules solides
<b>Sens de l'écoulement</b>	Traces et drains	Transfert
<b>Confluences</b>	Passages busés, gués, jonctions naturelles, absence de jonction	Transfert
<b>Taille des ravines</b>	Relevé approximatif du profil en travers	Emission de particules solides Transfert
<b>Présence d'atterrissements</b>	Dans les zones où un réseau d'écoulement ne débouche pas dans une autre structure connectrice : observation d'un dépôt éventuel de sédiments	Dépôt

**Tableau 10 : Présentation des descripteurs utilisés pour renseigner la typologie sur le terrain**

Les structures paysagères pouvant jouer le rôle de tampon sont (classés par ordre croissant d'importance) :

- **Des obstacles temporaires.**
- **Des cassures nettes de pente** avec une zone d'épandage suffisamment importante.
- **Des haies.**
- **Des barrières végétales conséquentes** (bosquet, ripisylve).
- **Des prairies ou des friches.**

## **2.3 Choix des descripteurs (paramètres qualitatifs) pour les relevés de terrain**

### **2.3.1 Des descripteurs qualitatifs**

Après avoir défini la typologie des éléments à diagnostiquer pour la compréhension des processus érosifs, il convient de définir les paramètres qui seront utilisés sur le terrain pour identifier les différentes structures paysagères et permettre la création d'indicateurs.

Selon Kao *et al.* (2002), un paramètre est une propriété ou une caractéristique, mesurée (paramètre quantitatif) ou observée (paramètre descriptif). Dans le présent diagnostic, la récolte des paramètres descriptifs sur le terrain a été privilégiée, compte tenu du temps disponible et de la surface à parcourir.

Ces descripteurs doivent fournir notamment des informations sur l'intensité des phénomènes observés mais également sur l'organisation de toutes les structures prédéfinies dans les typologies.

Les paramètres descriptifs utilisés sont résumés dans le **Tableau 10**.

Afin d'améliorer l'outil de diagnostic, il faut prévoir à terme d'incorporer des paramètres quantitatifs. Cela n'a pas été réalisé ici par manque de temps. Les mesures à prévoir sont : mesures granulométriques des sédiments, mesures exactes des profils en travers des ravines, pente des talus.

### **2.3.2 Organisation des relevés de terrain**

Le travail sur site peut se décomposer en deux phases :

- Relevés sur un carnet de terrain muni de photographies aériennes et de cartes simplifiées (traces, limites des parcelles, réseau hydrographique, etc.). L'ensemble des éléments définis dans la typologie y est répertorié.
- Relevés avec un GPS différentiel des éléments non visibles sur la photographie aérienne ou des éléments non répertoriés sur la BD\_Topo 2004 de l'IGN. Il s'agit des drains dans les bananeraies et des ravines non cartographiés par l'IGN. Le GPS différentiel est également utilisé pour prendre des points de contrôles isolés (point de séparation des eaux sur une trace, forme d'érosion très localisée).

L'**Annexe 8** fait un point sur le fonctionnement du GPS différentiel.



## 2.4 Acquisition des données sur SIG

### 2.4.1 La production de données cartographiques brutes

Le support principal pour la production de données cartographiques est le jeu de photographies aériennes IGN de 2004. En couplant cette source d'information avec celle de la BD\_Topo IGN de 2004, nous avons pu obtenir une somme d'information non négligeable. Nos observations de terrain ont par ailleurs permis d'aider à l'interprétation des photographies aériennes et à la correction de quelques données de la BD\_Topo.

Ces données sont projetées dans le système de coordonnées UTM 20 N Fort-Desaix couramment utilisé en Martinique.

Quelques précisions sont à apporter sur le contenu des cartes :

**L'occupation du sol.** Les classes d'occupation utilisées reprennent les grandes lignes de la cartographie réalisée à l'échelle du bassin versant. Une attention toute particulière a été donnée au parcellaire agricole qui a été digitalisé de manière à pouvoir superposer les autres cartographies (traces, talus, fossés). Il est également rappelé que le découpage des surfaces agricoles se fait par rapport à la nature de la culture et non par rapport au découpage cadastral, afin de conserver la logique sur le rôle de la couverture végétale dans la genèse des processus érosifs.

**Réseau de traces.** Cette couche d'information a servi de base aux autres cartographies (talus et fossés). En effet, les tronçons de talus ou fossés ne sont pas visibles sur les photographies aériennes et ont donc dû être digitalisés par rapport aux observations de terrain.

**Zones tampons.** Cette cartographie est basée sur les relevés de terrain et les photographies aériennes.

### 2.4.2 L'organisation en base de données géographiques

Après réalisation des couches d'information brutes, il faut renseigner les tables attributaires afin de construire la base de données géographiques finale.

**Remarque :** cette organisation est provisoire et sera amenée à évoluer en structure de type SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale) qui facilitera la création et la manipulation des indicateurs. A ce stade, on a respecté la topologie entre les éléments cartographiés afin de réaliser des sorties cartographiques rigoureuses et de permettre plus tard la gestion spatiale des filiations pour l'utilisation dans un futur modèle.

La difficulté dans le renseignement des tables attributaires résidait dans le rôle mixte que portent les couches d'information. Ainsi, par exemple, la couche des fossés doit-elle comporter des informations sur la fonction d'émission et la fonction de transfert.

L'**Annexe 9** résume les différents champs renseignés pour chaque couche d'information.

L'intensité de l'érosion a été notée sur une échelle de valeur commune à toutes les structures (faible, moyenne, forte), ce qui explique notamment l'intensité maximale de toutes les ravines alors que les drains n'ont des intensités que faibles à moyennes.





**Photo 13 : Couverture au sol dans une bananeraie âgée**



**Photo 15 : micro demoiselles coiffées**



**Photo 16 : Bananier effondré dans une ravine**



**Photo 18 : Trace en terre avec érosion dans les passages de roue**



**Photo 14 : Griffe d'érosion formée à partir d'un andain de résidus**



**Photo 17 : Trace avec début de sapement par une ravine**



### 3 Présentation et analyse des résultats

Les résultats présentés ici sont issus principalement des observations réalisées sur le terrain. Ce sont des résultats qualitatifs qui ont vocation à représenter de façon simplifiée la complexité des phénomènes. Néanmoins, un certain nombre de conclusions peuvent déjà en être tirées.

#### 3.1 L'érosion en zone agricole

Les différentes formes d'érosion que l'on rencontre en zone agricole ne sont pas toutes perçues de la même manière par les agriculteurs. Il y a les formes ponctuelles et spectaculaires (ravines, effondrement des traces) qui attirent leur attention, et l'érosion en nappe, qui affecte leur parcelle mais passe bien souvent inaperçue.

##### 3.1.1 Les bananeraies sont les cultures les plus sensibles

Les données de la littérature s'accordent pour dire que les pertes en terre sont bien plus importantes par érosion linéaire que par érosion diffuse. Dans le contexte étudié, ceci est d'autant plus vérifié que les sols sont relativement bien couverts et possèdent une stabilité structurale supérieure aux sols limoneux connus pour leur sensibilité aux phénomènes de battance. Néanmoins, les cultures de banane sont des cultures assez ruisselantes et leur sensibilité à l'érosion en nappe varie en fonction de leur âge et des techniques culturales. Sur le sous bassin versant, des enquêtes auprès des producteurs de bananes et les observations de terrain ont permis de dégager les points suivants :

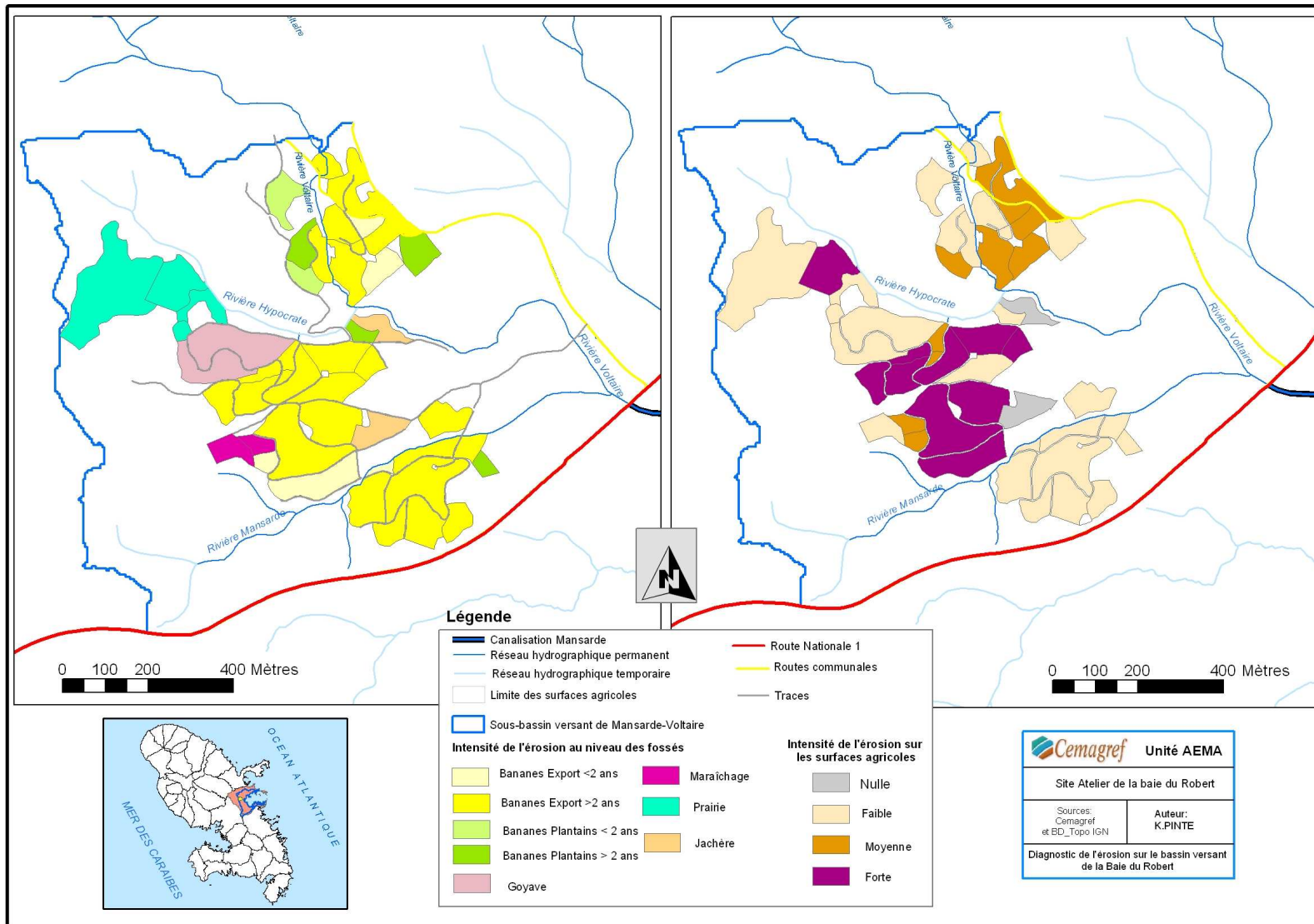
La majorité des parcelles plantées en banane d'export sont des parcelles âgées de plus de 5 ans dont l'organisation en rangs a disparu. Ces parcelles, dont les rendements ne sont pas maximum (les agriculteurs ne fournissent aucun chiffre exact), font preuve d'un entretien minimaliste (peu de désherbage). De plus, l'accumulation relativement homogène des résidus de coupe sur le sol offre une bonne couverture végétale au sol (**Photo 13**), le protégeant ainsi de l'impact des gouttes de pluie (direct ou venant des feuilles de bananier). Ces parcelles sont donc peu sensibles à l'érosion en nappe, et le ruissellement peut difficilement se concentrer pour former l'érosion linéaire.

Les bananeraies les plus sensibles sont des bananeraies jeunes où les plants ont déjà acquis leur port de maturité, leur conférant cette capacité à concentrer l'eau de pluie le long du faux tronc. Ces plantations possèdent une organisation en rangs avec des résidus disposés en andains dans le sens de la pente. Si la parcelle se trouve sur un terrain en pente, le ruissellement peut se concentrer le long de ces andains. Ce sont par ailleurs des parcelles avec peu de mauvaises herbes et des bananiers dont la surface foliaire n'est pas maximale. Les jeunes parcelles sont donc relativement sensibles à l'érosion en nappe mais également à l'érosion linéaire. L'érosion qui caractérise ces bananeraies est donc mixte. Les figures d'érosion observables sur le terrain (micro demoiselles coiffées et griffes) sont visibles sur les **Photo 15** et **Photo 14**.









Carte 15 : Surfaces agricoles et intensité observée de l'érosion

Enfin, un point peut être fait sur le rôle des drains creusés dans les bananeraies. Beaucoup d'agriculteurs les utilisent, soit pour évacuer l'excès d'eau dans les sols sur pentes faibles en bordure des cours d'eau, soit pour capter une partie du ruissellement de surface dans les parcelles en pente. Dans ce dernier cas, certains agriculteurs maîtrisent bien la technique et s'attachent à creuser ces drains perpendiculairement au sens de la pente, tandis que d'autres creusent des drains dont l'orientation s'en rapproche. Le ruissellement capté par ces drains voit alors son énergie cinétique augmenter le long du drain qui se transforme alors en rigole. Si plusieurs drains se rejoignent dans un drain principal appelé « maîtresse » celui-ci peut même évoluer jusqu'au stade de ravine.

Quant aux autres surfaces agricoles (vergers, pâturages), elles sont considérées comme très peu sensibles à l'érosion. Les vergers sont fortement enherbés et les prairies ne sont pas surpâturées. Sur la **Carte 15**, une prairie apparaît comme fortement sensible car elle vient d'être labourée et des traces importantes d'érosion en nappe ont été observées.

### 3.1.2 Les formes d'érosion qui gênent les agriculteurs

Outre les phénomènes d'érosion cités précédemment qui ne sont jamais explicités par les agriculteurs, les ravines qui traversent les bananeraies sont pour la profession le problème majeur, en terme d'érosion. Ces ravines entaillent profondément leurs parcelles et les plants se trouvant à proximité sont sapés et s'effondrent au fond de la ravine (**Photo 16**). Cette forme d'érosion est d'autant plus dénoncée par les agriculteurs qu'elle prend naissance en dehors de leurs parcelles. Les principales ravines répertoriées en milieu agricole sur le sous bassin sont en effet dues à des arrivées de ruissellement concentré massif en provenance de zones plus ou moins imperméabilisées (zones d'habitat diffus, routes).

La **Carte 16** positionne les ravines répertoriées sur le bassin. L'intensité de l'érosion au niveau de ces ravines est considérée comme maximale.

Un problème d'importance également souligné par les agriculteurs et qui affecte leur outil de production se situe au niveau des traces (**Carte 17**). Les traces, outre leur dégradation par le ruissellement concentré dans les passages des roues (**Photo 17**), sont à certains endroits sapées par l'écoulement des fossés adjacents ou par des ravines se situant à proximité (**Photo 18**).

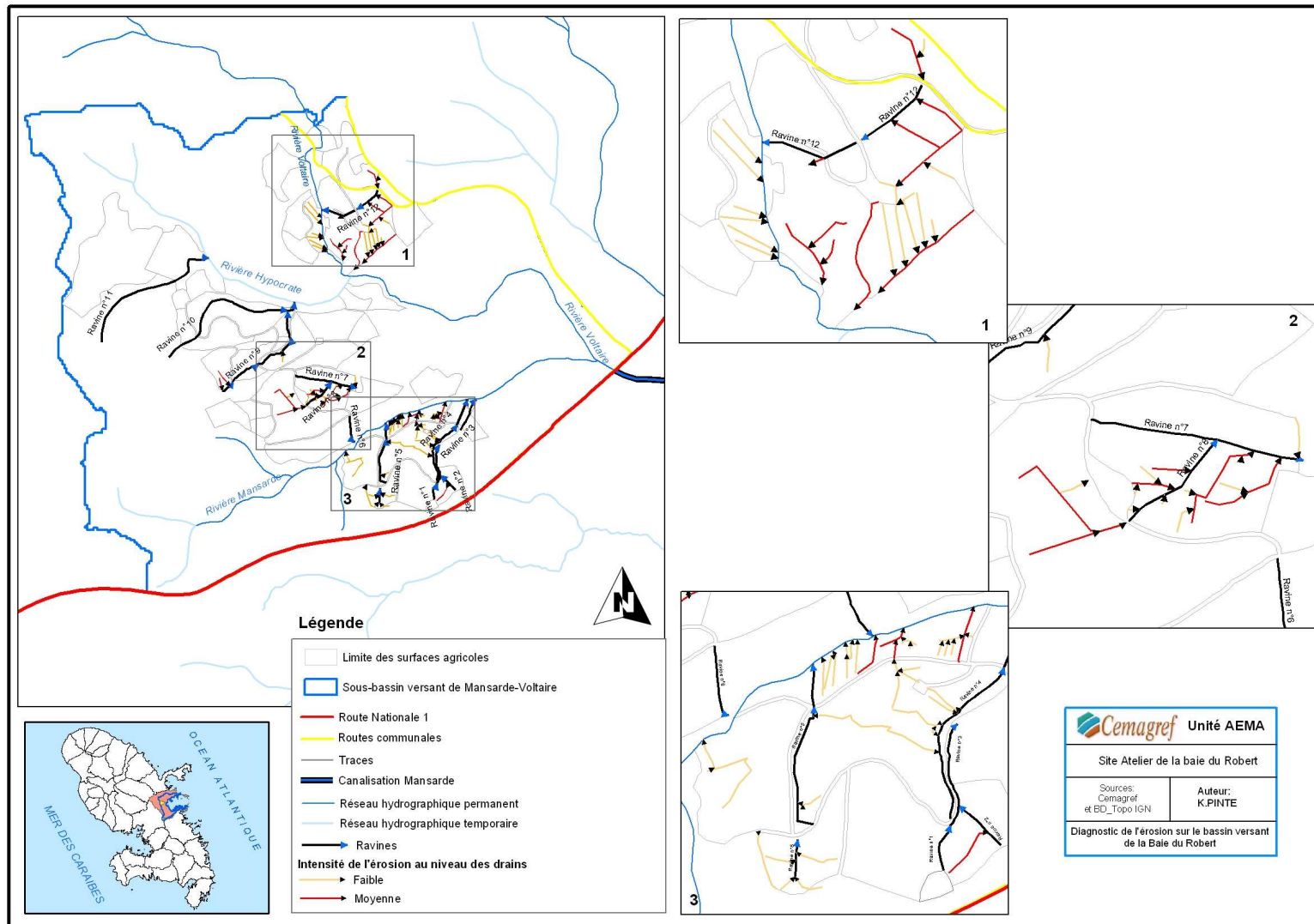
## 3.2 Un réseau de connexion très dense

Une fois les zones émettrices identifiées et l'intensité observée (sous conditions pluviométriques données, cf remarque), la deuxième étape de la prospection est d'analyser le transfert du transport solide jusqu'à la baie. Le relevé de l'ensemble des structures de connexion entre les zones émettrices et le milieu récepteur final a permis de se rendre compte de la diversité et de la complexité des chemins que peuvent emprunter les sédiments pour arriver jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

**Remarque :** La jonction entre les différents éléments du réseau d'écoulement a été cartographiée notamment à partir des observations par temps de pluie. Les événements pluvieux sous lesquels nous avons travaillé sont des épisodes correspondant au passage d'ondes tropicales dont le cumul des pluies se situe entre 30 mm et 60 mm. Pour des événements plus importants, et notamment de type cyclonique, les précipitations et volumes ruisselés sont tels que les observations et cartographies réalisées ne sont plus valables.







Carte 16 : Situation des ravines et des drains dans les bananeraies avec l'intensité observée de l'érosion.

Le calcul de la densité de drainage donne une idée de la ramification du réseau d'écoulement superficiel. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Dans notre cas, on peut voir que, en fonction du degré d'anthropisation des réseaux d'écoulement (traces, fossés, drains), on arrive à des valeurs très différentes de la densité de drainage. La densité de drainage sur le sous bassin est ainsi multipliée par près de 6 si l'on concentre le calcul sur les surfaces agricoles.

Calcul de la densité de drainage :

$$\sum (L_i)/S = L/S \text{ avec :}$$

$L_i$  : Longueur d'un tronçon du réseau

$L$  : Longueur totale du réseau

$S$  : Superficie de l'aire drainée par le réseau

Si l'on considère l'ensemble du réseau, une densité de drainage élevée est donc un premier indicateur sur la capacité potentielle du réseau à transporter rapidement les particules solides jusqu'à l'exutoire.

Par ailleurs, la complexité du réseau et des connexions amène à des situations très contrastées. Par exemple, des particules émises très en amont sur le territoire agricole peuvent arriver plus facilement à l'exutoire que des particules émises plus en aval. Le temps de transfert des particules solides ne serait donc plus corrélé à la distance zone d'émission / baie du Robert. En effet, la présence de courts-circuits dans l'écoulement ou de réseaux linéaires ininterrompus peut conduire à différentes situations. C'est le cas d'une succession de traces qui partent depuis les parcelles les plus en amont et qui débouchent dans la rivière Voltaire, à 100 m à peine de l'exutoire du sous bassin. Aucun obstacle ne vient interrompre ou rediriger cet écoulement. (cf zoom **Carte 17**)

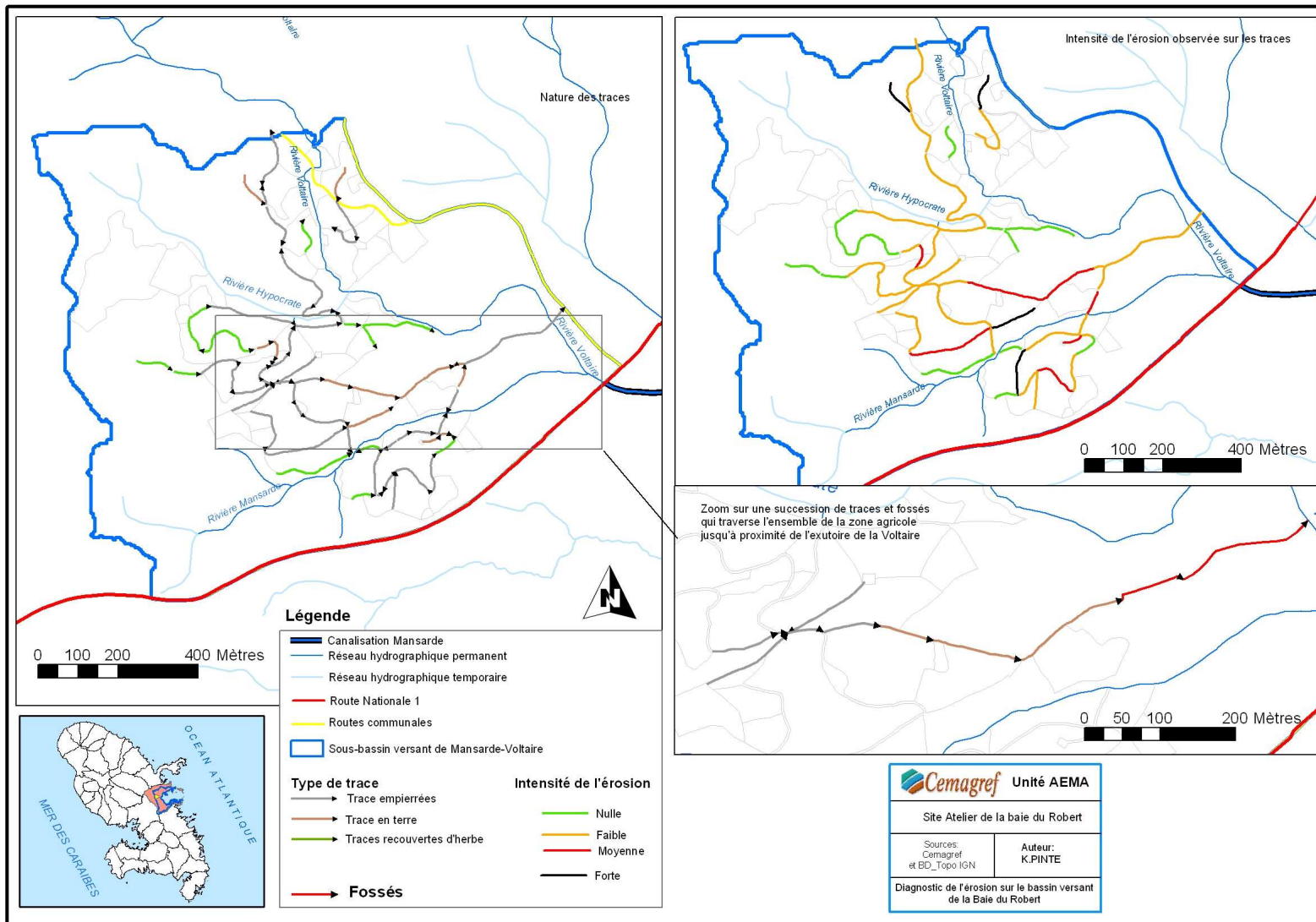
La complexité du réseau d'écoulement mise à jour lors de cette étude met en évidence également la difficulté d'utiliser des MNT bruts pour modéliser les écoulements, tel que réalisé pour le modèle expert à l'échelle du bassin versant. La notion de longueur de pente dépend complètement de la présence d'éléments linéaires (traces, fossés, drains) qui sont souvent en travers de la pente et introduisent une discontinuité dans le flux du ruissellement de surface.

La principale conclusion qui peut être tirée de l'analyse du réseau d'écoulement est que la densité de drainage très importante du sous bassin augmente la dynamique des crues et du transport solide. Le sous bassin versant étudié, en plus de posséder des caractéristiques naturelles torrentielles, se caractérise par un maillage de structures anthropiques qui accélèrent le transit des débits liquides et solides vers la baie.









Carte 17 : Traces parcourant les terres agricoles et intensité de l'érosion observée

### 3.3 A-t-on affaire à de véritables zones tampons ?

Le relevé sur le terrain des zones d'atterrissements de sédiments a permis de mettre en évidence des zones de dépôt privilégiées que l'on pourrait qualifier de zones « tampons » par rapport au transport solide. La **Carte 18** situe les principales zones mises en évidence. On rappelle que la définition de ces zones repose sur des observations qui se sont étendues sur le début de la saison des pluies et pour des événements pluvieux importants mais non extrêmes.

#### 3.3.1 Observations des zones tampons

On a pu observer des zones tampons stables de type :

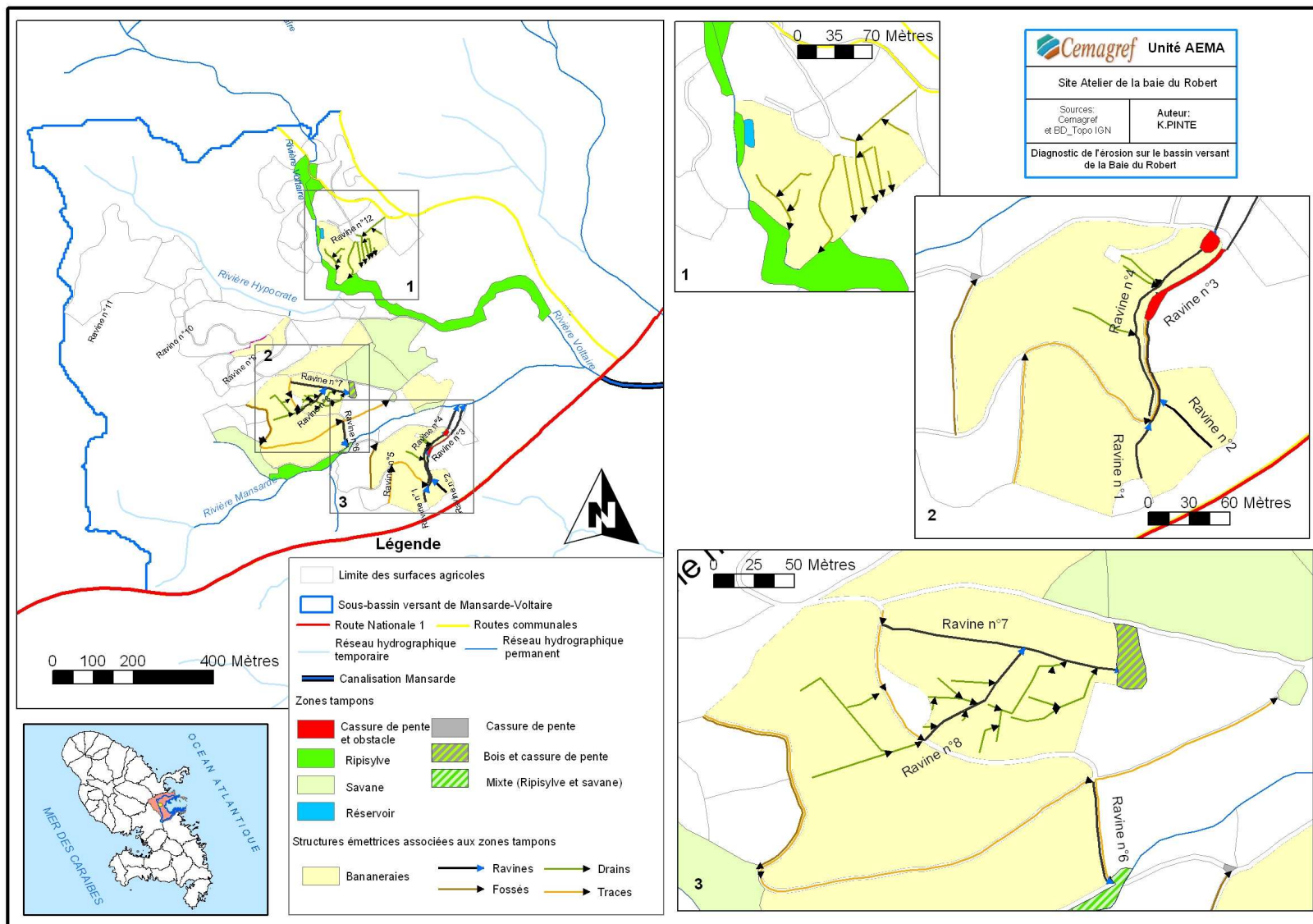
- **Ripisylves.** Elles concernent essentiellement les abords de la rivière Voltaire. La ripisylve y est constituée par de grands massifs de bambous qui par ailleurs fixent les berges. Ces bambous forment une véritable barrière végétale entre la rivière Voltaire et les parcelles agricoles adjacentes. La série de drains présentée sur la **Carte 18** (encadré n°1) débouche ainsi sur une zone densément végétalisée qui filtre une partie du transport solide.
- **Bosquets associés à des ruptures de pente.** Ces zones tampons peuvent être constituées seulement par quelques arbres et les strates herbacées sous-jacentes. La barrière végétale occasionnée casse l'énergie de l'écoulement diminuant ainsi la capacité de transport solide. D'importants dépôts de sédiments ont été ainsi observés dans la zone aval de la ravine n°7 (**Carte 18**, encadré n°3). Une rupture de pente associée à la barrière végétale constituée de quelques arbres occasionne l'atterrissement complet de la ravine qui vient littéralement mourir contre cette barrière. L'écoulement se perd ensuite dans des herbes folles avant de retrouver un fossé naturel qui évacue les eaux.
- **Des ruptures de pente.** On l'a vu précédemment, pour peu qu'une barrière végétale soit associée à une rupture de pente majeure, on peut assister à un dépôt de sédiments important et au comblement du lit de la ravine. C'est le cas de la ravine n°4 (**Carte 18**, encadré n°2) dont la partie terminale sur une zone plane est délimitée par une trace. Avant le passage du gué par la ravine, celle-ci a déposé de grandes quantités de sédiments. La ravine n'a plus de lit et l'écoulement se disperse avant de se concentrer à nouveau au passage du gué.
- **Grandes zones de friches, savanes, jachères.** On a répertorié des bananeraies (parcelles en jaune clair sur la **Carte 18**) dont le ruissellement de surface et les produits de l'érosion en nappe étaient récupérés par de grandes zones de savanes.

Des zones tampons temporaires causées par :

- **Des obstacles temporaires.** Sur le trajet de la ravine n° 3 (**Carte 18**, encadré n°2) un arbre effondré a progressivement entravé son écoulement. L'arbre est par ailleurs tombé dans une zone où la pente est plus faible. Il en résulte la création d'une zone d'atterrissement importante. La trace contiguë à la ravine est recouverte par une importante couche de sédiments relativement grossiers. Le débit liquide déchargé d'une partie de sa charge solide est dirigé vers une autre ravine qui traverse la bananeraie de l'autre côté de la route. Cette zone tampon est très spécifique puisque dès lors que l'arbre sera dégagé, la ravine retrouvera un profil d'équilibre en rattrapant son lit initial. C'est donc une **zone tampon temporaire**. L'agriculteur concerné nous a confirmé que cet arbre présent depuis 1 an ou 2 allait bientôt être dégagé.







Carte 18 : Zones tampons répertoriées et structures émettrices associées

- **Des traces.** Certaines traces peu entretenues et envahies par les herbes récupèrent les produits de l'érosion des bananeraies amont. C'est le cas d'une trace longeant une parcelle de bananiers, âgée d'un an, très ruisselante avec de nombreuses griffes d'érosion observées. La parcelle étant dans sa première année de production, l'agriculteur n'a pas eu besoin d'accéder à cette parcelle par cette trace et l'a donc laissée s'enherber. Cette trace joue donc le rôle d'une bande enherbée. Mais la situation est ici encore temporaire. L'agriculteur nous a confié qu'il allait réaménager la trace pour faciliter l'accès à la bananeraie quand le cycle de récolte allait commencer.

### 3.3.2 Quelle part du transport solide arrive jusqu'à la baie ? Premiers éléments de réponse.

Nous nous intéressons ici exclusivement au cas des ravines, qui parmi l'ensemble des structures étudiées sont celles qui semblent produire le plus de sédiments. Quelques mesures de transport solide et estimations de débit ont été réalisées au cours des ondes tropicales qui ont traversé la Martinique. Ces mesures étaient destinées à donner des ordres de grandeur du transport solide généré par l'érosion ravinatoire. L'une des difficultés majeures du calcul des pertes en terre par érosion ravinatoire est de tenir compte des deux types de transports solides présents dans l'écoulement torrentiel des ravines : le transport des matières en suspension et le transport par charriage. Or, lors de la collecte des échantillons d'eau chargée en matière solide, nous nous sommes attachés à ne prélever que les matières en suspension. Le transport par charriage est en effet plus difficile à mesurer et l'installation de pièges à sédiments n'a pu être réalisé pour cette étude.

Le calcul estimatif réalisé (**Annexe 10**) donne des pertes en terre de l'ordre de 60 tonnes/ha/an en ne prenant en compte que les matières en suspension, et de l'ordre de plusieurs centaines de tonnes/ha/an en prenant en compte une partie du transport par charriage (grâce à un échantillon où la bouteille a été placée au fond de la ravine et non dans la veine d'eau).

Ces estimations données, on s'aperçoit donc qu'il est dangereux de sous estimer le transport solide par charriage.

Ces mesures ont été complétées par des mesures sur des ravines avant et après atterrissement des sédiments dans des zones tampons. Les résultats indiquent des concentrations en matières en suspension quasiment identiques. Pourtant, l'importance des dépôts laissait présager une forte diminution dans nos échantillons. Une hypothèse peut être formulée : les atterrissements de sédiments dans les zones tampons correspondent en réalité aux sédiments charriés. Leur granulométrie grossière les rend sensible au dépôt dès lors que la vitesse de l'écoulement diminue. Les zones tampons n'auraient donc que très peu d'incidence sur le transport des matières en suspension.

Au final, sur les 11 ravines répertoriées comme très actives qui traversent les terres agricoles du sous bassin, 5 ravines débouchent directement dans le réseau hydrographique principal sans être interrompues par une zone de dépôt majeure. On peut donc considérer que l'ensemble du transport solide (matières en suspension + charriage) transitant dans ces ravines arrive jusqu'à l'exutoire du sous bassin. Cette affirmation est valable à l'échelle de l'événement pluvieux comme à l'échelle de l'année.

Pour les autres ravines qui traversent des zones tampons, on peut penser qu'à l'échelle de l'événement pluvieux, seules les MES atteignent l'exutoire. Les éléments plus grossiers





transportés par charriage seraient eux retenus par certaines structures tampons. Mais à l'échelle de l'année, on peut envisager que ces sédiments sont repris au cours d'un événement pluvieux extrême ou que la zone tampon, saturée, ne puisse plus jouer son rôle pour les événements suivants.

## 4 Bilan et perspectives

Le diagnostic réalisé sur ce sous bassin versant a permis en premier lieu de lever certains doutes et de répondre aux questions qui étaient apparues lors de la modélisation de la vulnérabilité à l'érosion à l'échelle du bassin versant. Dans ce cadre, les réponses apportées sont :

- L'érosion qui affecte les zones agricoles est majoritairement de type linéaire. L'érosion en nappe est présente mais ne semble pas être comparable en intensité à l'érosion en ravines. Les sols très argileux semblent en effet peu battants. Par ailleurs, la couverture au sol dans les bananeraies, offerte par les résidus, les faux troncs ou les mauvaises herbes, protège le sol de l'impact des gouttes de pluie.
- Le nombre de traces et la complexité du réseau de drains dans les bananeraies rendent l'utilisation d'un MNT brut pour la modélisation des flux d'eau très approximative. Les principaux problèmes, on l'a vu, sont très localisés. La sortie d'une buse ou l'arrivée d'un fossé en provenance d'une route nationale sont des éléments déterminants qui n'avaient pu être diagnostiqués à l'échelle du bassin versant même si le traitement du MNT avait permis d'obtenir quelques résultats satisfaisants. En effet, le tracé du réseau hydrographique théorique à partir de la couche d'information Flow accumulation obtenue avec Arc Hydro tools montre quelques bonnes concordances avec la réalité.
- Devant les phénomènes très violents et leur genèse rapide tels que la formation des ravines, l'érodibilité des sols ne semble pas être un paramètre déterminant dans l'étude de l'intensité des phénomènes érosifs. En revanche, il s'agira de déterminer pour la suite des recherches quels paramètres pédologiques pourraient être pris en compte dans de nouvelles modélisations. Après une crue, le fond des ravines paraît être formé d'une couche argileuse très compacte et peu sensible à l'entaille d'un cisaillement. On pense qu'un laps de temps sans pluie va provoquer la dessiccation de cette couche. Des fissures de retrait vont se former et affaiblir la structure de la couche argileuse qui sera alors vulnérable à la prochaine crue. L'étude des propriétés et de la dynamique de retrait des argiles est une piste de réflexion.
- Le rôle des zones d'habitat diffus a été étudié ici en terme d'apports liquides ponctuels en flux concentrés mais peu en terme d'apports solides. Quelques mesures de transport solide ont été estimées à la sortie d'une zone d'habitat. Ces mesures auraient tendance à minimiser l'apport solide en provenance de ces zones par rapport à l'érosion agricole mais ces résultats demandent confirmation. L'hypothèse qui avait donc été émise lors de la première phase de l'étude concernant le rôle important que pouvaient jouer les zones d'habitat diffus dans l'érosion en terme de production de sédiments ne peut être totalement confirmée.

Les premières étapes du diagnostic présentées dans ce rapport doivent servir de support pour l'élaboration d'indicateurs qui permettront de finaliser une méthodologie et tenter son application sur d'autres bassins versants aux problématiques similaires. Ces indicateurs seront conçus sur la base des paramètres récoltés sur le terrain et introduits sous SIG. Ils devront servir à la modélisation des trois fonctions composant le processus érosif (émission, transport, dépôt).



Au stade actuel, un certain nombre de paramètres récoltés sur le terrain avec ceux extractibles d'autres couches d'informations (BD\_Ortho et BD\_Topo, MNT) sont disponibles. Mais pour affiner ces indicateurs, d'autres paramètres sont nécessaires et notamment des paramètres quantitatifs. En effet, l'approche entamée ici est très naturaliste (ou empirique). Elle a permis en un temps réduit d'appréhender un grand nombre de phénomènes, leurs causes et leurs conséquences, par une analyse *in situ*. La connaissance du terrain va nous permettre également de choisir avec pertinence les lieux d'expérimentation.

Une deuxième phase va désormais consister à lancer des mesures afin de renseigner certains paramètres quantitatifs. Ces mesures concernent :

- L'instrumentation de cours d'eau avec une station de mesure des débits et du transport solide. Un travail sera réalisé afin de mettre en place une relation entre MES et turbidité.
- La pose de pièges à sédiments afin d'étudier le transport solide par charriage. Des études granulométriques seront lancées pour mieux comprendre la composition du transport solide et son potentiel de transport jusqu'au milieu marin.
- Le suivi géomorphologique du profil des ravines. A l'aide de repères, il s'agira de mesurer l'élargissement des ravines. Un relevé précis du profil en long pourra être envisagé.
- Un suivi fin du régime hydrique. Ce suivi permettra de mieux comprendre le rôle de l'agressivité des pluies dans la genèse des processus érosifs. Le but sera d'analyser également le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant fortement anthropisé (agriculture et urbanisation croissante). L'étude de la dynamique des flux liquides et solides est en effet indispensable pour déterminer la quantité de sédiments arrivant à la baie.

Enfin, le diagnostic réalisé ici et les études complémentaires qui vont être lancées vont permettre de compléter l'indicateur de charge polluante mis en place dans le cadre de la première phase du projet LITEAU II. En effet, cet indicateur ne prenait pas en compte la dynamique des pollutions un fois émises dans le milieu. L'étude et la cartographie des réseaux d'écoulement, dans et entre les bananeraies, permettra de mieux connaître le transfert des polluants.



## Conclusion générale

Les résultats issus de ce diagnostic sont de deux types :

- L'érosion affecte l'ensemble du bassin. Cependant, l'érosion linéaire étant prépondérante, elle limite ainsi spatialement le phénomène (essentiellement dans les ravines). Les zones les plus touchées par cette forme d'érosion sont principalement les surfaces agricoles, mais l'urbanisation croissante tend à amplifier les processus, déjà favorisés localement par certaines pratiques culturales.
- La contribution de toutes ces zones à l'envasement de la baie ne peut à ce stade de l'étude être déterminée avec précision. Néanmoins, il apparaît clairement que les zones potentielles de dépôt sur ce bassin très ramassé autour de la baie sont peu efficaces à l'échelle d'une année hydrologique entière. Par ailleurs, les observations réalisées pour des événements pluvieux modestes (ondes tropicales) doivent rappeler au lecteur que les événements de type cyclonique ne sont pas pris en compte ici, alors que leurs intensités entraînent parfois des perturbations environnementales bien supérieures. Nos observations restent donc relatives au régime pluviométrique considéré.

Face à ces différents constats, la lutte contre l'envasement de la baie peut-être envisagée sous deux approches (qui peuvent être complémentaires) :

- Une approche « curative » qui consiste à retenir dans le bassin versant les particules solides émises par les phénomènes d'érosion en construisant des ouvrages de rétention de sédiments. Cette approche très lourde nécessite par ailleurs d'importants moyens d'investigations pour le dimensionnement de ces ouvrages.
- Une approche « préventive » qui s'attaque à l'amont du problème. Il s'agit de diminuer les émissions de particules solides sur le bassin par des moyens de lutte anti-érosive. Cette approche sur les terres agricoles est préconisée à double titre. En effet, l'érosion linéaire, principal problème mis en évidence, a une première conséquence *in situ* avec la destruction de l'appareil productif des agriculteurs qui se sentent impuissants face au dynamisme destructeur de ces phénomènes mais également impuissants face aux causes (rôle de l'urbanisation). La deuxième conséquence concerne l'enjeu de l'hypersédimentation avec l'émission de sédiments, mais à propos duquel les agriculteurs se sentent peu concernés.

Le dialogue engagé principalement avec les producteurs de banane montre qu'ils sont demandeurs en solutions pour minimiser l'érosion sur leurs terres. La lutte anti-érosive avec par exemple la stabilisation des ravines par des barrages naturels filtrants (plantations dans le lit de la ravine) pourrait être un exemple de préconisations. Ces propositions, associées à une démarche participative, permettraient d'impliquer doublement les producteurs dans la conservation du « patrimoine sol » mais également dans la protection de l'environnement de la baie.

Il faut cependant attirer l'attention sur le fait que l'agriculture, citée de nombreuses fois dans cette étude, est loin d'être la seule responsable de l'envasement de la baie. Il est important de rappeler que l'urbanisation galopante sur le bassin versant amène son cortège d'impacts directs sur l'environnement. Lutter contre l'envasement à ce niveau ne réclame plus simplement l'aval des agriculteurs mais une action concertée entre tous les acteurs locaux et cette fois-ci à l'échelle du bassin. Ce rapport servira de base aux futures réflexions.



## Bibliographie

- Albert, P. et Spieser, J.**, 1999. Atlas climatique. Le temps à la Martinique. Ed. Météo France, Martinique, 101p.
- Albrecht, A., Rangun, L., Barret, P.**, 1992. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). Cahiers ORSTOM.Série Pédologie (FRA), Vol. 27, No 1, p. 121-133
- Bathurst, J.C.**, 2002. Physically-based erosion and sediment yield modelling: the SHERTRAN concept, in Summer, W., Walling, D.E., 2002, 46-67
- Becquet, M.**, 2004. L'urbanisation et ses conséquences sur l'utilisation des sols pour l'agriculture en Martinique-Analyse diachronique d'informations spatiales non superposables. Mémoire de DESS en Géomatique de l'Université d'Orléans. 52 p.
- Breetzke, G.D.**, 2004. A critique of soil erosion modelling at catchment scale using a GIS. Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (UNIGIS). Faculteit der Aard-en Levenswetenschappen Vrije Universiteit Amsterdam. The Netherlands. 145 p.
- Cabidoche, Y.M., Dorel, M., Paillat, J.M., Robin, P.**, 2001. Inventaire des données scientifiques et techniques disponibles dans les Dom insulaires relatives à la fertilisation azotée des cultures, à leur conduite, au fonctionnement des aquifères et aux phénomènes de transfert d'azote dans le milieu et à leur incidence. Proposition de recherches complémentaires pour valider les outils de fertilisation raisonnée et tester leur impact sur des bassins représentatifs. Expertise demandée par le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Direction de l'eau, 60 p.
- Cerdan, O.**, 2001. Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés. Thèse présentée à l'université d'Orléans pour obtenir le grade de Docteur de l'Université d'Orléans. 186 p.
- Cerdan O., Le Bissonais, Y., Souchère, V., Martin, P., Lecomte, V.**, 2002. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27** (2), 193-205.
- Cohen, M. J.**, 2004. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assesment in a tropical watershed. *Geoderma* 124 (2005) 235-252.
- Colmet-Daage, F.**, 1969. Légende-Carte des sols des Antilles à 1/20000<sup>e</sup>-Guadeloupe-Martinique (partie volcanique), ORSTOM, Centre des Antilles, bureau des sols.
- Desse, M. et Saffache P.**, 2005. Les littoraux antillais : des enjeux de l'aménagement à la gestion durable. Ibis Rouge Editions. 116 p.
- De Noni, G. et Viennot, M.**, 1998, Etude des facteurs de l'érosion hydrique sur des versants volcaniques cultivés : une réponse à une demande de développement. IRD, Montpellier, Bulletin - Réseau Erosion (FRA), No 18, p. 437-449
- De Noni, G. et Viennot, M.**, 1997, Les dynamiques dominantes d'érosion des sols cultivés dans la montagne andine de l'Equateur : un exemple d'approche qualitative et « naturaliste », IRD, Montpellier, Bulletin - Réseau Erosion (FRA), No 17, p. 11-23
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Ritsema., C.J.**, 1996. LISEM : A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output'. *Hydrol. Proc.*, 10, p. 1107-1117.
- De Roo, A.P.J.**, 1998. Modelling runoff and sediment transports in catchments using GIS. *Hydrol. Process.* 12, 905±922
- Elwell, H.A.**, 1977. A soil loss estimation system for southern Africa. Rhodesian Dep. Of Conservation & Extension, Research Bulletin, No. 22.





- Eiumnoh, A., Pongsai, S., Sewana, A.,** 2002. Dynamic soil erosion model : MSEC1 model, an integration of mathematical model and PCRaster Pathumthani (Thailand) : Asian Institute of Technology, 28 p
- Harris, M.T. and Boardman, J.,** 1990. A rule-based Expert System Approach to Predicting Waterborne Soil Erosion. In: J. Boardman, D.L. Foster and J.A. Dearing (Editors), *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 401-412.
- Hessel, R., Van Den Bosch, R., Vigiak, O.,** 2005. Evaluation of the LISEM soil erosion model in two catchments in the East African Highlands. *Earth Surf. Process. Landforms* 31, 469–486 (2006)
- Heusch, B.,** 1970. L'érosion du Pré Rif. *Annales rech. Forestière Maroc*. Rabat, Spécial n°12: 9-176.
- In Roose (1994)**
- Hoyos, N.,** 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Catena* 63 (2005) 85-108.
- Hubert, A.,** 2005. Incidence à moyen terme de la conduite de bananeraies sur les propriétés du sol : conséquences sur le fonctionnement hydrique et l'érosion. Mémoire de fin d'étude. ENSAR-AgroCampus Rennes.
- Hudson, N.W.,** 1973. *Soil Conservation*. Batsford, London. 320 p. **In Roose (1994).**
- Jenson, S. K., et Domingue, J. O.,** 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54, p 1593–1600.
- Kao, C., Vernet, G., Le Filleul, J.M., Nedelec, Y., Carluet, N., Gouy, V.,** 2002. Elaboration d'une méthode de typologie des fossés d'assainissement agricole et de leur comportement potentiel vis-à-vis des produits phytosanitaires. *Ingénieries* n°29. p 49-65.
- Khamsouk, B.,** 2001. Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite). Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'ENSA Montpellier. 214 p.
- Lal, R.,** 1976. Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria and their control. IITA Monograph n°1, Ibadan 126p. **In Roose (1994).**
- Lane, L.J., Nearing, M.A., Laflen, J.M., Foster, G.R.,** 1992. Description of the US Department of Agriculture water erosion prediction project (WEPP) model. In: A.J. Parsons and A.D. Abrahams (eds.), *Overland flow: hydraulics and erosion mechanics*. UCL Press, University College, London, p. 377-391.
- Le Bissonnais Y., Thorette, J., Bardet, C., Daroussin, J.,** 2002. L'érosion hydrique des sols en France. Rapport IFEN. 106 p.
- Lentsoane, P.M.M.,** 2004. Evaluation of erosion models and field assessments methods as tools for monitoring and evaluation of soil erosion in landcare. Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree MSc (Agric) Soil Science in the Faculty of Natural and Agricultural Sciences University of Pretoria.
- Lucas, G.,** 2004. Approche du transfert d'échelle spatiale d'un indicateur agro-environnemental d'aléa phytosanitaire, sur des bassins versants emboîtés de la Save (Gers). Mémoire de fin d'études. ENITA de Bordeaux.
- Macary, F. et Paulais, J.,** 2003. Méthode d'identification de zones prédisposées aux émissions et aux transferts particuliers - Application à une zone d'élevage bovin intensif dans le bocage sud-Manche. *Ingénieries* n°36. p 3-17.
- Marie, P. et Lucas G.,** 2005, Etude spatiale des risques agri-environnementaux - Bassin versant de la baie du Robert. Programme LITEAU II. Rapport intermédiaire. Cemagref. 58 p.



- Meyer, L.D., Wischmeier, W.H.**, 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 12, 754–758 and 762.
- Millward, A.A.**, 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena* 38. 109-129.
- Meunier, M.**, 1999, Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique - Hydrologie des crues, hydraulique et dynamiques torrentielles. Cemagref Editions. 403 p
- Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V., Finney, H.J.**, 1984. A predictive model for the assessment of erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research* 30, 245–253
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Goyers, G., Poessen, W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E.**, 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surf. Process. Landforms*, 23, p. 527-544.
- Morgan, R.P.C.**, 2000. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model. *Catena* 44 (2000) 305-322.
- Ndandou, J.F., Albrecht, A.**, 1998. Dynamique précoce de la matière organique du sol et de l'agrégation d'un vertisol sous prairie (Martinique) selon le type de travail du sol. ORSTOM, Montpellier (FRA), Congrès Mondial de la Science du Sol, 20-26 août 1998, Montpellier, FRA. 6 p.
- Parson, A.J., Wainwright, J., Powell, D.M., Kaduk, J., Brazier, R.E.**, 2004. A conceptual model for determining soil erosion by water. *Earth Surf. Process. Landforms*. 29, 1293-1302
- Quantain, P. et Combeau, A.**, 1962. Erosion et stabilité structurale du sol. AISH n°59 : 124-130. In **Roose (1994)**
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A, McCool, D.A., Yoder, D.A.**, 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook n°703, (U.S.Gov.Print.Office: Washington D.C)
- Roose, E.**, 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO* n°70. 420 p.
- Roose, E. et Sarrailh, J.M.**, 1989-1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux : 20 années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie (FRA)*, Vol. 25, No 1-2, p. 7-30
- Roose, E., Khamsouk, B., Lassoudière, A., Dorel, M.**, 1999. Origine du ruissellement et de l'érosion sur sols bruns à halloysite de Martinique. Premières observations sous bananiers. *Bulletin Réseau Erosion*, 19, 139-147.
- Rose, C.V., Williams, J.R., Sander, G.C., Barry, D.A.**, 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes. *Soil Science Society of America Journal* n°47, 1983. p. 991-995.
- Saffache, P.**, 1999. L'avancée du trait de côte de la baie du Marin (Martinique) : conséquence de l'activité anthropique sur les bassins versants alentour. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences Paris. Série 2a : Sciences de la Terre et des Planètes (FRA)*, Vol. 328, No 11, p. 739-744
- Souchère, V., Sorel, L., Couturier A., Le Bissonais, Y., Cerdan, O.**, 2000. Application du modèle STREAM à l'échelle d'un bassin versant au cours d'un cycle hydrologique
- Summer, W., Walling, D.E.**, 2002. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. IHP (International Hydrological Programme)-VI, Technical Documents in Hydrology, No. 60 UNESCO, Paris.
- Vigiak, O. et al**, 2005. Modelling catchment-scale erosion patterns in the East African Highlands, *Earth Surf. Process. Landforms*, 30, p. 183-196



**Westercamp, D. et Tazieff, H.**, 1980. Guides géologiques régionaux. Martinique-Guadeloupe-Saint Martin-La Désirade. In **Khamsouk, B.**, 2001

**Wischmeier, W. H., Smith, D. D.**, 1978. Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning. USDA Handbook, 537, 58 p.

**Zingg, A.W.**, 1940. Degree and length of lad slope as it affects soil loss and runoff. Agric. Eng. 21 : 59-64. In **Roose (1994)**

## **Liste des sites Web consultés :**

<http://www.insee.fr/>

<http://www2.brgm.fr/risques/antilles/>



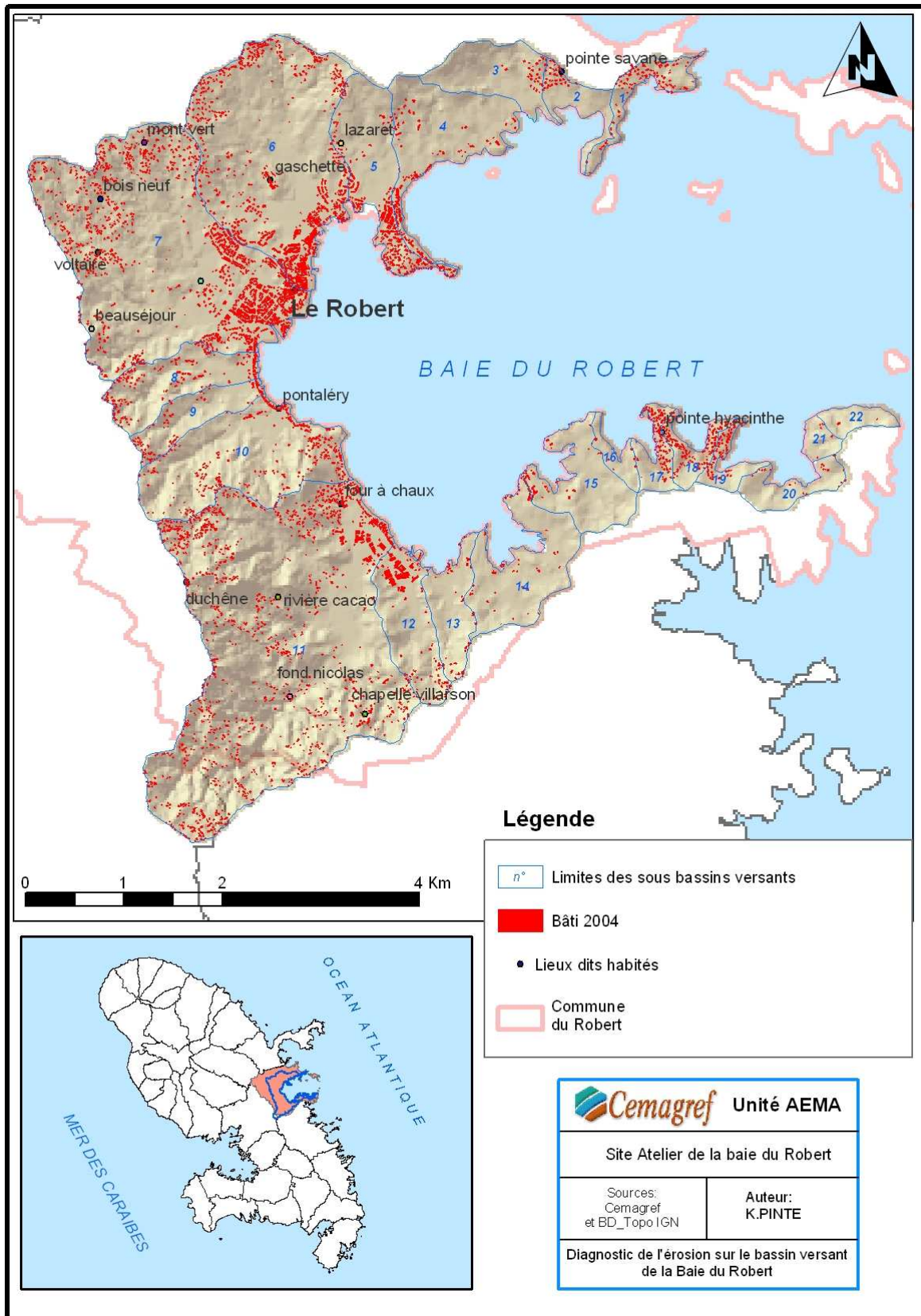
# **Annexes**

<b>Annexe 1: Carte du bâti 2004 sur le bassin versant de la baie du Robert .....</b>	<b>II</b>
<b>Annexe 2: Détail de la bibliographie sur les modèle empiriques .....</b>	<b>III</b>
<b>Annexe 3: Exploitabilité des données de Météo France et analyse fréquentielle sur deux stations pluviométriques .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Annexe 4: Méthode d'acquisition de l'occupation du sol .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Annexe 5: Correspondance entre classes et codes pour l'ensemble des paramètres utilisés dans la modélisation .....</b>	<b>XV</b>
<b>Annexe 6: Arborescence logique .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Annexe 7: Carte de l'occupation du sol du sous bassin versant de Mansarde Voltaire .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>Annexe 8: Fonctionnement du GPS différentiel.....</b>	<b>XIX</b>
<b>Annexe 9: Détails sur la conception de la base de donnée conçue pour l'étude du sous bassin versant de Mansarde-Voltaire .....</b>	<b>XX</b>
<b>Annexe 10: Essai de quantification de pertes de terre au niveau d'une ravine.....</b>	<b>XXII</b>





## Annexe 1 : Carte du bâti 2004 sur le bassin versant de la baie du Robert





## Annexe 2: Détail de la bibliographie sur les modèle empiriques

### Modélisation empirique

Détail de l'équation de Wischmeier (USLE)

$$A=R*K*SL*C*P$$

Avec:

- A=Pertes de sol en tonnes/ha/an
- **R**: Erosivité des pluies avec  $R= E*I30$ , avec E=énergie cinétique des gouttes de pluie ( en tonne métrique \* m/ha/cm de pluie) et I30=intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimées en cm par heure. Ce paramètre étant souvent peu disponible, Renard et Freimund,1994, (cités dans *Morschel J., Fox D.*) proposent une méthode de substitution établie ( à partir de 155 stations aux Etats-Unis) sur une relation entre R et la hauteur annuelle moyenne des pluies (P) en mm :

$$R = 0,04830 * P^{1,610}$$

- **K** : Erodibilité des sols. K dépend de la matière organique (MO), de la texture (M), de la perméabilité (c) et de la structure (b) du profil de sol.  $0.01 < K < 0.7$

$$K = 2,8 * 10^{-7} * M^{1,14} * (12 - MO) + 4,3 * 10^{-3} (b - 2) + 3,3 * 10^{-3} (c - 3)$$

Avec  $M = (\% \text{ limons} + \% \text{ sables}) * (100 - \% \text{ argiles})$  et  $1 \leq b \leq 4, 1 \leq c \leq 6$

- **SL** : facteur topographique qui dépend à la fois de la longueur de la pente (L) et de l'inclinaison de la pente (S).  $0.1 < SL < 5$

$$S = 10,8 \sin \theta + 0,03 \text{ si la pente est inférieure à } 9\%$$

$$S = 16,8 \sin \theta - 0,5 \text{ si la pente est supérieure ou égale à } 9\%$$

$$L = \frac{(\lambda)^m}{22,1} \text{ avec } m = \frac{\varepsilon * \beta}{1 + \beta} \text{ et } \beta = \frac{\sin(\theta / 0,0896)}{3 * \sin(\theta)^{0,8} + 0,56}$$

Avec :  $\lambda$  (en m) : longueur de la pente calculée entre le sommet du versant et le début de la zone concave ,  $\theta$ : inclinaison de la pente,  $\zeta$ : rugosité de la surface

- **C**: couvert végétal. C est un simple rapport entre l'érosion sur sol nu et l'érosion observée sous un système de production. Le facteur C inclue l'information sur les techniques culturales.  $1 < C < 0.001$
- **P** : Pratiques anti-érosives (labour, billonage, terrasses...).  $0.1 < P < 1$

Ce modèle qui présente l'avantage d'avoir un faible nombre de paramètres d'entrée se heurte à plusieurs limites pour son utilisation dans un environnement différent de celui où il a été étalonné (grandes plaines de grande culture aux Etats-Unis). Ces limites sont (Roose, 1994) :

- Ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe.
- Il ne s'applique que sur des zones de pentes faibles à modérées. En effet sur les pentes supérieures à 15% la source d'énergie prédominante devient celle du ruissellement et non plus celle de la pluie



- La relation entre énergie cinétique et intensité des pluies n'est valable que pour le climat américain.
- Ce modèle ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans. Ce modèle n'est donc pas adapté à l'étude de l'érosion à l'échelle de l'événement pluvieux. A noter à ce propos l'existence du modèle MUSLE qui est l'adaptation de l'USLE à l'échelle de l'orage. Le facteur climat ne tient plus compte de l'érosivité des pluies mais du volume ruisselé :  $R = a * (Q * q)^b$  avec a et b : constantes, Q : Volume ruisselé ( $m^3$ ), q : débit du pic de crue ( $m^3/s$ )

De plus l'étalonnage sur des parcelles expérimentales de 100 m<sup>2</sup> pose la question du transfert d'échelle pour l'utilisation du modèle à l'échelle du bassin versant par exemple.

Néanmoins le modèle USLE a été utilisé dans de nombreux programmes d'étude de l'érosion. Il a été utilisé tel quel ou bien avec des modifications adaptatives. Il a notamment fait preuve d'une adaptation par Renard *et al.* (1997) aux conditions environnementales du Nord-est des Etats-Unis et a été informatisé pour devenir le RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

On peut citer également le modèle SLEMSA (Ellwel, 1977 in Breetzke, 2004) basé sur la même approche empirique que l'USLE et destiné au calcul de pertes annuelles de terre en Afrique du Sud. Les facteurs utilisés sont les mêmes. Ce qui diffère, ce sont les paramètres et leurs calculs. Breetzke (2004) précise que le modèle SLEMSA est soumis aux mêmes limitations que USLE.

D'autres auteurs ont tenté d'adapter la USLE à des régions tropicales avec plus ou moins de succès. Le tableau n°1 présente quelques unes de ces adaptations.

### **Modélisation à base physique (Détail des principaux modèles et raisons de leur non utilisation pour l'étude.**

- **WEPP Model**

Le modèle WEPP impulsé par Lane *et al.* (1992) a été désigné pour remplacer le modèle USLE aux Etats-Unis. Ce modèle s'intéresse à l'érosion en nappe (comme étant une conséquence de la dégradation de la structure du sol due à l'impact des gouttes de pluie) et à l'érosion linéaire sous forme de rigoles (fonction de la capacité du ruissellement à détacher les particules de terre, de la capacité de transport du ruissellement et de sa charge en sédiments). Il est organisé en plusieurs modules : climatique, croissance de la plante, irrigation, bilan hydrique, décomposition des résidus, labour, ruissellement, érosion et dépôts. Ce modèle est capable de simuler à des échelles temporelles différentes (continues ou à l'échelle de l'orage). Initialement conçu pour prédire l'érosion à l'échelle de la parcelle ce modèle a été par la suite étendu à l'échelle du bassin versant (jusqu'à 300 ha environ).

**La quantité de paramètres d'entrée pour ce modèle est non négligeable et semble plus particulièrement étudié pour des zones où le relief n'est pas trop disséqué et pour les grandes cultures.**

- **EUROSEM Model (and Kinos model)**

Ce modèle (Morgan *et al.* 1998) a été conçu pour prévoir l'érosion dans les pays européens, venant du constat qu'aucun modèle n'avait encore été développé sur le vieux continent. C'est un modèle dynamiquement distribué à base physique à l'échelle de la parcelle ou du petit bassin versant. Il modélise l'érosion en rigoles (rill) et entre les rigoles (interill). L'échelle temporelle est celle de l'évènement pluvieux. Selon les auteurs, il est en effet plus pertinent de s'intéresser à quelques évènements climatiques qui sont responsables de la majeure partie de



l'érosion. Les flux d'eau et de sédiments sont intégrés le long d'une série de pentes uniformes et de chenaux d'écoulements reliés en réseau pour simuler le fonctionnement du bassin. Les entrées du modèle sont : précipitations, végétation, propriétés mécaniques du sol, propriétés hydriques du sol, microtopographie, topographie.

- **LISEM (Linburg Erosion Model)**

LISEM (De Roo *et al.*, 1996) est un modèle à base physique qui simule l'arrachement, le transport et le dépôt des sédiments pendant et après des événements pluvieux pour des petits bassins versants (10 à 1000 ha).

Entrées : direction locale de l'écoulement, gradient de pente, végétation (LAI, couverture, hauteur), états de surface (rugosité, surface encroûtée, cohésion, stabilité des agrégats, traces des roues...), D50, conductivité hydraulique du sol à saturation, teneur en eau initiale et à saturation, profondeur du sol, localisation et largeur des routes, des cours d'eau et des fossés

Sorties : cartes (intermédiaire et finale) de ruissellement, d'érosion et de dépôts ; hydrogramme et sédimentogramme pour les exutoires du bassin et des sous bassins ; bilans d'eau et de sédiments.

**Adapté aux zones de grandes cultures et au climat tempéré, ce modèle a été testé (Hessel *et al.*, 2005) sans succès en Afrique de l'Est (Kenya et Tanzanie).**

- **SHETRAN**

Le modèle SHETRAN est un modèle à base physique, spatialement distribué. Il a été conçu par le Water Resource Systems Research Laboratory (WRSRL), Department of Civil Engineering, University of Newcastle. Il est basé sur un modèle **purement hydrologique**, le SHE (Système Hydrologique Européen, Abbot *et al.*, 1986a) auquel ont été rajoutés des modules sur le transport des sédiments ainsi que sur la migration des polluants. Il permet également la localisation et le dépôt des glissements de terrain et la formation de ravines. **La modélisation est particulièrement efficace pour des BV de 1km<sup>2</sup> à 2000km<sup>2</sup>.**

Les deux modèles présentés ci-après sont moins courants dans la littérature mais ont le mérite d'avoir été testés dans des conditions environnementales plus similaires à celles de la Martinique que les autres modèles conçus sous des climats tempérés ou semi-aride (plaines des Etats-Unis).

- **Modèle PLER (Predict and Localize Erosion and Runoff)**

Le modèle PLER (Migraine, 2005) est un modèle dérivé d'un autre modèle d'érosion dynamique (MESC, Management of Soil Erosion Consortium, Eiumnoh *et al.*, 2002) ainsi que de l'équation GUESS (Griffith University Erosion Sedimentation System, Rose *et al.*, 1983).

Le but de ce modèle est d'évaluer des flux de sédiments et de cartographier les dépôts de façon dynamique à des pas de temps de 6 min. Selon les auteurs, c'est un modèle intermédiaire entre les modèles empiriques « simplistes » et les modèles à base physique trop demandeurs de paramètres. Une des composantes principales de ce modèle est une évaluation physique du ruissellement avec un calcul simplifié de la vitesse d'écoulement.

Ce modèle a été testé sur des petits bassins versants agricoles (50 ha à 100 ha) à forte pente en Thaïlande et au Vietnam. Sa capacité à être utilisé sur des bassins versants de taille différente est en cours de validation.





## Entrées

- MNT (pentes, longueur de pente, direction aval de l'écoulement)
- Carte des stations de mesure
- Carte des sols (densité, profondeur, infiltrabilité, % d'argile, vitesse de sédimentation, densité de sédimentation, pores efficients/pores totaux en %)+ (porosité disponible pour le stockage, volume d'eau stockée dans le pixel, vitesse moyenne efficiente du ruissellement surfacique et sub-surfacique, temps de concentration du ruissellement, ruissellement, capacité de transport de l'écoulement)
- Carte occupation des sols (Coefficient de Manning, % de couverture, ETR/ETP en %)

## Sorties

- Cartes du ruissellement cumulé, arrachage des sédiments, flux et stockage des sédiments
- Séries chronologiques du ruissellement, des sédiments produits, transportés, déposés

**L'intérêt de ce modèle réside dans les conditions environnementales dans lesquelles il a été testé (milieu tropical et fortes pentes) qui s'apparentent aux conditions climatiques de la Martinique. Les paramètres entrant sont nombreux mais ils ne sont peut-être pas si difficiles à récolter sur le terrain (à voir avec le CIRAD et l'IRD). On peut néanmoins se poser la question pour notre étude, de la nécessité de simuler l'érosion à des pas de temps de 6 minutes.**

- **Revised Morgan-Morgan-Finley model (MMF)**

Le modèle MMF (Morgan *et al.*, 1984) était initialement basé sur les concepts des travaux de Meyer et Wischmeier (1969) et Kirkby (1976, in Morgan, 2000) tout en proposant des améliorations en matière de description physique des phénomènes d'érosion. Ce modèle avait été validé sur 67 sites expérimentaux dans 12 pays (Morgan, 2000). Le modèle était alors basé sur la simplification du processus d'érosion en deux phases (eau et sédiment):

- Détachement des particules du sol par l'impact des gouttes de pluie
- Transport de ces particules par le ruissellement

En revanche le transport des particules par les gouttes de pluies et l'arrachement de particules par le ruissellement était négligé. Si le premier processus peut être négligé, le deuxième revêt une grande importance dans le cadre de l'érosion sur fortes pentes.

Dans la nouvelle version du modèle, le processus d'érosion est à nouveau séparé en 2 modules :

- Eau : qui détermine 1/-l'énergie disponible des précipitations pour arracher les particules du sol 2/-le volume de ruissellement
- Sédiment : qui détermine 1/-les taux de particules arrachées par la pluie et le ruissellement et 2/-la capacité de transport du ruissellement.

Dans le nouveau modèle une méthode d'approche à l'échelle du petit bassin versant est proposée. Il s'agit de découper le bassin versant en éléments homogènes du point de vue de l'occupation du sol, de leurs sols et de la pente. Ces éléments homogènes sont ensuite arrangés en séquence suivant le sens d'écoulement des flux de ruissellement afin de déterminer l'accumulation des écoulements pour chaque élément (le ruissellement généré sur un élément provient du ruissellement généré sur le dit élément et du ruissellement des éléments amonts).



L'idée est intéressante, mais pose un problème de méthode si l'on aborde l'utilisation du modèle MMF par une approche SIG où l'unité spatiale d'intégration de l'information est le pixel. L'idée serait d'utiliser l'algorithme de calcul D8 de Jenson et Domingue (1998) qui donne les accumulations de flux par pixel. Mais au lieu d'affecter la valeur théorique de « 1 » aux pixels lors du calcul de l'accumulation à partir de la grille de direction des écoulements, il faudrait pouvoir donner à chaque pixel sa « valeur de ruissellement ». Une piste pour répondre à ce problème se situerait peut-être du côté des travaux de Souchère *et al.* (INRA, Grignon et Orléans) autour de la conception du modèle STREAM. Ils ont développé ce modèle sous SIG et ont créé des algorithmes pour déterminer l'accumulation des flux sur chaque pixel.

Le modèle révisé a été testé par Vigiak *et al.*, (2005) en Afrique de l'Est sur deux petits bassins versants en zone tropicale (saison humide et saison sèche) avec des précipitations annuelles aux alentours de 1000 mm concentrées pendant la saison humide. Les pentes y sont fortes (moyenne autour de 20%). Le modèle a tourné sur différents types de couverture végétale (dont notamment la canne à sucre et la banane). Les pertes de terres simulées sur les deux bassins s'étalent entre 0.01 kg/m<sup>2</sup>/an et 13.5 kg/m<sup>2</sup>/an (soit entre 0.1 tonne/ha/an et 135 tonnes/ha/an). A titre d'indication, selon Roose (1994), l'ensemble des données récoltées par l'ORSTOM et le CIRAD sur les pertes en terres simulées sur parcelles ont conduit à des valeurs s'échelonnant entre 1 et 200 t/ha/an (jusqu'à 700 tonnes en montagne sur des pentes de 30% à 60%). Le modèle semble néanmoins surestimer les pertes en terre, notamment à cause du paramètre d'accumulation de l'écoulement qui donne de l'importance à l'érosion produite en bas de pente et en fond de vallée. Ce modèle serait donc plus applicable à l'échelle du champ qu'à l'échelle du bassin versant.

**L'intérêt de ce modèle réside dans l'utilisation de paramètres d'entrée facile à acquérir. Des valeurs pour les cultures de banane et de canne à sucre sont par ailleurs déjà disponibles. Selon Vigiak *et al.*, (2005), en améliorant le module hydrologie (prédiction du ruissellement le long de la pente), ce modèle serait beaucoup plus précis.**



### Annexe 3: Exploitabilité des données de Météo France et analyse fréquentielle sur deux stations pluviométriques

#### *Analyse de l'exploitabilité des données Météo-France*

Afin d'étudier les séries de données climatiques des pluviomètres présents sur la baie du Robert, un tri était nécessaire pour éliminer les années où les données étaient trop incomplètes. Ce tri s'est basé sur l'étude des codes qualités fournies par Météo-France pour chacune de leurs mesures. Ces codes sont :

Cumul précipitations	Code qualité	Interprétation
-1	0	Mesure manquante (pas de donnée)
<i>Vide</i>	1	Jour sec (pas de pluie)
<i>Vide</i>	2	Traces de pluie (non mesurable)
<i>Val</i>	1	<i>Val</i> est la valeur du cumul mesuré
<i>Val</i>	0	<i>Val</i> est la valeur du cumul estimé dans nos services
0	3	Jour d'un cumul non réparti (pluviomètre non relevé).
<i>Val</i>	4	<i>Val</i> est la valeur du cumul non réparti sur les jours précédents (depuis le premier jour où le pluviomètre n'a pas été relevé).
<i>Vide</i> ou <i>val</i>	7	Pas de donnée pour ce mois. Le premier jour du mois, on trouve dans le champ cumul la valeur estimée pour le mois. Les autres jours du mois le champ cumul est vide.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau ci-après:

Analyse des résultats :

Les pluviomètres 4 et 7 (Mansarde et Duchesne) possèdent les plus longues séries d'années propres (aucune donnée manquante, ni ré évaluée à posteriori).

Les autres pluviomètres possèdent un nombre moins important d'années « propres » mais il est possible de dégager dans la série chronologique des années exploitables :

- Années comportant quelques jours avec le code qualité 2 indiquant que les pluies étaient trop faibles pour être mesurables. On peut donc assimiler ces mesures au code qualité 1 avec un cumul de précipitation nul.
- Années comportant quelques jours consécutifs où les pluviomètres n'ont pas été relevé le jour même (code qualité 3) mais dont le cumul est mesuré les jours suivants (code qualité 4). Ces données peuvent être exploitables car il ne s'agit jamais de plus de 3 jours consécutifs non relevés.
- Années comportant quelques jours ( $< 10$ ) avec des cumuls estimés par les services de météo France.

Seule la série chronologique du pluviomètre de Chapelle Villarson est peu exploitable, avec seulement 3 années de données complètes.

Une fois le tri opéré parmi les séries, il est nécessaire de regarder quelles sont les séries annuelles communes entre chaque pluviomètre. En effet pour comparer des stations (étude de



l'influence du relief par exemple) entre elles il est indispensable de les comparer sur des années identiques.

Au final, seulement deux pluviomètres (P03 et P07) possèdent un nombre suffisamment important de séries annuelles communes pour que le régime des pluies des deux zones couvertes par le pluviomètre puisse être étudié. Il s'agit des séries de 1962 à 1967, 1970, 1971 et 1973 à 1977 soit au total 13 années. La série de 1974 pour la station de la Gendarmerie a été prise même si elle n'est pas tout à fait complète. Il n'y avait qu'un jour qualifié avec le code 2 (traces de pluie non mesurables). Il a donc été attribué à ce jour un cumul de pluie de 0 mm pour rendre la série complète. Sur ces deux stations, une analyse fréquentielle des pluies a été réalisée afin de voir si le risque d'événements extrêmes étaient le même.



**Situation des pluviomètres sur le bassin**





N°Pluviomètre	P02	P03	P04	P07	P05	P10
Nom de la station	Pointe-Fort	Gendarmerie	Mansarde	Duchesne	Voltaire	Chapelle-Villarsen
Altitude (en m)	13	10	45	230	55	105
Situation	Nord	Nord	Nord	Sud	Nord	Sud
1961						
1962						
1963						
1964						
1965						
1966						
1967						
1968						
1969						
1970						
1971						
1972						
1973						
1974						
1975						
1976						
1977						
1978						
1979						
1980						
1981						
1982						
1983						
1984						
1985						
1986						
1987						
1988						
1989						
1990						
1991						
1992						
1993						
1994						
1995						
1996						
1997						
1998						
1999						
2000						
2001						
2002						
2003						
2004						
<b>Total années complètes</b>	10	12	17	17	7	1
<b>Total années quasi complètes</b>	4	6	/	/	7	2
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>14</b>	<b>3</b>



## *Analyse fréquentielle des pluies sur les stations de Gendarmerie et Duchêne.*

On rappelle que ces deux stations ont un différentiel d'altitude de 220m qui justifie leur étude pour déterminer un éventuel effet du relief sur le régime des pluies extrêmes.

L'analyse fréquentielle se base sur la méthode du GRADEX (Duband et Guillot, 1967). Cette méthode a été développée afin de prédire les crues extrêmes pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques. Elle se base en premier lieu sur l'analyse des pluies extrêmes dont nous nous contenterons ici.

### Principe de la méthode :

Pour calculer le risque de pluie extrême sur un bassin, il faut disposer de séries pluviométriques journalières. Lorsqu'on dispose de peu d'années, on peut, sur chaque mois, établir, sur une échelle de Gumbel, la distribution empirique de toutes les précipitations journalières, sur laquelle il est possible d'ajuster la fonction de répartition  $F(R) = 1 - \gamma e^{-(R/a)} - \beta x e^{-(R/c)}$  où, au delà d'un certain seuil  $R_0$ ,  $F(R) \approx 1 - \gamma e^{-(R/a)}$ . On considère alors que le Gradex  $a$  est fourni par la direction asymptotique de  $F(R)$ .

A titre d'exemple les gradex mensuels ont été calculés pour la station de la Gendarmerie les sur la saison des pluies de Juillet à Décembre.

	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Gradex en mm/24h	22	20	44	20	27	14

Le risque de pluie extrême est le plus important d'Aout à Novembre. Toutefois on peut considérer par extension que la saison à risque s'étend de Juillet à Décembre.

On peut alors établir la distribution de toutes les pluies journalières de la saison retenue Juillet à Décembre pour disposer d'un échantillon plus important et considérer que le gradex sera donné pour  $R > R_0$  par  $F(R) \approx 1 - \gamma e^{-(R/a)}$ .

La pente de la partie asymptotique de  $F(R)$ , ajustée à main levée, fournit une bonne estimation du Gradex de la saison.

Pour la station Duchesne ce gradex serait compris entre 32 et 37 mm/24 h et pour la station Gendarmerie entre 27 et 32 mm/24h. Il semblerait donc que le risque de pluie extrême est un plus important sur la station Duchesne.

Une autre approche est possible pour obtenir une valeur approchée du gradex en réalisant la distribution des pluies journalières maximum de la saison (la pluie max des  $N$  jours pour chaque année). L'échantillon est beaucoup plus réduit et l'ajustement à main levée plus délicat. La fonction de répartition qui s'ajuste sur cet échantillon est de la forme :

$G(R) = e^{-(e^{-(R-\theta)/a})}$  fonction qui est équivalente à  $[F(R)]^N$ . Elle est représentée par une droite de pente  $a$ , nommée le gradex sur un graphique de Gumbel.

C'est elle qui permet de déterminer la fréquence annuelle ou la durée de retour d'une pluie de  $X$  mm sur cette saison.



La valeur du gradex a peut alors être calculée par l'estimateur  $\sqrt{6/\pi} \cdot \sigma$  où  $\sigma$  représente l'écart type de la série des pluies journalières maxi saisonnières.

Afin de privilégier le nombre de séries, l'analyse du gradex a été étendue à d'autres séries annuelles disponibles mais ces années ne sont plus communes aux deux stations. Les périodes d'observation ne sont plus tout à fait homogènes. Toutefois on constate que les valeurs de gradex ainsi calculées sont quasiment identiques de l'ordre de 33 mm (voir tableau ci-dessous). Cette approche ne confirmerait donc pas les premières conclusions.

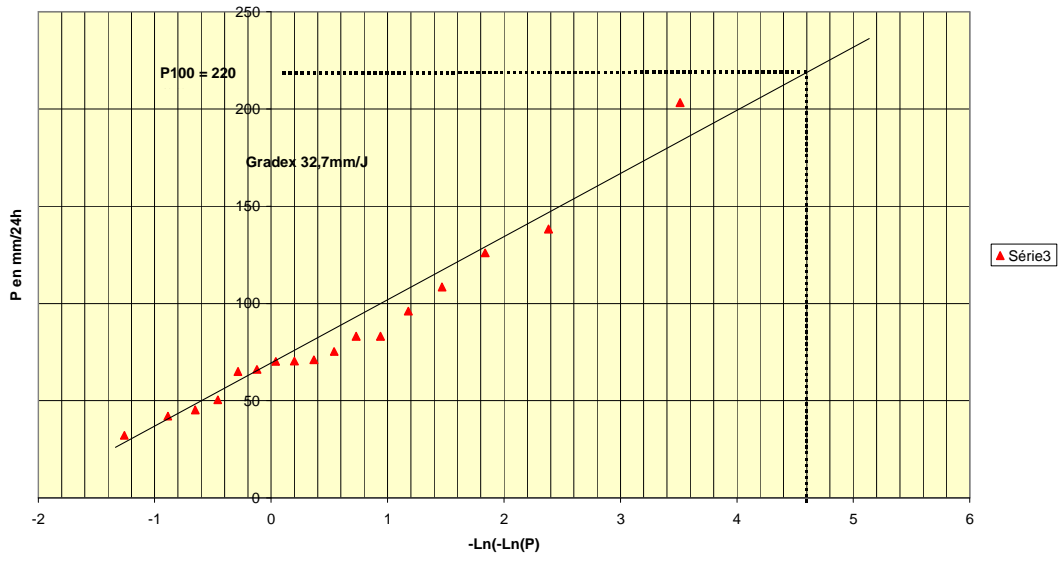
Tableau : Pluies journalières maximale pour chaque saison annuelle.

	Gendarmerie	Duchesne
1961		45,2
1962	80	75,3
1963	203,3	203,3
1964	117	66
1965	165,4	50,4
1966	109,8	70,3
1967	159,5	126
1968		65
1969		71
1970	115,5	138,3
1971	58,5	70,2
1972		32,2
1973	101,2	42
1974	53	96
1975	76,5	83,1
1976	65,7	108,5
1977	92,2	83,1
1978		
1979		
1980		
1981		
1982		
1983	57	
1984	163,4	
1985	100,3	
1986	93,2	
1987	74	
Ecart type	42,99	42,02
<b>Gradex</b>	<b>33,5</b>	<b>32,8</b>

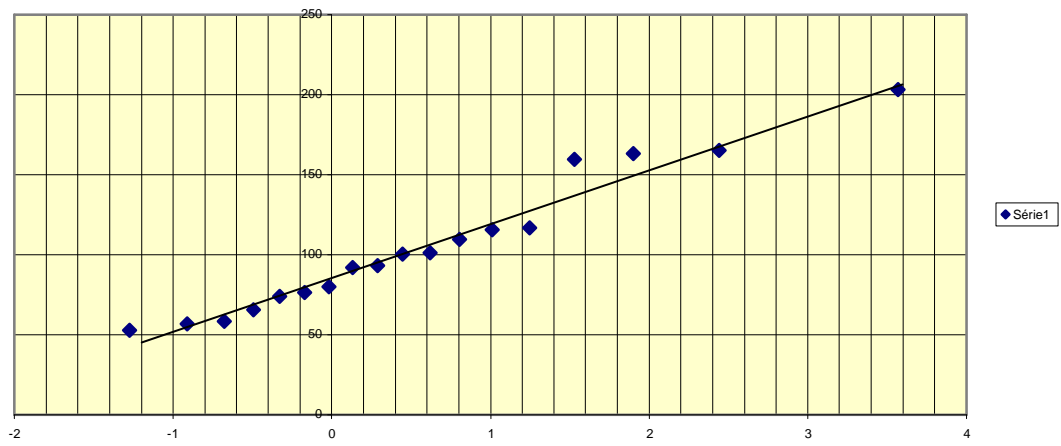
L'hétérogénéité des séries ne permet donc pas d'être plus précis quant à l'appréciation d'un risque de pluie extrême différent sur ces deux stations. L'effet du relief n'est toutefois pas marqué. En revanche on peut affirmer que la période la plus à risque est Septembre-Novembre.



**Distribution des pluies journalières de la station Duchesne (Juillet à Décembre) et distribution des pluies journalières max annuelles**



**Distribution des pluies journalières maxi saisonnières (07-12) des années 62-67,70-71,73-77,83-87 à La Gendarmerie : Gradex 32,6 mm/Jour**







## **Annexe 4: Méthode d'acquisition de l'occupation du sol**

### *Supports cartographiques utilisés*

L'occupation du sol été cartographiée à partir :

- Des photos aériennes 2004 IGN
- De la BD Topo 2000 de l'IGN
- De la cartographie du parcellaire agricole réalisée à partir d'enquêtes en 2005 par Lucas G., du Cemagref, dans le cadre du projet LITEAU.

### *Les règles de décision pour la digitalisation ont été les suivantes :*

- Lors de la digitalisation des unités d'occupation du sol il a été tenu compte des limites définissant des unités homogènes du point de vue de la couverture et non pas strictement des limites de parcelles ou administratives. Ainsi un redécoupage des parcelles digitalisées a été effectué. Une parcelle renseignée comme étant du pâturage mais contenant une zone boisée importante est par exemple séparée en deux.
- Pour l'habitat diffus, la digitalisation s'est faite à partir d'une zone de tampon de 10 m créée à partir du bâti de la BD Ortho 2000 de l'IGN. Ce tampon a été créé afin de gommer les erreurs de digitalisation du bâti par l'IGN mais également afin de prendre en compte la zone « d'influence » du bâti, à savoir le jardin, potager, parking, zones de travaux. Quand les limites des propriétés sont bien définies et vont au-delà du tampon, elles sont digitalisées. Les tampons très isolés sont laissés tels quels. Par contre quand plusieurs tampons sont proches ils sont rassemblés dans une seule unité polygonale. Les routes et chemin servent de limite pour la digitalisation.
- Pour les zones de savanes et de friches, la digitalisation s'est faite en prenant la limite avec les zones de bois et les routes. La photo-interprétation ne permettant que très difficilement de distinguer les zones de savane (prairies naturelles avec quelques arbres et arbustes) des zones de friches (arbustes et surfaces en herbe), il a été décidé de rassembler ces deux types d'occupation du sol.
- Les bois ont été digitalisés par photo-interprétation des zones les plus sombres et denses en terme de végétation. Les limites étaient notamment prises au niveau des ombres portées bien visibles sur les photos aériennes.
- Les zones fortement urbanisées. La digitalisation s'est basée sur les zones où le tampon du bâti était quasi continu, du fait de la densité de l'habitat. Le critère de décision pour distinguer les zones urbaines des zones pavillonnaires (classées comme « habitat diffus ») est la présence d'un jardin.



**Annexe 5: Correspondance entre classes et codes pour l'ensemble des paramètres utilisés dans la modélisation**

***Couverture du sol***

Indice	Catégories de couverture du sol	Occupation du sol
0	Zones urbaines	Urbain dense, terrains de sport
1	Végétation dense	Bois, Bois côtiers, savanes, friches, vergers
2	Végétation herbacée rase	Pâturages et pelouses
3	Canne à sucre	Canne à sucre
4	Canne à sucre post récolte	Canne à sucre post récolte
5	Habitat diffus	Habitat diffus
6	Bananaïes > 2 ans	Bananaïes > 2 ans
7	Bananaïes < 2 ans	Bananaïes < 2 ans
8	Maraîchage	Maraîchage
9	Sol nu	Zones de travaux, parcelles labourées.

***Inclinaison de la pente***

Indice	Classes de pente	Intensité
1	[0%-5 %[	Faible
2	[5%-20%[	Moyenne
3	[20%-40%[	Forte
4	>40%	Très forte

***Accumulation de l'écoulement***

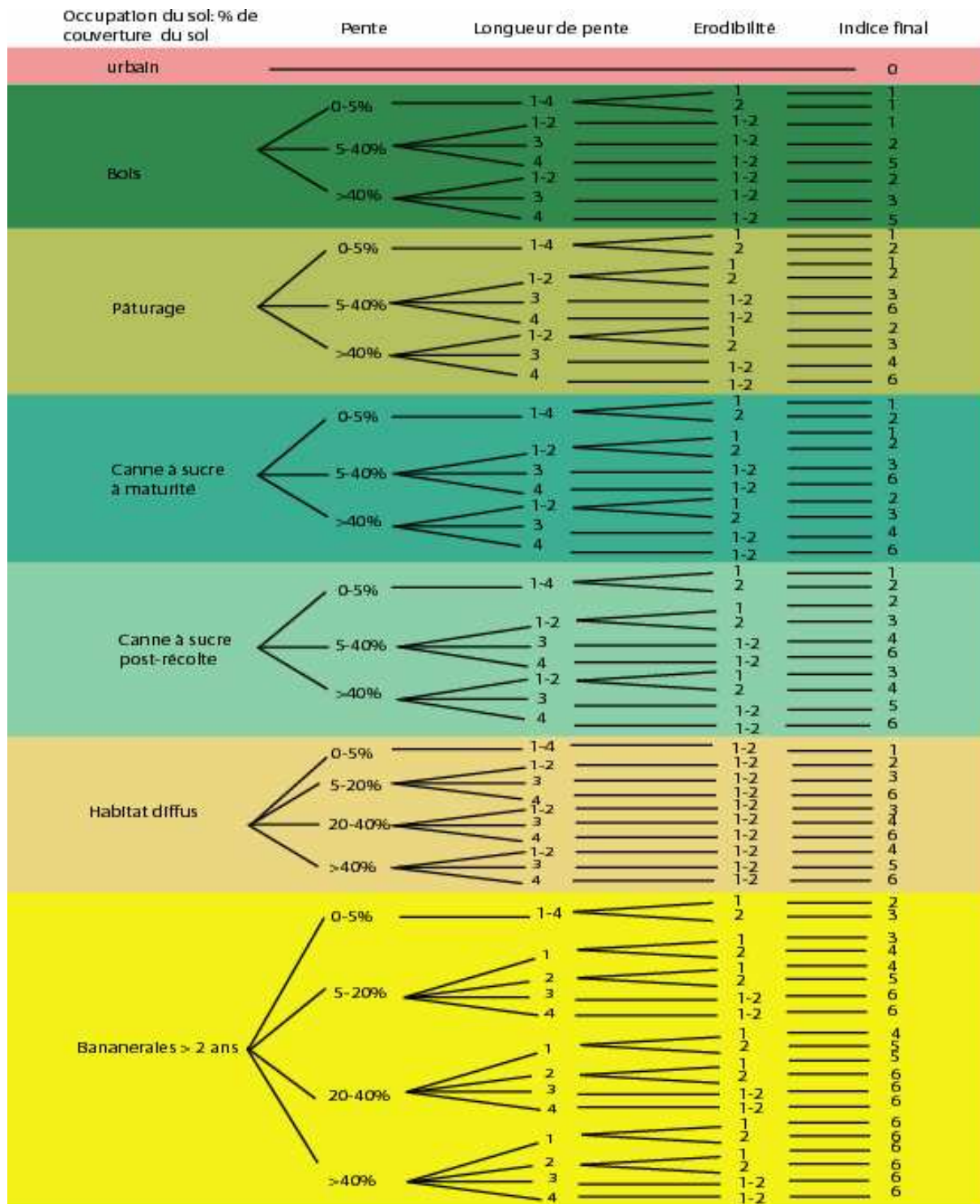
Indice	Classes d'accumulation de L'écoulement (en nombre de pixels)
1	[0-5[
2	[5-150[
3	[150-5500[
4	> 5500

***Erodibilité***

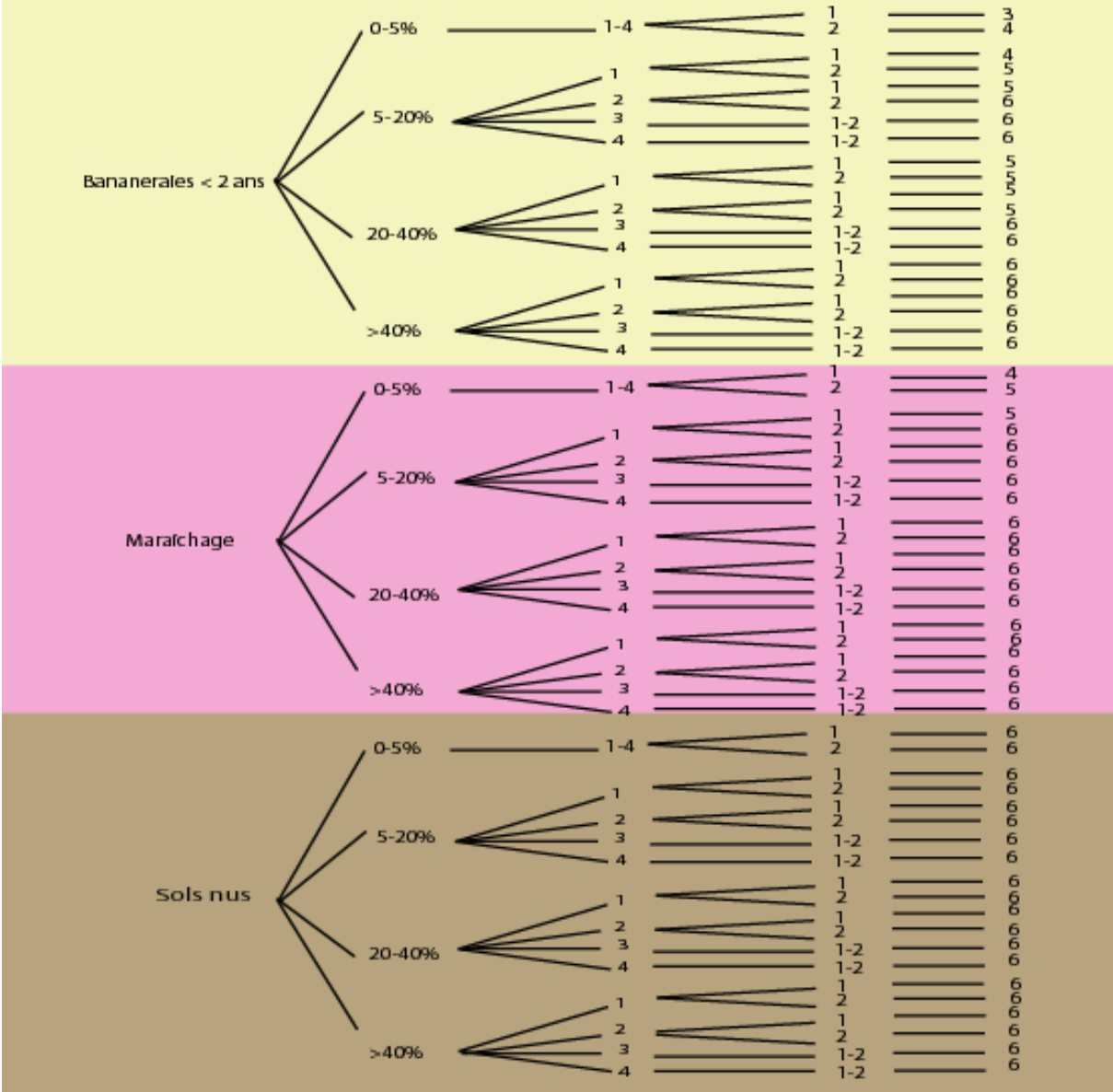
Type de sol	Profondeur	Type d'argile	Indice d'érosion
Sol brun rouille à hayllosite	profond	Hayllosite	1
Sol rouge ou brun Montmorillonitique	Profond avec un orthotype court	Montmorillonite	2
Sols vertiques et mollisols	Profond à court	Montmorillonite	2
Ferrisols compacts	Profond avec un orthotype court	Mélange de Kaolinite et de métahayllosite	1
Vertisols	Moyennement profond	Montmorillonite	2
Alluvions continentales	Profond	Montmorillonite	2



### Annexe 6: Arborescence logique



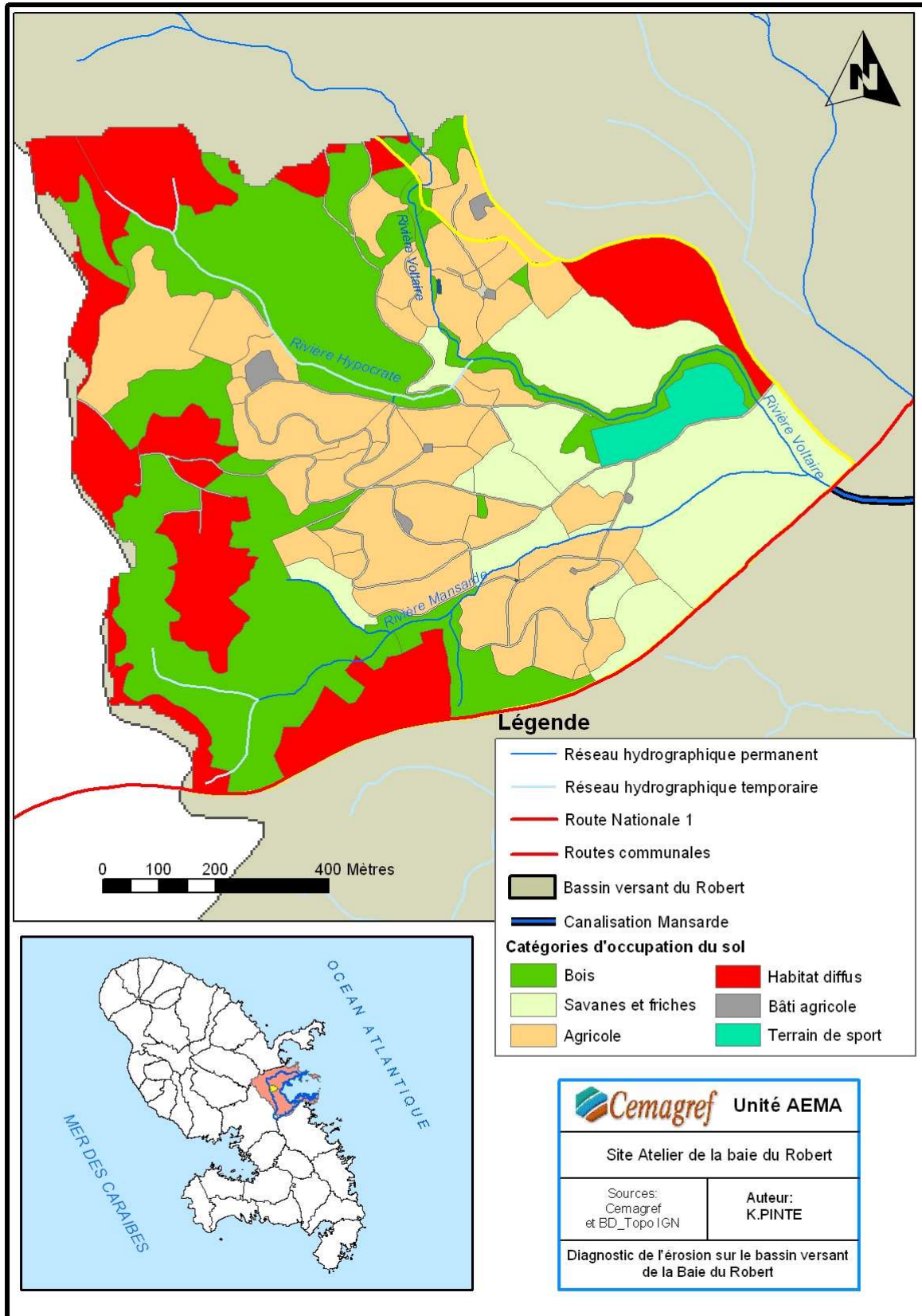








Annexe 7: Carte de l'occupation du sol du sous bassin versant de Mansarde Voltaire





## Annexe 8: Fonctionnement du GPS différentiel

Pour bénéficier d'une précision accrue dans le positionnement géoréférencé des drains et des ravines, nous avons fait appel au matériel du CIRAD. Le GPS différentiel du CIRAD permet par post traitement d'atteindre une précision de 30cm à 50cm

Le GPS différentiel utilisé est composé de deux unités. Une unité fixe appelée la base et une unité mobile. La base est positionnée sur une borne IGN fixe dont les coordonnées x, y, z sont connues. Elle est constituée d'un trépied sur lequel est positionné l'antenne de réception. Le positionnement se fait à la verticale parfaite du repère de la borne IGN et à niveau par rapport à l'horizontal. La distance entre l'antenne et la borne IGN est mesurée et rentrée dans la centrale d'acquisition. L'antenne est alimentée par un jeu de batterie et l'acquisition des données se fait sur une carte mémoire. Cette base capte et emmagasine de façon continue les positions données par les satellites.

La partie mobile du GPS est embarquée sur le terrain où doivent être réalisées les mesures. Elle est constituée de la même antenne (montée sur une perche pour capter le signal des satellites au dessus des bananiers) et du même boîtier (batteries et carte mémoire). Le pointage des éléments sur le terrain se fait l'aide de la centrale d'acquisition reliée à la carte mémoire. Les observations sont rentrées sous formes de couches d'information (en format ligne ou point).

Dans le cas de la base et de la partie mobile embarquée, le positionnement par les satellites se fait avec une précision de 5m à 10m. Comment obtenir alors une précision de 30cm à 50cm ?

Le GPS utilisé est dit différentiel par post-traitement. Une fois les relevés terminés et le matériel démonté, les informations contenues dans les cartes mémoires sont importées dans un logiciel de traitement. Il va calculer l'erreur mesurée en continue entre la position de la borne IGN donnée par les satellites et la position réelle donnée par l'IGN. Ces erreurs sont ensuite reportées sur les positions relevées par la partie mobile pour arriver à un positionnement avec la précision annoncée par le constructeur.

La sortie finale est un fichier de forme ou "shape" exportable dans le logiciel de SIG utilisé



**Annexe 9: Détails sur la conception de la base de donnée conçue pour l'étude du sous bassin versant de Mansarde-Voltaire**

***Supports utilisés pour l'acquisition des couches d'information***

<b>Cartographie</b>	<b>Support utilisé</b>	<b>Format de la couche d'information</b>
<b>Occupation du sol</b>	BD_Ortho 2004 + Observations de terrain	Fichier de forme type « polygones »
<b>Réseau de traces</b>	BD_Ortho 2004 + BD_Topo 2004 + Observations de terrain	Fichier de forme type « polylignes »
<b>Réseau de Fossés</b>	Réseau de traces + Observations de terrain	Fichier de forme type « polylignes »
<b>Réseau de Talus</b>	Réseau de traces + Observations de terrain	Fichier de forme type « polylignes »
<b>Réseau Hydrographique permanent</b>	BD_Topo 2004 + Observations de terrain	Fichier de forme type « polylignes »
<b>Réseau de ravines et de drains</b>	Relevés GPS différentiel	Fichier de forme type « polylignes »
<b>Zones tampons</b>	BD_Ortho 2004 + Observations de terrain	Fichier de forme type « polygones »



### Informations sur le renseignement des tables attributaires

Couche d'information	Champs renseignés	Classes
<b>Occupation du sol</b>	Nature	Agricole/Bois/Habitat diffus/Friches/Savanes/Bâti agricole/Autres
	Id-Nature	Identifiant unique
	Erosion	En Nappe/Mixte/Nulle
	Intensité	Faible/Moyenne/Forte
	Couverture végétale	Faible/moyenne/Forte
<b>Traces et Routes</b>	Nature	Route/ Trace empierrées/Traces en terre/Traces enherbées
	Id-Nature	Identifiant unique
	Id-Aval	Identifiant du bief aval
	Erosion	Linéaire/Nulle
	Intensité	Faible/Moyenne/Forte
<b>Fossés</b>	Nature	Fossé
	Id-Nature	Identifiant unique
	Id-Aval	Identifiant du bief aval
	Erosion	Linéaire/Nulle
	Intensité	Faible/Moyenne/Forte
<b>Talus</b>	Nature	Talus
	Id-Nature	Identifiant unique
	Identifiant du bief aval	Id-Aval
	Erosion	En Nappe/Mixte 1/Mixte 2
	Intensité	Faible/Moyenne/Forte
<b>Ravines et drains</b>	Nature	Ravines/drains
	Id-Nature	Identifiant unique
	Identifiant du bief aval	Id-Aval
	Erosion	Linéaire
	Intensité	Faible/Moyenne/Forte

Concernant le champ "Erosion", il s'agit de renseigner sur la forme d'érosion prédominante observée. Dans le cas où deux formes d'érosion coexistent, le terme "Mixte" est employé. Pour les parcelles de banane "Mixte" englobe l'érosion linéaire et l'érosion en nappe. Pour les talus, "Mixte 1" signifie la coexistence d'une érosion linéaire avec de l'érosion en nappe et "Mixte 2" la coexistence des trois formes d'érosion dont l'érosion en masse (petits glissements de terrain).





### **Annexe 10: Essai de quantification de pertes de terre au niveau d'une ravine**

Au cours de l'onde tropicale qui a traversé la Martinique le 13 juin 2006, des échantillons d'eau lors d'une crue dans une ravine ont été récoltés. L'onde tropicale a engendré des cumuls de 30 à 50 mm sur la Martinique. L'averse lors de laquelle a été effectuée la mesure a eu une durée d'environ 1h. Cette ravine fait 80m de long et traverse une bananeraie. Elle prend naissance avec une arrivée d'eau massive en provenance d'une zone d'habitat diffus sus-jacente.

Le but de la mesure est d'estimer le transport solide généré par cette ravine pour ensuite évaluer la production de sédiments au cours d'une année.

#### **Déroulement de la mesure :**

Arrivée sur site environ 15 minutes après le début de l'averse. La ravine est déjà en crue, mais l'averse continuant, on estime être arrivé pendant la montée des eaux.

Plusieurs échantillons sont pris afin d'essayer de capter le pic de crue. Pour cela on utilise une bouteille d'un litre que l'on plonge dans le flux d'eau au niveau d'un petit gué. On ne garde que l'échantillon correspondant au passage du pic de crue (déterminé visuellement en prenant des repères). Par ailleurs, une estimation du débit a été réalisée en calculant le temps de remplissage d'un bac de 100 litres.

Des échantillons sont pris en amont et en aval de la ravine afin de pouvoir déterminer le transport solide généré par le passage de la ravine dans la bananeraie.

Un prélèvement est réalisé en prenant soin de ne prendre que le transport en suspension et non le transport par charriage. Un autre est réalisé en prélevant les deux.

#### **Résultats :**

Débit de pointe estimé : 50 litres/s

Transport solide estimé hors charriage : 9 g/l

Transport solide estimé (MES + charriage) : 25 g/l (sous estimé)

A partir de ces mesures, on estime le transport solide moyen (MES et charriage) pendant la crue à 20 g/l. On peut considérer que la crue dure 30 min avec un débit moyen de 30 l/s et qu'une dizaine d'événements de ce type se produisent par an (sous-estimé). Par ailleurs, le relevé du profil en travers de la ravine de 80 mètres de long (1m de profondeur et section au fond de 50 centimètres), donne une surface érodable de 120 m<sup>2</sup>.

Cela donne une perte en terre d'environ **500 tonnes/ha/an**, compatible avec les ordres de grandeur donnés dans la littérature.



## Abstract

**Key words:** Watershed – Water erosion – Tropical climate – GIS – Indicator – Expert based model – Robert Bay – Martinique.

The watershed of the Robert Bay, a contrasted area, is affected by various types of water erosion (sheet erosion, linear erosion and land slides). The following study tries to insert these different phenomena with very different causes in a spatial diagnosis which takes into account the available scientific and technical means. The quantitative assessment of the sediment yield through physically based or empirical models was put aside due to its complexity, the lack of data and because it was not adapted to the local conditions. An expert based model has been chosen with the creation of a vulnerability indicator of erosion using a Geographical Information System (GIS). The resultant map, which was field validated, underlines banana plantations, market gardening, building sites as well as dispersed housing.

From the validated map, we defined a subwatershed test referred to as vulnerable. On this new study area, we went thoroughly into the erosion diagnosis, through a field approach of the whole erosion process (emission, transfer and potential deposits of particles). The analysis specifies the validity domain of the spatial vulnerability indicator and is the starting point to assess the effective contribution of the eroded areas to the hypersedimentation of the collecting zone. It clearly appears that the linear erosion damaging the cultivated areas comes mainly from a heavy water outflow originated by roads and urban districts. An important net of tracks and ditches can facilitate the transfer of particles. And last, deposit areas have been located but we cannot yet determine their buffering capacities.

This GIS listed results collected on the field help formulating a certain amount of working hypotheses. The setting up of new research programmes based on these hypotheses enables collaborating scientific teams to improve their knowledge of the area and therefore to propose more accurate priority actions to the local executives.

## Résumé

**Mots clés :** Bassin versant – Erosion hydrique – Climat tropical – SIG – Indicateur – Modèle système expert – Baie du Robert – Martinique.

Territoire contrasté, le bassin versant de la Baie du Robert (23 km<sup>2</sup>) est affecté par de nombreux phénomènes d'érosion (érosion en nappe, érosion linéaire et glissements de terrain). Cette étude tente d'appréhender l'ensemble de ces phénomènes aux causes très différentes dans un diagnostic spatial qui tient compte des moyens techniques et scientifiques en présence. L'évaluation quantitative des apports terrigènes par des modèles à base physique ou empirique a été écartée par excès de complexité, manque de données, et une faible adaptation aux conditions du milieu. C'est une modélisation par approche dite experte avec la création sous Système d'Information Géographique (SIG) d'un indicateur de vulnérabilité à l'érosion qui a été préférée. La carte obtenue, validée sur le terrain, fait ressortir principalement les cultures de banane et maraîchères, les surfaces en travaux ainsi que les zones d'habitat diffus.

A partir de la carte validée, un sous bassin versant test, qualifié de vulnérable a été défini. Sur cette nouvelle zone d'étude, le diagnostic de l'érosion a été approfondi, par une approche naturaliste du processus érosif général (émission de particules solides, mais aussi transfert et dépôts potentiels). Cette analyse précise le domaine de validité de l'indicateur spatial de vulnérabilité, et constitue le point de départ d'une évaluation de la contribution réelle des zones érodées à l'hypersédimentation du milieu récepteur. Il en ressort que l'érosion linéaire qui affecte fortement les terres agricoles provient partiellement d'apports d'eau massifs des routes et zones urbaines. Le transfert des particules solides peut être facilité par un réseau de traces et de fossés très développé. Enfin des zones de dépôt ont été localisées mais sans pouvoir encore déterminer leur "pouvoir tampon".

Ces résultats qualitatifs, répertoriés sous SIG et provenant d'observations de terrain, aident à la formulation d'un certain nombre d'hypothèses de travail. La mise en place de nouveaux programmes de recherche en fonction de ces hypothèses permet ainsi aux équipes scientifiques partenaires d'améliorer leur connaissance du territoire et d'affiner leurs propositions d'actions prioritaires auprès des décideurs locaux.