RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès immédiat

Erosion des sols et transfert sédimentaire vers la Grande Baie de Martinique

Rapport final

BRGM/RP-74860-FR
Version 2 du 15 décembre 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Vandromme R., Nachbaur A., Grangeon T., Cerdan O., Bizeul R., Evrard O.

Ce rapport a été vérifié le 20/10/2025 et approuvé le 29/10/2025 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

CACEM Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique
CONTRAT DE LA GRANDE BAIE MARTINIQUE
Espace Sud — Communauté d'Agglomération de l'Espace Sud Martinique
CONTRAT LITTORAL SUD
CTM Collectivité Territoriale de Martinique
ODE Office de l'Eau Martinique
cea
LSCE Laboratoire des Sciences du Climat & de l'Environnement

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq ou par ce code :

Mots clés : Martinique, érosion, ruissellement, sédiments, traçage sédimentaire

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Vandromme R., Nachbaur A., Grangeon T., Cerdan O., Bizeul R., Evrard O. 2025. Erosion des sols et transfert sédimentaire vers la Grande Baie de Martinique. Rapport final V2. BRGM/RP-74860-FR, 8 p.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-08/04/2024

Synthèse

La baie de Fort-de-France, ou Grande Baie de Martinique est un site d'exception, couvrant une surface de 70km², avec un linéaire côtier d'environ 100km. Cependant, les apports terrigènes provenant des paysages amonts peuvent modifier l'équilibre de ses écosystèmes, avec notamment la dégradation de certains récifs coralliens. Ils augmentent la turbidité de l'eau de la baie selon l'intensité des épisodes pluviométriques et favorisent également l'arrivée dans les eaux littorales de certains polluants provenant en particulier des parcelles agricoles. L'érosion des sols au niveau des parcelles cultivées est aussi responsable d'un appauvrissement des sols, ainsi que d'un accroissement des risques gravitaires tel que les coulées de boue.

La réduction des apports sédimentaires vers la baie s'inscrit dans le plan d'action du Contrat de la Grande Baie. Dans ce contexte, la Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique (CACEM), la Communauté d'Agglomération de l'Espace Sud de la Martinique (CAESM) et le BRGM ont souhaité définir des actions à mener pour limiter les apports solides à la baie sur les deux principales rivières contributrices : la Rivière Lézarde dont la superficie du bassin versant est de 101 km^2 et la Rivière Salée avec un bassin versant de 65 km². Le travail sur le bassin versant de la Rivière Lézarde est financé par la CACEM, la CTM (Collectivité Territoriale de Martinique), l'ODE (Office De L'Eau Martinique) et le BRGM et le travail sur le bassin versant de la Rivière Salée par la CAESM, la CTM, l'ODE et le BRGM.

Ce rapport vise à préciser l'origine des apports sédimentaires, provenant des deux bassins versants, qui vont arriver à la baie via le réseau hydrographique. En effet, l'origine des sédiments et les processus de transfert sont peu étudiés en Martinique. Ce travail permettra, *in fine*, d'apporter les éléments nécessaires pour définir des plans d'actions pour réduire les apports sédimentaires à la baie.

Grâce à une approche combinant synthèse bibliographique, traçage sédimentaire, analyses et utilisation de cartes d'aléa mouvement de terrain (glissements/coulée et érosion de berges) et modélisation hydrosédimentaire, ce travail met en évidence la contribution significative de trois sources principales : l'érosion hydrique (notamment en domaine agricole), les glissements/coulées et l'érosion de berges.

Les résultats montrent que le bassin versant de la Lézarde est particulièrement contributeur, avec un export annuel vers la baie estimé à plus de 50 000 tonnes de sédiments, contre environ 5 000 tonnes pour celui de la Rivière Salée. Cette différence s'explique par des facteurs topographiques, pédologiques et d'occupation du sol, notamment la prédominance des cultures de banane sur la Rivière Lézarde, plus sensibles à l'érosion que les cultures de canne majoritaires sur la Rivière Salée.

Pour élaborer un plan d'action efficace, il est nécessaire de combiner des mesures agissant à la source (amélioration des pratiques culturales, aménagements d'hydraulique douce, stabilisation des berges) et des mesures intervenant sur les chemins de transfert (piégeage des sédiments). La simulation d'un scénario d'aménagements d'hydraulique douce agissant sur les transferts sur les parcelles agricoles a permis d'estimer une réduction potentielle de l'érosion de 50% au niveau des parcelles agricoles et une diminution de 10 à 20 % des exports sédimentaires vers la baie selon les bassins. La simulation d'un scénario agissant à la source grâce à l'enherbement des bananeraies a permis de d'estimer une réduction de l'érosion de 80% au niveau des parcelles et une réduction de 10 à 30 % des exports sédimentaires vers la baie selon les bassins. La mise en

place d'autres mesures pour limiter les apports de sédiments liés aux glissements/coulées et aux érosion berge permettrait d'améliorer encore cette évolution à la baisse.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Erosion, ruissellement, transfert 11

3. Synthèse bibliographique 13
3.1. Matières en Suspension dans les cours d'eau 13
3.2. Matières en suspension dans les baies 13
3.2.1. Concentrations en MES 13
3.2.2. Sédimentation dans la baie 13
3.3. Taux d'érosion 15
3.3.1. Ordres de grandeur 15
3.3.2. Exemple de mesures en bananeraies : 16
3.4. Ruissellement et érosion 17
3.5. Cartographie de l'aléa érosion à l'échelle de la Martinique 19

4. Description des bassins versants 23
4.1. Caractéristiques topographiques 23
4.2. Occupation des sols 27
4.3. Nature des sols 31

5. Quantification des sources de l'érosion 35
5.1. Collecte et analyse de données 35
5.1.1. Données de concentration en matières en suspension 35
5.1.2. Recherche de chroniques de mesures 37
5.1.3. Pluviométrie 41
5.1.4. Débits 43
5.1.5. Caractérisation de la réponse pluie – débit (2022-2023) 44
5.1.6. Traçage 46
5.1.7. Evaluation quantitative de l'érosion 51
5.2. Modélisation des exports sédimentaires des bassins versants de la Lézarde et de la Rivière Salée vers la Grande Baie de Fort-de-France 63
5.2.1. Présentation du modèle WaterSed 63
5.2.2. Principe de la modélisation pseudo continue 63
5.2.3. Spécificité du contexte antillais 64
5.2.4. Paramétrisation 64
5.2.5. Calibration et validation 65
5.2.6. Résultats 68
5.2.7. Synthèses des quantifications des différentes sources d'érosion 71

6. Plan d'actions de lutte contre l'érosion 73
6.1. Principes 73
6.2. Simulation d'un scénario d'aménagements d'hydraulique douce 73

7. Conclusions 77

8. Références 79

Liste des figures

Figure 1 : Schématisation d'un bassin versant et des différentes zones de production/transfert de sédiments par érosion. 1) envasement de la baie, 2) érosion de berge, 3) rivière chargée en sédiments, 4) écoulement chargé en sédiments dans un fossé agricole, 5) érosion concentrée/ravine dans une bananeraie, 6) glissement de terrain et 7) érosion diffuse. 12

Figure 2 : Evolution du transport par suspension et par charriage de la ravine Mansarde (Rocle et al., 2012) 16

Figure 3 : Indices de vulnérabilité à l'érosion 19

Figure 4 : Indicateurs de pression proposé par Cheula (2013) pour les masses d'eau (dégradé bleu) et terrestres (dégradés rouges). Les bassins versants de la Rivière Lézarde et de la Rivière Salée ont été ajoutés à la figure initiale par simple géoréférencement de la figure initiale. 20

Figure 5 : Localisation des deux bassins versants de la zone d'étude au sein de l'île de la Martinique. Le dégradé de couleur indique l'altitude, l'épaisseur de chaque cours d'eau est proportionnelle à son ordre au sens de Strahler. 23

Figure 6 : Courbes hypsométriques du bassin versant de la Lézarde (trait noir) et la Rivière Salée (trait bleu). 24

Figure 7 : Carte des pentes des deux bassins versants étudiés. 25

Figure 8 : Indice de connectivité calculé sur les deux bassins versants étudiés. 26

Figure 9 : Cartographie de l'occupation des sols obtenue à partir de l'OCS-GE 2017 sur le bassin versant de la Lézarde 27

Figure 10 : Cartographie de l'occupation des sols obtenue à partir de l'OCS-GE 2017 sur le bassin versant de la Rivière Salée..... 28

Figure 11 : Occupation des sols reconstituée sur les le bassin versant a) de la Lézarde et b) de la Rivière Salée. 30

Figure 12 : Carte des sols de la Martinique au 1/ 20 000ème (Colmet-Daage, 1969) et localisation des deux bassins versants étudiés. 31

Figure 13 : Diagramme ternaire des échantillons analysés (Cocu, 1999). Les échantillons de surface (un par type de sol) sont indiqués par un contour pointillé gras. 32

Figure 14 : Textures des horizons supérieurs du sol (GIS Sol, 2011) (déterminées à partir de base de donnée VALSOL (Beaudou et al., 2004) et de la carte des sols des Antilles (Colmet-Daage, 1969)) et localisation des deux bassins versants étudiés. 33

Figure 15 : Représentation de la démarche pour quantifier la part des différentes sources de l'érosion 35

Figure 16 : Valeurs de MES ponctuelles en fonction du temps (l'ordonnée est en échelle logarithmique)..... 36

Figure 17 : Localisation des stations de débit, pluviomètres et sondes de turbidité dans les deux bassins versants de l'étude. Les sous-bassins versants correspondant aux stations de débit les plus avals ont été tracés en gras. 38

Figure 18 : Pluviométrie annuelle 2022 (en mm) en Martinique (source Météo France, https://meteofrance.mq/fr/climat/bulletin-climatique-annuel-2022) 41

Figure 19 : Localisation des pluviomètres utilisés sur le bassin versant de la Lézarde pour l'année 2022 et polygones de Thiessen tracés pour quantifier l'aire d'influence de chaque pluviomètre 42

Figure 20 : Cumuls de pluie mensuels moyens pour les années 2022 et 2023 pour chaque bassin versant (pour la Rivière Lézarde l'exutoire du bassin versant est au niveau de la RN1 et pour la Rivière Salée à Petit Bourg, cf. Figure 17) 42

Figure 21 : Débit de la Rivière Lézarde au niveau du pont de la RN1 de 2010 à fin 2022 43

Figure 22 : Concept de séparation des types d'écoulement au sein d'un hydrogramme de crue 44

Figure 23 : Exemples de découpage d'événements pluvio-ruisselants à partir des chroniques de pluie et de débit de l'année 2022 pour le bassin versant de la Lézarde 44

Figure 24 : Relation pluie-débit pour les deux bassins versants. Chaque point correspond à une crue. 45

Figure 25 : Relation entre cumul de pluie et coefficient de ruissellement pour les deux bassins versants. 45

Figure 26 : Schéma conceptuel de la méthode de traçage sédimentaire appliquée à des bassins agricoles martiniquais. Les sources ciblées ici sont les cultures de banane, de canne et les structure exposant les horizons profonds aux processus érosifs (ravines, glissements, éboulements de berge). Les particules-cibles peuvent être prélevées dans les rivières (matières en suspension) ou dans la baie (sédiments déposés). 47

Figure 27 : Photo d'une trappe à sédiments installée dans la Rivière Lézarde et des sédiments récoltés 48

Figure 28 : Localisation des trappes à sédiments et des échantillons de matériaux sources dans les deux bassins versants étudiés. 48

Figure 29 : Contributions moyennes des deux sources potentielles considérées (i.e., horizons de surface, horizons profonds) estimées par le modèle de mélange pour chaque échantillon de matières en suspension collecté dans les rivières Lézarde et Salée. 49

Figure 30 : Ravine (gauche) et labour (droite) dans des bananeraies 50

Figure 31 : Echantillonnage réalisé sur le bassin versant du Galion et analyse de la carotte sédimentaire réalisée dans la baie (représentation du flux terrigène et de l'origine des particules) (Bizeul et al., 2024) 51

Figure 32: Localisation du site d'étude de Duchêne dans le bassin versant de la Rivière Salée 52

Figure 33 : Occupation du sol dans le sous-bassin Duchêne et localisation des carottages de sols (en noir) et de sédiments (en blanc) 53

Figure 34 : Variations temporelles des taux d'érosion moyens estimés pour le sous-bassin Duchêne 54

Figure 35 : Synthèse des résultats obtenus par l'étude du sous-bassin versant Duchêne 54

Figure 36 : Principe considéré pour cartographier la probabilité qu'un glissement superficiel n'atteigne le réseau hydrographique 55

Figure 37 : Carte de l'aléa « transport de sédiments par glissement jusqu'au réseau hydrographique ». Ainsi, le niveau d'aléa fort correspond aux zones où la probabilité que des sédiments atteignent le réseau hydrographique est la plus forte. 56

Figure 38 : Exemple de sous-bassin versant bénéficiant d'un inventaire complet des glissements déclenchés par les pluies du 5 mai 2009 sur la commune du Lamentin 57

Figure 39 : Ordre de grandeur de volume de sédiments mobilisés par glissement de terrain sur chaque bassin versant 58

Figure 40 : Critères (a) et b) identifiés comme discriminants sur le site pilote (tronçon terminal de la Lézarde) pour déterminer le processus d'érosion dominant sur chaque portion de berge (c) 60

Figure 41 : Ordre de grandeur des volumes de sédiments érodés en $m^3.an^{-1}$ par processus gravitaire depuis les berges 60

Figure 42 : Principe de la chaine de modélisation opérée sur une saison hydrologique 64

Figure 43 : Exemples de résultats obtenus pour différentes des épaisseurs de sol constante sur le bassin versant (200, 500 et 10000 mm) 66

Figure 44 : Résultats obtenus pour la calibration (année 2022) réalisée sur le bassin versant de la Rivière Salée (a) et pour le bassin versant de Rivière Lézarde (b) en appliquant les même paramètres (épaisseurs de sol et vitesses de vidange en fonction de la texture des sols) 66

Figure 45 : Résultats obtenus pour la validation sur l'année 2023 pour le bassin versant de la Rivière Salée (à gauche) et le bassin de la Rivière Lézarde (à droite) 67

Figure 46 : Carte de l'aléa érosion en 5 classes sur les 2 bassins versants 69

Figure 47 : a) zoom sur la carte d'aléa et b) occupation du sol correspondante 70

Figure 48 : Erosion brute par classe d'occupation des sols pour chaque bassin versant 70

Liste des annexes

Annexe 1 Fiches techniques d'hydraulique douce 83

Annexe 2 Fiche érosion et mouvements de masse 87

Annexe 3 Fiche érosion des sols en zones cultivées 89

Annexe 4 Fiche de synthèse 91

Annexe 5 Ressources 92

Annexe 6 Atlas cartographiques 93

1. Introduction

La baie de Fort-de-France, ou Grande Baie de Martinique est un site d'exception, couvrant une surface de 70km², avec un linéaire côtier d'environ 100km. Cependant, les apports terrigènes provenant des paysages amonts peuvent modifier l'équilibre de ses écosystèmes, avec notamment la dégradation de certains récifs coralliens. Ils augmentent la turbidité de l'eau de la baie selon l'intensité des épisodes pluviométriques et favorisent également l'arrivée dans les eaux littorales de certains polluants provenant en particulier des parcelles agricoles. L'érosion des sols au niveau des parcelles cultivées est aussi responsable d'un appauvrissement des sols, ainsi que d'un accroissement des risques gravitaires tel que les coulées de boue.

La réduction des apports sédimentaires vers la baie s'inscrit dans le plan d'action du Contrat de la Grande Baie. Dans ce contexte, la Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique (CACEM), la Communauté d'Agglomération de l'Espace Sud de la Martinique (CAESM) et le BRGM ont souhaité définir des actions à mener pour limiter les apports solides à la baie sur les deux principales rivières contributrices : la Rivière Lézarde dont la superficie du bassin versant est de 101 km^2 et la Rivière Salée avec un bassin versant de 65 km². Le travail sur le bassin versant de la Rivière Lézarde est financé par la CACEM, la CTM (Collectivité Territoriale de Martinique), l'ODE (Office De L'Eau Martinique) et le BRGM et le travail sur le bassin versant de la Rivière Salée par la CAESM, la CTM, l'ODE et le BRGM.

Ce rapport vise à préciser l'origine des apports sédimentaires provenant des deux bassins versants, qui vont arriver à la baie via le réseau hydrographique. En effet, l'origine des sédiments et les processus de transfert sont peu étudiés en Martinique. Ce travail permettra, *in fine*, d'apporter les éléments nécessaires pour définir des plans d'actions pour réduire les apports sédimentaires à la baie.

Sur ce type de bassins versants, les processus susceptibles de produire des sédiments sont l'action érosive du ruissellement sur les versants (parcelles agricoles, terrassements urbains...) et les mouvements de terrain (type glissements/coulées ou érosion de berges).

La méthodologie retenue vise (1) à caractériser les processus de production sédimentaire dans les deux bassins versants, (2) d'évaluer leur importance relative et (3), de décliner des types d'actions de remédiation.

Ce rapport présente les résultats sur les deux bassins versants. Les différentes cartes produites ont été placées en annexes.

2. Erosion, ruissellement, transfert

Les apports de matériaux fins à la baie de Fort-de-France génèrent une augmentation de la turbidité dans les rivières puis dans la baie. Ils sont dus à l'érosion hydrique ainsi qu'aux mouvements de masse tels que les glissements/coulées et l'érosion de berges. Le but de cette étude est d'identifier la provenance (les zones sources) de ces sédiments et les processus de transferts afin de proposer un plan d'action pour limiter l'arrivée de sédiments dans la baie.

Sur les versants, la dynamique érosive dépend principalement de deux processus (Figure 1) :

- L'érosion diffuse qui se forme lorsque l'impact des gouttes de pluie désagrège les agrégats de sol et met en mouvement des particules sur une distance faible, typiquement la dizaine de centimètres (Legout *et al.*, 2005). Il peut néanmoins mettre en mouvement des quantités importantes de particules fines (les agrégats produits ont généralement une taille allant de la dizaine de micromètres à quelques millimètres de diamètre), qui seront ensuite transportées par un ruissellement diffus de faible hauteur.
- L'érosion concentrée, qui se crée lorsque la puissance de l'écoulement, résultant à la fois du volume d'eau ruisselant et de sa vitesse, dépasse le seuil critique d'incision du sol. Ce processus peut générer un ravinement plus ou moins intense, plus localisé que l'érosion diffuse mais transportant localement des quantités de matières supérieures. Nous adopterons dans ce rapport, et par convention, la même dénomination que Pinte (2005) ; à savoir que le terme de ravine, parfois utilisé pour désigner des zones d'écoulement intermittentes, sera dans ce rapport utilisé pour désigner les figures d'érosion.

Contrairement aux processus érosifs de versant cités ci-dessus, les mouvements de masse sont des phénomènes ponctuels et plus localisés. Ils peuvent mobiliser des quantités importantes de matériaux. Le principal élément déclencheur de ces mouvements de masse est l'eau.

Dans les cours d'eau, l'érosion des berges peut mobiliser d'importantes quantités de matériau qui, une fois dans le cours d'eau, sont transférées vers la baie ou déposés dans la rivière.

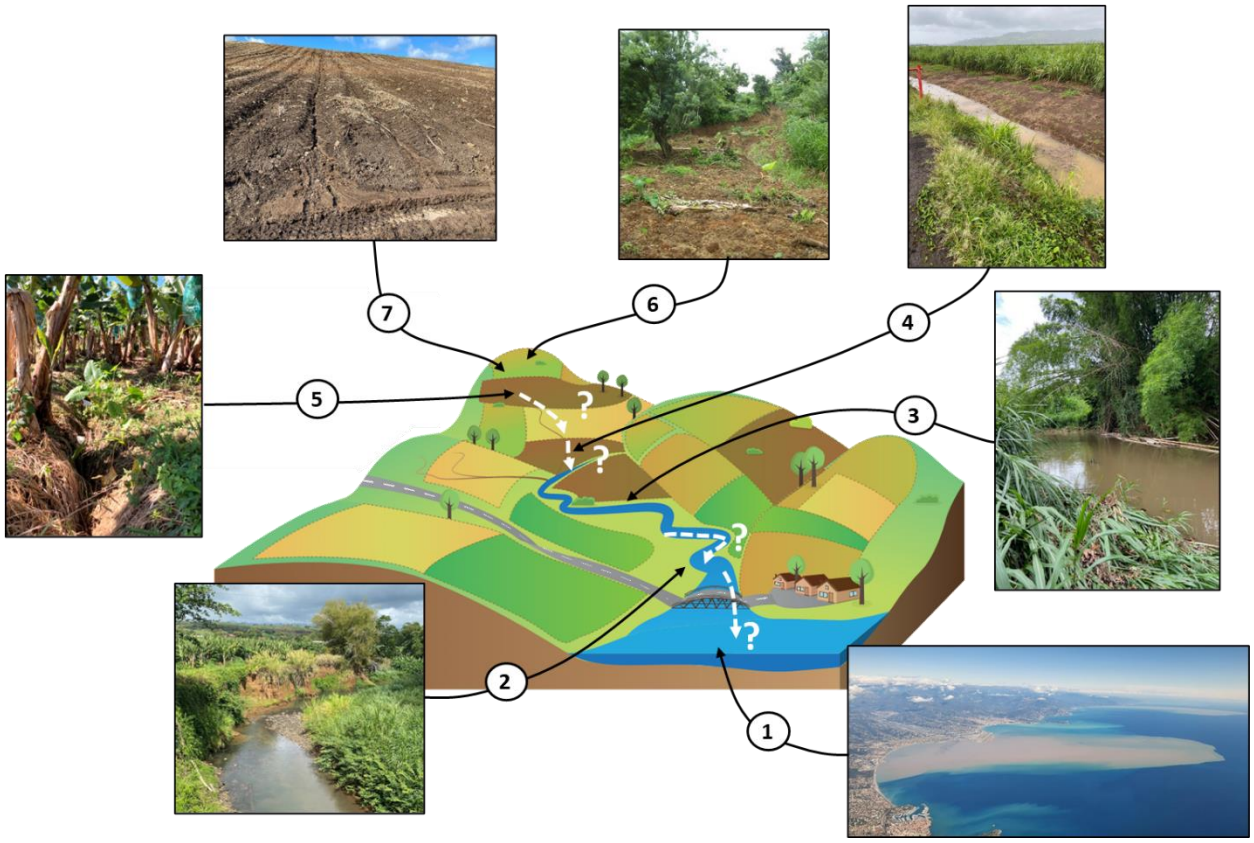

Figure 1 : Schématisation d'un bassin versant et des différentes zones de production/transfert de sédiments par érosion. 1) envasement de la baie, 2) érosion de berge, 3) rivière chargée en sédiments, 4) écoulement chargé en sédiments dans un fossé agricole, 5) érosion concentrée/ravine dans une bananeraie, 6) glissement de terrain et 7) érosion diffuse.

3. Synthèse bibliographique

Quelques études relatives à l'érosion des sols ont déjà été menées en Martinique et en Guadeloupe. Cette partie synthétise les principaux résultats et ordres de grandeur mesurés, notamment des valeurs de concentrations dans les baies, des taux d'érosion dans différents contextes et des coefficients de ruissellement[1].

3.1. MATIERES EN SUSPENSION DANS LES COURS D'EAU

Les études réalisées en Martinique sur la qualité des eaux dans les cours d'eau abordent parfois la présence de matières en suspension (MES). Dans le rapport « Etat des lieux, diagnostic préalable à l'étude d'un contrat de Baie de Fort-de-France » (Littoralis, 2002), quelques données de Matières En Suspension (MES) ont été synthétisées. Il s'agit de données de la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement, devenue DEAL) entre 1993-2000 et de données DDASS (Direction Départementale des Affaires Sociales et Sanitaires, devenue ARS) entre 1999 et 2001. Les données sont cependant délicates à interpréter en raison des dates de suivi très disparates d'un point à l'autre et de l'abandon dans le temps de certains points de mesure. La forte pluviométrie, notamment dans les zones de haute altitude et les pentes importantes sont responsables de débits pouvant être très élevés. Les concentrations en MES associées peuvent être importantes. A l'aval, la topographie est très plate à l'approche de la baie et ne permet pas toujours l'évacuation des MES ; bien souvent, il est nécessaire de draguer le lit des rivières à leur embouchure pour éliminer les embâcles qui se forment lors des crues.

3.2. MATIERES EN SUSPENSION DANS LES BAIES

3.2.1. Concentrations en MES

Selon une étude sur la qualité des eaux et des sédiments de la baie de Fort-de-France (Castaing *et al.*, 1986), les concentrations en MES peuvent atteindre 5 mg/L à l'exutoire des rivières. Lors des ondes tropicales, ces concentrations sont dépassées en surface et peuvent atteindre 22 mg/L près du fond.

Lors du passage de la tempête Klaus en 1990, la houle de Sud-Ouest a bloqué le panache turbide de La Lézarde dans la Cohé du Lamentin. Des concentrations en MES de 200 à 600 mg/L ont été mesurées aux débouchés des rivières, les eaux de la baie restant moins chargées (20 à 50 mg/L) (Assor *et al.*, 1991).

3.2.2. Sédimentation dans la baie

Une étude comparative de la bathymétrie de la baie de Fort-de-France a été réalisée par la SOGREAH à la demande de la DIREN (SOGREAH, 2001) sur la base des différentes cartes marine établies par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) en 1825, 1938 et 1984. Les densités de données étant très différentes d'une carte à l'autre, l'analyse comparative n'a pu être réalisée sur l'ensemble de la baie qu'entre les années 1938 et 1984. Les cartes de 1825 n'ont pu être utilisées que dans trois zones de la baie (Genipa, Cohé et Fort-de-France) où les fonds sont relativement réguliers.

[1] Le coefficient de ruissellement est le rapport entre le volume de pluie et le volume ruisselé

L'évolution de l'ensemble de la Baie entre 1938 et 1984 montre que la tendance générale est à la sédimentation. Pour plus de la moitié de la Baie, les dépôts sont modérés et inférieurs à 0.5 m. Trois secteurs sont soumis à des sédimentations importante (plus de 2 m) : les débouchés de la Rivière Lézarde, de la Rivière Salée et de la Rivière Madame. Hormis ces trois secteurs, la sédimentation peut dépasser le mètre dans certaines zones, en particulier sur une ligne Pointe du Bouc - Fort-de-France. L'incertitude estimée sur la mesure étant de 0.4 m, ces chiffres permettent uniquement de donner une tendance sur la répartition spatiale de la sédimentation, notamment des zones de dépôt importantes aux embouchures. Ce résultat souligne l'importance d'étudier les apports sédimentaires provenant de ces bassins versants.

L'étude des zones d'embouchure a permis de montrer que :

- Le débouché de la Lézarde progresse vers le large de 300 m entre 1825 et 1938 (2,60 m/an en moyenne) et de 360 m entre 1938 et 1984 (6 m/an en moyenne). Le bassin versant exporte donc de grandes quantités de sédiments qui se déposent dans la baie ce qui entraine un déplacement de l'exutoire.
- Entre 1938 et 1984, le débouché de la Rivière Salée en mer a avancé de 330 m environ, alors qu'entre 1825 et 1936 le débouché s'est déplacé vers le Nord, le lit du cours d'eau ayant changé de position.
- Les vitesses de sédimentation ont évolué entre les deux périodes : les taux de sédimentation estimés dans la Baie entre 1938 et 1984 seraient plus de deux fois supérieurs à ceux de la période 1825-1938.
- Au niveau de la Rivière Lézarde, 3.93 m de sédiments se sont déposés sur une superficie de 356 000 m² en 46 ans (entre 1938 et 1984) soit 1 400 000 m^3.
- Au niveau de la Rivière Salée 1.94 m de sédiments se sont déposés sur une superficie de 270 500 m² en 46 ans (entre 1938 et 1984) soit 525 000 m^3.

Ces chiffres permettent de faire une approximation des taux d'érosion spécifique de chaque bassin. En supposant que la densité des sédiments est de 1, on obtient pour le bassin versant de la Rivière Lézarde un taux de 3 t/ha/an et pour celui de la Rivières Salée un taux de 1,75 t/ha/an. Le taux de la Rivière Lézarde est peut-être moins important car l'exutoire de la rivière Caleçon est proche (ce qui augmente la superficie du bassin versant). Ces taux sont des taux moyens sur 46 ans, ils permettent d'estimer les ordres de grandeur. Ces épaisseurs de sédimentation et la progression des embouchures sur la baie sont des indicateurs permettant de supposer une augmentation des transferts de sédiments au cours du temps depuis les bassins versants vers la baie. Les taux d'érosion obtenus restent approximatifs. A titre indicatif, le taux moyen modélisé à Mayotte sur 8 ans est de 0.57 t/ha/an (https://www.leselam.com/).

Une publication de 2004 (Feïss *et al.*, 2004) a réalisé une caractérisation et une quantification des apports sédimentaires d'origine continentale dans la baie du Marin. Cette étude s'est basée sur des prélèvements de matériaux réalisés à terre et en mer et a permis d'estimer les vitesses de sédimentation au débouché des cours d'eau. La comparaison des vitesses de sédimentation dans la Baie du Marin à l'exutoire de deux bassins versants contrastés a montré que depuis 50 ans, cette vitesse était deux fois plus importante pour le bassin versant présentant la plus forte proportion de surfaces agricoles.

A retenir : Matière en suspension dans les Baies

Les mesures ou estimations déjà réalisées dans les baies de Martinique montrent que les concentrations en MES peuvent être très variables aux débouchés des cours d'eau, notamment après des événements pluvieux causés par les ondes tropicales.

Les embouchures des cours d'eau progressent vers la mer et ce phénomène s'est accéléré depuis 50 ans. Ce phénomène semble plus prononcé dans le cas de bassins versants dont l'occupation des sols est dominée par des surfaces agricoles.

3.3. TAUX D'EROSION

3.3.1. Ordres de grandeur

Il existe quelques données quantifiant l'érosion des sols en Martinique (Achard *et al.*, 2018; Cattan *et al.*, 2009; Khamsouk, 2001; Saffache *et al.*, 2003). Ces études fournissent des ordres de grandeur très différents (de quelque $t.ha^{-1}.an^{-1}$ à plus de 40 $t.ha^{-1}.an^{-1}$) selon la méthode utilisée et le type de culture étudiée. Les échelles spatiales de ces études sont également différentes, depuis la placette de quelques m² jusqu'au bassin versant (plusieurs km²). Dans la littérature, on trouve plusieurs études en Martinique qui s'intéressent à l'érosion en parcelle. Ces études dans les années 2000 ont montré que la culture intensive de banane, impliquant un labour profond (> 30 cm) et des apports massifs d'intrants, conduisait à une érosion « massive » des sols de plusieurs $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (Khamsouk, 2001).

Une autre étude dans la Baie du Marin (Saffache *et al.*, 2003) sur l'évolution du trait de côte avec des simulation de pluie a permis de mesurer d'autre taux d'érosion :

- ⇨ Forêt 1.2 $t.ha^{-1}.an^{-1}$
- ⇨ Pâturage 2 $t.ha^{-1}.an^{-1}$
- ⇨ Maraîchage 6 $t.ha^{-1}.an^{-1}$

Dans le cadre du projet Caraïbe Hycos (Roose *et al.*, 2012) (https://www.guadeloupe.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/le_depliant_du_projet_Caraibe-Hycos.pdf), une instrumentation de sous bassin versant débouchant sur la Baie du Robert a permis de mesurer d'autres taux d'érosion. Attention, ces mesures cumulent la partie charriage (éléments grossiers) et MES (éléments fins en suspension) (Rocle *et al.*, 2012) :

- ⇨ Bassin versant Gaschette 8 à 15 $t.ha^{-1}.an^{-1}$
- ⇨ Bassin versant Voltaire 2 à 8 $t.ha^{-1}.an^{-1}$
- ⇨ Bassin versant Mansarde 8 à 20 $t.ha^{-1}.an^{-1}$

Cette étude met également en évidence la variabilité annuelle de la production de sédiments, contrôlée par les événements pluvieux importants (Figure 2).

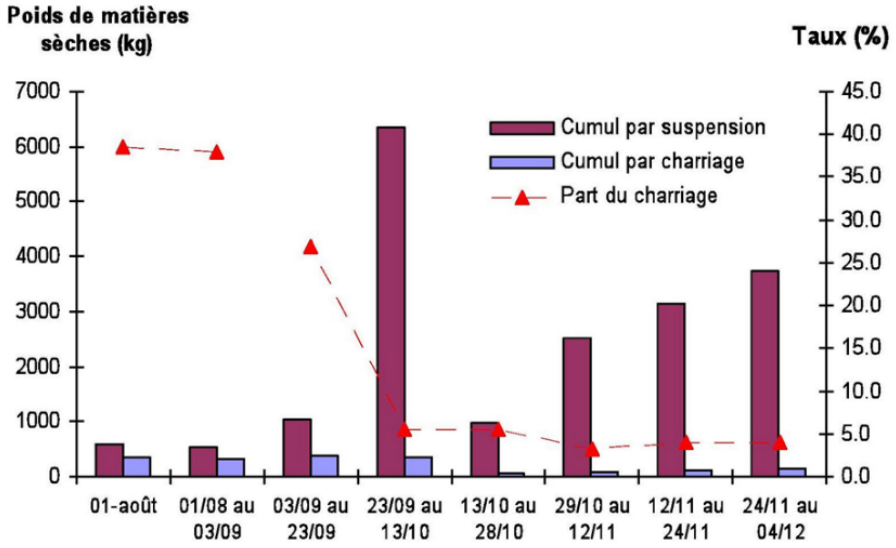

Figure 2 : Evolution du transport par suspension et par charriage de la ravine Mansarde (Rocle et al., 2012)

3.3.2. Exemple de mesures en bananeraies :

La structure du bananier modifie l'incidence de la pluie sur le sol, l'eau va donc s'infiltrer préférentiellement au pied du bananier, on parle de "stemflow" (Cattan *et al.*, 2009). Ce processus augmente le ruissellement au pied du bananier et peut conduire à la formation de rigoles d'érosion. L'organisation spatiale de la bananeraie (i.e. orientation des inter-rangs), l'enherbement de la parcelle et la gestion des paillis de résidus ont un impact majeur sur les pertes en sol (Achard *et al.*, 2018). Ainsi, un taux d'érosion de 44 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ a été mesuré pour une bananeraie implantée en double rang dans le sens de la pente, avec un travail du sol profond et une localisation des résidus dans le grand rang. Une bananeraie plantée en quinconce avec paillis de résidu reparti sur toute la surface du sol génère une érosion inférieure à 1 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (Achard *et al.*, 2018).

Ces travaux fournissent des données pour de courtes périodes, de la durée d'un évènement pluvieux (Cattan *et al.*, 2009) à un an (Achard *et al.*, 2018).

A retenir : Production de sédiments

L'occupation des sols joue un rôle important sur la sensibilité à l'érosion.

Les surfaces cultivées peuvent être très sensibles à l'érosion. L'enherbement ou la protection du sol par paille de résidu peut limiter très fortement cette sensibilité.

On observe une variabilité annuelle/saisonnière de l'érosion.

3.4. RUISSELLEMENT ET EROSION

En Martinique, le ruissellement et l'érosion diffuse ont été étudiés pour différentes cultures (banane, ananas, canne à sucre, maraîchage), sur des parcelles expérimentales de 100 ou 200 m² (Khamsouk *et al.*, 1999; Roose *et al.*, 1999; Saffache, 1999). Les observations réalisées sur ces sites expérimentaux montrent que la stabilité structurale des sols argileux 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 et machines de récolte (Roose *et al.*, 1999). Les taux d'érosion sous ces cultures couvrantes sont généralement très faibles (entre 0 et 0.1 tonne.ha^{-1} sur 5mois) mais peuvent atteindre 75 tonnes/ha/5mois sur sol nu, labouré et en conditions de fortes pentes ; à titre d'exemple, dans cette étude, des pentes de 25% et 45% amènent à des taux d'érosion de 66 t.ha^{-1} sur 5 mois et 75 t.ha^{-1} sur 5 mois pour des coefficients de ruissellement compris entre 1.6% et 19%, respectivement (le coefficient de ruissellement est le rapport entre le volume de pluie et le volume ruisselé). Ces études montrent également que l'érosion linéaire (concentrée) prend vite le relais de l'érosion diffuse (en nappe) sur les parcelles en forte pente.

Des études des sols (andosols) de Guadeloupe (Cabidoche *et al.*, 2009 ; Cattan *et al.*, 2006) ont montré que ces sols volcaniques argileux avaient une capacité d'infiltration élevée. Cependant, une couche argileuse tassée, de très faible capacité d'infiltration, est souvent présente à 0.5 m de profondeur dans les zones cultivées. Elle va limiter l'infiltration de l'eau en profondeur, avec pour conséquence de favoriser la saturation de la colonne de sols lors d'événements pluvieux importants ou successifs. Ce phénomène est important, puisqu'il va permettre la formation de ruissellement sur des sols très perméables et donc peu propices au ruissellement.

Plusieurs études sur le comportement hydro-sédimentaire des bananeraies sur le bassin versant de la Lézarde (Khamsouk, 2001; Khamsouk *et al.*, 1999) ont permis de dégager des comportements différents selon les cultures. Les coefficients de ruissellement peuvent être très variables dans les bananeraies en raison de la concentration localisée du ruissellement. Dans les cultures de canne, les coefficients de ruissellement sont faibles, mais la production de sédiments peut être importante lorsque le ruissellement se met en place. Enfin, sur les sols nus, les coefficients de ruissellement sont élevés et l'érosion est forte avec – cependant – une forte variabilité entre les parcelles.

De nombreuses études ont été menées afin de quantifier le ruissellement à l'échelle de la parcelle. Elles montrent des coefficients de ruissellement de l'ordre de 10%, variant généralement de quelques pourcents à 34% (Cattan *et al.*, 2006). Pendant des périodes particulièrement pluvieuses, certains auteurs (Cabidoche *et al.*, 2009) mesurent des coefficients de ruissellement maximaux allant de 30% à 60%, en soulignant le caractère exceptionnel de cette période, et proposent dans leur bilan hydrologique une contribution du ruissellement sur andosols de l'ordre de 6 ± 6%. Si ces études donnent des quantifications intéressantes à considérer à l'échelle locale, notamment utiles lors de la paramétrisation et la calibration des modèles, leur transposition à l'échelle du bassin versant se heurte au problème de transfert d'échelle. A titre d'illustration, le ruissellement produit à l'échelle de la parcelle peut se réinfiltrer s'il se produit sur des grandes longueurs de pente. Certaines études, plus rares, ont quantifié la dynamique hydrologique à l'échelle du bassin versant. Ainsi, (Charlier *et al.*, 2008) estiment une contribution du ruissellement au bilan hydrologique d'un bassin versant de 17.8 ha couverts par des andosols de l'ordre de 10% à l'échelle annuelle, variant à l'échelle de l'évènement entre 6% et 24%. Du fait du manque d'études menées à l'échelle du bassin versant, la dynamique du ruissellement à ces échelles reste mal quantifiée.

A retenir : Ruissellement et érosion en Martinique

Les sols volcaniques ont une capacité d'infiltration élevée. Cependant, une couche argileuse de de faible capacité d'infiltration (tassée par le travail du sol) est souvent présente en profondeur dans les zones cultivées (~0.5 m). Lors d'événements pluvieux importants ou récurrents, la colonne de sol peut se saturer et générer du ruissellement.

Les coefficients de ruissellement sont :

- très variables dans les bananeraies,
- faibles dans les cultures de canne,
- élevés pour les sols nus (avec une érosion forte) et une forte variabilité entre les parcelles.

Les taux d'érosion sont :

- importants dans les bananeraies, en raison de l'érosion concentrée
- peuvent être importants dans les cultures de canne pendant le ruissellement
- élevé sur sols nus
- faibles sous les cultures couvrantes mais importants sur de fortes pentes (érosion concentrée).

3.5. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA EROSION A L'ECHELLE DE LA MARTINIQUE

Une précédente étude a cartographié la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique en Martinique (Cheula, 2013). Cette étude se base sur un travail mené à l'échelle d'un site pilote : la Baie du Robert (Pinte, 2006; Rocle *et al.*, 2012) et adapte la méthodologie MESALES proposée par Le Bissonnais *et al.*, (1998).

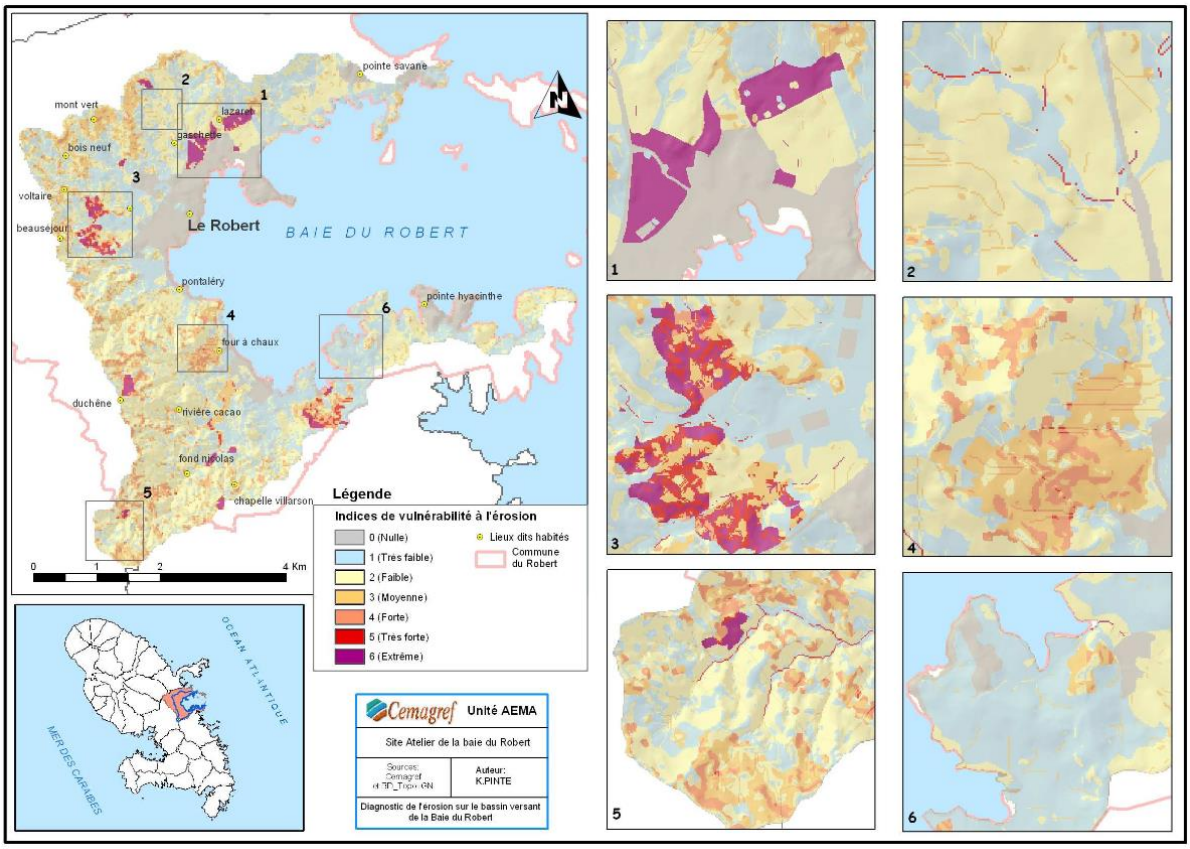

Figure 3 : Indices de vulnérabilité à l'érosion

(Pinte, 2006)

Il s'agit une approche de type « arbres de décision ». Dans ce cadre, les variables considérées par les auteurs comme importantes à considérer pour caractériser la vulnérabilité des sols sont (1) l'occupation et (2) la texture des sols, (3) la pente locale et (4) la longueur de pente. A noter que la variabilité spatiale de la pluie n'est pas prise en compte dans cette étude. Une nomenclature simplifiée, adaptée à une application à grande échelle, a été proposée afin de pouvoir appliquer le schéma proposé à l'échelle du bassin versant de la Baie du Robert à plus grande échelle. Les différentes variables sont combinées, grâce à un arbre de décision, pour constituer un indice de sensibilité. Un indice de pression est ensuite calculé par bassin versant, indice défini comme la somme de la sensibilité calculée à l'échelle du pixel, rapportée à la superficie du bassin versant pour définir un indice de pression terrestre, et à la superficie de la masse d'eau pour l'indice de pression aquatique (Figure 4).

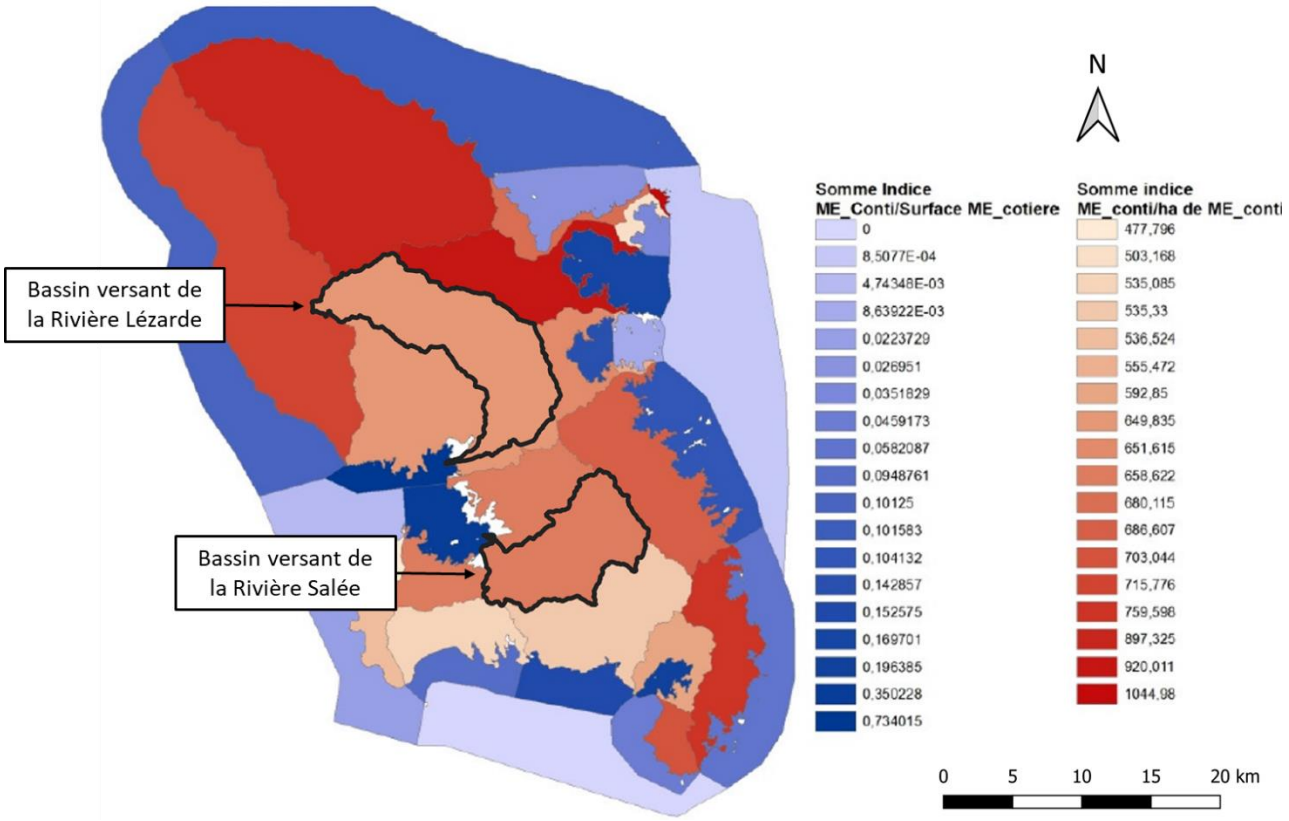

Figure 4 : Indicateurs de pression proposé par Cheula (2013) pour les masses d'eau (dégradé bleu) et terrestres (dégradés rouges). Les bassins versants de la Rivière Lézarde et de la Rivière Salée ont été ajoutés à la figure initiale par simple géoréférencement de la figure initiale.

Cette étude offre une cartographie à l'échelle de l'île de l'aléa érosion et de son impact sur les masses d'eau. On note que le bassin versant de Trinité est particulièrement impacté, en lien avec de fortes pentes et une dominante de surfaces sensibles à l'érosion. La baie de Fort-de-France est également affectée par un aléa fort. Les bassins versants de la Rivière Lézarde et de la Rivière Salée apparaissent affectés d'un aléa moyen à fort. Il est néanmoins à noter que l'échelle d'agrégation choisie par les auteurs est susceptible d'avoir influencé les résultats. En effet, le bassin versant de la Rivière Lézarde a été regroupé avec celui incluant la commune de Fort-de-France. Les zones urbaines étant considérées comme produisant peu de sédiments, l'aléa érosion de ce bassin versant a dû voir son aléa diminuer par effet de moyenne, sans que nous puissions néanmoins évaluer dans quelle mesure cela a affecté le résultat global. Le cas du bassin versant de la Rivière Salée est plus difficile à interpréter : il inclut la zone allant jusqu'à la commune des Trois-Ilets à l'ouest et jusqu'au nord-est de Saint Esprit, des zones de fortes pentes ; des zones planes sont également introduites dans l'aire ayant servi au calcul de l'aléa.

Le travail proposé par ces auteurs propose un zonage intéressant à l'échelle de la Martinique. Il présente également l'avantage de considérer de manière simple et facilement applicable certaines des variables primordiales à considérer pour décrire l'érosion des sols (Le Bissonnais *et al.*, 1998), à savoir la topographie, l'occupation des sols et le type de sols. Il présente en revanche l'inconvénient, reconnu par les auteurs, de ne pas proposer une quantification de l'érosion mais une indication relative de l'intensité de l'érosion. Le phénomène de dépôt qui peut se produire entre les zones érodées et le transfert aux masses d'eau n'est pas considéré. S'agissant d'un aléa érosion, il ne prend pas en compte les processus de glissement de terrain ni ceux se produisant en rivière comme l'érosion de berges. Ainsi, il est difficile d'évaluer l'impact de cet aléa sur les masses d'eau, et notamment celle de la Baie de Fort-de-France, car des

processus qui pourraient l'augmenter ne sont pas pris en compte dans ce travail. De la même manière, les effets de la mangrove sur le piégeage des sédiments n'ont pas pu être considérés dans ce travail se focalisant sur l'aléa érosion sur versant.

Quoi qu'il en soit, une forte expertise de terrain et SIG a été déployée dans cette étude. Une évaluation de l'aléa érosion hypothétique basée sur un changement d'occupation du sol est également testée. Dans ce scénario, un développement des surfaces dédiées au maraîchage et aux bananeraies est envisagé afin d'étudier les zones qui pourraient devenir vulnérables à l'érosion. En se basant sur l'interprétation des résultats obtenus et cette modélisation hypothétique, les auteurs soulignent l'impact de l'occupation des sols et de ses modifications sur l'aléa érosion. Ce résultat est en accord avec les résultats expérimentaux obtenus à l'échelle locale (synthétisés ci-dessus) et suggère l'importance de l'occupation du sol à une échelle supérieure.

A retenir : cartographie de l'aléa érosion à l'échelle de la Martinique

Le travail mené par Cheula (2013) propose une méthodologie et un cadre de travail basés sur la méthode initialement proposée par Le Bissonnais *et al.* (1998), permettant d'évaluer l'aléa érosion et la pression associée sur les masses d'eau côtières de Martinique. Cette étude montre notamment la forte pression sur la baie du Robert, du Marin et celle de Fort-de-France.
Concernant la baie de Fort-de-France, le bassin versant de la Rivière Lézarde et celui de la rivière Salée sont identifiés comme deux bassins versants incluant un aléa Erosion de niveau intermédiaire à élevé dans la classification proposée. L'effet de l'occupation des sols, notamment des cultures, est souligné dans cette étude.

4. Description des bassins versants

4.1. CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES

Le bassin versant de la Lézarde a une superficie de 102 km^2 et celui de la Rivière salée de 65 km^2. Le contour de ces bassins versants a été déterminé par analyse de la BD Alti de l'IGN, de résolution cinq mètres (Figure 5). Ils ont tous deux leurs exutoires au niveau de la baie de Fort-de-France. Le premier s'étend sur une large plage d'altitude, allant de 0 m à 1192 m, tandis que les altitudes du second ne s'étendent que de 0 m à 392 m (Figure 6).

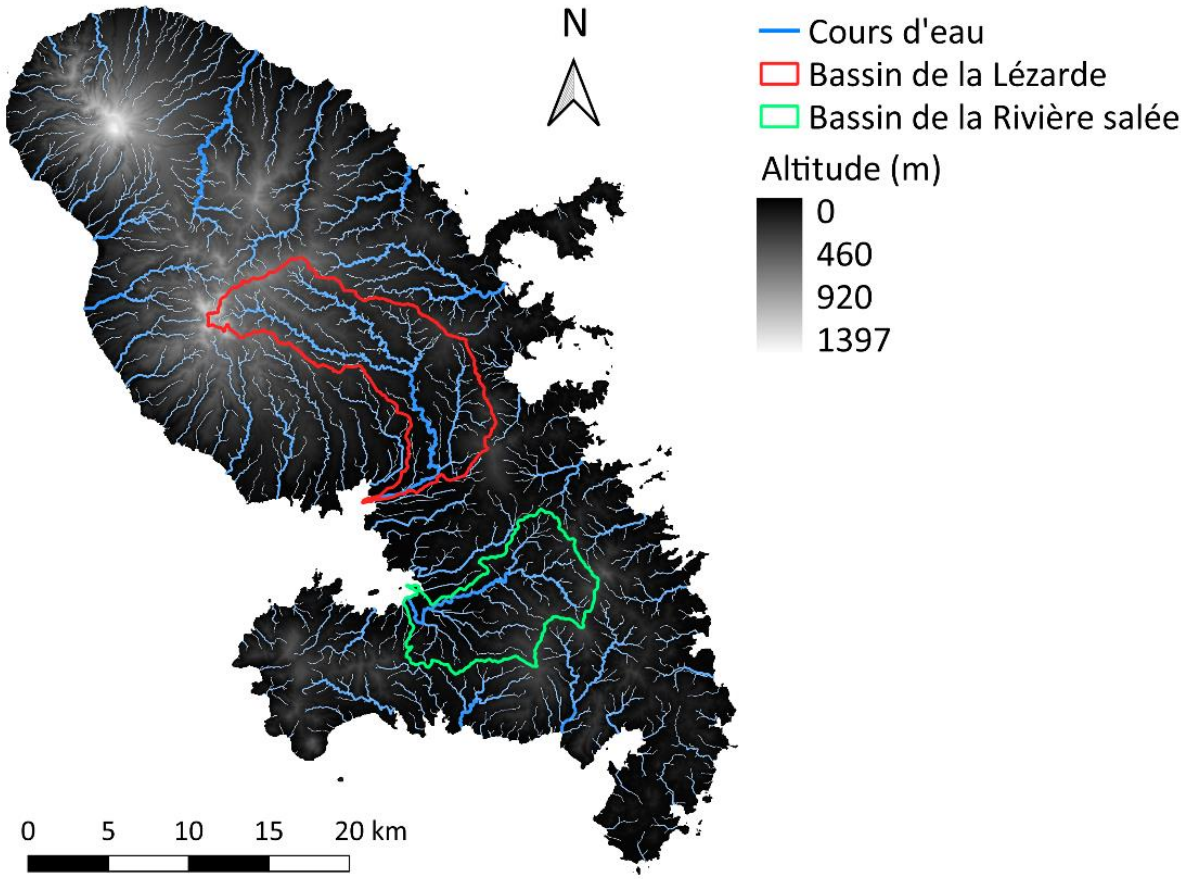

Figure 5 : Localisation des deux bassins versants de la zone d'étude au sein de l'île de la Martinique. Le dégradé de couleur indique l'altitude, l'épaisseur de chaque cours d'eau est proportionnelle à son ordre au sens de Strahler.

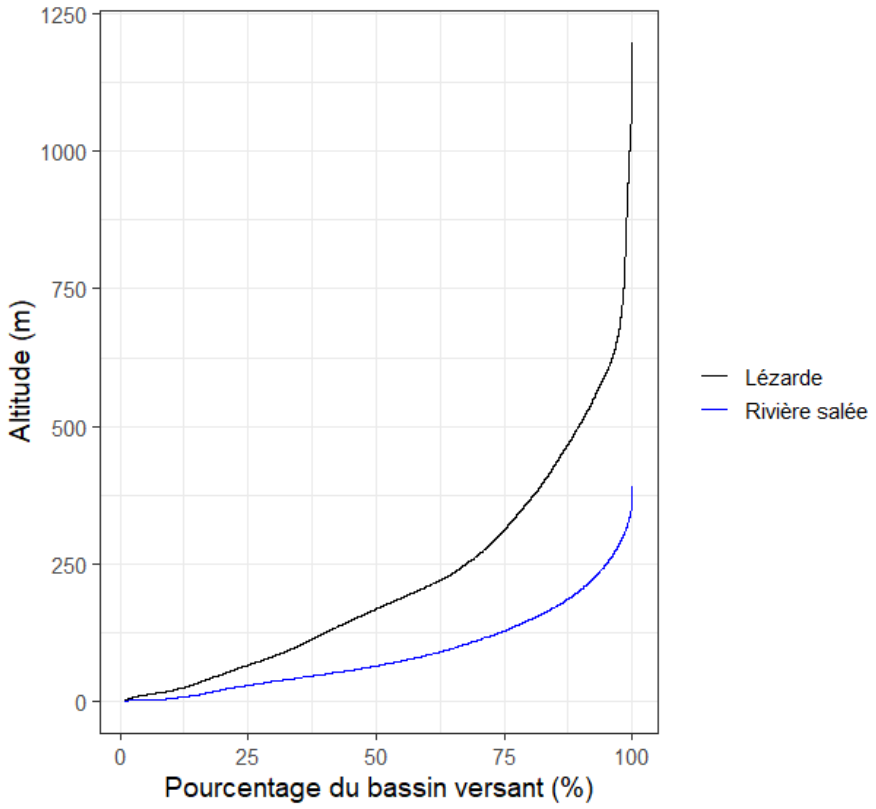

Figure 6 : Courbes hypsométriques du bassin versant de la Lézarde (trait noir) et la Rivière Salée (trait bleu).

On note également que la courbe hypsométrique du bassin de la Lézarde présente trois ruptures de pente, à environ 50, 250 et 625 m, signe d'un bassin versant côtier qui présente trois grandes structures morphologiques : une zone de plaine (< 50 m), une zone de collines d'altitudes intermédiaires (50 - 250 m) et une zone de plus haute altitude (250 – 625 m) et enfin les zones les plus escarpées, correspondant à l'amont du bassin versant. Le bassin versant de la Rivière Salée présente lui un profil plus homogène, avec une unique rupture de pente aux alentours de 10 m. Ce profil indique une transition plus progressive des zones depuis les plaines côtières vers les zones de plus haute altitude. De plus fortes ruptures de pente sont donc présentes sur le bassin de la Lézarde que sur celui de la Rivière Salée. Cette analyse est reflétée par la carte des pentes calculée au sein des bassins versants (Figure 7).

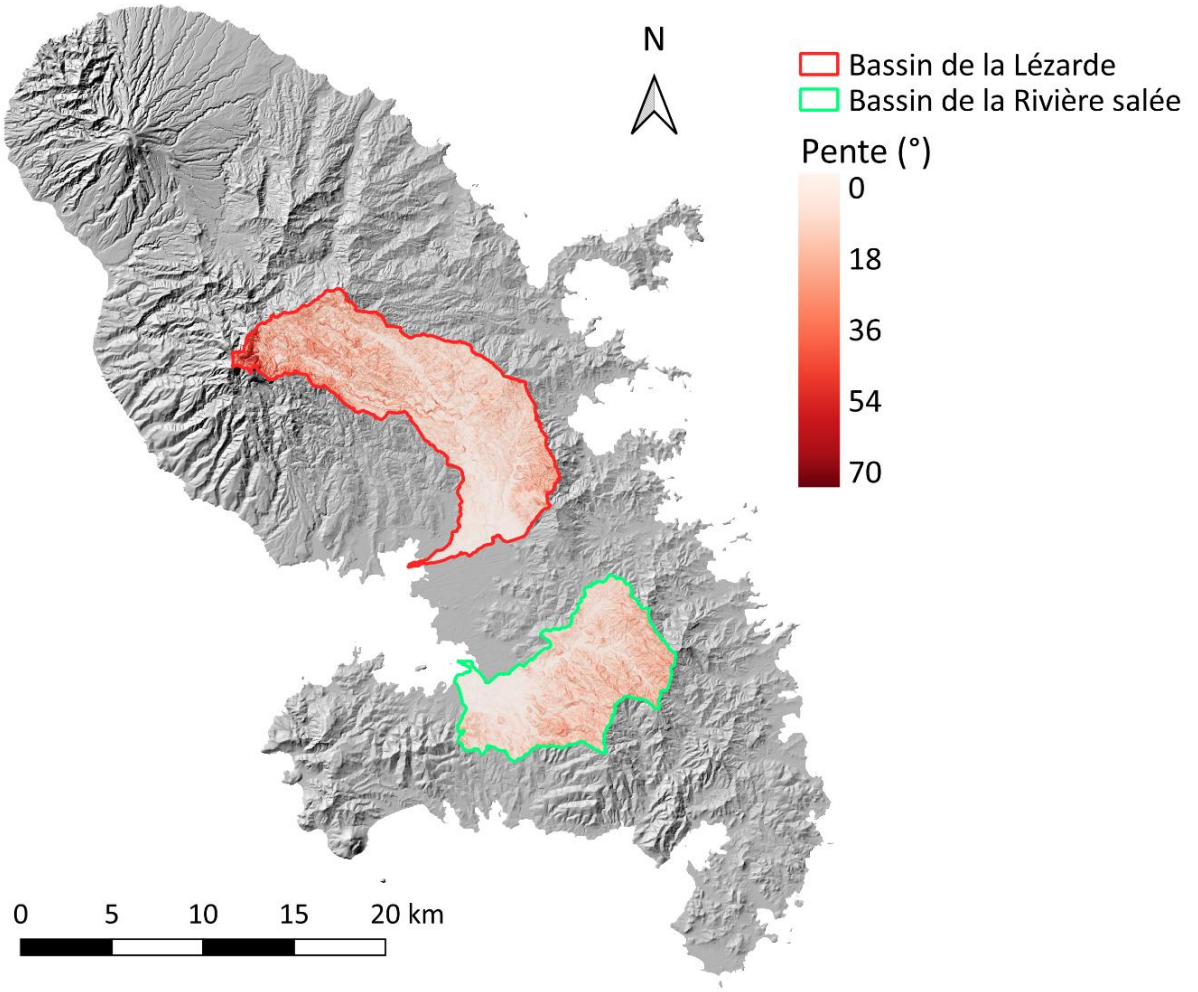

Figure 7 : Carte des pentes des deux bassins versants étudiés.

Afin d'inclure dans l'analyse topographique à la fois les notions de pente mais également de distance au cours d'eau, nous avons choisi d'utiliser un indice de connectivité (Borselli ***et al.***, 2008), défini comme :

$$IC_k = log_{10}\left(\frac{\bar{W}_k^{up}\bar{S}_k^{up}\sqrt{\bar{A}_k^{up}}}{\sum_{i=k,n_k} d_i^{down} \Big/ (W_i^{down} S_i^{down})}\right)$$

Où :

- *IC* est l'indice de connectivité (-)
- *W* est un indice de pondération (-)
- *S* est la pente moyenne de la zone contributrice (m/m)
- *A* est l'aire contributrice amont (m^2)
- *d* est la longueur de la cellule le long du chemin de propagation du ruissellement (m)
- Les exposants *up* et *down* se réfèrent à l'amont et à l'aval du pixel, respectivement (-)

L'indice *k* indique que *IC* est calculé en chaque point des bassins versants. Le numérateur grandit donc de l'amont vers l'aval et lorsque la pente augmente, tandis que le dénominateur augmente avec la longueur d'écoulement et la diminution de la pente aval. Cet indice est donc purement topographique (il ne prend par exemple pas en compte l'occupation des sols), il n'est pas défini pour les pentes nulles, et va tendre à croitre selon une échelle logarithmique au fur et à mesure que l'aire accumulée et la pente amont augmente, et/ou que la pente aval augmente et la longueur d'écoulement diminue. Sous l'hypothèse que les longueurs de ruissellement et les pentes contrôlent les flux d'eau et de matériaux érodés, cet indice nous permet donc de savoir si chaque pixel d'un bassin versant est fortement connecté ou non au cours d'eau (respectivement si l'indice est fort ou faible). Il a été calculé pour les deux bassins versants en considérant le cours d'eau principal comme enjeu, afin de se centrer sur les processus d'érosion et de dépôts sur versants (Figure 8). Un atlas détaillé de cet indice au 1/10 000ème est présent en Annexe 6.

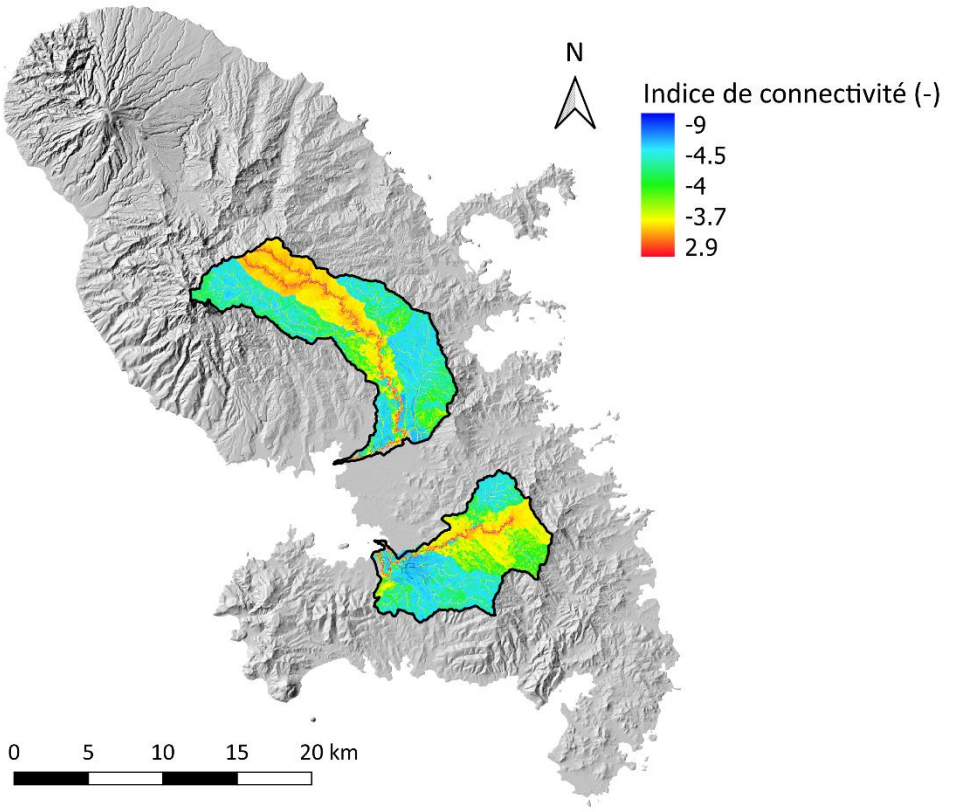

Figure 8 : Indice de connectivité calculé sur les deux bassins versants étudiés.

L'étendue de cet indice est similaire sur les deux zones d'études. Il est en revanche supérieur sur le bassin versant de la Lézarde, sur lequel il s'étend de -8.0 à 3.3, tandis qu'il est compris entre -9.2 et 2.9 sur le bassin versant de la Rivière salée. Les valeurs médianes sont semblables : -4.2 pour la Rivière salée et -4.3 pour la Lézarde, tandis que le neuvième décile vaut -3.2 pour la Rivière salée et -2.4 pour la Lézarde. Cette dernière valeur souligne que la différence entre les deux bassins versants se fait principalement sur les valeurs importantes : les valeurs sur la Lézarde sont plus élevées. Ce résultat reflète un comportement médian similaire entre les deux bassins versants, mais des zones localement plus connectées au cours d'eau dans le cas du bassin versant de la Lézarde, ce qui implique un transfert facilité du ruissellement et des matières

érodées vers le cours d'eau. Enfin, il est intéressant de noter les variations cartographiques de l'indice de connectivité, qui permettent de déterminer les zones les plus connectées au cours d'eau principal, donc les zones qui pourraient contribuer au transfert hydro sédimentaire global du bassin versant.

Implications pour le transfert des matériaux érodés

Les deux bassins versants présentent dans leurs parties amonts des pentes fortes à très fortes (jusqu'à 70°), qui sont donc susceptibles de produire de l'érosion et de transférer les particules arrachées du sol vers les cours d'eau. Par ailleurs, l'indice de connectivité souligne que les deux bassins versants présentent des valeurs de connectivités similaires. En revanche, des valeurs plus élevées sont relevées sur le bassin versant de la Lézarde, ce qui implique des transferts d'eau et de particules de sols facilités sur ce bassin versant. Enfin, cet indice fourni un zonage des parties des bassins versants les plus susceptibles de transférer les particules vers le réseau hydrographique et donc, *in fine*, vers la baie de Fort-de-France. Il est important de souligner que l'occupation des sols n'est pas prise en compte de manière explicite par cet indice.

4.2. OCCUPATION DES SOLS

Sur la Martinique, la base de données d'Occupation des Sols à Grande Echelle (OCS-GE) est disponible pour les années 2000, 2010 et 2017 sur www.geomartinique.fr. Cette base de données combine plusieurs types d'informations provenant de différentes bases de données et permet de disposer d'une couverture harmonisée couvrant l'ensemble de l'île de la Martinique, donc d'une couverture continue des bassins versants de la Lézarde et de la Rivière salée. Une reclassification en 17 classes a été effectuée afin de prendre en compte la complexité des propriétés pouvant affecter la réponse hydro-sédimentaire, en évitant de multiplier les classes.

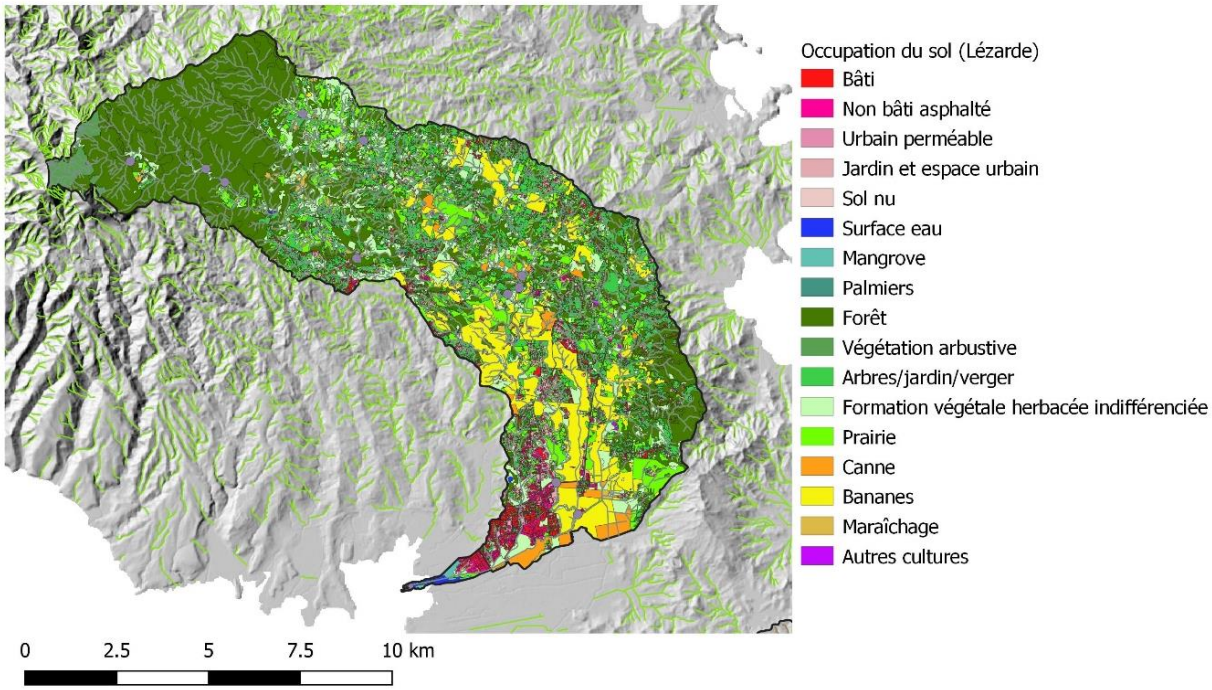

Figure 9 : Cartographie de l'occupation des sols obtenue à partir de l'OCS-GE 2017 sur le bassin versant de la Lézarde

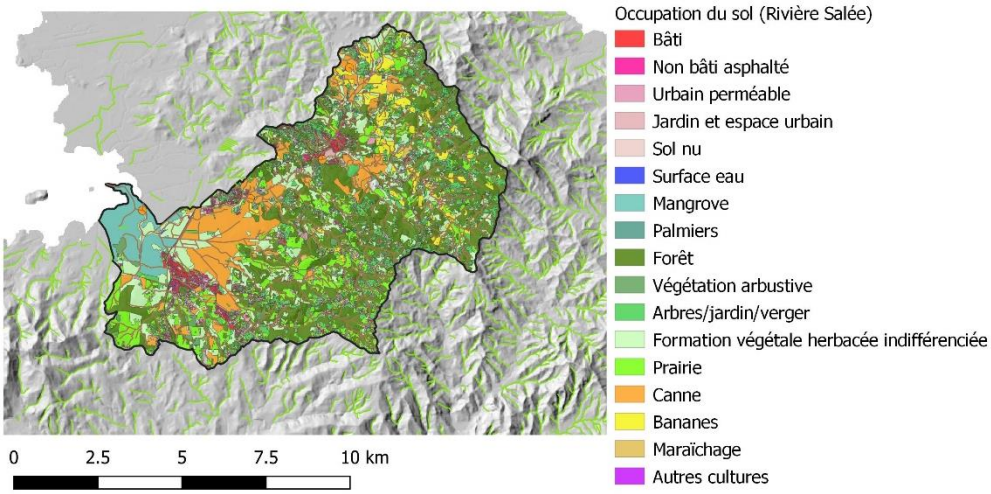

Figure 10 : Cartographie de l'occupation des sols obtenue à partir de l'OCS-GE 2017 sur le bassin versant de la Rivière Salée

Occupation du sol	Lézarde		Rivière salée	
	Superficie (ha)	%	*Superficie (ha)*	%
Autres cultures	*9*	0.1	*16*	0.2
Bananes	*1106*	10.9	*270*	4.1
Bati	*445*	4.4	*272*	4.2
Canne	*167*	1.6	*654*	10.0
Foret	*3593*	35.4	*1772*	27.1
Formation végétale herbacée indifférenciée	*1171*	11.5	*1001*	15.3
Jardin et espaces urbains	*409*	4.0	*300*	4.6
Mangrove	*18*	0.2	*281*	4.3
Non bâti asphalté	*280*	2.8	*154*	2.3
Palmiers	*23*	0.2	*11*	0.2
Prairie	*1025*	10.1	*854*	13.0
Sol nu	*2*	0.0	*1*	0.0
Surfaces eaux	*84*	0.8	*18*	0.3
Arbres/jardin/verger	*1583*	15.6	*825*	12.6
Urbain perméable	*48*	0.5	*38*	0.6
Maraichage	*80*	0.8	*33*	0.5
Végétation arbustive	*117*	1.1	*48*	0.7

Tableau 1 : Superficies et proportions des différentes occupations du sol dans chaque bassin versant pour l'année 2017(calculés à partir de l'OCS-GE)

Les zones de végétation naturelles (forêts + végétation arbustive) représentent 48% de la surface du bassin de la Rivière Lézarde et 43 % du bassin versant de la Rivière Salée. Les zones urbanisées couvrent environ 12 % de la surface des 2 bassins versants. En revanche, des différences marquées sont notées sur le type de culture dominant ces bassins versants : celui de la Rivière Salée est dominé par la culture de la canne à sucre, qui représente en moyenne 10%

de sa surface, contre 2% sur le bassin versant de la Lézarde. Le bassin versant de Lézarde est dominé par les cultures de bananes qui représentent environ 11% de sa surface, contre 4 % pour la Rivière Salée.

L'OCS-GE 2017 utilise le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de l'année 2017. Le RPG est issus de données déclaratives des exploitants et permet une meilleure description de l'étendue des ilots culturaux et du type de cultures. Sur la Martinique il est disponible à partir de 2001. La Figure 11 représente les proportions des cultures majoritaires sur chaque bassin versant de 2001 à 2021. A noter, une anomalie sur l'année 2013 pour laquelle les surfaces de culture de bananes ne sont pas renseignées dans le RPG.

Sur le bassin de la Lézarde, la canne à sucre, les bananeraies et les herbages représentent 70 à 80 % de la surface décrite par le RPG. Les surfaces de cultures de bananes ont baissé depuis 2001 au profit des herbages et de jachères. Les surfaces en canne ont une évolution variable. Sur le bassin versant de la Rivière Salée, la canne, les bananes et les herbages représentent 80 à 90 % du RPG. Les surfaces en canne sont relativement stables et comme pour le bassin versant de Lézarde, les surfaces en bananes baissent depuis 2001.

Les parcelles de bananes et de canne à sucre sont replantées tous les 5-6 ans en respectant une jachère avec mise en place de plantes de services pour une meilleure gestion du parcellaire et une réduction de l'usage de produits phytosanitaires. La rotation culturale qui était d'environ une dizaine d'année au début des années 2000 et donc passé progressivement à 5-6 ans, les parcelles étant replantées dès que les rendements commencent à baisser.

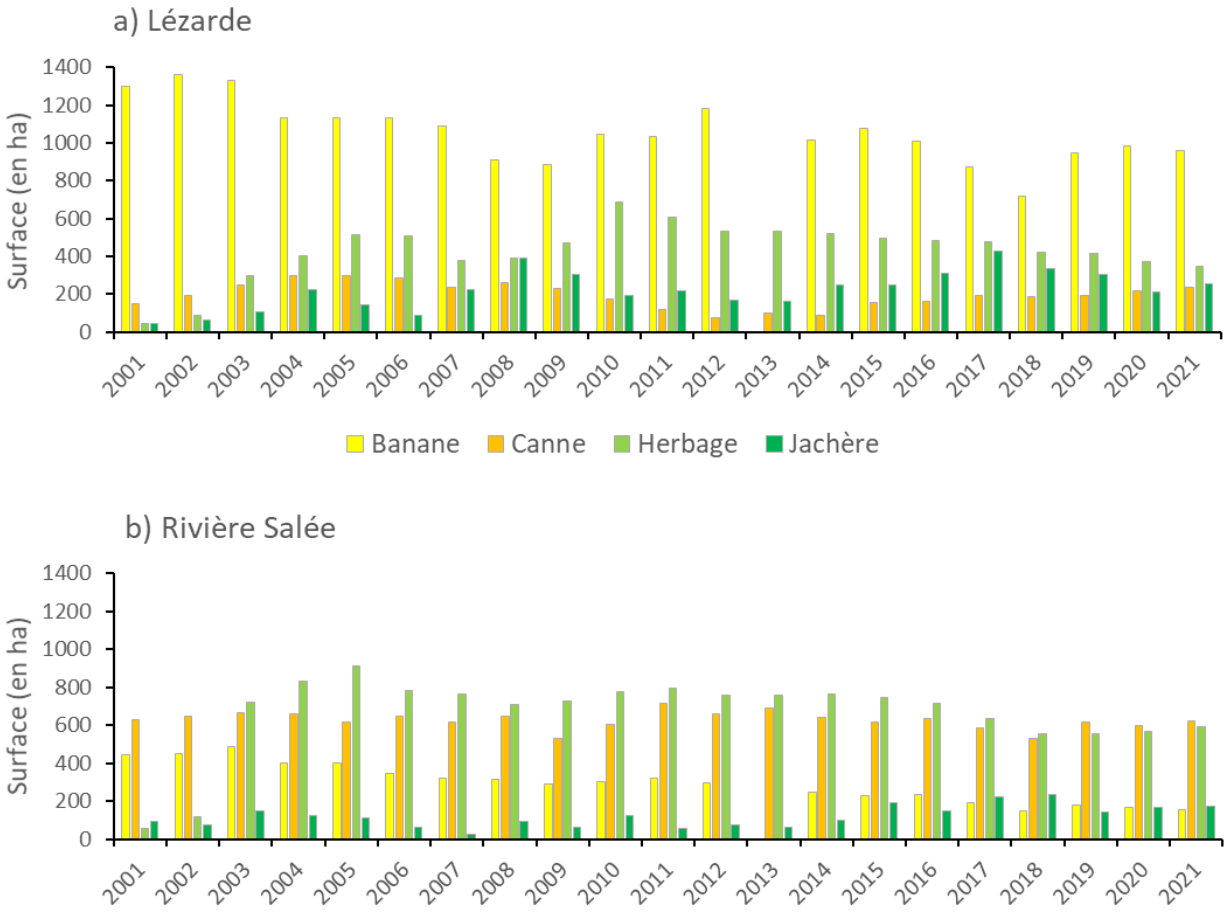

Figure 11 : Occupation des sols reconstituée sur les le bassin versant a) de la Lézarde et b) de la Rivière Salée.

Ces différences de cultures peuvent entrainer des différences de comportement significatives au niveau du ruissellement et de l'érosion des sols. En effet, la culture de canne à sucre qui développe un couvert végétal dense, limite l'érosion des sols, et donc le transfert vers les cours d'eau, contrairement à des sols nus. En revanche, les parcelles de bananes cultivées de façon intensive avec labour peuvent présenter des taux d'érosion significatifs, comme suggéré dans la littérature. Sur la base de données bibliographiques, il est donc pressenti une érosion locale plus importante dans le cas des cultures bananières, donc des taux d'érosion plus importants sur le bassin versant de la Lézarde, comme illustré dans le paragraphe 3.2.2. Il est par ailleurs important de noter que cette étude se focalise sur l'érosion des sols et les transferts depuis les versants jusqu'aux cours d'eau. Ainsi, ce travail ne considère pas les processus tels que la sédimentation dans les zones types mangroves. Or l'exutoire de la Rivière Salée est constitué de mangroves, dont la présence va favoriser la sédimentation des particules arrivant depuis les cours d'eaux amont.

Implications pour l'érosion des sols

Les deux bassins versants présentent un couvert végétal important, composés de forêts et zones herbacées sur au moins deux tiers de leurs superficies. Ces zones se situent principalement dans les parties amont des bassins, notamment sur les zones de fortes pentes. Les principales zones de cultures se situent plus en aval, notamment sur les zones de plaine les plus proches de l'exutoire au niveau mais également le long des cours d'eau principaux. Une différence sur le type de cultures majoritaires est notée entre les deux bassins versants : sur celui de la Rivière salée, la culture de la canne est dominante, sur celui de la Lézarde, il s'agit de la banane. Les différences de taux d'érosion mesurés dans la littérature sur ces types de cultures permettent d'anticiper des taux d'érosion locaux plus important sur le bassin versant de la Lézarde que sur celui de la Rivière salée. Cette analyse ne tient pas compte des phénomènes d'érosion de berges ni de glissement de terrain.

4.3. NATURE DES SOLS

Une carte pédologique a été établie sur la Martinique par l'IRD en 1969. La carte pédologique simplifiée au 1/20 000ème a été utilisée.

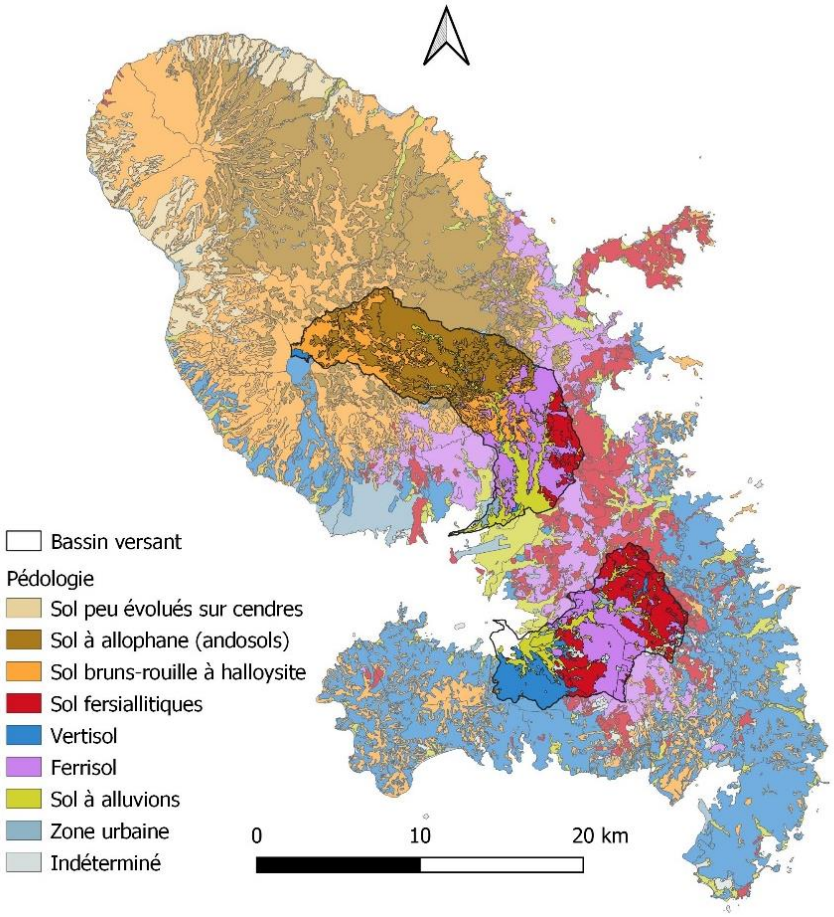

Figure 12 : Carte des sols de la Martinique au 1/ 20 000ème (Colmet-Daage, 1969) et localisation des deux bassins versants étudiés.

Les deux bassins versants présentent une répartition des types de sols contrastés ; celui de la Rivière Salée est dominé par les sols fersiallitiques, ferrisols, vertisols tandis que celui de la Rivière Lézarde est majoritairement couvert par des andosols, sols brun rouille à halloysite et ferrisols. Afin d'examiner les caractéristiques hydrosédimentaires de ces sols, nous nous appuyons sur les études menées par (Cocu, 1999 ; Sels, 1999). Au cours de ces études, 31 échantillons prélevés au sein de différentes fosses pédologiques ont été étudiés, incluant des prélèvements à différentes profondeurs (depuis la surface jusqu'à plus de 2.6 m de profondeur) et au sein des différentes pédologies observées sur l'île. Les résultats (Figure 13) illustrent la variabilité de la texture des sols.

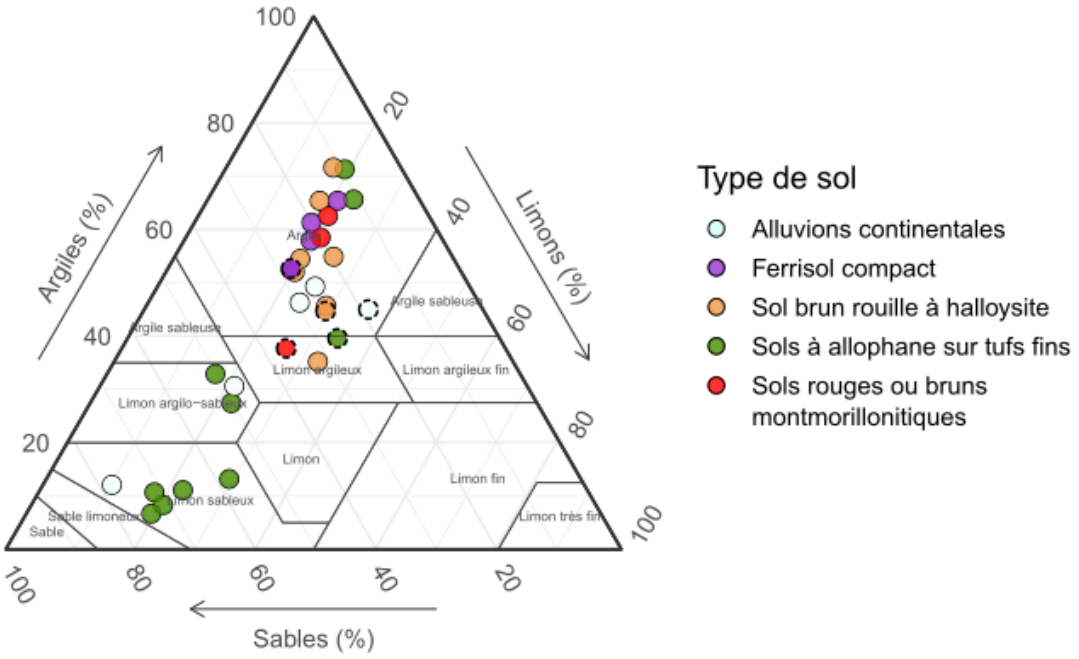

Figure 13 : Diagramme ternaire des échantillons analysés (Cocu, 1999). Les échantillons de surface (un par type de sol) sont indiqués par un contour pointillé gras.

Les échantillons analysés sont globalement argileux, peu limoneux (pourcentage de limons compris entre 11% et 36%) et présentent une forte variabilité des proportions en sables (entre 9% et 77%) et argiles (entre 7% et 72%). On note néanmoins que les échantillons de surface sont globalement plus riches en limons (entre 20% et 36%), au détriment des sables (entre 19% et 36%) et des argiles (entre 38% et 55%). Ceci est en accord avec la carte des textures des horizons supérieurs des sols (GIS Sol, 2011) réalisée à partir de la carte pédologique (Colmet-Daage, 1969) et de la base de données ValSol de la Martinique (Beaudou *et al.*, 2004).

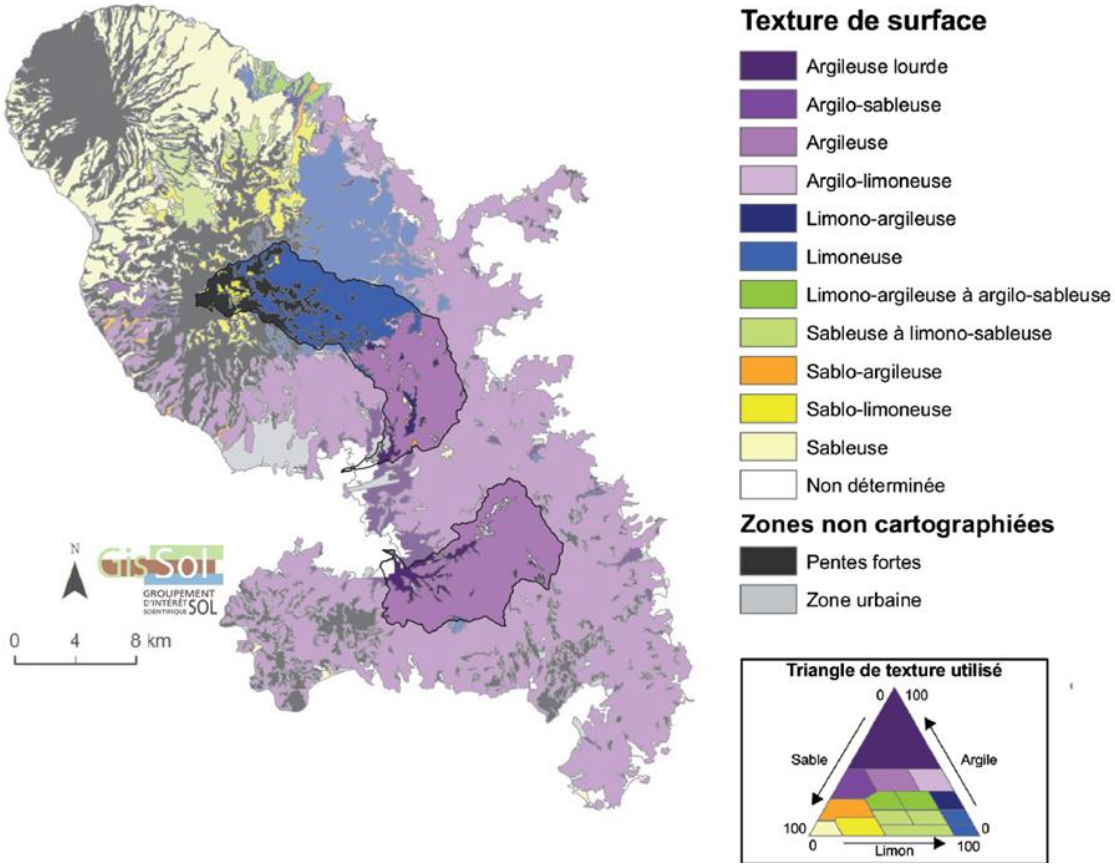

Figure 14 : Textures des horizons supérieurs du sol (GIS Sol, 2011) (déterminées à partir de base de donnée VALSOL (Beaudou et al., 2004) et de la carte des sols des Antilles (Colmet-Daage, 1969)) et localisation des deux bassins versants étudiés.

Les sols du bassin versant de la Rivière Salée ont une texture principalement argileuse. Les sols situés à l'aval et à proximité des cours d'eau ont une texture argileuse lourde. Les sols situés dans la moitié aval du bassin versant de la Lézarde ont une texture similaire à ceux du bassin versant de la Rivière Salée (majoritairement argileuse et localement argileuse lourde), les sols situés dans la moitié amont ont une texture limoneuse voire sableuse).

La texture du sol joue sur ses propriétés hydrodynamiques et érosives. Les sols limoneux sont plus sensibles à l'érosion que les sols argileux mais ils sont plus perméables donc permettent l'infiltration de l'eau et génèrent moins de ruissellement.

Implications pour le ruissellement et le détachement de particules de sol par érosion

En Martinique, le sud est surtout de texture argileuse correspondant à des sols évolués de volcanisme ancien. Les sols peu évolués de volcanisme récent du nord de l'île sont de textures limoneuses à sableuses.

Le bassin versant de la Rivière Salée est constitué essentiellement de sols à texture argileuse. Le bassin versant de la Lézarde est constitué de sols à texture argileuse dans sa moitié aval et à texture limoneuse dans sa moitié amont.

Ces textures de sols ont des propriétés différentes vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion : (1) les sols limoneux et sableux sont plus sensibles à l'érosion que les sols argileux et (2) les sols limoneux (en contexte martiniquais) et sableux ont une capacité d'infiltration plus importante que les sols argileux et génèrent donc moins de ruissellement.

5. Quantification des sources de l'érosion

Une originalité de cette étude est l'utilisation de différentes approches qui ont été utilisées pour caractériser les processus de production sédimentaire dans les deux bassins versants et évaluer leur importance relative (Figure 15) : la collecte et l'analyse de données hydrologiques, le traçage sédimentaire et l'analyse d'études existantes (aléa mouvement de terrain, recul historique des berges de la Rivière Lézarde).

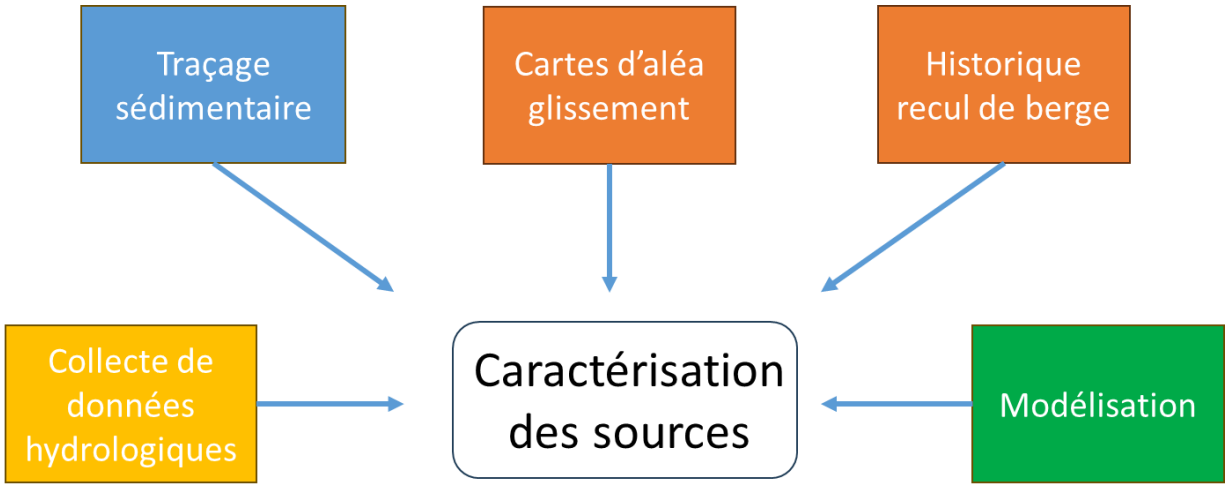

Figure 15 : Représentation de la démarche pour quantifier la part des différentes sources de l'érosion

5.1. COLLECTE ET ANALYSE DE DONNEES

Devant le faible nombre de données disponibles dans la littérature dans les environnements volcaniques insulaires, il a été nécessaire procéder à une phase de collecte et d'analyse de données hydrologiques, incluant pluie, débit et concentration en matières en suspension. Cette étape a pour but de caractériser et comprendre la réponse hydrologique des deux bassins versants étudiés.

5.1.1. Données de concentration en matières en suspension

Des données ponctuelles de mesure de MES en rivières sont disponibles sur le site Naïades qui regroupe les données sur la qualité des eaux de surface (http://naiades.eaufrance.fr/acces-donnees#/physicochimie). Des données existent entre 1999 et 2023 sur plusieurs points de la Rivière Lézarde (521 mesures) et entre 1995 et 2023 au Niveau de Petit Bourg sur la Rivière Salée (160 mesures). Ces données regroupent des données de l'Office De l'Eau (ODE) et de la DEAL. La répartition temporelle de ces données est irrégulière et certains points de mesure n'ont pas été maintenus, l'intervalle entre deux mesures est au mieux d'un mois.

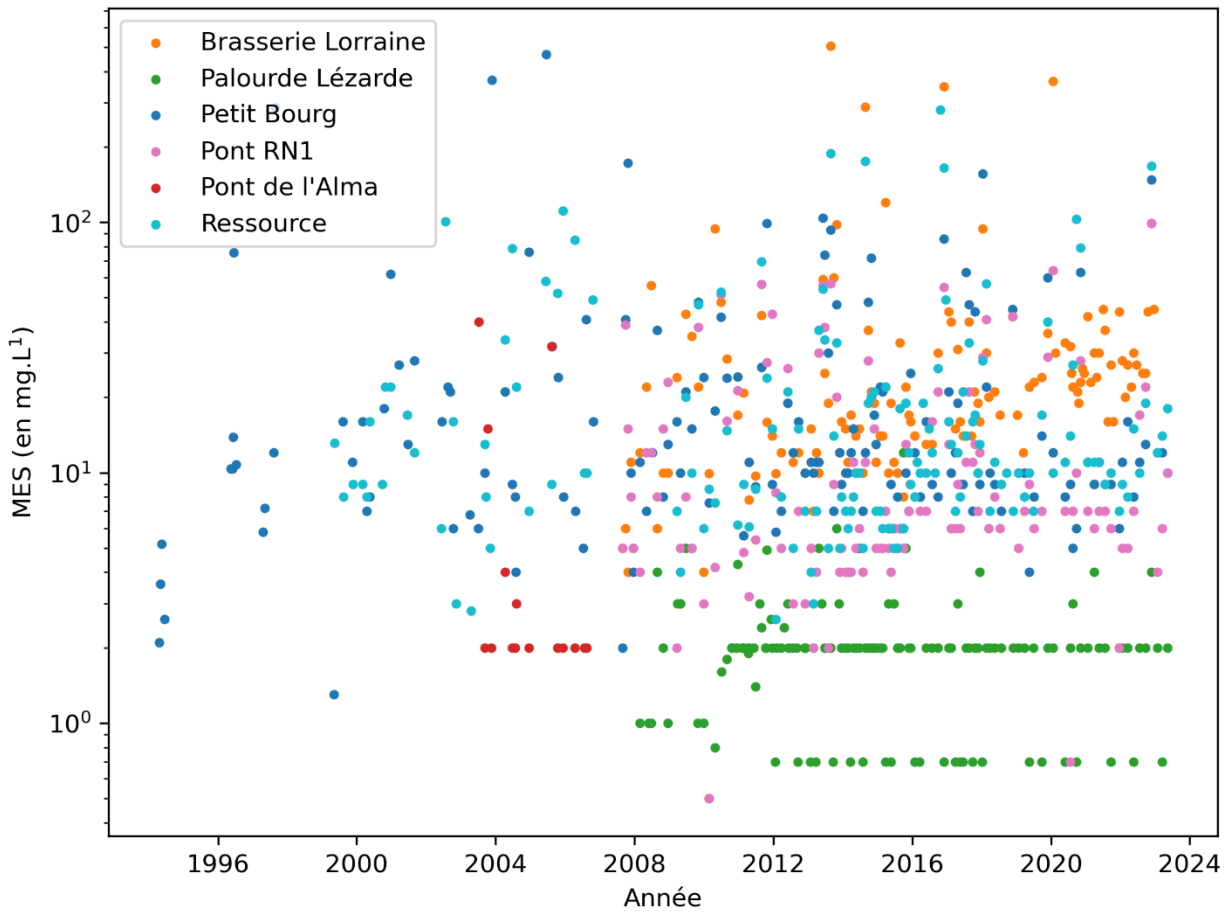

Figure 16 : Valeurs de MES ponctuelles en fonction du temps (l'ordonnée est en échelle logarithmique)

Ces données de concentrations en Matières En Suspension présentent des limites en termes de fréquence d'acquisition, ce qui ne permet pas d'établir des bilans sédimentaires précis pour une modélisation robuste. En effet, une fréquence d'échantillonnage insuffisante peut sous-estimer les variations rapides des concentrations, notamment lors d'événements hydrologiques intenses. Malgré cette contrainte, ces données permettent néanmoins de mettre en évidence plusieurs tendances significatives :

- Une majorité de faibles concentrations en MES hors périodes de crues, donc un transport sédimentaire limité hors périodes de crue.
- Quelques valeurs de concentrations en MES très élevées lors des crues, ces évènements sont moins fréquents mais jouent un rôle important sur les transferts sédimentaires
- Des valeurs de concentration moins élevées à l'amont (Point de mesure Palourde Lézarde et Pont de l'Alma) en raison de l'aire drainée plus faible

Ces éléments laissent supposer que l'export de sédiment se produit essentiellement pendant les crues.

5.1.2. Recherche de chroniques de mesures

Afin de pouvoir être intégrées dans une démarche de modélisation, les données recherchées doivent répondre à plusieurs critères comme la durée de mesure, le pas de temps, la localisation des points de mesure dans les bassins versants, etc. Différentes sources de données ont été répertoriées :

- **Hydroportail** (https://hydro.eaufrance.fr/)

  Ce site national est notamment alimenté par la Cellule de Veille Hydrologique (CVH) de la DEAL Martinique qui suit les hauteurs d'eau (et les débits, dans certains cas) de certains cours d'eau. Les périodes de mesure varient selon les stations. La pluie est également mesurée mais n'est disponible sur le site internet que depuis l'année 2021 (les chroniques de pluie d'avant 2021 existent à la CVH mais n'ont pas été mises en ligne). Certaines chroniques de pluie ont été déposées sur le site par Météo France.

- **Météo France**

  Nombreuses chroniques de pluie au pas de temps pouvant descendre à 6 min

- **CVH de la DEAL Martinique**

  La CVH alimente l'Hydroportail et a participé au projet Caraïbe-HYCOS (2010-2014) (https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-01/010055529.pdf, https://books.openedition.org/irdeditions/12959?lang=fr). Ce projet se construisait autour d'un observatoire concernant le suivi du cycle hydrologique sur l'arc insulaire caribéen. Dans ce cadre, la CVH a mis en place des stations des mesures de qualité de l'eau, notamment au niveau de la RN1 sur la Rivière Lézarde, et au niveau de Petit Bourg sur la Rivière Salée. Les paramètres mesurés étaient la conductivité, l'oxygène dissous, la température et la turbidité (au pas de temps de 20 min). Ces chroniques de données brutes nous ont été fournies.

- **Projet HydroSedMar (HSM)** (https://hydrosedmar.brgm.fr/)

  Des chroniques de turbidité ont été acquises (au pas de temps de 10 min) lors du projet en 2017 au niveau du pont Spitz sur la Rivière Lézarde et dans la baie de Genipa à 500 m de l'embouchure de la Rivière Salée.

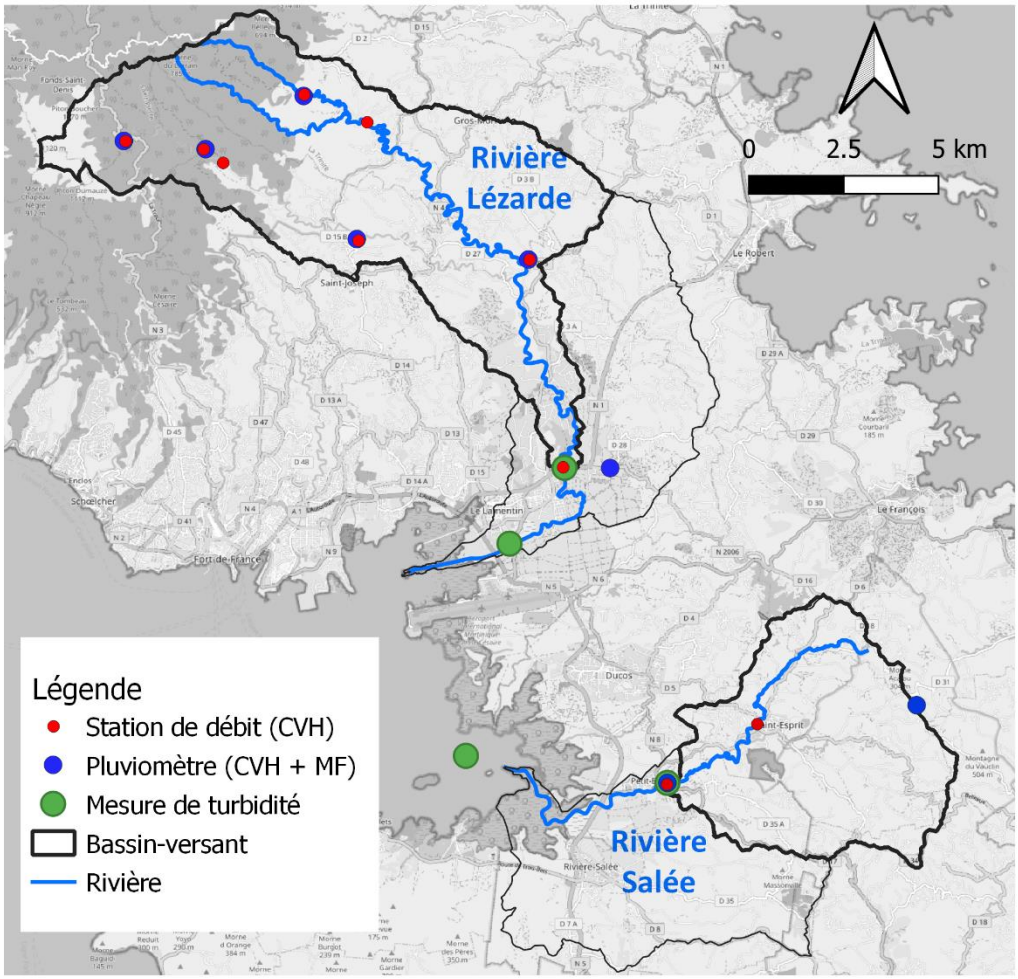

Figure 17 : Localisation des stations de débit, pluviomètres et sondes de turbidité dans les deux bassins versants de l'étude. Les sous-bassins versants correspondant aux stations de débit les plus avals ont été tracés en gras.

	Lézarde	**Salée**
Superficie à l'embouchure	102 km²	65 km²
Superficie au droit de la station hydrométrique	69.73 km²	34.95 km²

Tableau 2 : Superficies des bassins et sous-bassins versants

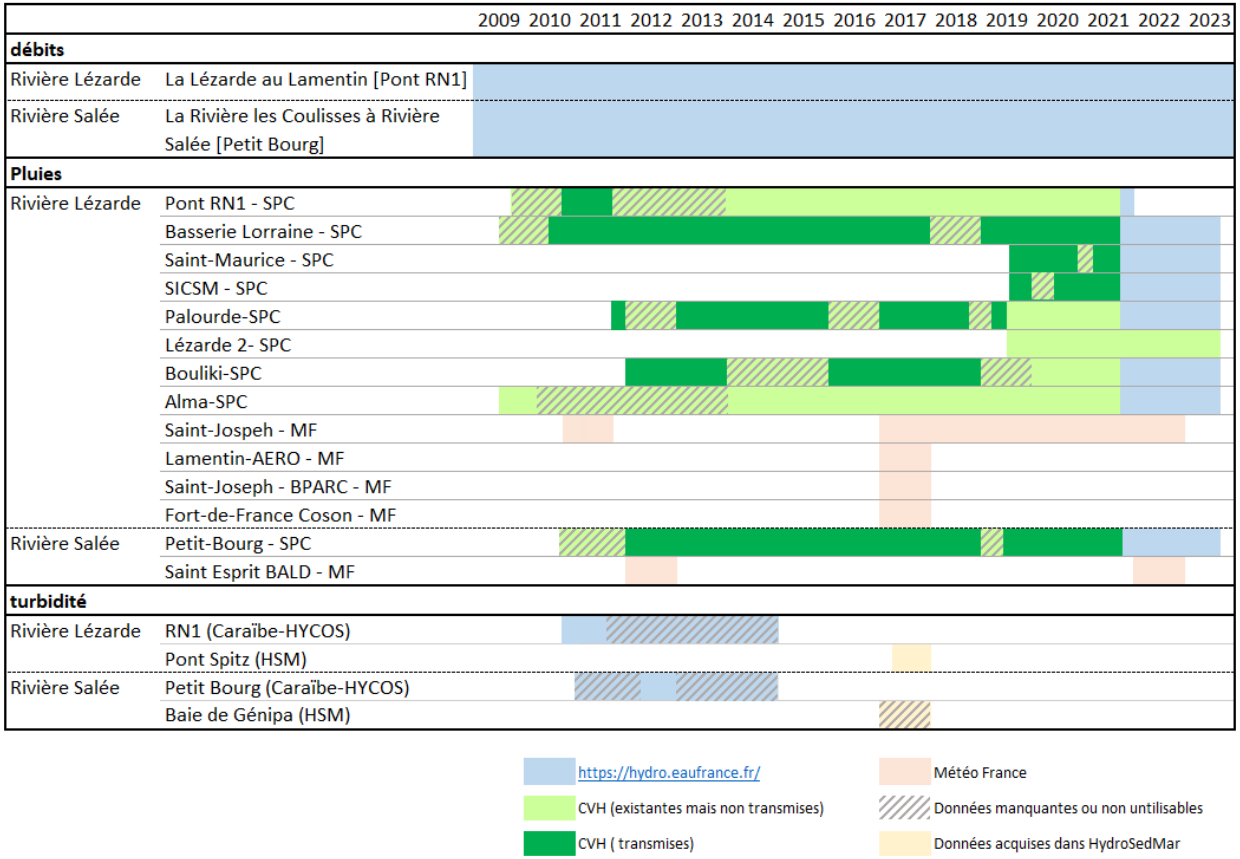

Tableau 3 : Données disponibles sur les deux bassins versants. Les données CVH DEAL Martinique (certaines étant disponibles au téléchargement sur https://hydro.eaufrance.fr/). Les données de pluie à 6 min des stations Météo France sont devenues accessible au cours du projet (https://www.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-6-minutes/)

5.1.3. Pluviométrie

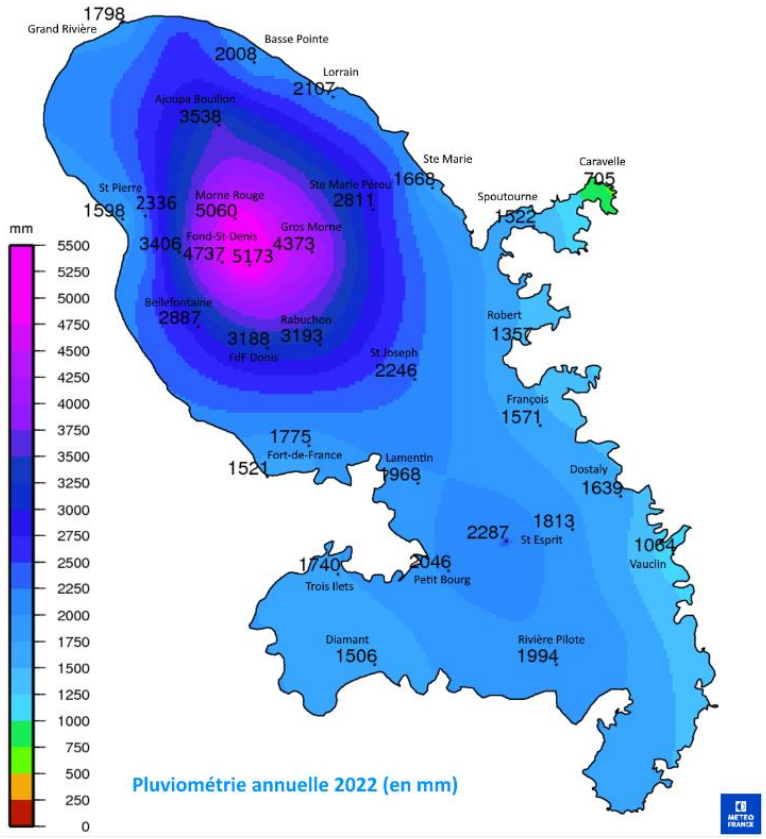

Figure 18 : Pluviométrie annuelle 2022 (en mm) en Martinique (source Météo France, https://meteofrance.mq/fr/climat/bulletin-climatique-annuel-2022)

La pluviométrie annuelle moyenne en Martinique est de l'ordre de 1 100 mm. En 2022, le cumul de pluie annuel a varié de 700 mm à la Caravelle à plus de 5 000 mm sur les Pitons du Carbet. Les cumuls sont plus importants sur le bassin versant de la Rivière Lézarde que sur celui de la Rivière Salée. Les données de pluie étant ponctuelles (cf. Figure 17 et Tableau 3), il a été choisi d'utiliser plusieurs stations réparties sur les deux bassins versants afin de tenir compte de la variabilité spatiale des précipitations. Les pluviomètres ont été sélectionnés selon leurs dates d'acquisition et la validité de leurs données.

Sur le bassin versant de la Lézarde, 6 pluviomètres (Hydroportail) ont été utilisés pour l'année 2022 et 4 (Météo France) pour l'année 2023 (Figure 19). L'aire d'influence de chaque pluviomètre a été évaluée avec la méthode des polygones de Thiessen. Ces aires d'influence ont été utilisées pour pondérer les valeurs de cumul de chaque pluviomètre.

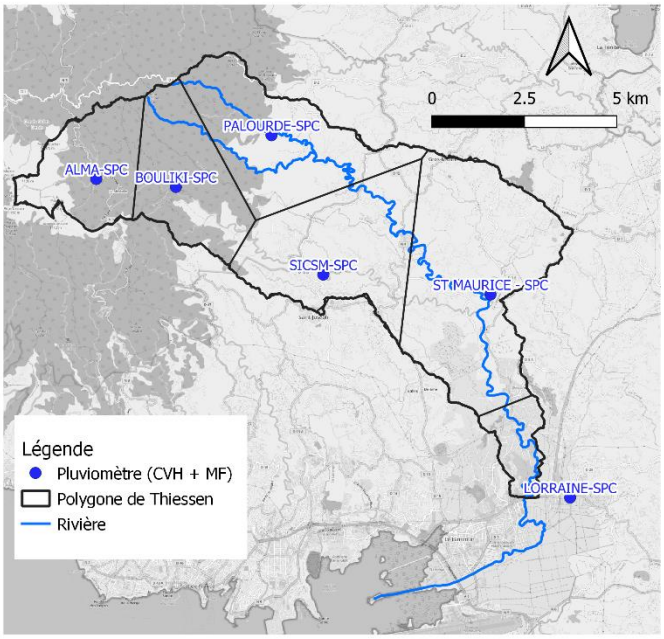

Figure 19 : Localisation des pluviomètres utilisés sur le bassin versant de la Lézarde pour l'année 2022 et polygones de Thiessen tracés pour quantifier l'aire d'influence de chaque pluviomètre

Pour la Rivière Salée, deux pluviomètres ont été utilisés, l'un au niveau de Petit Bourg et l'autre à l'amont du bassin (sur la commune de Saint Esprit). Les deux pluviomètres étant situés à des extrémités opposées du bassin versant, la moyenne des cumuls aux deux stations a été prise en compte.

L'analyse mensuelle de la pluviométrie montre que plus de la moitié des précipitations se produit entre juillet et novembre (Figure 20), période pendant laquelle se produisent également la plupart des crues.

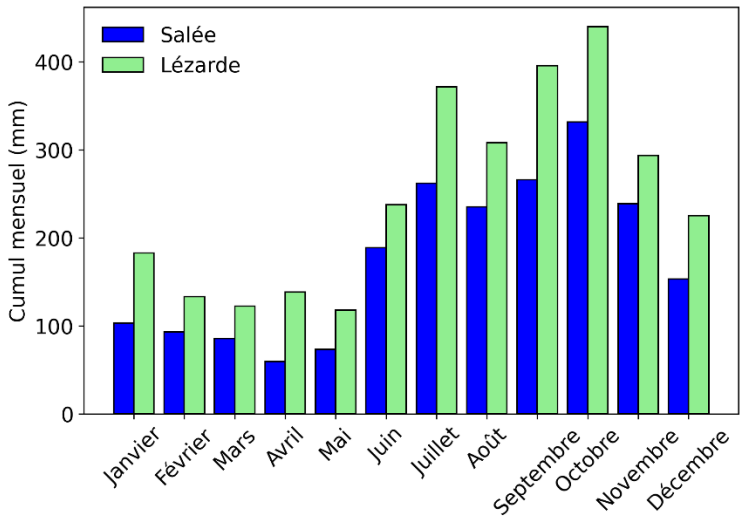

Figure 20 : Cumuls de pluie mensuels moyens pour les années 2022 et 2023 pour chaque bassin versant (pour la Rivière Lézarde l'exutoire du bassin versant est au niveau de la RN1 et pour la Rivière Salée à Petit Bourg, cf. Figure 17)

5.1.4. Débits

Les débits aux exutoires des bassins peuvent varier très fortement d'une année à l'autre. Par exemple, l'année 2011 a été très humide alors que l'année 2019 a été plus sèche.

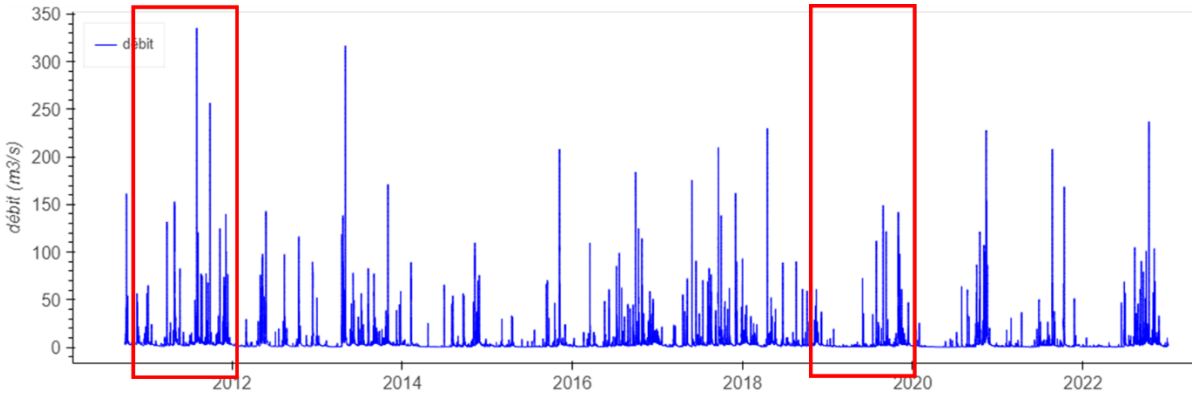

Figure 21 : Débit de la Rivière Lézarde au niveau du pont de la RN1 de 2010 à fin 2022

L'analyse des hydrogrammes de crue (qui représentent la variation du débit en fonction du temps) donne des indications sur les proportions relatives des principaux types d'écoulements en rivière (Figure 22). Les principaux types d'écoulements sont :

- L'écoulement de surface (ou ruissellement) constitué par la lame d'eau qui, après une pluie, s'écoule à la surface des sols. L'importance de cet écoulement dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, ne deviennent prépondérants
- L'écoulement de base (ou débit de base) : l'eau transite à travers l'aquifère à une vitesse comprise entre quelques mètres par jour et quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau. À cause des faibles vitesses de l'eau dans le sous-sol, l'écoulement de base n'intervient que pour une faible part dans l'écoulement de crue. De plus, il ne peut pas toujours être relié au même événement pluvieux que l'écoulement de surface et provient généralement des pluies antécédentes.

Pour connaître le volume de ruissellement généré par une crue, il faut donc soustraire le débit de base au débit du cours d'eau. Une analyse a été réalisée sur les chroniques de débit au niveau du pont de la RN1 et de Petit Bourg. Dans les deux cas, le débit de base présente une forte saisonnalité qui ne se retrouve pas dans le débit ruisselé. Ceci signifie que les crues, mêmes peu intenses, peuvent se produire à n'importe quel moment de l'année et que les bassins sont très réactifs.

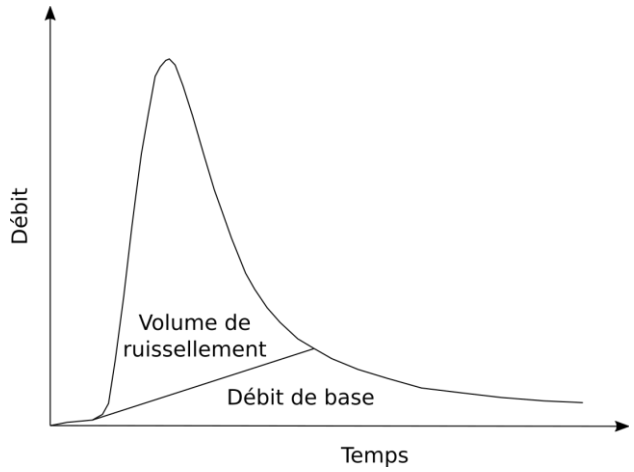

Figure 22 : Concept de séparation des types d'écoulement au sein d'un hydrogramme de crue

5.1.5. Caractérisation de la réponse pluie – débit (2022-2023)

Il est possible de caractériser le comportement d'un bassin versant en mettant en relation le volume ruisselé à l'exutoire grâce au débit et aux volumes de pluie précipités. Cette caractérisation pluie-débit a été réalisée pour les deux bassins versants en fonction des chroniques de données disponibles. Les chroniques de pluies pondérées (cf. paragraphe précédent) ont été découpées en une succession d'événements de pluie et couplés aux événements ruisselants issus des chroniques de débit correspondantes (Figure 23).

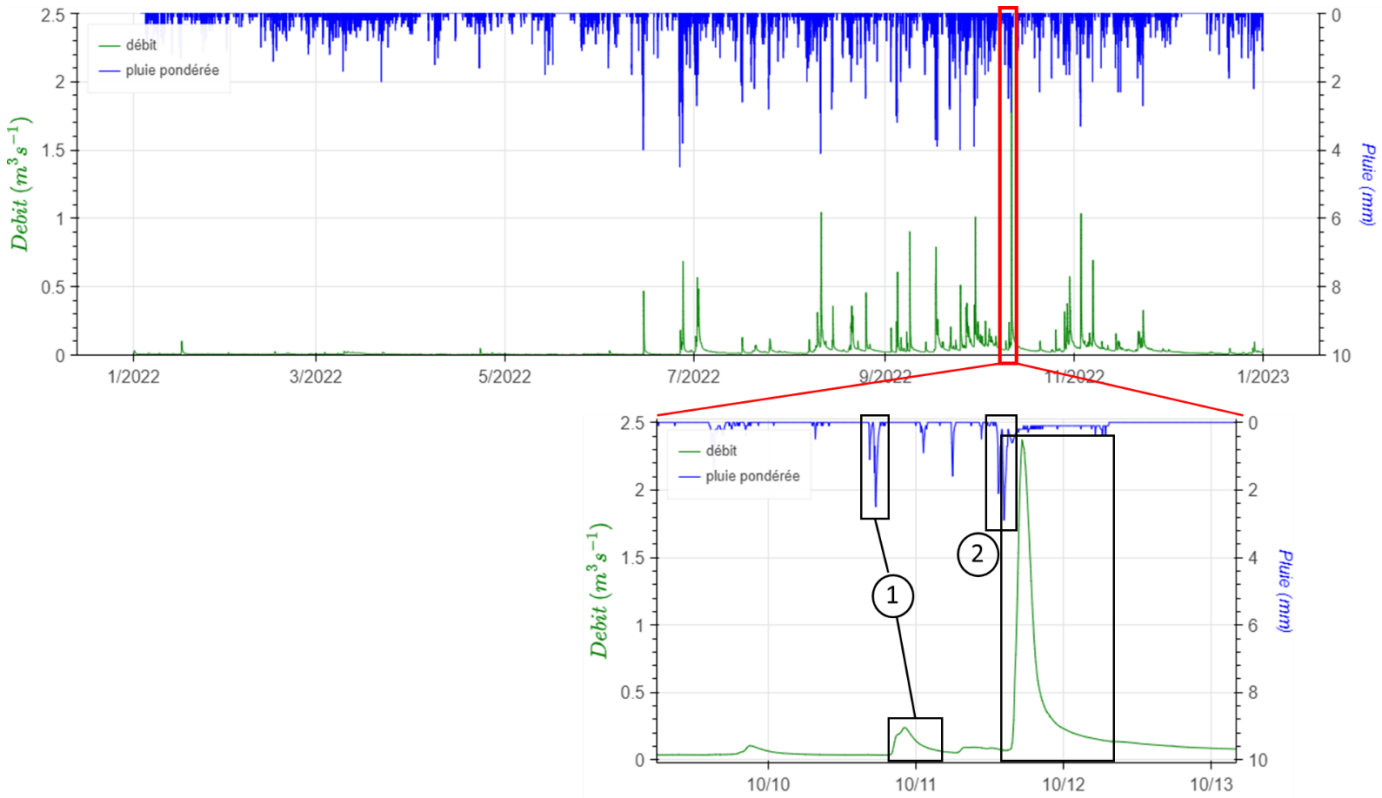

Figure 23 : Exemples de découpage d'événements pluvio-ruisselants à partir des chroniques de pluie et de débit de l'année 2022 pour le bassin versant de la Lézarde

Ce découpage a été réalisé sur les années 2022 et 2023, sur les deux bassins versants.

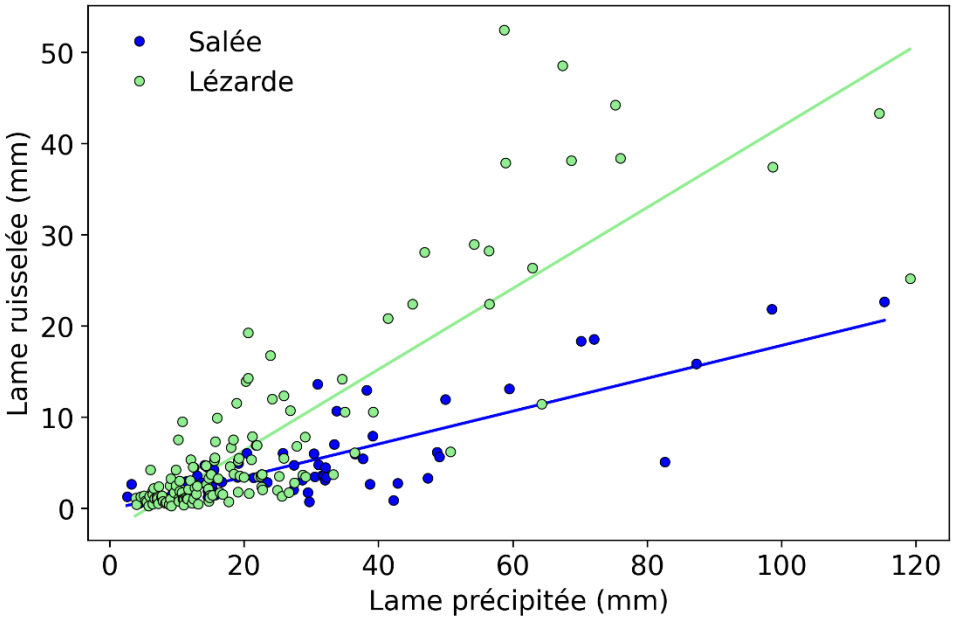

Figure 24 : Relation pluie-débit pour les deux bassins versants. Chaque point correspond à une crue.

La relation entre la pluie et le débit présente plusieurs points notables : sur les deux bassins versants, on observe une bonne corrélation entre le volume de ruissellement et le cumul des précipitations. Cependant, pour une même quantité de pluie, le bassin de la Rivière Salée génère moins de ruissellement que celui de la Rivière Lézarde. Enfin, une variabilité importante persiste dans les deux zones, indiquant que d'autres facteurs interviennent dans la réponse hydrologique.

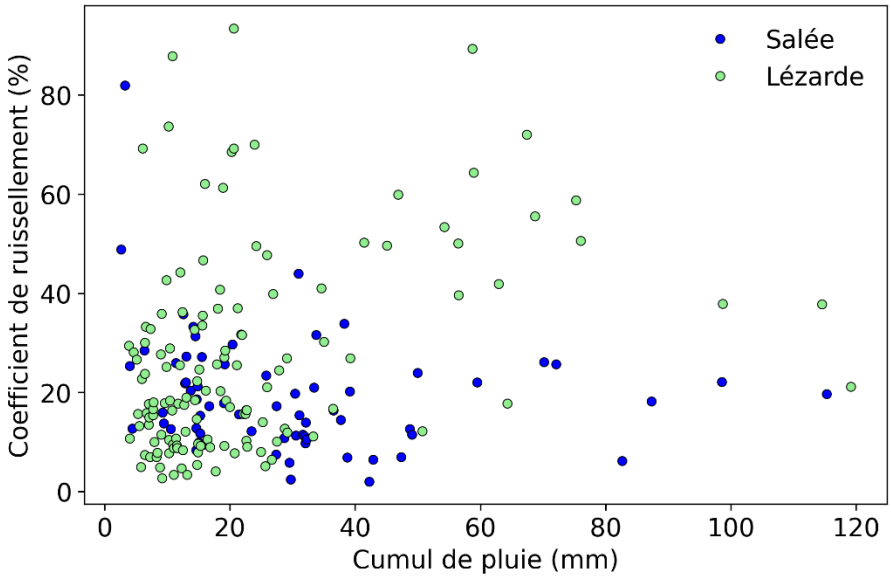

Figure 25 : Relation entre cumul de pluie et coefficient de ruissellement pour les deux bassins versants.

Le coefficient de ruissellement, soit la proportion de la pluie écoulée sous forme de débit à l'exutoire du bassin versant, est globalement plus fort sur le bassin versant de la Rivière Lézarde que celui de la Rivière Salée. La relation entre le coefficient de ruissellement et le cumul de pluie ne présente pas de corrélation nette surtout pour les cumuls de pluie importants.

Cette absente de corrélation montre qu'on ne peut pas se contenter d'approche simplifiée pour reproduire le fonctionnement de ces bassins et qu'il faut recourir à de la modélisation hydrologique spatialisée.

La bibliographie indique que les sols volcaniques possèdent généralement une forte capacité d'infiltration (Cattan *et al.*, 2009). Si le ruissellement était principalement dû à un dépassement de la capacité d'infiltration, on devrait observer une corrélation entre le coefficient de ruissellement et le cumul de pluie. La Figure 25 montre que ce n'est pas le cas ici. Ces observations suggèrent que le ruissellement pourrait être en partie contrôlé par des processus de saturation du sol liés à la succession des épisodes pluvieux. Cette hypothèse permettrait d'expliquer les coefficients de ruissellement élevés observés même pour des cumuls de pluie relativement faibles.

A retenir

L'analyse de la réponse pluie-débit sur les deux bassin versants étudiés suggère que le ruissellement pourrait-être en partie contrôlé par des processus de saturation du sol.

5.1.6. Traçage

a) Principe du traçage sédimentaire

L'objectif du traçage sédimentaire est de quantifier la contribution des sources d'érosion potentielles qui fournissent des particules (sédiments) au réseau hydrographique et, *in fine*, participe à l'envasement de la baie en aval (Figure 26). Afin de fournir des résultats robustes, des techniques de traçage sédimentaire ont été développées (Collins *et al.*, 2020). Celles-ci consistent à mesurer des propriétés physico-chimiques, tant au sein des sources potentielles dont peuvent provenir les sédiments à travers le paysage (échantillons de sol) qu'au sein des matériaux-cible prélevés dans le réseau hydrographique (matières en suspension transitant dans le réseau hydrographique). Ensuite, parmi les propriétés mesurées, la combinaison optimale de traceurs qui se révèlent à la fois conservatifs (*i.e.*, ils ne sont pas modifiés pendant l'érosion et le transport) et discriminants (*i.e.*, ils présentent des concentrations systématiquement différentes entre les sources) est sélectionnée et introduite dans un modèle de mélange. Celui-ci permet de quantifier la contribution (en %) de chacune des sources pour chacun des échantillons-cible (chaque prélèvement de matières en suspension dans chacune des rivières étudiées).

b) Méthodologie

La définition des sources potentielles de sédiments au sein du paysage doit être adaptée au contexte de chaque étude. Dans les bassins étudiés ici (*i.e.*, rivière Lézarde et rivière Salée), trois sources de sédiments potentielles ont été ciblées : 1) les horizons de surface des sols (0-2 cm) sous culture de banane ; 2) les horizons de surface des sols (0-2cm) sous culture de canne à sucre ; 3) les horizons profonds des sols (< 30 cm), qui regroupent toutes les structures exposant les horizons profonds du sol aux processus érosifs (*e.g.*, ravines, glissements de terrain, éboulements de berges).

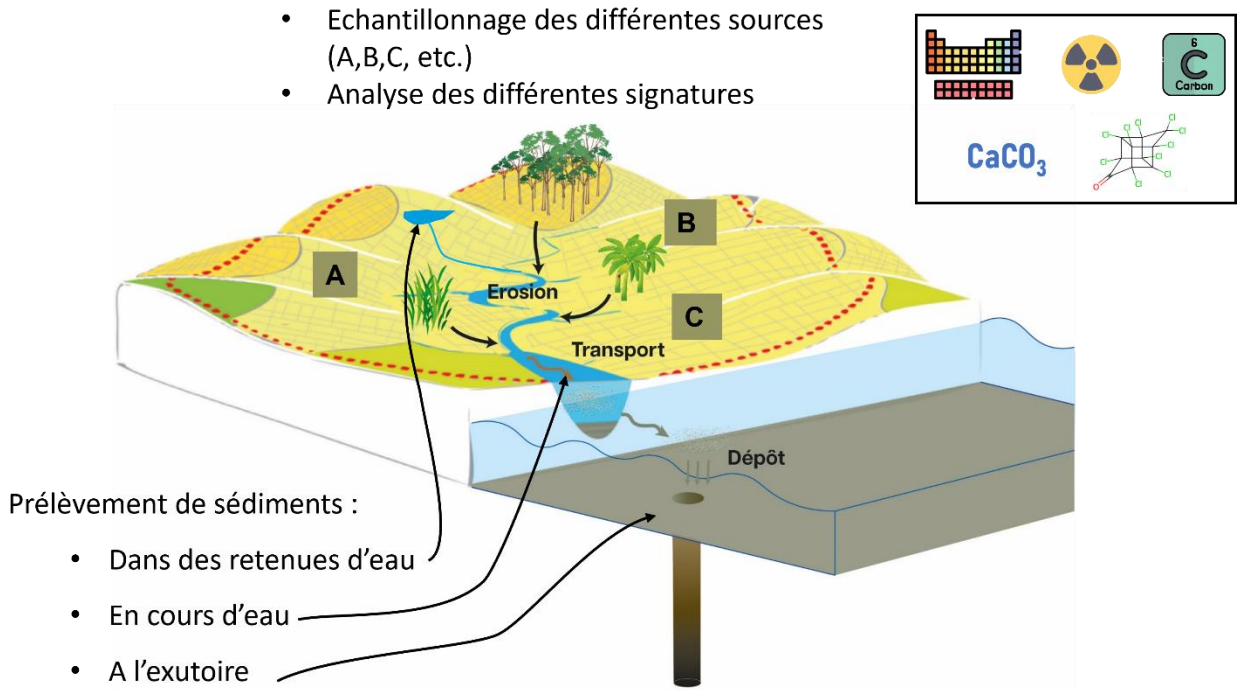

Figure 26 : Schéma conceptuel de la méthode de traçage sédimentaire appliquée à des bassins agricoles martiniquais. Les sources ciblées ici sont les cultures de banane, de canne et les structure exposant les horizons profonds aux processus érosifs (ravines, glissements, éboulements de berge). Les particules-cibles peuvent être prélevées dans les rivières (matières en suspension) ou dans la baie (sédiments déposés).

Les sources ont été prélevées avec des spatules en plastique dans des zones connectées au réseau hydrographique (Figure 28), après en avoir fait la demande auprès des propriétaires, le cas échéant, en échantillonnant préférentiellement les 2 cm superficiels du sol (les plus exposés aux processus d'érosion), en mélangeant une dizaine de prélèvements collectés au sein d'un rayon de 20 m à partir d'un point donné. Le Tableau 4 synthétise le type et le nombre d'échantillons de sources potentielles prélevés dans les bassins versants étudiés.

Type de source	Nombre d'échantillons dans le bassin de la Lézarde	Nombre d'échantillons dans le bassin de la Rivière Salée
Horizons de surface des sols sous culture de banane	n = 9	n = 4
Horizons de surface des sols sous culture de canne à sucre	n = 6	n = 7
Horizons profonds	n = 13	n = 8

Tableau 4 : Synthèse des types et nombres d'échantillons prélevés

Pour la collecte des particules issues de l'érosion des sources potentielles, des trappes (Figure 27) ont été installées pendant 1 an (juin 2022 – juillet 2023) en un point de chacune des rivières

étudiées (Figure 28). Ces tubes, solidement arrimés au lit de la rivière, permettent aux particules d'y pénétrer et, en réduisant la vitesse du courant, d'y sédimenter. Le matériel collecté, produit de l'érosion des sols dans le bassin en amont, permet de réaliser les analyses des propriétés de traçage. Au cours de la période d'échantillonnage (Juin 2022 – Juillet 2023), cinq échantillons de matières en suspension ont été collectés dans la Rivière Lézarde, et six l'ont été dans la Rivière Salée.

Figure 27 : Photo d'une trappe à sédiments installée dans la Rivière Lézarde et des sédiments récoltés

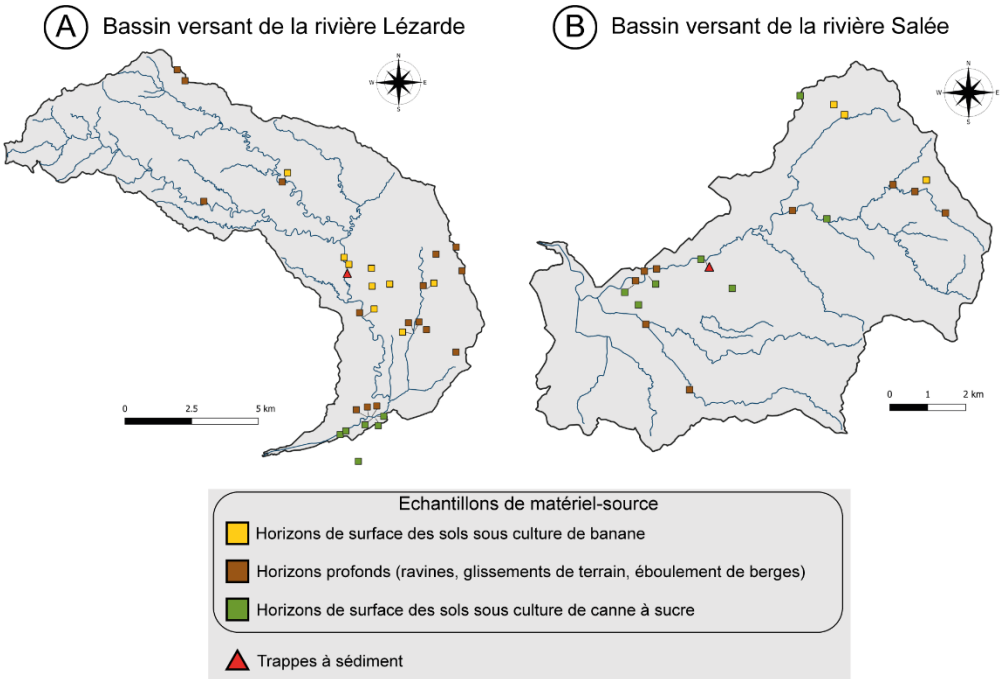

Figure 28 : Localisation des trappes à sédiments et des échantillons de matériaux sources dans les deux bassins versants étudiés.

c) *Résultats*

Afin de contextualiser les évolutions temporelles des contributions de sources estimées par le modèle pour les deux rivières, les débits mesurés sur la période étudiée ont été reportés sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Cela met en évidence, d'une part, des débits plus é levés pour la rivière Lézarde et, d'autre part, des variations temporelles fortes pour les deux rivières, qui s'explique par le contexte tropical (i.e., saison sèche vs saison humide). Ces conditions hydrodynamiques conditionnent fortement les flux de sédiments transitant dans les cours d'eau étudiés.

Au sein des échantillons de sédiments en suspension prélevés au niveau des stations de la rivière Lézarde et de la rivière Salée, il n'a pas été possible de distinguer les contributions des cultures de canne de celles de bananes. On suppose que les rotations culturales sont à l'origine de la confusion entre la signature des sols sous culture de banane et celle des sols sous culture de canne à sucre. En regroupant les deux types de cultures, on observe une contribution d'environ 60% des horizons profonds et de 40 % des horizons de surface (**Erreur ! Source du renvoi i ntrouvable.**),

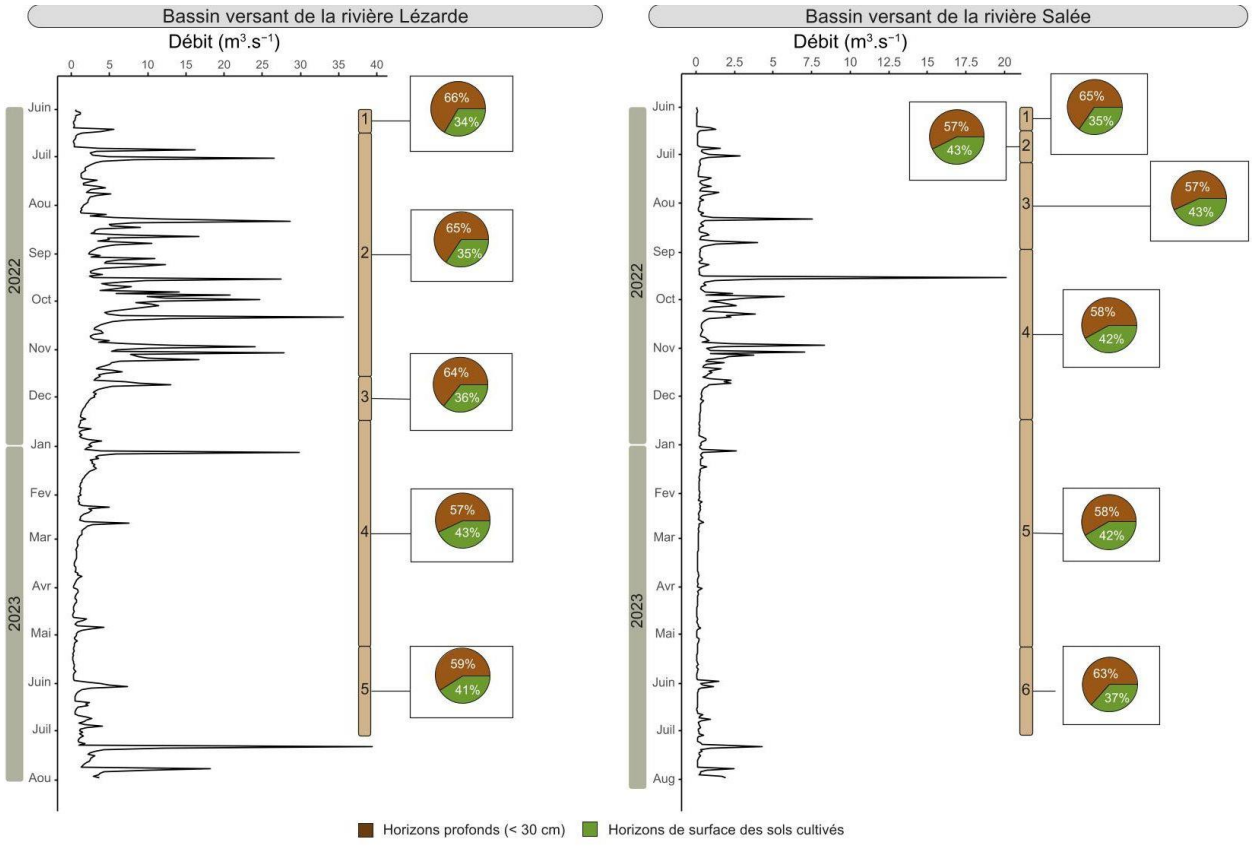

Figure 29 : Contributions moyennes des deux sources potentielles considérées (i.e., horizons de surface, horizons profonds) estimées par le modèle de mélange pour chaque échantillon de matières en suspension collecté dans les rivières Lézarde et Salée.

Cette contribution importante des horizons profonds aux sédiments transitant dans les cours d'eau démontre l'importance des processus d'érosion concentrée, notamment par les ravines profondes (en combinaison avec les glissements et l'érosion de berge) observées sur le terrain. Ces figures d'érosion peuvent notamment se former dans les bananeraies (Figure 30Figure 29), par l'effet conjugué de la pente et des pratiques agricoles, et ainsi mobiliser les horizons profonds du sol. De plus, le labour profond (Figure 30Figure 29) des parcelles de canne à sucre ou de bananeraie lors des rotations ou replantation peut également exposer les horizons profonds du sol aux processus érosifs.

Figure 30 : Ravine (gauche) et labour (droite) dans des bananeraies

Ces résultats montrent que les surfaces cultivées contribuent significativement à l'apport sédimentaire aux rivières Lézarde et Salée et que les pratiques agricoles jouent un rôle majeur dans l'ampleur des processus érosifs. L'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée dans la baie du Galion dans le cadre d'autres études (Bizeul *et al.*, 2024; Sabatier *et al.*, 2021) sur les transferts de chlordécone a permis de montrer l'évolution temporelle de la contribution des différentes sources de particules de sédiments (Figure 31). Les auteurs ont notamment mis en évidence une forte augmentation des flux terrigènes à partir des années 2000. Cette augmentation serait essentiellement due à l'érosion accrue des horizons de surface et profonds des sols sous bananeraie. Dans ces études, l'hypothèse avancée pour expliquer cette augmentation est celle de la modification des pratiques agricoles, notamment le désherbage chimique et le labour profond. Les résultats de la présente étude sont donc en accord avec les précédentes études portant sur les sources de sédiments en Martinique.

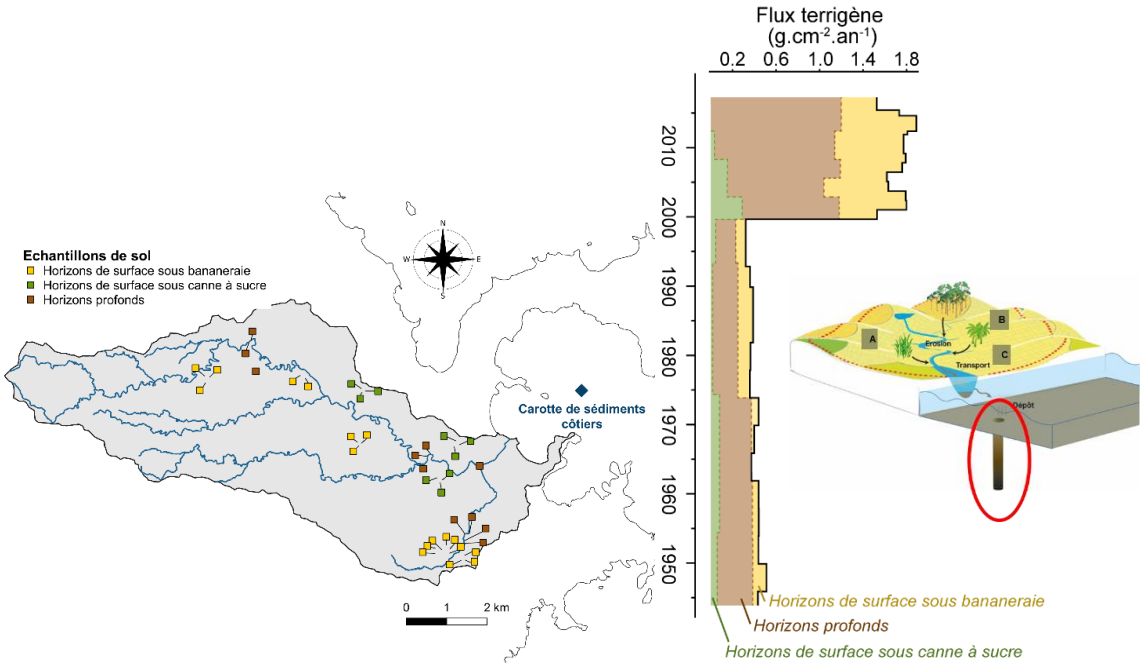

Figure 31 : Echantillonnage réalisé sur le bassin versant du Galion et analyse de la carotte sédimentaire réalisée dans la baie (représentation du flux terrigène et de l'origine des particules) (Bizeul et al.*, 2024)*

A retenir

La méthode de traçage utilisée a permis de mettre en évidence :

- une contribution des sols de surface équivalente en proportion à celle des sols de subsurface

- une forte augmentation des flux terrigènes à partir des années 2000

5.1.7. Evaluation quantitative de l'érosion

a) Erosion des sols

Site d'étude : le sous-bassin Duchêne

Comme indiqué précédemment dans ce rapport, peu de données sont disponibles pour quantifier l'érosion des sols aux Antilles françaises. Les quelques études que l'on trouve dans la littérature scientifique fournissent des informations sur de courtes périodes (1 à 2 ans) et elles ont été réalisées il y a plus de 20 ans. A notre connaissance, les taux d'érosion n'ont jamais été reconstruits sur le long-terme (i.e., plusieurs dizaines d'années). En l'absence de suivi à long terme, l'étude des archives sédimentaires permet de reconstituer les variations temporelles des taux d'érosion et de les mettre en relation avec les changements de gestion des sols.

Pour mener cette reconstruction à long-terme des taux d'érosion, une étude (Bizeul *et al.*, 2025) a été menée dans le sous-bassin Duchêne (0,16 km^2), situé dans la partie nord du bassin versant de la rivière Salée (Figure 32). En effet, ce site est propice à l'étude des processus érosifs. D'une part, sa surface réduite induit une connectivité directe entre les zones érodées et les zones de dépôts des particules issues de cette érosion. D'autre part, la présence d'une retenue agricole non perturbée en contrebas de versants cultivés depuis 1980 permet une analyse robuste des dépôts de sédiments qui s'y sont accumulés. Enfin, nous disposons d'un historique des changements d'occupation du sol depuis 1980 dans la zone (Registre Parcellaire Graphique, images satellite et aériennes, témoignages d'habitants).

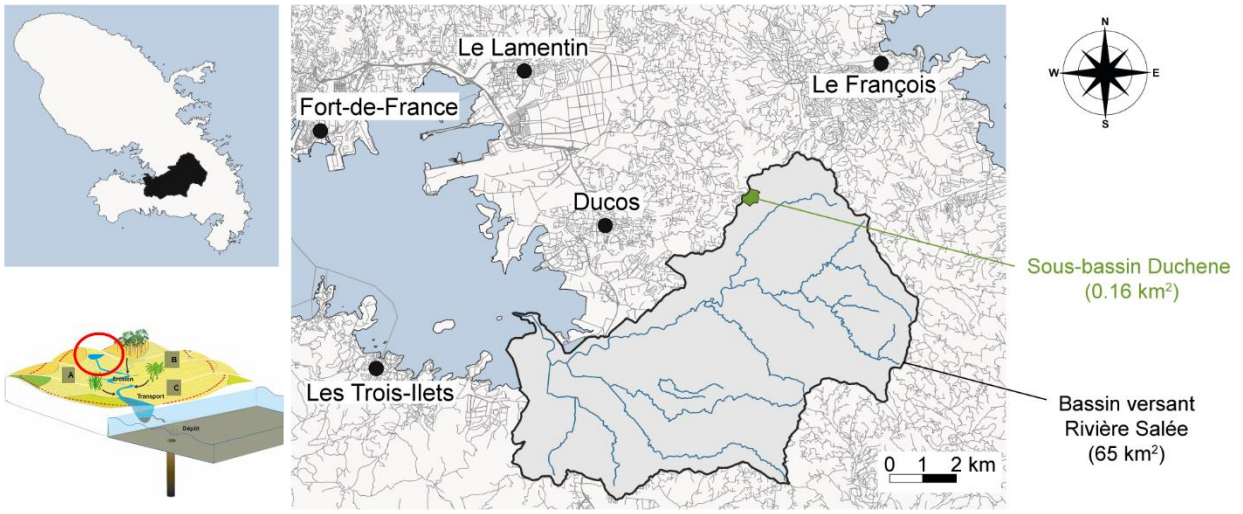

Figure 32: Localisation du site d'étude de Duchêne dans le bassin versant de la Rivière Salée

Au moment de l'échantillonnage (février 2023), le sous-bassin Duchêne était couvert de bananeraies dans sa partie sud et de canne à sucre dans ses parties nord et ouest (respectivement 15 % et 46 % du bassin versant). Des terres en jachère se trouvaient dans les parties occidentale et méridionale et couvraient 30 % du bassin versant. Deux zones d'habitation et de bâtiments agricoles sont également présentes au nord et au sud-ouest, couvrant 9 % de la surface du bassin versant. Un réservoir peu profond de 1,6 ha, utilisé pour l'irrigation, est situé à l'exutoire du bassin versant, dans la partie orientale (Figure 33). Ce réservoir agricole permet de piéger efficacement les sédiments. A notre connaissance, ce réservoir n'a pas connu de travaux de curage depuis sa création à la fin des années 1970.

Les sédiments carottés dans la retenue (zone d'accumulation) ont permis de réaliser une quantification de l'érosion.

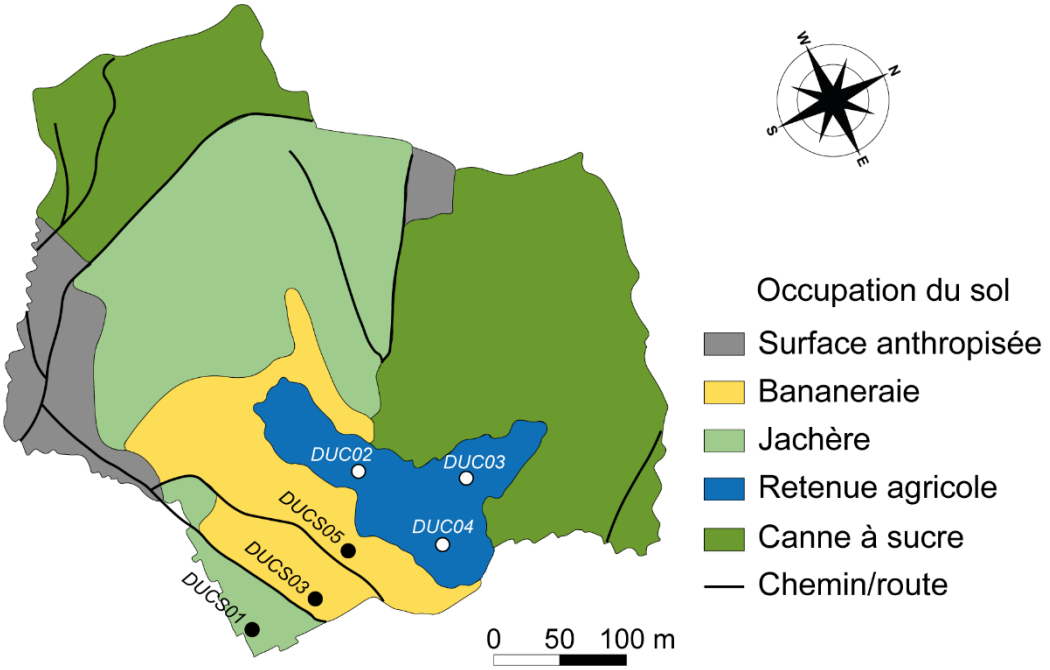

Figure 33 : Occupation du sol dans le sous-bassin Duchêne et localisation des carottages de sols (en noir) et de sédiments (en blanc)

Trois carottes de sédiments ont été prélevées dans la retenue agricole présente en aval du versant étudié. Puisque les sédiments sont les produits de l'érosion qui survient en amont, et en supposant que ces trois carottes sont représentatives des sédiments accumulés dans l'ensemble de la retenue, il est alors possible de quantifier les taux d'érosion à l'échelle du sous-bassin versant Duchêne. Pour ce faire, à partir de l'analyse des carottes de sédiments, on extrapole le volume total de sédiments déposés à l'ensemble de la retenue sur la base des trois carottes sédimentaires. De plus, grâce à l'établissement de modèles d'âge, nous sommes capables d'attribuer un âge à chacune des couches des carottes de sédiments. En compilant l'ensemble de ces informations, il est alors possible d'estimer des taux d'érosion moyens annuels à l'échelle du bassin versant. Les tendances temporelles des taux d'érosion (Figure 34) reconstitués montrent des taux d'érosion allant en moyenne de 7,9 à 11,9 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. De plus, des variations significatives de ces taux ont été observées au cours du temps, suivant un schéma cyclique allant de 2 à 8 ans. Dans l'ensemble, une tendance générale à l'augmentation de l'érosion est observée entre 1980 et 2023. En effet, la dernière phase d'augmentation, survenue de 2011 à 2019, présente les taux d'érosion les plus élevés qui aient été observés depuis 1980, avec des valeurs comprises entre 10,9 et 11,7 $t.ha^{-1}.an^{-1}$.

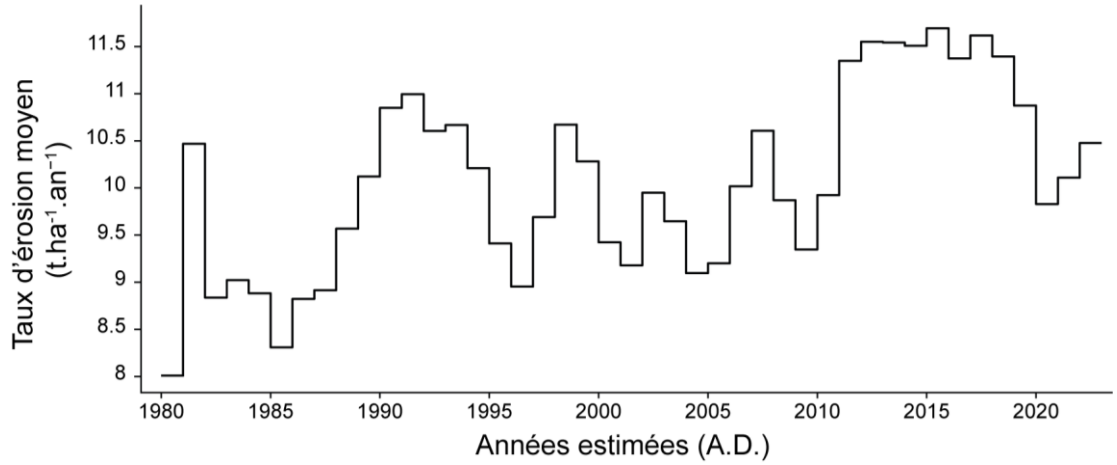

Figure 34 : Variations temporelles des taux d'érosion moyens estimés pour le sous-bassin Duchêne

Synthèse des résultats

L'étude du sous-bassin Duchêne a permis de mettre en évidence des taux d'érosion élevés, de l'ordre de 10 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, avec des valeurs dépassant largement les taux d'érosion tolérable en contexte tropical. Ces 20 dernières années, l'intensification des pratiques agricoles (labour profond, utilisation d'herbicides) a conduit à une accélération des transferts de particules vers le réservoir agricole (Figure 34 et Figure 35).

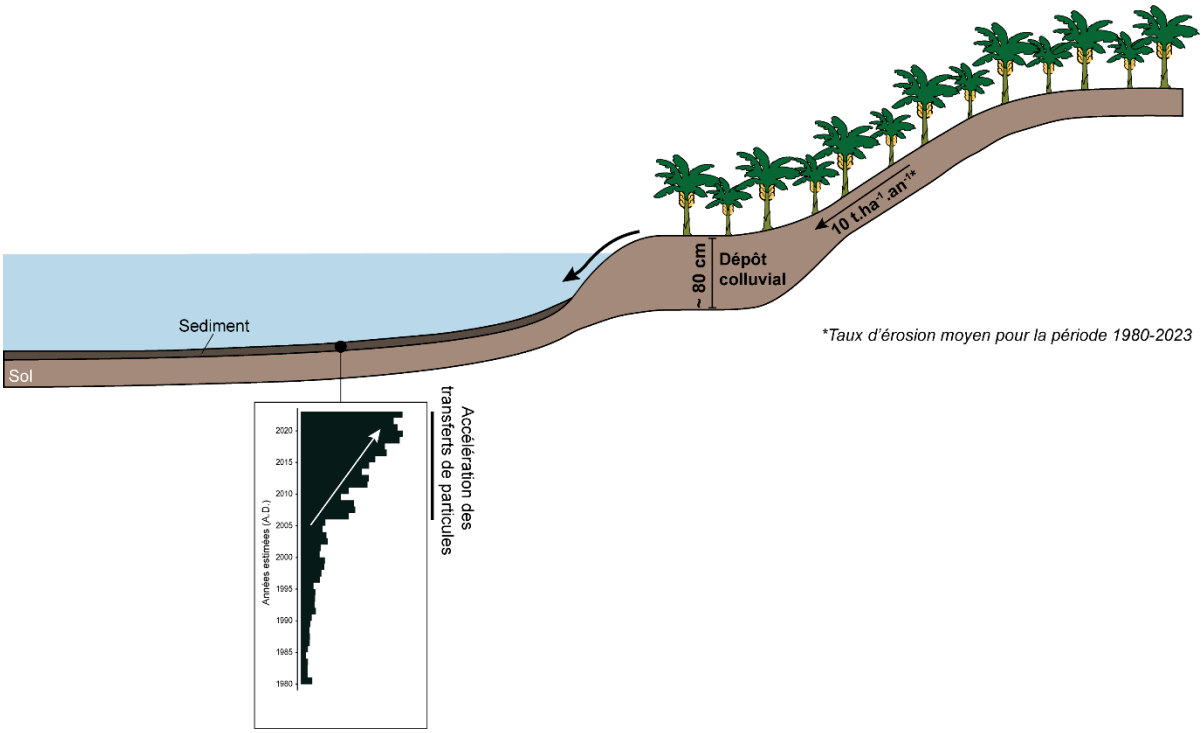

Figure 35 : Synthèse des résultats obtenus par l'étude du sous-bassin versant Duchêne

b) Apport de sédiments par Glissement de terrain

Parmi les différents types de glissements de terrain martiniquais identifiés par Nachbaur *et al.*, (2024), les glissements/coulées qui se propagent sur les plus longues distances (sur plusieurs dizaines voire une centaine de mètre) sont les plus susceptibles d'apporter des sédiments jusqu'au réseau hydrographique. Ils correspondent à des glissements superficiels de plusieurs centaines à un millier de mètres cubes qui ont la particularité de décaper les terrains argileux sur une épaisseur métrique et de se propager en incisant le versant. Ils sont définis par une forte proportion liquide (environ ¼ d'eau et ¾ de matériau solide). A l'inverse, les glissements profonds mobilisent des volumes beaucoup plus conséquents mais se propagent sur une longueur généralement limitée.

Par ailleurs, les glissements superficiels sont les seuls phénomènes gravitaires pour lesquels il serait, dans certaines conditions, envisageable de déployer du génie écologique.

Une carte d'aléa « Apport de sédiment à la Grande Baie par glissement »

La carte d'aléa est obtenue en combinant classiquement un niveau d'intensité et une probabilité d'occurrence.

Le niveau d'intensité a été considéré comme moyen quel que soit le type de glissement superficiel.

La probabilité d'occurrence a été définie ici comme la probabilité qu'un glissement se déclenche, dégénère en coulée puis que les matériaux atteignent le réseau hydrographique. La connectivité au réseau hydrographique a été appréciée grâce à des outils dédiés à la prise en compte de la propagation (simulation Flow R déployée ici). Ce travail s'est appuyé sur les travaux déployés pour la cartographie de l'aléa Glissement remis à la DEAL en 2024 (Nachbaur *et al.*, 2024) (Figure 36).

		Probabilité de départ sous forme de coulée	
		Fort (Pente > 35°)	Moyen (Pente < 35°)
Probabilité d'atteinte du réseau hydrographique	Fort	Probabilité de propagation de niveau fort ET connexion au réseau hydrographique	Fort	Moyen
	Moyen	Probabilité de propagation de niveau moyen ET connexion au réseau hydrographique	Moyen	Moyen

Figure 36 : Principe considéré pour cartographier la probabilité qu'un glissement superficiel n'atteigne le réseau hydrographique

La Figure 37 présente les cartes d'aléas obtenues.

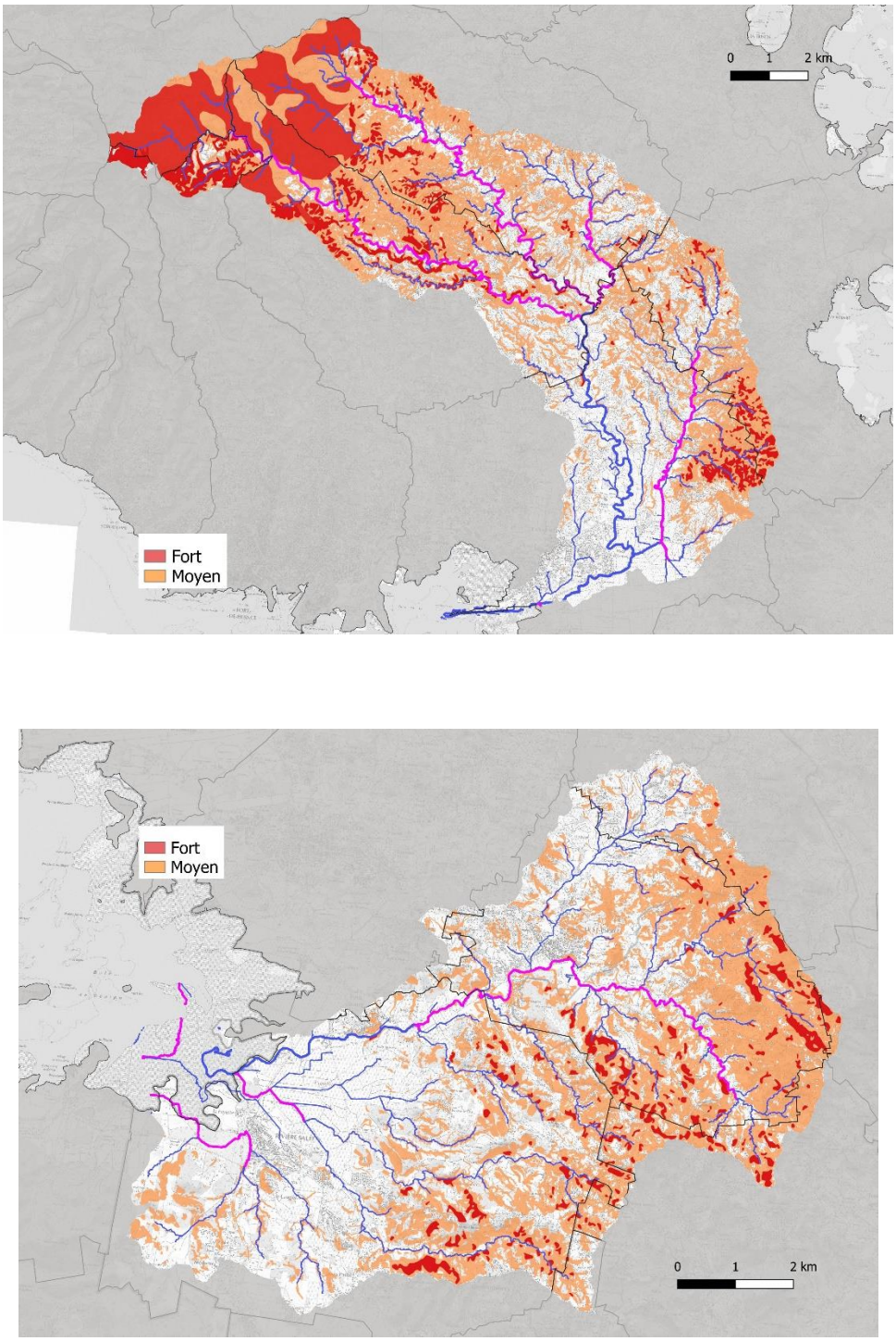

Figure 37 : Carte de l'aléa « transport de sédiments par glissement jusqu'au réseau hydrographique ». Ainsi, le niveau d'aléa fort correspond aux zones où la probabilité que des sédiments atteignent le réseau hydrographique est la plus forte.

Estimation d'un ratio de tonnage pour un évènement de pluie décennale (à cinquantennale)

Bien que l'inventaire capitalise plus de 600 glissements superficiels sur le territoire martiniquais, ce catalogue ne peut être considéré comme représentatif car ces évènements sont de taille limitée et affectent des versants escarpés généralement peu habités.

Pour pallier cet artéfact, il a été choisi de se focaliser sur un évènement pluviométrique suffisamment bien documenté pour que l'inventaire des glissements associés soit considéré comme complet et représentatif : les pluies de mai 2009. La période de retour de cet épisode est estimée entre décennale et cinquantennale selon les indicateurs Météo France[2].

Un calcul de volume de sédiments a été fait sur plusieurs petits-bassins versants à partir de l'emprise de la zone de départ et considérant une emprise mobilisée d'épaisseur métrique. Pour pouvoir comparer les valeurs des petits-bassins versants, ce volume a été rapporté à la surface de l'aléa de départ de niveau fort, soit la zone pour laquelle on peut considérer que le départ de coulée est fort.

Ainsi, la densité des évènements de 2009 donne un ratio minimal de volume de sédiments qui peuvent rejoindre le réseau hydrographique pour un évènement pluviométrique décennale et cinquantennale.

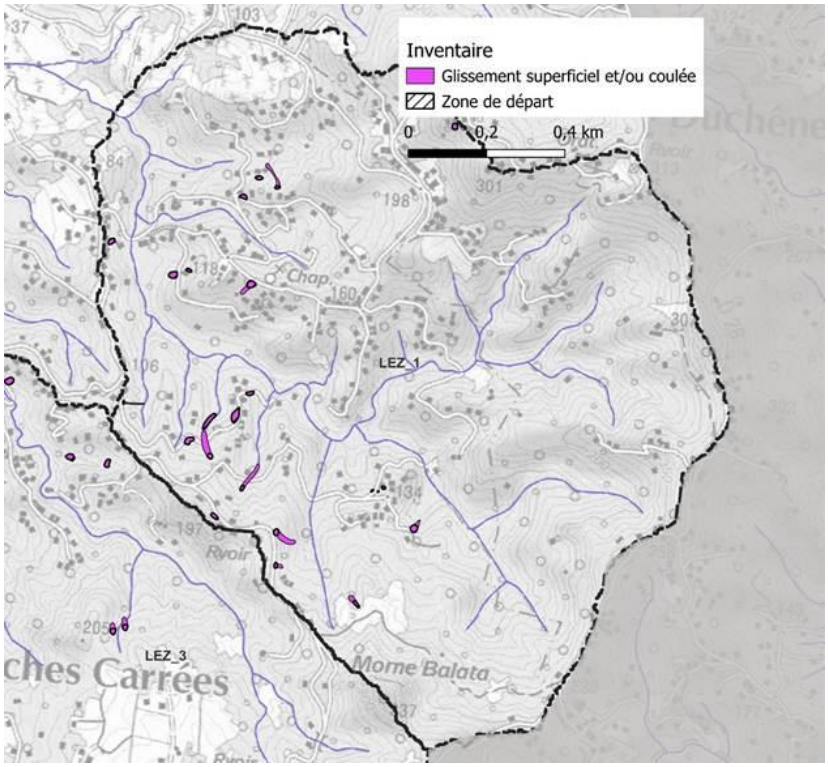

Figure 38 : Exemple de sous-bassin versant bénéficiant d'un inventaire complet des glissements déclenchés par les pluies du 5 mai 2009 sur la commune du Lamentin

[2] Direction Interrégionale Antilles-Guyane de Météo France (2009). Rapport concernant les pluies intenses en Martinique du 20 avril 2009 au 6 mai 2009. Version 1.1 du 25/05/2009.

Volume de sédiments érodés par l'action des glissements de terrain

La Figure 39 donne l'ordre de grandeur des volumes de sédiments apportés par des glissements de terrain jusqu'au réseau hydrographique par bassin versant pour un événement climatique décennal (à cinquantennal). Ce volume est calculé à partir du ratio calculé précédemment rapportée à l'emprise de l'aléa connecté au réseau hydrographique de chaque bassin versant.

Ceci permet d'avancer que :

- La quantité de sédiments mobilisés par glissement de terrain est dix fois plus importante sur le bassin versant de la Lézarde que sur celui de Rivière Salée ;
- Ce volume est de l'ordre de 10 000 t/an pour la Lézarde et de 1 000 t/an pour la Rivière Salée.

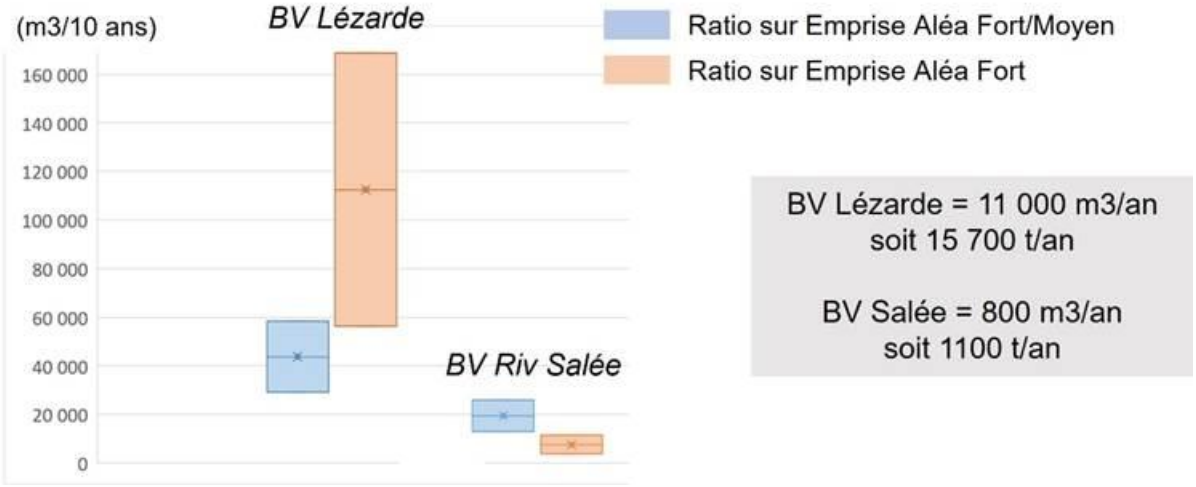

Figure 39 : Ordre de grandeur de volume de sédiments mobilisés par glissement de terrain sur chaque bassin versant

c) Apport de sédiments par Erosion de berge

A l'échelle d'un bassin versant, une rivière comme la Lézarde (35,8 km) ou la rivière Salée (16,1 km) présentent de fortes variations du processus d'érosion de berge le long de leur linéaire, selon la nature des berges et le contexte topographique notamment.

De grands types de processus d'érosion sur les berges

Une étude de 2012 (Nachbaur *et al.*, 2012) menée pour la commune du Lamentin a permis de distinguer, sur le tronçon terminal de la Lézarde, deux grands types de berges selon leur dynamique spatio-temporelle :

- Des berges à forte mobilité avec un recul compris entre 15 m et 60 m en 60 ans. Sur ces portions, la dynamique est majoritairement contrôlée par des processus localisés de type glissements de terrain. On constate plus précisément :
    - Des portions où la rivière présente une dynamique de divagation latérale forte à l'échelle centennale. Dans ce secteur, les berges sont moyennement consolidées, constituées d'alluvions anciennes essentiellement limono-sableuses, subverticales, avec une hauteur comprise entre 5 et 7 m. Le recul historique

constaté est de 30 m en moyenne sur 60 ans pouvant atteindre 60 m localement. Sur le tronçon étudié (16 km), ces zones occupent 20 % du linéaire ;

- Des berges qui présentent une vitesse de recul significatif mais sans mobilité latérale du lit mineur. Sur le tronçon étudié (16 km), ces zones occupent 30 % du linéaire.

- Des berges très peu mobiles. Ces portions de berges subissent une érosion diffuse par détachement de particules dont le cumulé sur les 60 dernières années présente un recul de moins de 5 m (limite de résolution de l'étude). Les coefficients d'érodibilité ont été affinées de manière à ne pas dépasser les observations. Sur le tronçon étudié (16 km), ces zones occupent 50 % du linéaire.

Sur le linéaire étudié en 2012 (16 km), le volume de sédiments produit annuellement a été estimé à partir de la hauteur des berges et de la moyenne des vitesses historiques observées sur les 60 dernières années. Ce volume a été estimé par tronçon de berges homogènes puis regroupé selon le type de mobilité.

Ces calculs nous confirment que sur les cours d'eau avec un ordre de Strahler supérieur à 3, les processus de type localisé (érosion de berges par glissement de terrain) peuvent participer de manière largement plus significative à la quantité de sédiments érodés que l'érosion diffuse. Les secteurs de divagation de lit, quand la géologie le permet, contribuent ici à hauteur de 83% de sédiments soit 87% si on le rapporte au linéaire de zone divagante. Ceci rejoint les constats de (Rodrigues *et al.*, 2006) dans d'autres contextes.

L'identification du processus d'érosion dominant des berges

Fort de ce constat, des critères permettant de connaitre a priori, la dynamique des berges ont été identifiés à partir des dynamiques observées sur le tronçon terminal de la Lézarde (Nachbaur *et al.*, 2012).

Il ressort que la nature des berges (d'après la carte du régolithe (Lacquement *et al.*, 2022),la carte géologique (Westercamp *et al.*, 1990) et la pente du lit (source référentiel RHUM[3]) suffisent à identifier, sur le site pilote, les portions de berges les plus dynamiques.

Ces considérations ont donc été extrapolées sur les principaux cours d'eau des bassins versants étudiés (cours d'eau avec rang de Strahler supérieur à 3) permettant ainsi de distinguer *a priori* les berges les plus mobiles soumises à des processus de glissement de terrain des berges quasi-stables sujets à des processus d'érosion diffuse (cf. Figure 40.c.).

[3] Mise en œuvre du référentiel hydromorphologique ultra marin (RHUM). Adaptation du système relationnel d'audit hydromorphologique (SYRAH) dans les DOM. Rapport Méthodologique. Version juillet 2014.

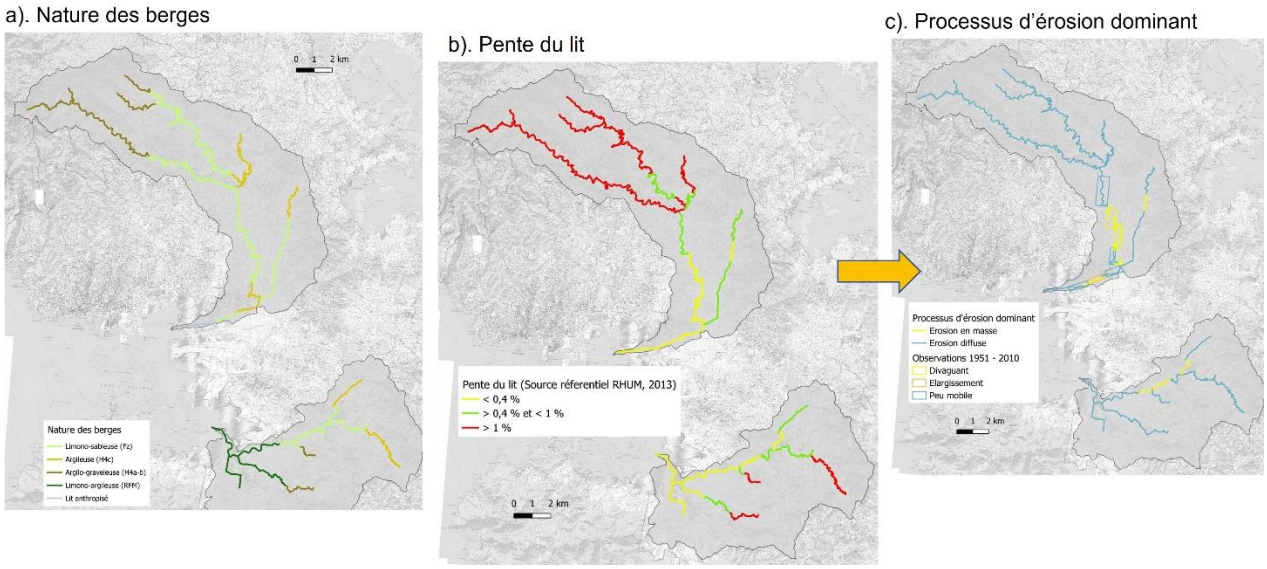

Figure 40 : Critères (a) et b) identifiés comme discriminants sur le site pilote (tronçon terminal de la Lézarde) pour déterminer le processus d'érosion dominant sur chaque portion de berge (c)

Volume de sédiments érodés depuis les berges

Sur ces deux bassins versants, on admet donc que l'érosion vient majoritairement de processus gravitaires localisés sur certaines berges spécifiques identifiées au préalable (cf. Figure 40.c.).

Le volume de sédiments produits annuellement par ces berges a été estimé à partir de la hauteur des berges et leur vitesse de recul. Cette dernière a été estimé à dire d'expert à partir des vitesses historiques observées sur le site pilote (entre 0,15 et 0,5 m/an) et des analogies suivant leur configuration géologique.

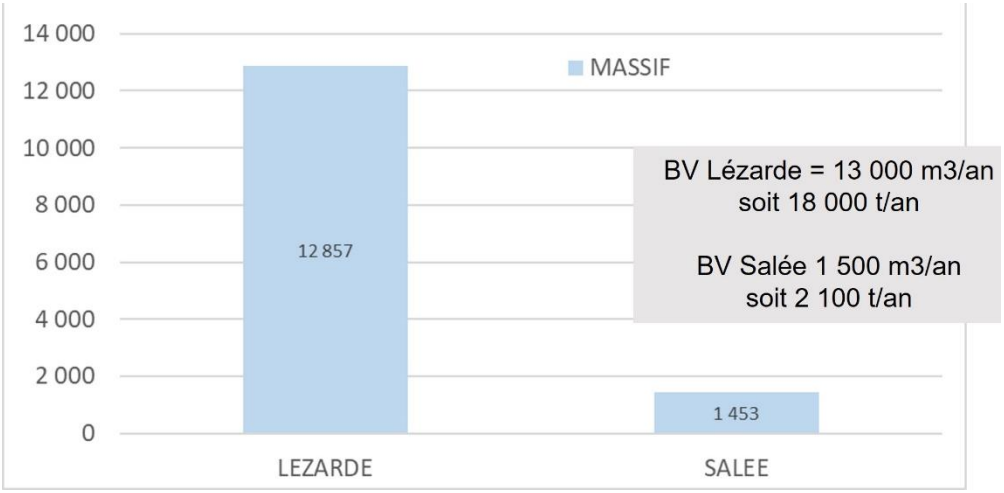

Figure 41 : Ordre de grandeur des volumes de sédiments érodés en $m^3.an^{-1}$ par processus gravitaire depuis les berges

Les vitesses de recul estimée sont représentées dans un atlas au 1/10 000ème en Annexe 6.

A retenir

L'étude du sous-bassin Duchêne a permis de mettre en évidence des taux d'érosion élevés pour les zones pentues cultivées, de l'ordre de 10 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, avec des valeurs dépassant le taux d'érosion tolérable estimé en contexte tropical.

La quantité de sédiments mobilisés par glissement de terrain est dix fois plus importante sur le bassin versant de la Lézarde que sur celui de Rivière Salée. Ce volume est de l'ordre de 10 000 t/an pour la Lézarde et de 1 000 t/an pour la Rivière Salée.

Le volume de sédiments produits annuellement par érosion de berges a été estimé à 18000 $t.an^{-1}$ pour la Lézarde et 2100 $t.an^{-1}$ pour la Rivière Salée.

5.2. MODELISATION DES EXPORTS SEDIMENTAIRES DES BASSINS VERSANTS DE LA LEZARDE ET DE LA RIVIERE SALEE VERS LA GRANDE BAIE DE FORT-DE-FRANCE

La modélisation du ruissellement et de l'érosion a été effectuée avec le modèle WaterSed décrit ci-dessous. Un des verrous pour son application est le manque de données dans le contexte d'îles volcaniques tropicales. Les interactions entre sols volcaniques et pluviométrie importante sont rarement quantifiées, rendant la conceptualisation des processus et la paramétrisation d'un modèle difficile. L'étude bibliographique réalisée ainsi que la collecte des données disponibles ont permis de tester et valider certaines hypothèses. Cette phase de modélisation a été réalisée conjointement avec la phase 2 du projet SEA9-chlordécone (BRGM/RP-74555-FR). Nous décrivons ici rapidement les grands principes, étapes et conclusion de la paramétrisation et validation de la modélisation sur les bassins versants de la Rivières Lézarde et de la Rivière Salée.

5.2.1. Présentation du modèle WaterSed

Le logiciel WaterSed, dont les aspects techniques sont précisés par Grangeon *et al.*, (2021), Landemaine *et al.*, (2023) et Vandromme *et al.*, (2023), permet de simuler le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle jusqu'à celle du bassin versant pour un évènement de pluie donné ou pour une séquence d'évènements pluvieux. Cet outil permet de tester des scénarios d'aménagement d'hydraulique douce (fascine, haie, bande enherbée ou mare), des scénarios de changement d'occupation des sols et/ou de pratiques culturales ou encore d'étudier les conséquences de scénarios futurs de changements climatiques. Le modèle est intégré à SAGA GIS. Il est open-access et open-source, disponible au téléchargement sur le site web www.watersed.fr.

Le modèle est événementiel : il fonctionne à l'échelle de l'événement de pluie, et simule le ruissellement et l'érosion à l'échelle de la maille. Concernant le ruissellement, sont explicitement résolus le ruissellement par dépassement de capacité d'infiltration (ou ruissellement « hortonien ») se produisant lors d'événements pluvieux intenses ou sur sols avec de faibles capacité d'infiltration (ex. sol présentant une croûte de battance), mais aussi le ruissellement par saturation des sols, à la faveur d'événements pluvieux récurrents qui vont remplir la porosité des sols. Parmi les modèles d'érosion existants dans la littérature scientifique, la prise en compte simultanée de ces deux processus est une spécificité rare. En ce qui concerne les processus d'érosion, l'érosion diffuse et l'érosion en ravines sont simulées.

Les flux d'eau et de particules générés localement sont propagés par le modèle d'amont en aval selon le gradient de plus grande pente ou peut être modifié en cas de présence d'aménagements. Au cours du transfert, les flux d'eau peuvent se réinfiltrer si le ruissellement atteint une zone qui n'est pas saturée, et les flux de particules peuvent se déposer, par exemple à la faveur d'une diminution de la pente locale ou d'une augmentation de la rugosité (ex. présence d'une végétation dense).

5.2.2. Principe de la modélisation pseudo continue

Bien que le modèle soit événementiel, la prise en compte des processus de saturation nécessite de considérer la dynamique temporelle de plusieurs événements pluvio-ruisselants. Ainsi, le modèle conserve à la fin de la simulation de chaque événement pluvio-ruisselant l'état de saturation du sol, puis l'utilise comme condition initiale de la simulation suivante. Pendant la période entre deux événements pluvio-ruisselant, un bilan hydrologique simplifié est mis en place, au cours duquel l'état de saturation du sol est modifié : augmentation par la quantité de pluie précipitée, diminution par perte profonde et évapotranspiration. Cette opération est répétée sur la totalité de la période de simulation. Ainsi, tous les événements pluvieux ayant généré une crue sont simulés explicitement par le modèle, tandis que ceux qui se produisent entre deux crues sont pris en compte dans un bilan hydrologique opéré entre deux simulations

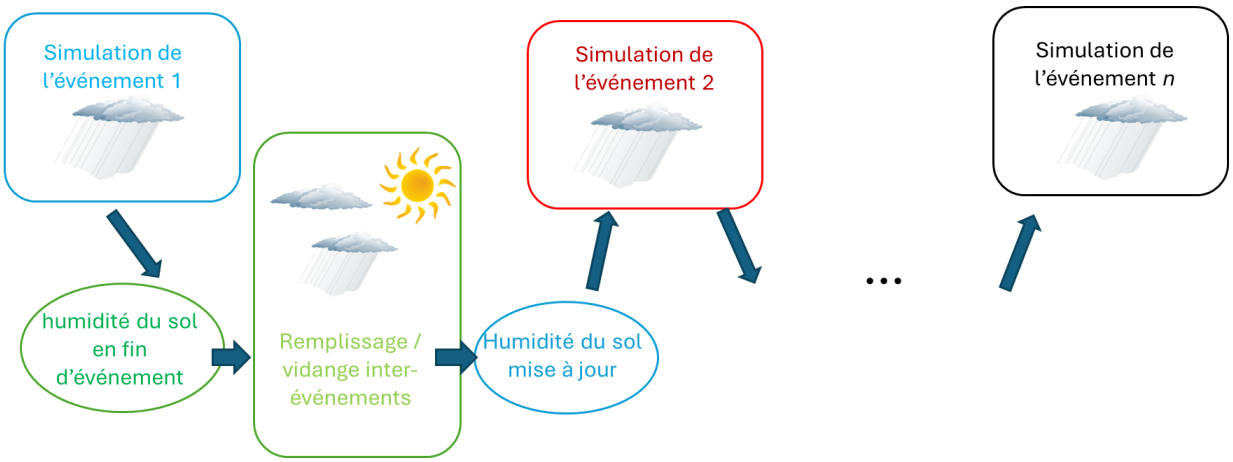

Figure 42 : Principe de la chaine de modélisation opérée sur une saison hydrologique

5.2.3. Spécificité du contexte antillais

Il existe peu d'études hydrologiques sur des îles volcaniques tropicales dans la bibliographie scientifique. Un synthèse récente sur le sujet (Tarasova *et al.*, 2024) montre que les études en milieu tropical sont extrêmement peu nombreuses. Zang *et al.* (2023) soulignent par ailleurs le manque d'études portant spécifiquement sur la thématique du ruissellement en milieu volcanique, constat également repris par Grangeon *et al.* (2025). Ce manque est d'autant plus prononcé concernant la thématique de l'érosion des sols et du transport de particules, extrêmement peu documentés dans ces milieux. Les interactions entre sols volcaniques et pluviométrie importante sont rarement quantifiées, rendant la conceptualisation des processus et la paramétrisation d'un modèle difficile.

5.2.4. Paramétrisation

Dans un premier temps, les 17 classes d'occupation du sol déterminées dans le paragraphe 4.2 ont été complétées à l'aide de la BDTOPAGE et de la BDTOPO (ajout des cours d'eau et des chemins). Puis une classification de la sensibilité au ruissellement et à l'érosion de chacune des classes a été établie à dire d'expert. Cette classification se base sur des données qualitatives et quantitatives. Il s'agit notamment de données de la bibliographie, des échanges avec les partenaires du projet et acteurs locaux (qui disposent d'une expertise naturaliste de terrain (CIRAD, INRAe, DAAF, FREDON), et des observations de terrain menées dans le cadre de ce projet.

Classe d'occupation des sols	Sensibilité au ruissellement	Sensibilité à l'érosion
Mangrove	1	1
Forêt	2	5
Sol nu	3	18
Prairie	4	8
Palmiers	5	10
Labour	6	16
Jardins et espaces urbains	7	9
Formation végétale herbacée indifférenciée	8	7
Végétation arbustive	9	6
Maraîchage	10	17
Arbres, jardins, vergers	11	11
Autres cultures	12	14
Canne à sucre	13	13
Bananeraies	14	15
Ravine	15	3
Chemins	16	12
Fossé	17	4
Ecoulement pluvial urbain	18	1
Non bâti asphalté	19	2
Bâti	20	1
Cours d'eau	21	1
Surfaces en eau	21	1

Tableau 5 : Classes d'occupation des sols retenues. Les valeurs des classes de sensibilité représentent un classement à dire d'expert.

Une classification a également été réalisée en fonction des classes de nature des sol (cf. 0) (sols à texture argileuse et limoneuse)

5.2.5. Calibration et validation

Faute de mesures disponibles en tout point des zones d'intérêt, le travail présenté ici s'est concentré sur l'utilisation des données acquises par les stations de jaugeage décrite dans le paragraphe 5.1.5. Il n'a pas été possible dans le cadre de ce projet de trouver de chroniques de turbidité disposant de valeurs de concentration associées sur les deux zones d'intérêt. Ces chroniques sont habituellement combinées aux valeurs de débit mesurées au niveau de station de jaugeage afin d'être en mesure de calculer des flux à haute fréquence et ainsi calibrer et valider les modélisations (Grangeon *et al.*, 2021).

La calibration a été réalisée sur l'année 2022 et la validation sur l'année 2023. La calibration sur l'année 2022 a été réalisé de la manière suivante :

- Tests sur bassin versant de la Rivière Salée : ce bassin versant présente moins de variabilité spatiale que le bassin versant de la Lézarde, en termes de nature des sols. Sur le bassin versant de la Rivière Salée, les sols ont une texture argileuse avec des sols très argileux (argile lourde) à proximité des cours d'eau. Le bassin versant de la Rivière Lézarde présente une texture supplémentaire plus limoneuse sur sa partie amont (Figure 14).
    - Ces premiers tests ont permis de mettre en évidence que les résultats des modélisations étaient sensibles au volume de stockage des sols et à leur vitesse de vidange, mettant en

évidence le rôle de la saturation des sols dans la génération du ruissellement. La Figure 43 présente les résultats obtenus en ne considérant qu'une texture argileuse sur tout le bassin versant de la Rivière Salée avec une épaisseur de sol constante.

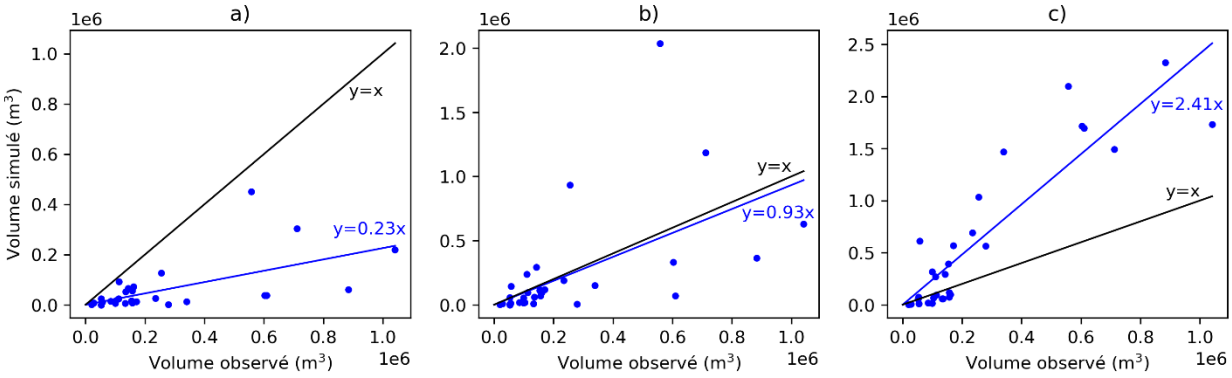

Figure 43 : Exemples de résultats obtenus pour différentes des épaisseurs de sol constante sur le bassin versant (200, 500 et 10000 mm)

- La prise en compte de 2 textures différentes (une texture argileuse épaisse et une texture très argileuse moins épaisse et moins perméable améliore les résultats.
- Une valeur de vidange différente pour chaque texture (plus faible pour la texture très argileuse que pour la texture argileuse) améliore également les résultats.
- L'observation des résultats obtenus pour des événements de pluie importants et rapprochés ont mis en évidence un « effet piston », c'est-à-dire que plus les sols sont saturés, plus la pression dans la porosité est importante et conduit à des flux contribuant à sa vidange. Cela signifie que lorsque plusieurs pluies importantes et rapprochées se succèdent, la vitesse de vidange est plus importante que lors de périodes plus sèches, cette variation de vitesse de vidange en fonction de l'antécédant pluvieux a été prise en compte et a permis d'améliorer les résultats des modélisations.

- Application des paramètres obtenus pour le bassin versant de la Rivière Salée au bassin versant de la Rivière Lézarde : en rajoutant une texture de sol limoneuse, cette texture limoneuse étant supposée plus épaisse, plus perméable et avec une vitesse de vidange plus élevée.

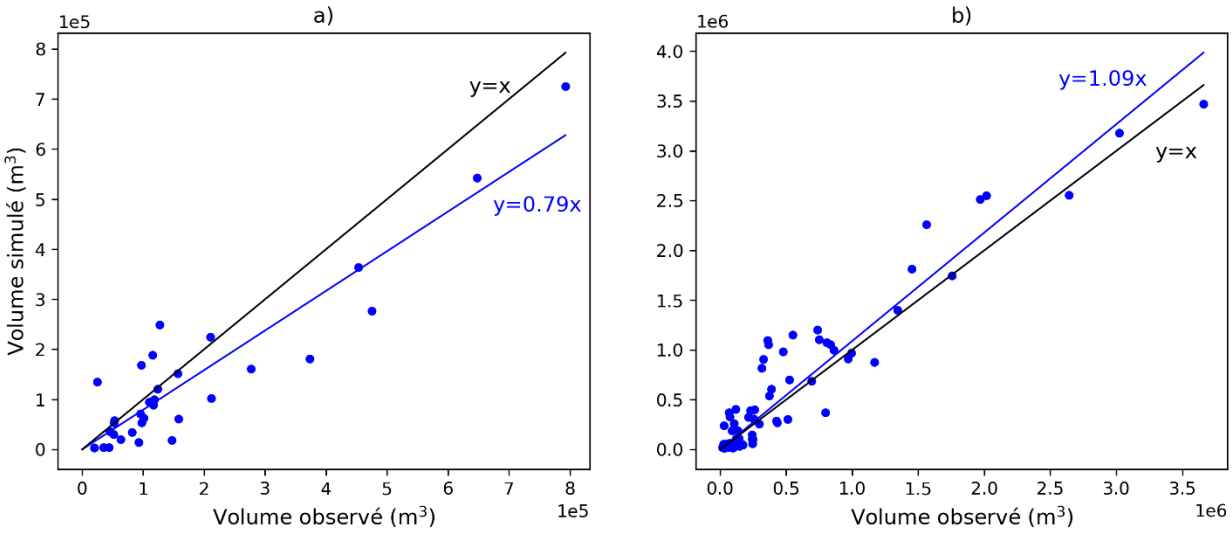

Figure 44 : Résultats obtenus pour la calibration (année 2022) réalisée sur le bassin versant de la Rivière Salée (a) et pour le bassin versant de Rivière Lézarde (b) en appliquant les même paramètres (épaisseurs de sol et vitesses de vidange en fonction de la texture des sols)

- Simulation de l'année 2023 sur les 2 bassins versants en utilisant les paramètres obtenus pour la calibration

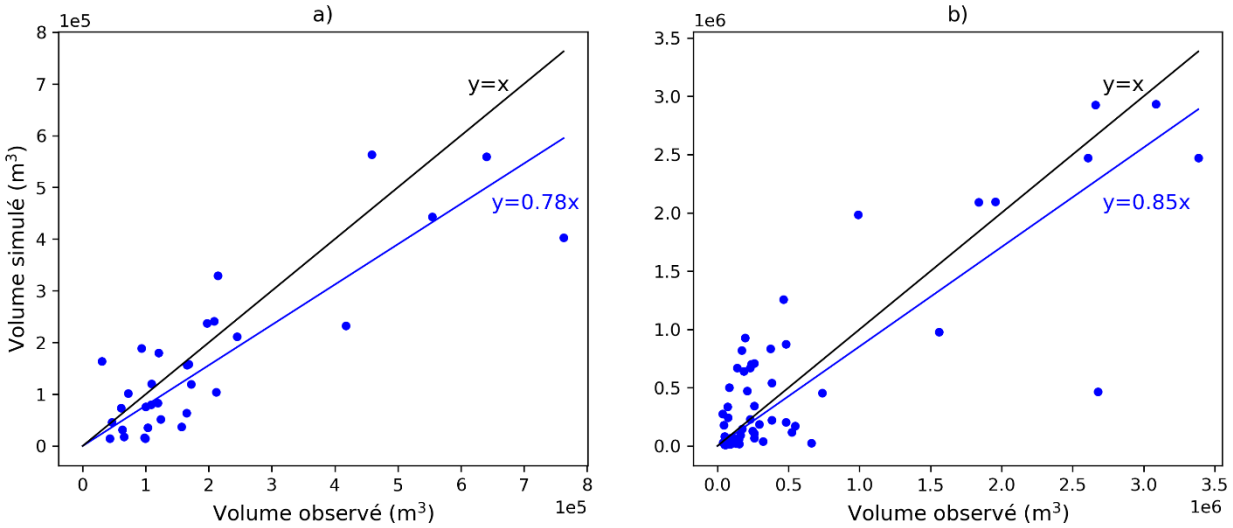

Figure 45 : Résultats obtenus pour la validation sur l'année 2023 pour le bassin versant de la Rivière Salée (à gauche) et le bassin de la Rivière Lézarde (à droite)

Afin de s'assurer de la capacité du modèle à reproduire les flux de particules, nous nous sommes basés sur une comparaison des valeurs de taux d'érosion locaux et de flux modélisés, avec les valeurs trouvées dans la bibliographie et dans les parties 5.1.6 et 0, notamment la quantification réalisée dans le sous bassin de Duchêne de l'ordre de 10 $t.ha^{-1}.an^{-1}$.

5.2.6. Résultats

Le modèle étant calibré et validé sur deux années (2022 et 2023), il a été choisi d'utiliser les résultats de simulation de ces deux années, et de les moyenner sur une année. 64 événements pluvio-ruisselants ont été modélisés sur le bassin versant de la Rivière Salée et 125 sur le bassin versant de la Rivière Lézarde.

Le modèle produit plusieurs cartes pour chaque événement modélisé comme le volume ruisselé, l'érosion diffuse, l'érosion concentrée, le flux sédimentaire (quantité totale de sédiments transportés durant l'événement), le taux d'érosion spécifique (ratio entre le flux sédimentaire et l'aire drainées), etc. Le taux d'érosion spécifique permet de réaliser une cartographie de l'aléa érosion en 5 classes (très faible, faible, moyen fort et très fort). Le résultat global est présenté dans la Figure 46. Un atlas détaillé au 1/10 000ème est présent en Annexe 6.

	Tau d'érosion (en $t.ha^{-1}.an^{-1}$)
Très faible	< 0.5
Faible	0.5 - 1
Moyen	1 - 2
Fort	2 - 5
Très fort	> 5

Tableau 6 : Correspondance entre les classes d'aléa et les taux d'érosion spécifiques annuels

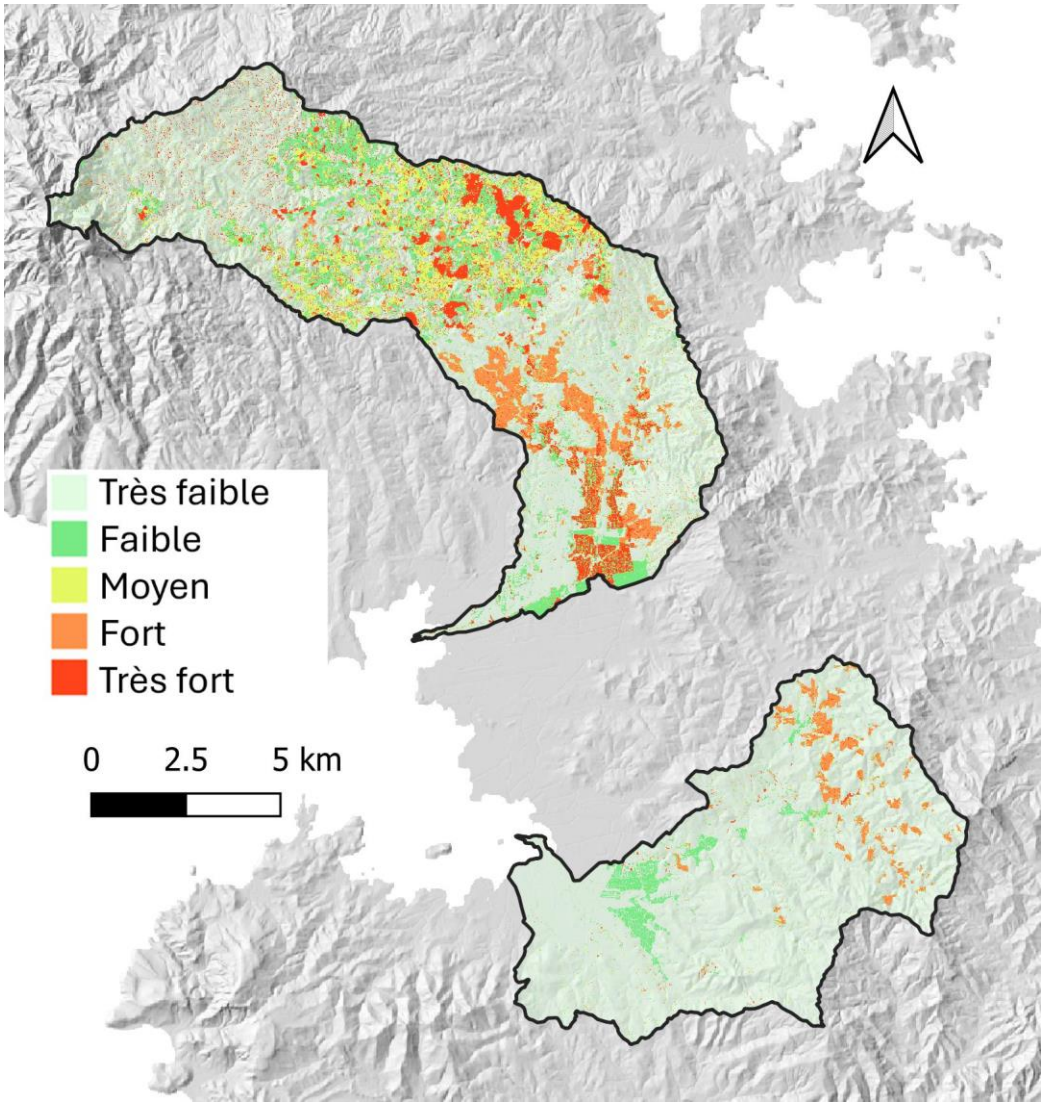

Figure 46 : Carte de l'aléa érosion en 5 classes sur les 2 bassins versants

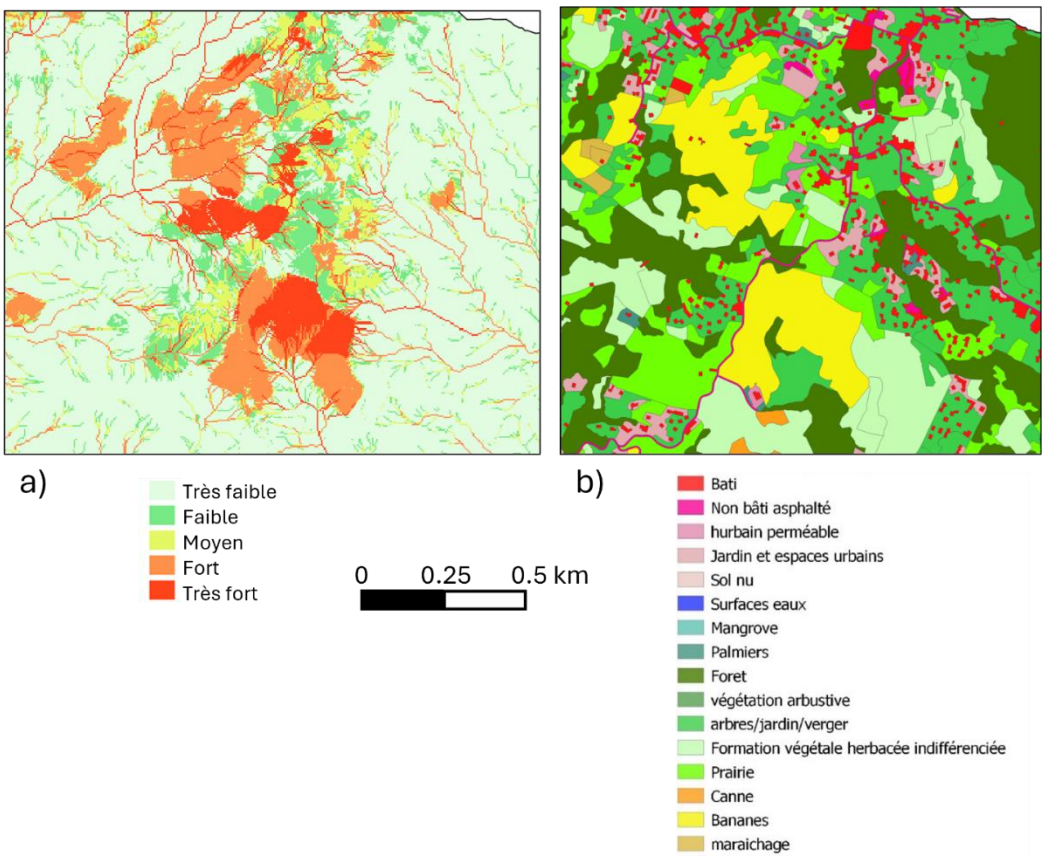

Figure 47 : a) zoom sur la carte d'aléa et b) occupation du sol correspondante

Cette modélisation permet d'estimer un export annuel moyen pour chaque bassin versant en regardant la valeur des sédimentaires à leur. Ainsi le bassin versant de Rivière Lézarde exporte environ 25000 t.an^{-1} de de sédiments et le bassin de la Rivière Salée 2 000 t.an^{-1}.

L'analyse des différentes sorties du modèle permet également de mettre en évidence que les cultures de bananes jouent un rôle important. Sur le bassin versant de la Rivière Salée elles représentent plus de la moitié l'érosion et un plus de 30 % sur le bassin de la Rivière Salée (Figure 48).

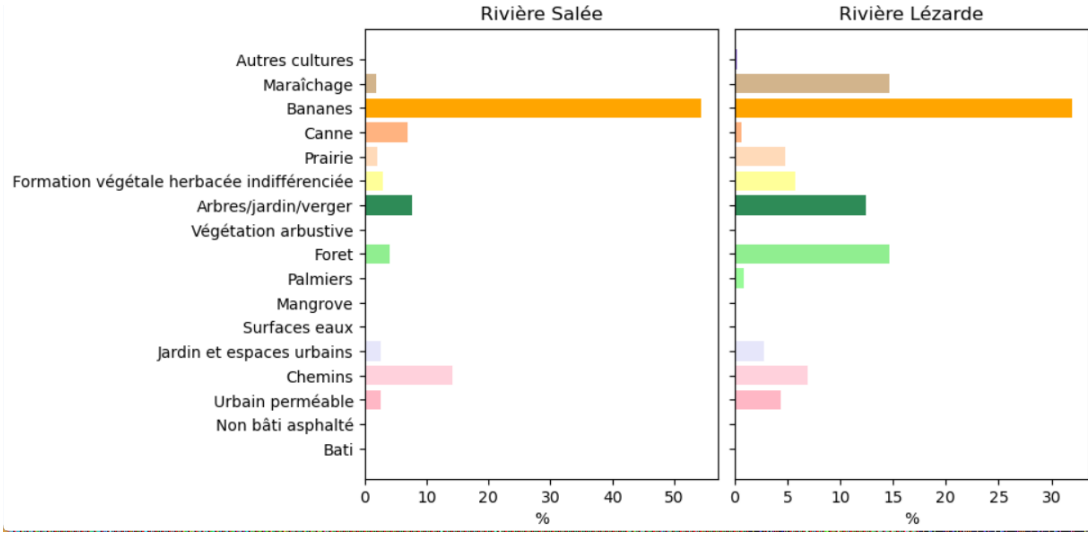

Figure 48 : Erosion brute par classe d'occupation des sols pour chaque bassin versant

5.2.7. Synthèses des quantifications des différentes sources d'érosion

Les différentes approches permettent une estimation des proportions de différentes sources d'érosion pour les deux bassins versants étudiés. Les bananeraies, les glissements de terrain et l'érosion de berge peuvent produire jusqu'à 10 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ de sédiments. Tous ces sédiments n'atteignent pas la baie, quelques $t.ha^{-1}.an^{-1}$ atteignent la baie sur la Lézarde et moins d'une $t.ha^{-1}.an^{-1}$ sur la Rivière Salée.

	Erosion hydrique	Glissements / Coulées	Erosion de berge	Total
Lézarde	25 000 t (49%) 3.75 $t.ha^{-1}.an^{-1}$	8 000 t (16%) 1.14 $t.ha^{-1}.an^{-1}$	18 000 t (35%) 2.57 $t.ha^{-1}.an^{-1}$	51 000 t
Salée	2 000 t (38%) 0.31 $t.ha^{-1}.an^{-1}$	1 100 t (21%) 0.17 $t.ha^{-1}.an^{-1}$	2 100 t (40%) 0.32 $t.ha^{-1}.an^{-1}$	5 200 t

Tableau 7 : Estimation de la proportion des origines des sédiments (la valeur du tonnage pour l'érosion de berge pour la Rivière Salée est une valeur extrapolée)

Les résultats issus de l'analyse des carottes sédimentaires dans la baie du Galion ou dans la retenue de Duchêne montre une augmentation importante des apports terrigènes depuis les années 2000.

Ces résultats montrent que la contribution de chacun des processus est significative. Ceci implique qu'il est nécessaire d'agir sur les trois sources de production de sédiment en combinant des actions à la source pour limiter l'érosion ainsi que sur les chemins de transfert en favorisant le dépôt pour agir sur les différents processus et à différentes échelles.

Des fiches de synthèse détaillant les types d'érosion et le type de mesure ont été élaborées dans le cadre de ce projet et sont disponibles en Annexe 2Annexe 3 etAnnexe 4.

A retenir

Les bananeraies, les glissements de terrain et l'érosion des berges peuvent produire une dizaine de $t.ha^{-1}.an^{-1}$ de sédiments :

- Quelque $t.ha^{-1}.an^{-1}$ atteignent la baie sur la Lézarde
- Moins d'1 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ atteignent la baie sur la Salée

Origine des sédiments :

	Erosion agricole	Glissements/ coulées	Erosion de berge
Lézarde	50%	15%	35%
Salée	40%	20%	*40% **

**Valeur extrapolée*

6. Plan d'actions de lutte contre l'érosion

6.1. PRINCIPES

L'élaboration d'une stratégie de lutte contre l'érosion des sols consiste à déployer, sur les bassins versants étudiés, différents types d'aménagements et de mesures, afin de réduire les transferts hydrologiques et sédimentaires. Il existe différents types d'aménagements pour lutter contre l'érosion hydrique :

- Les aménagements d'hydraulique douce : fascines, haies, bandes enherbées. Implantés le long des chemins d'écoulement des eaux, ces aménagements ont pour objectif de ralentir le ruissellement, de favoriser la sédimentation des particules de sols, de réinfiltrer les eaux de ruissellement et d'empêcher l'apparition de formes d'érosion concentrée ;
- Les aménagements d'hydraulique structurante : mares, bassin, diguette de plein champ, implantés en général à l'exutoire du bassin versant pour protéger les biens et les personnes situés à l'aval. Leur objectif est de tamponner les crues et/ou écrêter les débits de pointe ;
- L'amélioration des pratiques culturales : l'ensemble de ces pratiques vise à protéger le sol de l'érosion hydrique et à favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol. Elles limitent ainsi à la source le ruissellement et l'érosion.

Des fiches techniques décrivant les principaux aménagements d'hydraulique douce sont disponibles en 83Annexe 1. Ces fiches donnent notamment des indications de leur mise en œuvre et leur entretien.

Il existe également des moyens de lutte contre l'érosion due aux mouvements de masse :

- Pour les glissements/coulées, il faut agir :
    - à la source en stabilisant les terrains
        - reboisement des versant exposés
        - favoriser la végétation arbustive
    - sur les transferts en favorisant le dépôt :
        - fascines perpendiculaires à la pente,
        - pièges à blocs et gabions dans les ravines
        - retenues
- Pour l'érosion de berges il faut agir à la source pour limiter l'érosion :
    - Favorisation / préservation de la ripisylve
    - Aménagement de stabilisation des berges (notamment grâce au génie écologique)
    - Gestion des eaux de ruissellement (près des zones urbanisées et de culture)

Des fiches de synthèse détaillant les types d'érosion et le type de mesure ont été élaborées dans le cadre de ce projet et sont disponibles en Annexe 2Annexe 3 etAnnexe 4.

6.2. SIMULATION D'UN SCENARIO D'AMENAGEMENTS D'HYDRAULIQUE DOUCE

Les résultats obtenus dans les parties précédentes ont permis de montrer que toutes les sources d'érosion étaient significatives et qu'il est nécessaire d'agir sur les trois sources de production de sédiments en

combinant des actions à la source pour limiter l'érosion ainsi que sur les chemins de transfert en favorisant le dépôt pour agir sur les différents processus et à différentes échelles. L'érosion hydrique étant majoritaire, nous proposons ici de quantifier l'effet deux plans d'action grâce à la modélisation WaterSed. Le but du premier plan d'action est d'agir sur les transferts de sédiment grâce à des aménagements d'hydraulique douce dans les parcelles cultivées (canne et bananes) et le but du second plan d'action est d'agir sur les sources de l'érosion en enherbant les bananeraies (qui sont les principales sources de l'érosion.

D'autres outils devraient être utilisés pour quantifier l'effet de plans d'action sur Les glissements/coulées et sur l'érosion de berges.

La démarche pour évaluer l'efficacité des plans d'actions proposés est en deux temps. Dans un premier temps, les 2 années (2022 et 2023) d'évènements pluvio-ruisselants ont été simulées de la même manière que dans la partie 5.2.6, sans aménagements, afin de quantifier le flux de sédiments de base. Dans un second temps, le même jeu de données est utilisé pour effectuer des modélisations incluant cette fois les aménagements. Les résultats obtenus avec aménagements peuvent ainsi être comparés avec l'état initial sans aménagements pour mesurer l'impact de ces mesures sur les quantités sédiments exportés par les bassins versants vers la Baie.

Plan n°1 : Hydraulique douce pour agir sur les transferts : Les aménagements sont implantés le long des chemins d'écoulement des eaux. Dans le scénario proposé, des haies et des enherbements de talwegs ont été implantés sur les deux bassins versants. Le positionnement des haies est déterminé par l'intersection des chemins d'écoulement concentré et les limites de parcelles cultivées (elles sont positionnées perpendiculairement à l'écoulement). Les talwegs à enherber sont localisés dans des parcelles cultivées sur des chemins d'écoulement. Ces aménagements ont pour but de ralentir le ruissellement, de favoriser la sédimentation et de prévenir l'apparition d'érosion concentrée.

Pla, n°2 : Enherbement pour agir à la source : Dans ce scénario, les parcelles cultivées en bananes restent enherbées tout au long de l'année. Cet enherbement augmente la capacité d'infiltration, diminue le ruissellement et protège le sol de l'érosion.

	Plan d'actions sur les transferts (cannes + bananeraies) : Positionnement de haies et enherbement de talweg	Plan d'action à la source : Enherbement des bananeraies
Bassin versant de la Rivière Lézarde	10 %	10 %
Bassin versant de la Rivière Salée	20 %	30 %

Plan n°1 :

Les résultats montrent que sur une année, ce programme d'action permet de diminuer l'érosion de 50% au niveau des parcelles agricoles. A l'échelle des bassin versants, l'export de sédiment est diminué de de 20 %

(~400 t) sur le bassin versant de la Rivière Salée et de 10 % (~2 000 t) sur celui de la Rivière Lézarde. Sur chacun des bassins, la surface occupée par des cultures de cannes ou de bananes est en moyenne de 10%, l'efficacité du plan d'action est meilleure sur le bassin versant de la Rivière Salée car les pentes sont moins importantes, la pluviométrie plus faible et les sols sont moins sensibles à l'érosion.

Plan n°2 :

Les résultats montrent que pour sur une année, ce programme d'action permet de diminuer l'érosion de plus de 80% au niveau des parcelles de banane (. A l'échelle des bassin versants, l'export de sédiment est diminué de de 30 % (~600 t) sur le bassin versant de la Rivière Salée et de 10 % (~2 000 t) sur celui de la Rivière Lézarde. L'efficacité est meilleure en proportion sur le bassin de la Rivière Salée car les bananeraies sont la principale source d'érosion contrairement au bassin versant de la Lézarde où le maraîchage, les forêts et les vergers occupe une surface importante du bassin versant.

Un atlas au 1/10 000ème de ce plan d'action d'hydraulique douce (haies + talwegs enherbés) est disponible en Annexe 6.

Ces plans d'action sont des exemples, Ils ne concernent que l'érosion hydrique des sols, qui ne représente que 50 % des sources de l'érosion (5.2.7) et qu'une petite superficie du territoire. Des aménagements d'hydraulique douce et une couverture du sol permanente pourraient être implantés sur d'autres types d'occupation du sol, en zone de pente, comme les jardins, les espaces urbains perméables, les prairies et les vergers ainsi que les parcelles en maraîchage.

Pour réduire de façon plus significative les transferts de sédiment vers la baie, des plans d'action dédiés aux glissements/coulées et a l'érosion de berge de doivent être mis en place. Les cartes élaborées dans ce rapport peuvent être utilisées pour mettre en place des actions dans les zones concernées. Pour l'érosion de berge par exemple, il conviendra d'agir en priorité sur les zones de recul les plus importantes. L'ONF possède de compétences dans ce domaine (génie écologique). De la même manière un plan d'action pour limiter les impacts des glissements/coulées pourra être élaboré en utilisant la carte des zones de susceptibilité aux glissements/coulées fournie en annexe.

Il est fortement recommandé de faire intervenir les organismes compétents en Martinique comme l'ONF, L'Association française d'agroforesterie, le conservatoire Botanique de Martinique et d'utiliser des essences locales lors de recours à la végétation. De nombreuses ressources sont disponibles en Annexe 5.

7. Conclusions

L'étude menée sur les bassins versants de la Rivière Lézarde et de la Rivière Salée a permis de caractériser les processus d'érosion des sols et de transfert sédimentaire vers la Grande Baie de Martinique (Baie de Fort-de-France). Grâce à une approche combinant analyses bibliographiques, traçage sédimentaire, analyses et utilisation de cartes d'aléa mouvement de terrain (glissements/coulée et érosion de berges) et modélisation hydrosédimentaire, ce travail met en évidence la contribution significative de trois sources principales : l'érosion hydrique (notamment en domaine agricole), les glissements/coulées et l'érosion de berges. A notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude permet d'avoir une vue complète ainsi qu'une part relative des sources potentielles d'érosion à l'échelle du bassin versant.

Les résultats montrent que le bassin versant de la Lézarde est particulièrement contributeur, avec un export annuel vers la baie estimé à plus de 50 000 tonnes de sédiments, contre environ 5 000 tonnes pour celui de la Rivière Salée. Cette différence s'explique par des facteurs topographiques, pédologiques et d'occupation du sol, notamment la prédominance des cultures de banane sur la Lézarde, plus sensibles à l'érosion que les cultures de canne majoritaires sur la Salée.

Pour élaborer un plan d'action efficace, il est nécessaire de combiner des mesures agissant à la source (amélioration des pratiques culturales, aménagements d'hydraulique douce, stabilisation des berges) et des mesures intervenant sur les chemins de transfert (piégeage des sédiments). La simulation d'un scénario d'aménagements d'hydraulique douce agissant sur les transferts sur les parcelles agricoles a permis d'estimer une réduction potentielle de l'érosion de 50% au niveau des parcelles agricoles et une diminution de 10 à 20 % des exports sédimentaires vers la baie selon les bassins. La simulation d'un scénario agissant à la source grâce à l'enherbement des bananeraies a permis de d'estimer une réduction de l'érosion de 80% au niveau des parcelles et une réduction de 10 à 30 % des exports sédimentaires vers la baie selon les bassins. La mise en place d'autres mesures pour limiter les apports de sédiments liés aux glissements/coulées et aux érosion berge permettrait d'améliorer encore cette évolution à la baisse.

8. Références

Achard, R., Hubert, A., 2018. Influence de la conduite de la bananeraie et du paillage sur l'érosion en Martinique sur sols brun-rouille à halloysite, in: Lutte Antiérosive : Réhabilitation Des Sols Tropicaux et Protection Contre Les Pluies Exceptionnelles. Presented at the IRD, Roose Eric, Duchafour Hervé, De Noni Georges.

Assor, R., Julius, C., 1991. Circulation des masses d'eau, qualité bactériologique et micro- (aune benthique de la partie interne de la baie de Fort-de-France. Rapport PNUE 52.

Beaudou, A., Le Martrer, H., 2004. MIRURAM/VALSOL : Un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. Etude et Gestion des sols 11, 271–284.

Bizeul, R., Cerdan, O., Pak, L.T., Le Callonec, L., Huon, S., Sabatier, P., Evrard, O., 2024. Quantifying pesticide-contaminated sediment sources in tropical coastal environments (Galion Bay, French West Indies). J Soils Sediments 24, 3332–3349. https://doi.org/10.1007/s11368-024-03883-x

Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. Catena 75, 268–277. https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006

Cabidoche, Y.M., Achard, R., Cattan, P., Clermont-Dauphin, C., Massat, F., Sansoulet, J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. Environmental Pollution 157, 1697–1705. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.015

Castaing, P., Resseguier, A., Julius, C., Parra, M., Pons, J.-C., Pujos, M., Weber, O., 1986. Qualité des eaux et des sédiments dans la baie de Fort-de-France. Rapport CORDET 93.

Cattan, P., Cabidoche, Y.M., Lacas, J.G., Voltz, M., 2006. Effects of tillage and mulching on runoff under banana (Musa spp.) on a tropical Andosol. Soil and Tillage Research 86, 38–51. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.002

Cattan, P., Ruy, S.M., Cabidoche, Y.-M., Findeling, A., Desbois, P., Charlier, J.B., 2009. Effect on runoff of rainfall redistribution by the impluvium-shaped canopy of banana cultivated on an Andosol with a high infiltration rate. Journal of Hydrology 368, 251–261. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.020

Charlier, JB., Cattan, P., Moussa, R., Voltz, M., 2008. Hydrological behaviour and modelling of a volcanic tropical cultivated catchment. Hydrological Processes 22, 4355–4370. https://doi.org/10.1002/hyp.7040

Cheula, A., 2013. Cartographie de vulnérabilité des sols à l ' érosion hydrique en Martinique - Rapport de synthèse. IRD - ODE- DEAL Martinique.

Cocu, N., 1999. La carte des sols de Martinique comme support pour le cadrage de sites et la gestion agronomique. Exemple dans la vallée de la Lézarde (Mémoire ingénieur). Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Collins, A.L., Blackwell, M., Boeckx, P., Chivers, C.A., Emelko, M., Evrard, O., Foster, I., Gellis, A., Gholami, H., Granger, S., Harris, P., Horowitz, A.J., Laceby, J.P., Martinez-Carreras, N., Minella, J., Mol, L., Nosrati, K., Pulley, S., Silins, U., da Silva, Y.J., Stone, M., Tiecher, T., Upadhayay, H.R., Zhang, Y., 2020. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining

challenges and emerging themes, Journal of Soils and Sediments. Journal of Soils and Sediments. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4

Colmet-Daage, 1969. Carte des sols des Antilles à 1/20 000e - Guadeloupe- Martinique.

Feïss, C., Bonté, P., Andrieu, A., Lefevre, I., 2004. Transfert de matières des bassins versants côtiers au milieu marin : identification, caractérisation et vitesse. L'exemple de la baie du Marin (Martinique) / Transfer of matters from the watersheds toward the coast: identification, characterisation and es. Géomorphologie relief processus environnement 10, 81–90. https://doi.org/10.3406/morfo.2004.1201

GIS Sol, 2011. L'état des sols de France.

Grangeon, T., Charlier, J., Lacaze, F., Zhang, F., Cerdan, O., Aunay, B., 2025. Evidence of Geological Control on the Hydrological Response of Tropical Volcanic Catchments. Hydrological Processes 39, e70321. https://doi.org/10.1002/hyp.70321

Grangeon, T., Vandromme, R., Cerdan, O., De Girolamo, A.M., Lo Porto, A., 2021. Modelling forest fire and firebreak scenarios in a mediterranean mountainous catchment: Impacts on sediment loads. Journal of Environmental Management 289, 112497. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112497

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) - hèse de doctorat : Montpellier ENSAM.

Khamsouk, B., Roose, E., Dorell, M., Blanchart, E., 1999. Effect des systèmes de culture bananière sur la stabilité structurale et l 'érosion d ' un sol rouille à halloysite en Martinique 10.

Lacquement, F., Baptiste, J., Bernachot, I., Bernard, J., Bialkowski, A., Padel, M., Prognon, C., Raingeard, A., Reninger, P.-A., Tissoux, H., 2022. Carte des formations du régolithe de la Martinique comme appui pour la cartographie de l'aléa glissement de terrain (Rapport final BRGM/RP-71574-FR). BRGM.

Landemaine, V., Cerdan, O., Grangeon, Th., Vandromme, R., Laignel, B., Evrard, O., Salvador-Blanes, S., Laceby, P., 2023. Saturation-excess overland flow in the European loess belt: An underestimated process? International Soil and Water Conservation Research under revi.

Le Bissonnais, Y., Montier, C., Daroussin, J., King, D., 1998. Cartographie de l'aléa "Erosion des sols" en France. INRA, ifen.

Littoralis, 2002. Etat des lieux, diagnostic préalable à l'étude d'un contrat de Baie de Fort-de-France, Direction de l'Environement de Martinique. Direction de l'Environement de Martinique.

Nachbaur, A., Le Moigne, B., Garcin, M., Mathon, C., 2012. Evaluation de l'aléa érosion des berges de la Lézarde sur la commune du Lamentin (Martinique) (Rapport final BRGM/RP-61872-FR). BRGM.

Nachbaur, A., Schuller, L., Bellier, V., Brugeron, A., Le Moigne, B., Vignerot, B., Bernon, N., Meire, B., Peruzzetto, M., Garnier, C., Thiery, Y., 2024. Caractérisation de l'aléa glissement / coulée en Martinique : méthodologie et application aux 34 communes (Rapport final BRGM/RP-73611-FR). BRGM.

Pinte, K., 2006. Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert en Martinique - Mémoire de Master. INA P-G, Cemagref, PRAM.

Rocle, N., Bray, X., Nivet, A.-C., Gresser, J., De La Foye, F.-X., 2012. Processus érosifs et transport solide en milieu tropical insulaire. Cas des bassins versants de la Baie du Robert, Martinique, FWI, in: Lutte Antiérosive : Réhabilitation Des Sols Tropicaux et Protection Contre Les Pluies Exceptionnelles. IRD Editions. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.13013

Rodrigues, S., Bréhéret, J.-G., Macaire, J.-J., Moatar, F., Nistoran, D., Jugé, P., 2006. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: The Loire River (France). Sedimentary Geology 186, 89–109. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.011

Roose, É., Duchaufour, H., De Noni, G. (Eds.), 2012. Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. IRD Editions. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12419

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, in: Colloque International L'homme et l'érosion, Yaoundé, Cameroun, 9 Décembre 1999/19 Décembre 1999. Bulletin - Réseau Erosion, pp. 139–147.

Sabatier, P., Mottes, C., Cottin, N., Evrard, O., Comte, I., Piot, C., Gay, B., Arnaud, F., Lefevre, I., Develle, A.-L., Deffontaines, L., Plet, J., Lesueur-Jannoyer, M., Poulenard, J., 2021. Evidence of Chlordecone Resurrection by Glyphosate in French West Indies. Environ. Sci. Technol. 55, 2296–2306. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05207

Saffache, P., 1999. Un engraissement cotier resultant de l'erosion des bassins-versants cultivés : Exemple de la baie du Galion a la Martinique. Oceanologica Acta 23, 159–166. https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)00107-9

Saffache, P., Thomas, Y.-F., Feïss, C., 2003. Érosion agricole et envasement de la baie du Marin (Martinique), in: IXe Journées de Géographie Tropicale, La Rochelle, 13 et 14 Septembre 2001. pp. 113–120.

Sels, F., 1999. Contribution à la définition d'unités pédo-paysagères à la Martinique : illustration, explicitation et confrontation des documents existants sur le cadre physique.

SOGREAH, 2001. Analyse comparative de la bathymétrie de la Baie de Fort-de-France. SOGREAH - DIREN Martinique. https://doi.org/15096/JVR/55 0544 R2

Tarasova, L., Gnann, S., Yang, S., Hartmann, A., Wagener, T., 2024. Catchment characterization: Current descriptors, knowledge gaps and future opportunities. Earth-Science Reviews 252, 104739. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104739

Vandromme, R., Hayashi, S., Tsuji, H., Evrard, O., Grangeon, T., Landemaine, V., Laceby, J.P., Wakiyama, Y., Cerdan, O., 2023. Lessons learnt on the impact of an unprecedented soil decontamination program in Fukushima on contaminant fluxes. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 120, e2301811120. https://doi.org/10.1073/pnas.2301811120

Westercamp, D., Pelletier, B., Thibaut, P.M., Traineau, H., 1990. Carte géologique France (1/50 000), feuille Martinique -.

Zang, C., Sugita, M., Okita, A., Bi, S., 2023. Runoff characteristics of headwater catchments in a young volcanic region. Journal of Hydrology 620, 129350. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129350

Annexe 1 Fiches techniques d’hydraulique douce

La bande enherbée

FICHE TECHNIQUE

La bande enherbée forme une barrière contre le ruissellement et l'érosion des sols. Elle permet à l'eau de s'infiltrer et aux sédiments et matières actives de se déposer.

> Mise en œuvre

Localisation : dans les talwegs ou perpendiculairement à un axe de ruissellement.

Période de réalisation : réaliser l'implantation à une période où l'herbe pousse rapidement.

Matériel :

- Espèces végétales préconisées : famille des graminées. Les mélanges complexes « prairies » conviennent également.
- Matériel de semis.

Conception :

Dans les fonds de vallons, un travail spécifique est nécessaire : aplanissement et tassement du sol, semis à forte densité (minimum 40 kg/ha). Un tassement énergique du semis est indispensable.

> Entretien

Le ralentissement des débits et le stockage des sédiments seront assurés si la végétation reste maintenue à une hauteur de **10 à 15 cm maximum**.

Exportation des résidus de fauche pour éviter d'obstruer le réseau en aval.

Matériel à utiliser :

- gyrobroyeur,
- barre de coupe,
- broyeur à fléaux.

> Recommandations techniques

Prévoir une largeur minimale de 6 à 12 m, en l'adaptant à la pente, au type de sol et à l'intensité du ruissellement.

Mise en œuvre aisée	Ne gêne pas les manœuvres	Emprise au sol importante

La fascine

FICHE TECHNIQUE

La fascine est un ouvrage léger qui permet le ralentissement des écoulements et le dépôt des sédiments entraînés. Pour une meilleure efficacité, il est indispensable de créer un réseau de fascines complémentaires sur un même versant.

> Mise en œuvre

Localisation : perpendiculaire aux axes de ruissellement.

Matériel :

- Fagots de branches très denses : utiliser des branches de diamètres différents (de 2 à 6 cm), en les alternant afin d'obtenir des fagots serrés avec de la ficelle biodégradable type sisal (dimensions maximales : 3 m de long sur 40 cm de diamètre). La densité doit être, au moins, supérieure à 40 %.
- Pieux (diamètre : 8-10 cm, hauteur : environ 1,50 m), boutures (diamètre : 1-2 cm, hauteur : 50-70 cm), Entretoises (diamètre : 6-8 cm) pour assurer le tassement des fagots ou corde de coco.
- Clous adaptés

Conception : Faire une tranchée et planter deux rangées de pieux en quinconce de chaque côté de la tranchée (50 cm minimum de largeur). Les fagots sont placés en longueur entre les deux rangées de pieux. Le premier fagot est enterré aux trois-quarts. Les deux autres fagots sont ensuite posés en quinconce pour créer un barrage homogène sur toute la longueur. La hauteur totale, hors terre, est de 60 à 70 cm. Il faut réaliser un joint de terre à la base de la fascine pour que l'eau ne crée pas de circuits préférentiels. Un fil de fer ou un tasseau sur le dernier fagot permet de fixer et de tasser les matériaux.
Afin de multiplier les reprises, des boutures peuvent être plantées entre les pieux, le long des fagots tous les 50 cm et enfoncés de 25 à 30 cm.

> Entretien

Les fascines doivent être taillées régulièrement en fonction de la reprise de la végétation pour ne pas occuper trop d'espace. Les coupes servent à la recharge des fagots ou au bouturage. Les dépôts de sédiments en amont de la fascine peuvent être atténués voire ôtés lors des travaux de labour, de semis ou au godet en cas de non-travail du dol.

> Recommandations techniques

Mettre une largeur minimale comprise entre 6 et 12 m de large.

Efficacité hydraulique immédiate	Faible emprise	Stockage de la terre	Installation et entretien fastidieux	Coût important	Pérénisation dépendante de l'entretien

Les haies

FICHE TECHNIQUE

La haie est un élément du paysage qui présente, en plus de son intérêt écologique, un réel intérêt hydraulique. Elle ralentit les ruissellements, retient les sédiments et les matières actives. Son système racinaire favorise l'infiltration.

> Mise en œuvre

Localisation : perpendiculaire aux axes de ruissellement.

Préparation du sol : Désherbage préalable, passage d'une sous-soleuse et d'une charrue.

Plantation :
- Installation d'un paillage (bâche polypropylène tissée, paillage biodégradable, résidu de déchets verts, …) afin de maintenir l'humidité du sol et limiter la concurrence avec les espèces herbacées.
- Les plants sont enfoncés dans le sol jusqu'au collet.
- Plantation en deux rangs en quinconce, utilisation d'espèces locales pouvant être recépées.
- Mise en place de protection « gibier » avec tuteurs (Leur hauteur est à adapter en fonction des animaux présents).

Dans le cadre de la lutte contre les phénomènes d'érosion, il existe trois type de haies :

- **La haie de lutte contre les ruissellements concentrés ;**
- **La haie de lutte contre les ruissellements diffus ;**
- **La haie de maintien de talus.**

> Entretien

Recépage, désherbage et taille avec une fréquence à adapter en fonction des essences utilisées.

Matériel à utiliser pour la taille :
- Lamier : pour les branches de section supérieure à 3 cm,
- Broyeur : pour les branches de petites sections ou pour la reprise au sol de branches déjà coupées.

Les tailles de formation peuvent être effectuées manuellement ou mécaniquement.

> Recommandations techniques

Bien choisir les espèces au-dessus des réseaux de drainage. Si une haie doit être implantée en bord de route, il est indispensable d'obtenir l'accord des services de la voirie du Département. Lorsqu'elle est implantée en bordure de cours d'eau, il faut l'accord des syndicats d'entretien.

Le code civil définit les distances des plantations par rapport aux limites de propriété ou de voirie : 50 cm pour les plantations de moins de 2 m de hauteur et 2 m pour les plantations plus hautes.

Pérenne et efficace à long terme	Fonctionnalité multiple	Coût	Efficacité hydraulique de 3 à 5 ans	Entretien indispensable

Annexe 2 Fiche érosion et mouvements de masse

Erosion et mouvement de masse

Cas des glissements superficiels et coulées

De quoi parle-t-on ?

LES FACTEURS

LA PLUIE | L'OCCUPATION DU SOL | LA DISTANCE AU COURS D'EAU | LE TYPE DE GLISSEMENT

Sur les reliefs de la Martinique, les sols fortement altérés favorisent de nombreux glissements de terrain qui peuvent déplacer des quantités de terre importantes. Seule une partie des ces matériaux atteint les cours d'eau puis la Baie.

Les glissements atteignant le plus souvent le réseau hydrographique sont les glissements superficiels et les coulées de boue*.

*Coulée de boue :
- déplacement de matériaux remaniés
- avec une forte concentration en eau
- sur de grandes distances

Comment limiter le transfert potentiel vers la baie

Deux solutions possibles :

Agir à la source en stabilisant les terrains

- Reboisement des versants exposés
- Favoriser la végétation arbustive

Agir sur les transferts en favorisant le dépôt

- Fascines perpendiculaires à la pente
- Pièges à blocs et gabions dans les ravines
- Retenues

Privilégier la combinaison des deux lorsque cela est possible !

Erosion et mouvement de masse

Cas des érosions de berges

De quoi parle-t-on ?

L'érosion de berges produit des matériaux directement dans la rivière, les sédiments sont donc transportés jusque la baie

LES FACTEURS

VÉGÉTATION | MATÉRIAUX CONSTITUANT LES BERGES | HAUTEUR DES BERGES | DÉBIT DES COURS D'EAU LIÉ À LA PLUVIOMÈTRIE

Comment limiter le transfert potentiel vers la baie

Agir à la source en limitant l'érosion

- Ripisylve
- Aménagement de stabilisation des berges
- Gestion des eaux de ruissellement *(près des zones urbanisées et de culture)*

Cette fiche a été réalisée dans le cadre du projet « Érosion des sols et transfert sédimentaire vers la grande baie : Plan d'actions pour la Rivière Lézarde et la Rivière salée », financé par la CACEM, le CAESM, la CTM, l'ODE et le BRGM...

Annexe 3 Fiche érosion des sols en zones cultivées

Erosion des sols en zones cultivées

De quoi parle-t-on ?

Détachement de particules de sol par la pluie

Ruissellement

Concentration du ruissellement

EROSION DIFFUSE

EROSION CONCENTRÉE

LES FACTEURS

LA PLUIE | LE RUISSELLEMENT | LA TOPOGRAPHIE | LE SOL | L'OCCUPATION DU SOL

Forte variabilité dans l'espace et le temps

Comment limiter le transfert potentiel vers la baie

Deux solutions possibles :

Agir à la source en limitant l'érosion

- Réduire les périodes de faible couvert
- Favoriser l'enherbement *(augmente l'infiltration et limite l'érosion)*

Agir sur les transferts en favorisant le dépôt

- Haies végétales perpendiculaire à la pente
- Utilisation de zones tampons
- Talwegs enherbés
- Andain
- Cuvettes en lune

Privilégier la combinaison des deux lorsque cela est possible !

Analyse de terrain et en laboratoire

Par endroit, il y a 1m de sédiments déposés au fond de l'étang. Des carottes de sédiments ont été prélevées dans ces sédiments puis analysées en laboratoire par différentes méthodes. Ceci permet de dater les sédiments et déterminer leur origine.

Ainsi, on peut quantifier les taux d'érosion et de transfert de sédiments, ainsi que leur évolution sur plusieurs décennies !

Des taux d'érosion très importants ont été quantifiés pour la première fois par cette méthode et dans ces contextes.

En moyenne, 10 tonnes par hectares et par an

Cette fiche a été réalisée dans le cadre du projet « Érosion des sols et transfert sédimentaire vers la grande baie : Plan d'actions pour la Rivière Lézarde et la Rivière salée », financé par la CACEM, le CAESM, la CTM, l'ODE et le BRGM...

Annexe 4 Fiche de synthèse

Érosion des sols et transfert sédimentaire vers la baie de Fort-de-France :

plan d'actions pour la Rivière Lézarde et la Rivière Salée

ÉROSION DES SOLS

PERTE EN SOL
GLISSEMENTS DE TERRAIN
COULÉES DE BOUE

TRANFERT + ÉROSION + DÉPÔT

EROSION DE BERGE

ENVASEMENT

DÉGRADATION
DES MILIEUX AQUATIQUES
QUALITÉ DE L'EAU
ECOSYSTÈMES

Principaux résultats

Augmentation importante des apports terrigènes depuis les années 2000

Origines des sédiments :

	Erosion agricole	Glissements/ coulées	Erosion de berge
Lézarde	50%	15%	35%
Salée	40%	20%	40% *

*Valeur extrapolée

Les bananeraies, les glissements de terrain et l'érosion de berge peuvent produire une dizaine de t/ha/an de sédiment

- Quelques t/ha/an atteignent la baie sur la Lézarde
- Moins d'une t/ha/an atteignent la baie sur la Salée

Comment limiter le transfert des sédiments vers la baie

Les contributions de chaque processus (érosion, glissements et berges) **étant significatives, il est nécessaire d'agir sur les trois en combinant des actions :**

- **à la source pour limiter l'érosion**
- **sur les chemins de transferts en favorisant le dépôt**

Cette fiche a été réalisée dans le cadre du projet « Érosion des sols et transfert sédimentaire vers la grande baie : Plan d'actions pour la Rivière Lézarde et la Rivière salée », financé par la CACEM, le CAESM, la CTM, l'ODE et le BRGM...

Annexe 5 Ressources

https://genie-vegetal-caraibe.org/

https://www.agroforesterie.fr/ (https://www.agroforesterie.fr/agroforesterie-peyi/)

https://www.agroforesterie.fr/wp-content/uploads/2025/06/fiche-technique-haie-antierosive.pdf

http://cbmartinique.org/

https://www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guidevalorisationplanteslocalescompressed.pdf

https://www.agroforesterie.fr/wp-content/uploads/2024/02/guide-ripisylve-en-martinique.pdf

https://www.observatoire-eau-martinique.fr/bases-documentaire/fiche-guide-essence-de-restauration-des-ripisylves-et-lutte-contre-lerosion-des-berges/

https://www.leselam.com/

https://www.leselam.com/copie-de-l-%C3%A9rosion-%C3%A0-mayotte

https://www.leselam.com/_files/ugd/76d0cc_c82751c8100243e8a88bc42c51cff52c.pdf

Annexe 6 Atlas cartographiques

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
Direction régionale ou UTAM
Adresse
Tél. :
www.brgm.fr