

Analyse des ruissellements à l'origine des arrivées terrigènes dans le lagon de Saint-Leu – Modélisation hydrologique et sédimentaire sur le bassin versant de la Ravine du Cap (Saint-Leu, La Réunion)

Rapport final

BRGM/RP-70615-FR

Avril 2021



**PRÉFET
DE LA RÉGION
RÉUNION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Analyse des ruissellements à l'origine des arrivées terrigènes dans le lagon de Saint-Leu – Modélisation hydrologique et sédimentaire sur le bassin versant de la Ravine du Cap (Saint-Leu, La Réunion)

Rapport final

BRGM/RP-70615-FR

Avril 2021

M. CHAPUT

Vérificateur :

Nom : V. Landemaine

Fonction : Chercheur spécialiste de
l'érosion

Date :
22/03/2021

Signature :



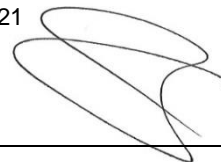
Approbateur :

Nom : K. Samyn

Fonction : Directeur régional – La
Réunion

Date : 08/04/2021

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



**PRÉFET
DE LA RÉGION
RÉUNION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Erosion, ruissellement, coulée de boue, lagon, modélisation, WaterSed, Saint-Leu, La Réunion

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

Chaput M. (2021) – Analyse des ruissellements à l'origine des arrivées terrigènes dans le lagon de Saint-Leu – Modélisation hydrologique et sédimentaire sur le bassin de la ravine du Cap (Saint-Leu, La Réunion). Rapport final. BRGM/RP-70615-FR, 67 p., 24 fig., 10 tabl.

Synthèse

La problématique de l'érosion dans les Hauts de l'Ouest est connue depuis plus de 30 ans. Plusieurs études, menées notamment par le CIRAD dans les années 90, ont fait le constat d'une agriculture inadaptée aux contextes topographiques et pédologiques dans ces secteurs. Des solutions de lutte contre l'érosion ont été régulièrement proposées, sans réelle appropriation ni mise en œuvre durable. Aujourd'hui, les problèmes relatifs à l'érosion des sols se font de plus en plus ressentir, notamment sur le territoire de Saint-Leu et tout particulièrement sur le bassin versant de la Ravine du Cap. Ce dernier est régulièrement touché par des phénomènes d'inondations et de coulées de boue qui se déversent dans le lagon lors d'épisodes de fortes pluies. Depuis une dizaine d'années, marquées une succession d'épisodes météorologiques intenses, on assiste à une dégradation très importante du récif, associée à une forte mortalité des populations de coraux et une eutrophisation progressive du milieu.

Face à ce constat, une dynamique s'est engagée depuis 2019, s'inscrivant notamment dans les réflexions sur le continuum Terre-Mer à La Réunion. Une étude de diagnostic, menée sur le secteur de la Ravine du Cap par le BRGM (financée par le TCO) a confirmé la forte problématique d'érosion dans les Hauts du bassin versant (> 800m), liée à des pratiques agricoles inadaptées, dans des zones de fortes pentes. L'impact des sols nus en général (rotation des cultures, travaux de valorisation foncière, chemins agricoles en terre) et de l'urbanisation grandissante sur le bassin versant a également été mis en avant.

Suite à cet état des lieux, deux études ont été lancées en parallèle avec des objectifs complémentaires :

- un diagnostic agricole approfondi dans la zone des Hauts de la Ravine du Cap (mené par le Département de La Réunion), avec pour objectifs la réalisation d'un inventaire détaillé et exhaustif des pratiques agricoles et des propositions de solutions de remédiation à l'échelle de la parcelle ;
- une étude de modélisation afin de caractériser les phénomènes d'érosion et de ruissellement à l'échelle de tout le bassin versant, dans le but d'évaluer la contribution des différents modes d'occupation du sol à ces processus et de quantifier l'efficacité de différentes mesures de lutte contre l'érosion (entre autres alimentées par le diagnostic agricole).

Cette dernière étude fait l'objet du présent document. Elle est menée dans le cadre d'une convention de recherche et développement partagée entre le BRGM et la DEAL de La Réunion. Pour cela, une approche par modélisation numérique a été utilisée grâce au modèle expert WaterSed, développé par le BRGM spécifiquement pour ce type de problématique.

Après une importante phase de paramétrisation du modèle, basée sur des observations et connaissances de terrain, différentes pluies de projet ont été simulées. Plusieurs paramètres tels que le flux sédimentaire, le ruissellement ou l'érosion concentrée (ravinement) ont ainsi pu être évalués. La contribution de chaque type d'occupation du sol à l'érosion a également pu être estimée. Les résultats confirment l'importante contribution des zones maraîchères des Hauts dans la production de terrigènes, en particulier lors de pluies de forte intensité. Les zones cannières, notamment en période de récolte ou de rotation des cultures sont également génératrices de terre, dans une moindre mesure. Leur grande superficie à l'échelle du bassin versant en fait toutefois des producteurs non négligeables de terres. Pour les pluies de moindre intensité, le rôle des chemins d'exploitation agricoles en terre, généralement implantés droits dans la pente et dépourvus de réseau de collecte des eaux de ruissellement, a été mis en avant.

En complément, plusieurs solutions de lutte contre l'érosion ont été modélisées. Ce travail a permis de quantifier les abattements attendus sur l'érosion par la mise en œuvre de ces mesures. Trois solutions principales ont été retenues : la revégétalisation partielle à complète des parcelles maraichères des Hauts, l'implantation de haies à la limite des parcelles de champs de canne et la réalisation d'un réseau de collecte et d'évacuation d'eau pluvial (EP) optimisé. La revégétalisation et l'implantation d'un réseau EP semblent particulièrement efficaces pour réduire les phénomènes de ravinement et d'érosion et les apports sédimentaires au lagon. Les abattements sur l'érosion peuvent atteindre jusqu'à 40% grâce à ces mesures. L'implantation de haies semble, quant à elle, intéressante à mettre en œuvre à l'échelle de la parcelle, en complément des autres mesures.

Cette étude, menée en parallèle du diagnostic agricole, permet d'objectiver l'efficacité de mesures depuis longtemps recommandées. Leur mise en œuvre nécessitera des réflexions et des concertations préparatoires avec l'ensemble des acteurs impliqués (GIEE, Chambre d'Agriculture, DAAF, collectivités, Etat...), ainsi que des précisions à l'échelle de la parcelle. Elle reste néanmoins parfaitement envisageable dans un avenir proche si les moyens humains et financiers adaptés sont mis en œuvre pour alimenter la dynamique engagée. Dans cette dynamique, le modèle établi grâce à ce travail pourra être utilisé, en fonction des besoins, pour accompagner la déclinaison opérationnelle du mode de gestion retenu sur le bassin versant et quantifier, par de nouvelles modélisations, l'apport des mesures réellement mises en place.

L'intérêt à terme, est de faire de l'expérience engrangée sur la Ravine du Cap une déclinaison à l'échelle d'autres bassins versants sensibles sur l'île pour la mise en œuvre de stratégies de lutte contre l'érosion sur le territoire.

Sommaire

1. Présentation du projet	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	10
2. Caractéristiques de la zone d'étude.....	13
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	13
2.2. TOPOGRAPHIE.....	14
2.3. GEOLOGIE	15
2.4. FORMATIONS PEDOLOGIQUES.....	16
2.5. OCCUPATION DES SOLS	18
2.6. L'EROSION DES ANDOSOLS EN CONTEXTE AGRICOLE	21
2.7. HYDROGRAPHIE ET FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE.....	24
2.8. CLIMAT.....	26
3. Modélisation de l'érosion des sols	28
3.1. PRESENTATION DU MODELE WATERSED	28
3.2. DEFINITION DE L'ALEA PLUVIOMETRIQUE	29
3.3. PARAMETRES DU MODELE	31
3.4. DONNEES D'ENTREE DU MODELE	32
3.4.1. Occupation du sol	32
3.4.2. Propriétés hydrodynamiques, érosives et topographie	33
3.5. RESULTATS.....	33
3.5.1. Pluie courante de courte durée (PR< 5 ans, durée 2h)	34
3.5.2. Pluie décennale sur 24h	36
3.5.3. Pluie intense de courte durée, avec antécédent pluvieux – Evènement de type Fakir (PR 10-25 ans, durée 4h).....	38
3.5.4. Pluie très intense de courte durée (PR 25-30 ans, durée 3h).....	40
3.5.5. Pluie centennale sur 24h.....	42
3.5.6. Synthèse et contribution à l'érosion selon le type d'occupation des sols.....	44
3.6. LIMITES DU MODELE.....	47
4. Propositions de solutions de rémediation	48

4.1. REVEGETALISATION DES ZONES MARAICHIERES DES HAUTS	49
4.1.1.Principe	49
4.1.2.Modélisation des abattements	52
4.2. IMPLANTATION DE HAIES AUX LIMITES DE PARCELLES CULTIVEES EN CANNE A SUCRE.....	53
4.3. RESEAU D'EVACUATION D'EAU PLUVIALE	55
4.4. PRIORISATION DE MISE EN OEUVRE.....	64
5. Conclusion	65
6. Bibliographie.....	67

Liste des figures

Figure 1 – Localisation du bassin versant de la Ravine du Cap extrait du MNT 2011 (contour cyan) et du bassin versant recalculé en 2020 suite à l'identification de nouveaux axes de ruissellement (contour rouge) sur la commune de Saint-Leu (contour blanc)...	14
Figure 2 – Carte des pentes sur la zone d'étude (lignes noires : isolignes 10m) et profil topographique recoupant le bassin versant (données MNT IGN 2011).	15
Figure 3 – Carte géologique au 1/100 000 sur la zone d'étude (Univ-Réunion/BRGM, 2006)... 16	
Figure 4 – Carte pédologique de la zone d'étude (Raunet, CIRAD, 1991)	18
Figure 5 – Cartographie de l'occupation des sols sur le bassin versant de la ravine du Cap (fond topo 1/25 000 IGN 2015).	20
Figure 6 – Levé des axes de ruissellement sur le bassin versant.....	25
Figure 7 – Axes de ruissellements identifiés sur le bassin versant (fond orthophoto IGN2017). Certains chemins, routes (en orange) ainsi qu'une partie du réseau urbain des bas (en rose) constituent des axes de ruissellement préférentiels en dehors du réseau hydrographique naturel.	26
Figure 8 : Articulation des différentes taches autour de la modélisation.	28
Figure 9 – Exemple de cartographies de pluie obtenues pour la pluie décennale journalière (à gauche) ou la pluie de période de retour 25-30 ans sur 3h (à droite) et intégrées à la modélisation.	31
Figure 10 – Principe général de la paramétrisation du modèle.....	31
Figure 11 – Carte d'occupation du sol utilisée pour la modélisation hydrologique et sédimentaire sur le bassin versant de la Ravine du Cap.	32
Figure 12 – Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie courante de période de retour <5 ans et d'une durée de 2h.	35
Figure 13 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie décennale de 24h.	37

Figure 14 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour un évènement de type Fakir (PR10-25 ans, durée 4h, avec antécédent pluvieux).....	39
Figure 15 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie de PR25-30 ans et de durée 3h.....	41
Figure 16 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie centennale de 24h.	43
Figure 17 – Importants ravinements observés sur une parcelle de canne à sucre.	46
Figure 18 – Ruissellement sur une prairie de kikuyu (en haut – ACLES 2006) et herbes couchées sur le passage de l'eau visibles suite à une forte pluie (en bas - photo 05/03/2020).	47
Figure 19 – Priorités de reboisement des parcelles maraichères dans les hauts du bassin versant. a) Occupation du sol à l'état initial (actuel), b) à e) Occupation du sol après reboisement de priorité 1 à 4 respectivement. Les linéaments jaunes représentent les zones d'érosion identifiées par le diagnostic agricole. Les cercles blancs localisent les secteurs reboisés selon les priorités.	51
Figure 20 – Localisation des haies modélisées.	54
Figure 21 – Cartographie des axes d'écoulement actuels et simulés. Dans les secteurs agricoles, la très grande majorité des écoulements actuels (en vert) se fait au droit des chemins, sans réseau de collecte et d'évacuation efficient. Dans les bas, dans les secteurs urbanisés, les écoulements se font dans un réseau urbain complexe dense (fossés, grilles avaloir, dalots couverts...).	57
Figure 22 – Comparaison du ruissellement (m ³) au droit d'une parcelle agricole (canne) en aval de la RD3 à l'état initial (actuel) et en présence d'un réseau EP théorique bordant les chemins agricoles. La présence du réseau (fossé) diminue drastiquement l'écoulement des eaux au travers de la parcelle et le rejet régulier des eaux collectées dans la ravine adjacente limite les vitesses d'écoulement et les risques de débordement.	58
Figure 23 – Comparaison de l'érosion concentrée au droit de la même parcelle entre l'état initial (actuel) et en présence d'un réseau EP théorique en bordure de chemin agricole. L'érosion sur les terrains agricoles cultivés est fortement réduite.	59
Figure 24 – Abattement modélisés sur l'érosion concentrée (i.e. le ravinement) en présence d'un réseau EP au niveau des chemin d'exploitation agricole (pluie modélisée = pluie décennale 24h).	61

Liste des tableaux

Tableau 1 – Précipitations journalières maximales (Bulletin Climatologique 2017, Météo France).	27
Tableau 2 – Données climatiques utilisées pour les pluies de projet (données Météo France et GEDC). Le cumul pluviométrique moyen sur le bassin versant a été calculé à partir des cartographies de pluie issues de ces données.	30
Tableau 3 – Synthèse des résultats des modélisations à l'exutoire de la Ravine du Cap pour les différentes pluies de projet.	44
Tableau 4 – Contribution (en %) à l'érosion de chaque type d'occupation du sol.	45

Tableau 5 – Abattements observés sur l'érosion brute, la concentration en MES et le flux sédimentaire à l'exutoire selon l'importance du reboisement des secteurs maraichers des hauts, pour différents scénarii de pluie.	53
Tableau 6 – Abattements modélisés à l'exutoire avec implantation de haies aux limites de parcelles agricoles.....	54
Tableau 7 – Différence sur l'érosion brute (érosion concentrée + érosion diffuse) liée à l'implantation de haies selon la classe d'occupation des sols et pour les différentes pluies de projet.	55
Tableau 8 – Résultats des simulations à l'exutoire pour les différentes pluies de projet en présence d'un réseau EP théorique sur les secteurs agricoles du bassin versant de la Ravine du Cap.....	62
Tableau 9 – Abattements observés (%) à l'exutoire entre l'état initial (état actuel) et en présence d'un réseau EP théorique.	62
Tableau 10 – Abattements modélisés sur l'érosion brute (érosion concentrée + érosion diffuse) en présence d'un réseau EP optimisé, en fonction du type d'occupation des sols.....	63

1. Présentation du projet

1.1. CONTEXTE

Depuis plusieurs années, une dégradation importante des récifs coralliens est mise en évidence par la Réserve Marine sur le lagon de Saint-Leu, en particulier au sud de la commune. Parallèlement, des arrivées terrigènes récurrentes dans le lagon sont observées lors d'épisodes de fortes pluies. Ces panaches turbides engendrent un envasement, une eutrophisation et une pollution du lagon qui affectent directement la santé des colonies de coraux.

Sur certaines stations de suivi, la Réserve Marine de La Réunion enregistre une chute dramatique de la proportion de coraux vivants depuis 2013, qui atteint moins de 2% par endroits en 2018. Cette mortalité est associée à une augmentation importante de la proportion d'algues sur ces stations. Depuis 2018, la régénération des récifs coralliens est très faible voire inexistante.

Outre l'impact délétère sur le lagon, les coulées de boue qui affectent le territoire de Saint-Leu génère de nombreux désordres sur les infrastructures (routes, ouvrages, habitations) et sur les terres agricoles (ravinements dans les champs et sur les chemins d'exploitation).

Ces manifestations semblent en recrudescence depuis le début des années 2010 et chaque événement pluvieux intense génère des dégâts importants sur la commune. Face à ce constat, plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'occurrence accrue de coulées de boue sur la commune. Parmi celles-ci, l'impact de l'urbanisation croissante, du prélèvement des andains et de la mise à nu des terrains agricoles ou du sous-dimensionnement du réseau d'évacuation des eaux pluviales ont été avancées. Pour autant, aucun diagnostic précis de la situation n'avait été mené jusqu'à présent.

En 2019, le TCO et la DEAL ont fait appel au BRGM afin de caractériser l'origine de ces apports terrigènes sur le bassin versant de la Ravine du Cap et ses abords, particulièrement impacté par les coulées de boue¹. Il est ressorti de ce travail que les apports terrigènes trouvent leur source à l'amont du bassin, en raison d'une conjonction de paramètres favorisant l'érosion (fortes pentes, sols érodibles et maraichage). Le transport solide généré est ensuite évacué par la ravine, en direction du lagon, alimenté à l'aval par des eaux de ruissellement issues des zones urbanisées, chargées en polluants anthropiques. Ponctuellement, la présence de sols à nu (terrassements, champs à nu après récolte...) favorise l'apport de matériaux terrigènes supplémentaires à l'exutoire de la ravine.

Suite aux conclusions de l'étude du BRGM, le Département de La Réunion a engagé en 2020 la réalisation d'un diagnostic agricole sur la partie haute du bassin versant de la Ravine du Cap afin de préciser les types de culture et les pratiques agricoles dans cette zone et évaluer les dysfonctionnements hydrauliques ainsi que les secteurs soumis à l'érosion.

En parallèle, dans le cadre d'un projet cofinancé par la DEAL de La Réunion, un travail de modélisation hydrologique et sédimentaire est réalisé par le BRGM, visant à évaluer les différentes sources de l'érosion sur l'ensemble du bassin versant et différents scénarii de remédiation. Cette étude est l'objet du présent rapport.

¹ Chaput M. (2020) – Caractérisation des ruissellements à l'origine des inondations et des arrivées terrigènes dans le lagon de Saint-Leu – Diagnostic. Rapport BRGM/RP-69428-FR, 63p., 37 fig., 12 tabl.

1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Ce travail, développé dans le cadre d'une convention Recherche et Développement avec la DEAL de La Réunion, a pour objectif de vérifier par une approche quantitative de modélisation les hypothèses retenues lors de la phase de diagnostic du projet (rapport BRGM/RP-69428-FR, janvier 2020) afin de proposer les mesures les plus adaptées à mettre en œuvre pour limiter les phénomènes d'érosion à terre et les transferts vers le lagon. L'étude se focalise sur le bassin versant de la Ravine du Cap. Il s'appuie notamment sur les résultats de la phase 1 et sur les résultats du diagnostic agricole réalisé par le Département de La Réunion.

Cette seconde phase se base sur une approche de modélisation hydrologique et sédimentaire grâce à l'utilisation du modèle WaterSed développé par le BRGM (Cerdan et al., 2002 ; Landemaine, 2016). Ses principaux objectifs sont de :

- Qualifier le ruissellement et l'érosion des sols pour l'état initial selon plusieurs pluies de projet ;
- Identifier les sources du ruissellement et de l'érosion des sols, les voies de transfert et les enjeux impactés ;
- Proposer des mesures de lutte contre l'érosion des sols (hydraulique douce, changement des pratiques culturales, etc.) en concertation avec les acteurs du territoire ;
- Quantifier, en relatif, les abattements attendus sur les rejets au lagon en intégrant à la modélisation du ruissellement et l'érosion des sols, les mesures proposées.

Pour cela, une importante étape de recueil de données est nécessaire. Elle vise à décrire les différentes composantes du bassin versant (occupation des sols, pédologie, topographie, ou encore géologie) et à compiler les données issues d'études récentes (CIRAD, Hawaï, Mayotte...) afin de bénéficier d'un retour d'expérience sur les problématiques d'érosion en milieu tropical. Toutefois, les données géographiques et bibliographiques disponibles ne sont souvent pas suffisantes pour décrire finement le fonctionnement hydraulique d'un bassin versant. Pour cette raison, une expertise de terrain a également été menée de manière à décrire précisément le réseau de circulation du ruissellement ainsi que l'ensemble des éléments susceptibles de modifier la réponse hydrologique des bassins versants (fossés, buses, bassins tampons, etc.).

Une fois le bassin versant décrit le plus exhaustivement possible, la paramétrisation du modèle constitue l'étape clef du travail. Elle consiste à affecter à chaque couple sol / occupation des sols / pratiques culturales des propriétés hydrodynamiques (capacité d'infiltration, réserve utile, etc.) et érosives (érodibilité, etc.) utilisables par le modèle WaterSed. Le fonctionnement hydrologique et sédimentaire actuel du bassin versant est ensuite modélisé grâce à WaterSed. Plusieurs pluies de projet sont étudiées, avec des périodes de retour croissantes, de façon à qualifier la réponse hydro-sédimentaire du bassin pour ces différentes situations.

Enfin, l'élaboration d'une stratégie de lutte contre l'érosion des sols consiste à déployer différents types d'aménagements et de mesures, afin de réduire les transferts hydrologiques et sédimentaires aux différentes échelles spatiales. Fort de l'expérience du BRGM en matière de lutte contre l'érosion en milieu tropical et notamment à Mayotte², et en collaboration avec le bureau d'étude en charge du diagnostic agricole, des solutions de remédiation adaptées au contexte local (géomorphologique, économique, social...) sont proposées. Ces solutions sont développées en concertation avec les acteurs du territoire : Groupements d'agriculteurs (Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental - GIEE), Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF), Chambre d'Agriculture, commune, collectivité, DEAL...

² <https://www.leselam.com/l-erosion-a-mayotte>

Une nouvelle modélisation intégrant les aménagements et solutions envisagés est réalisée et permet d'évaluer l'efficacité de chaque solution pour la réduction des transferts sédimentaires depuis les zones source jusqu'au lagon.

2. Caractéristiques de la zone d'étude

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

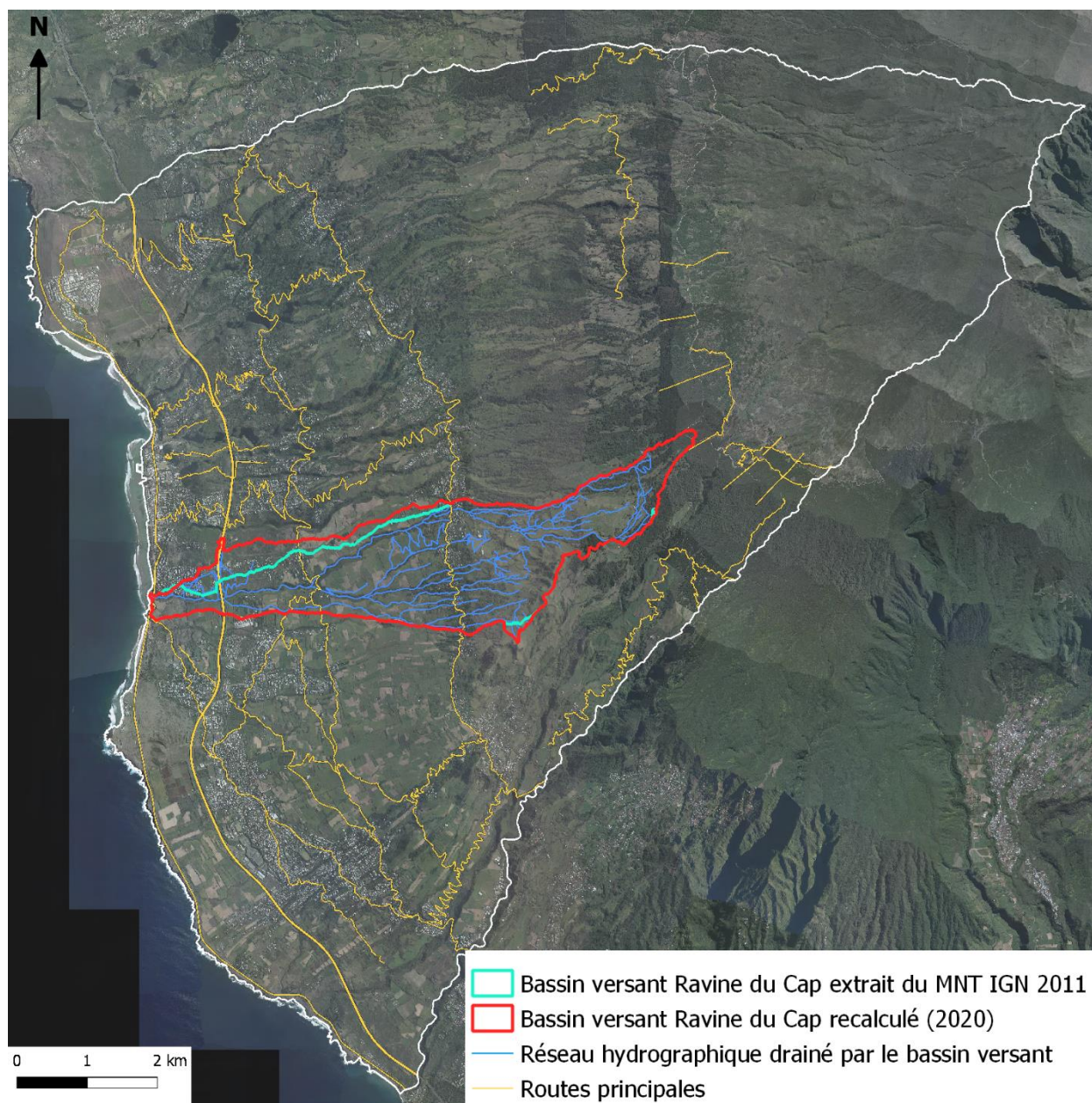
Le bassin versant de la Ravine du Cap se situe dans la moitié sud de la commune de Saint-Leu, à l'Ouest de l'île de La Réunion.

Le bassin versant naturel, d'une superficie de 7,9 km² s'étend entre 0 et 1695 m d'altitude, sur la planèze Ouest du massif du Piton des Neiges (Figure 1). Il draine les eaux de la Ravine du Cap et de ses affluents, dont la Ravine Grand Fond Dussac, la Petite Ravine et la Ravine Fond Papaye.

L'exutoire de la Ravine du Cap se situe entre le secteur de la Gendarmerie et le cimetière marin, dans une zone récifale.

Le bassin versant de la Ravine du Cap est peu peuplé comparativement à d'autres secteurs de la commune de Saint-Leu. Il couvre néanmoins les secteurs habités des Hauts entre Cap Camélia et Bac en fer, le long de la RD3, ainsi qu'une partie des lotissements de la Cité des Pêcheurs et du Cap Lelièvre.

L'anthropisation et les aménagements urbains réalisés ces dernières décennies ont modifié les axes d'écoulement naturels des eaux, en particulier en aval de la RD3 et en rive droite de la ravine du Cap. Ainsi, le bassin versant actuel drainé par la ravine est plus large que le bassin versant naturel, avec une superficie de **8.8 km²** (Figure 1, cf. paragraphe 2.7 pour détails).



2.2. TOPOGRAPHIE

Le bassin versant de la ravine du Cap présente un profil allongé, de pente moyenne proche de 20%. Trois secteurs topographiques distincts peuvent être distingués sur la zone d'étude (Figure 2) :

- De 0 à 600 m d'altitude, la pente est relativement homogène et oscille autour de 10-12° ;
- A partir de 600 m, on observe une nette rupture de pente avec une valeur moyenne de 20°, dépassant ponctuellement les 30-35° (hors encaissement des ravines). Ces fortes

pentcs se poursuivent jusqu'à 1350 m d'altitude. Elles sont particulièrement marquées entre Pente Maignard et Bac en Fer au sud du bassin versant, auxquelles s'ajoutent de nombreuses petites ravines avec un encaissement marqué ;

- Au-delà de 1350 m d'altitude, la pente s'adoucit à nouveau pour retrouver des valeurs comprises entre 5 et 15°.

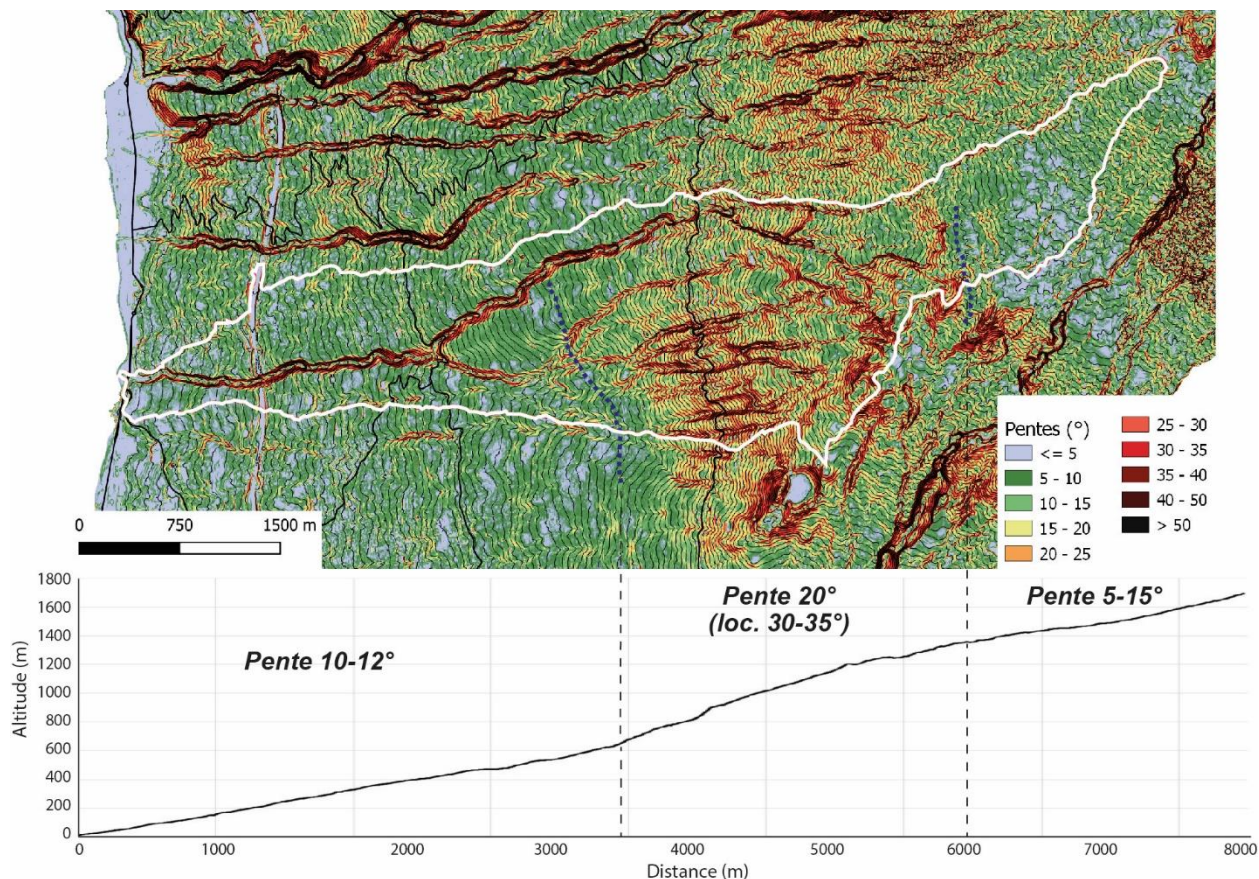


Figure 2 – Carte des pentes sur la zone d'étude (lignes noires : isolignes 10m) et profil topographique recoupant le bassin versant (données MNT IGN 2011).

2.3. GEOLOGIE

L'essentiel de la planèze de Saint-Leu est formée de coulées de lave issues des phases III et IV d'activité du Piton des Neiges (350 000 – 70 000 ans). Il s'agit de coulées de basalte riches en phénocristaux de feldspaths plagioclases (roches pintades), de basalte différencié ou d'andésite alcaline (hawaïtes, mugéarites), formant des empilements de bancs compacts de lave d'épaisseur métrique à décimétrique séparées par des horizons scoriacés (Figure 3).

Quelques affleurements de coulées de laves issues de la phase II du Piton des Neiges (> 430 000 ans) sont présents en bordure Sud de la commune. Il s'agit du Piton la Découverte, probable cône de scories ancien dont le sommet n'a pas été recouvert par les coulées plus récentes, et de coulées de lave de basalte à olivines affleurant dans l'encaissement de la Ravine du Trou en aval de ce piton.

Près du littoral, on rencontre des formations alluviales anciennes et récentes à l'embouchure des ravines, ainsi que d'alluvions marines.

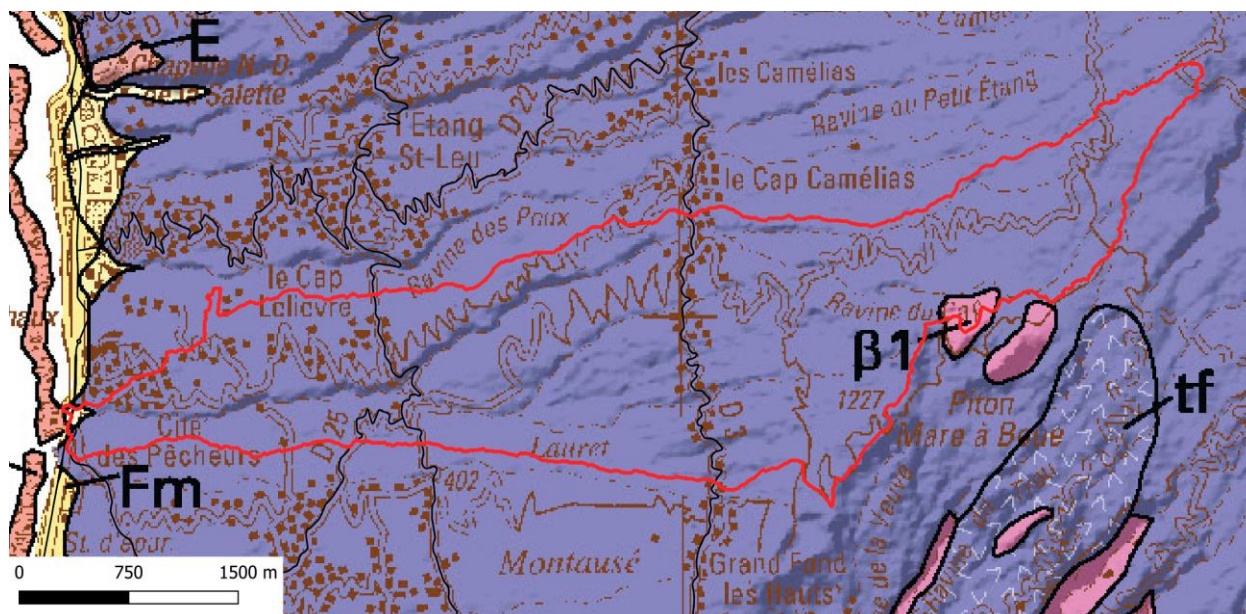


Figure 3 – Carte géologique au 1/100 000 sur la zone d'étude (Univ-Réunion/BRGM, 2006).

2.4. FORMATIONS PEDOLOGIQUES

L'ensemble des séries volcaniques présente une altération météorique poussée (action des eaux en milieu tropical) qui a affecté la texture et la structure du matériel originel. L'altération qui se développe depuis la surface peut atteindre plusieurs mètres de profondeur. Les coulées de lave et matériaux pyroclastiques (scories, cendres...) les plus anciens qui ont subi plusieurs cycles d'altération sont, de ce fait, plus altérés et des sols se sont développés à partir de ces formations.

La carte pédologique du CIRAD (Raunet, 1991) montre une zonation des sols avec l'altitude (Figure 4) avec :

- En bordure littorale et jusqu'à 50 m d'altitude des zones sableuses près du rivage et des vertisols (sols argileux à faible perméabilité) ;
- De 0 à 200m, des sols bruns ferruginisés caillouteux ;
- De 200 à 400m, des sols bruns peu épais à affleurement blocailleux sur coulées aa ;
- De 400 à 600 m, des sols bruns épais sur cendres (sols fermes, argileux et de perméabilité moyenne) ;
- De 600 à 1150 m, des andosols³ désaturés non perhydratés (sols friables, limoneux, fortement perméables) ;
- De 1150 à 1650m, des andosols désaturés perhydratés (sols très friables, limono-argileux et de très forte perméabilité).

Les caractéristiques de ces différents types de sols, issues des travaux de Raunet (1991) sont détaillées ci-dessous :

³ Andosols : sols humides peu évolués de montagne avec un horizon supérieur riche en matière organique (15-30% dans les premiers 20 cm) et une roche mère volcanique.

- **Vertisols**

Ces sols affleurent à basse altitude à proximité du littoral. Il s'agit de sols de couleur gris à brun, à structure fine, texture argileuse ou argilo-caillouteuse. Ils disposent d'un taux de matière organique de l'ordre de 2% et un pH proche de 7. Leur perméabilité est très faible, souvent inférieure à 1 mm/h à saturation.

- **Sols bruns ferruginisés**

Cet ensemble est constitué d'un horizon superficiel de 30 cm à 1 m d'épaisseur, dont les matériaux sont riches en cailloux et blocs emballés dans une matrice terreuse de couleur brun-rougeâtre. La matrice est argileuse, friable avec une perméabilité moyenne (de l'ordre de 50 mm/h à saturation) et un taux de matière organique de 1 à 6%. Sous l'horizon superficiel, le sol est de teinte beige-grisâtre et nettement plus compact et correspond à l'altération en place de roches mugéaritiques.

- **Sols bruns**

Ces sols se sont développés sur mugéarites en gratons (coulées aa). De couleur brun foncé à brun-grisâtres, ils sont bien structurés, fermes, avec peu d'éléments grossiers dans l'horizon superficiel et une texture argileuse. Ils disposent d'un taux de matière organique entre 3 et 5 % et un pH de 6-6,5. Leur perméabilité est moyenne, de l'ordre de 40 mm/h à saturation. Plus en profondeur, la proportion d'éléments grossiers augmente jusqu'à devenir dominante au-delà de 120-150 cm.

- **Andosols désaturés non perhydratés**

Ce type de sol s'observe à partir de 700m d'altitude. Il s'agit de sols épais (1-4 mètres), sans cailloux, de teinte générale brune. Le matériau friable, à toucher limoneux, d'aspect léger, toujours frais et humide et extrêmement perméable. L'horizon de surface de ce type de sol est, à l'état « non dégradé » assez épais (20-40 cm), bien structuré et à bonne macroporosité. En conditions cultivées dégradantes (géranium, maraichage...), il devient assez pulvérulent.

Il s'agit d'un sol riche en matière organique (10-20% en surface), au pH acide (< 5).

Les andosols, lorsqu'ils sont perturbés (découverts, desséchés, travaillés) peuvent perdre leurs propriétés favorables originelles (grande perméabilité, bonne stabilité structurale). Une fois déstructurés et desséchés irréversiblement, leur faible densité apparente et leur hydrophobie acquise **les prédisposent à un entraînement rapide par décollement de leur horizon de surface et flottation de micro-agrégats hydrophobes. Cette sensibilité est exacerbée par l'augmentation de la pente. Or, la majorité des andosols non perhydratés est répartie dans des zones de fortes pentes, supérieures à 20%.**

- **Andosols désaturés perhydratés**

Dans la continuité logique des andosols non perhydratés précédents, ce type de sols observé à partir de 1150 m d'altitude dans notre zone d'étude, correspond à une pluviométrie et une hygrométrie supérieures.

La spécificité de cette catégorie d'andosol est leur très grande richesse en eau (200 à 310% d'humidité pondérale à saturation). Il s'agit de sols d'épaisseur comprise entre 1 et 3 m, de teinte brun-rouge à beige clair. Le sol présente une structure continue, à l'aspect « gras », presque

huileux et présente une perméabilité très élevée. Au toucher, la consistance est friable, légère et « onctueuse ». La texture apparaît limono-argileuse, sans plasticité.

Ce sont des sols riches en matière organique (15-30% dans l'horizon de surface), au pH légèrement plus acide que les andosols non perhydratés.

Tout comme les andosols non perhydratés, les propriétés intrinsèques des andosols perhydratés peuvent être modifiées et irréversiblement perdues par le travail du sol (sensibilité à l'érosion accentuée).

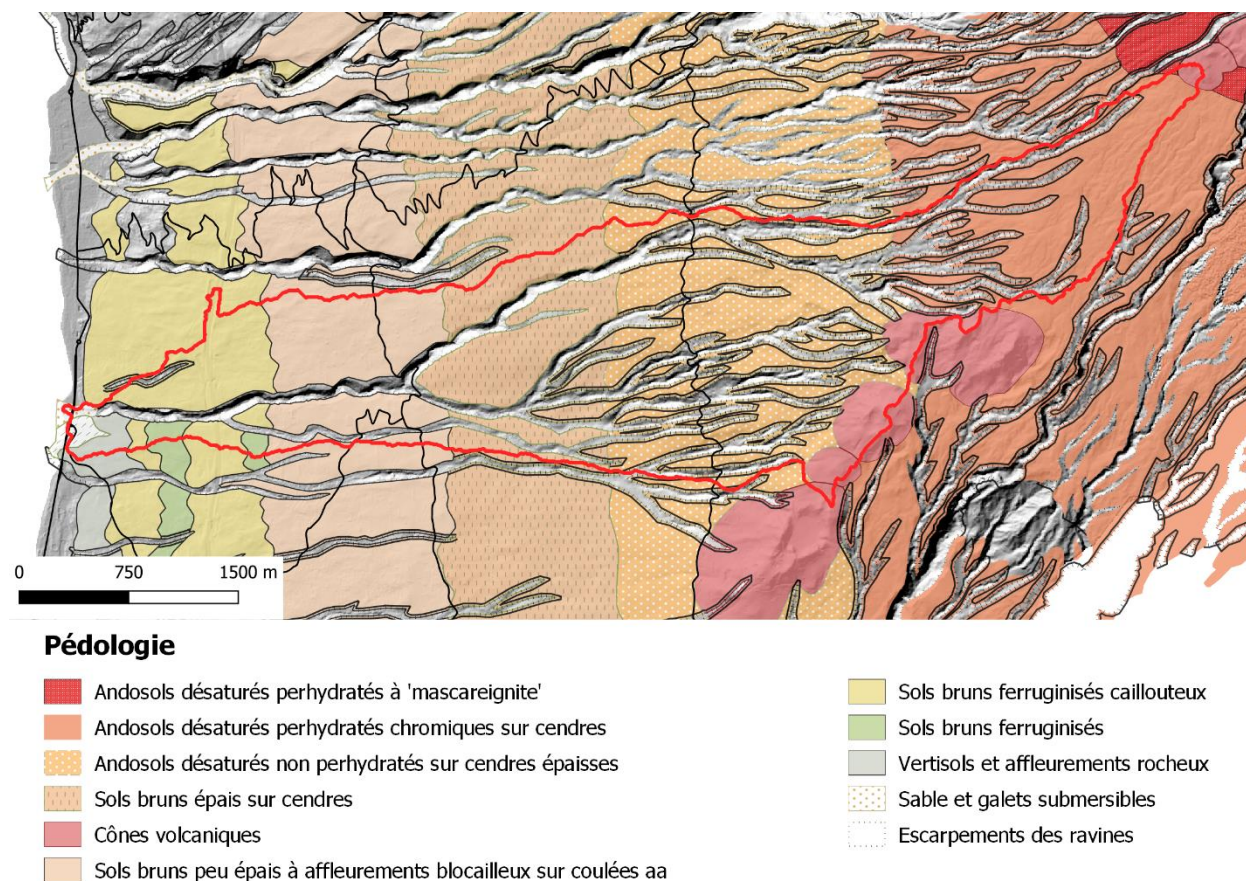


Figure 4 – Carte pédologique de la zone d'étude (Raunet, CIRAD, 1991)

2.5. OCCUPATION DES SOLS

Le mode d'occupation des sols sur le bassin versant de la Ravine du Cap a été analysé grâce aux données issues de multiples sources :

- La base d'occupation des sols 2019 (BOS 2019), de la DAAF, produite sur la base des déclarations des exploitants agricoles ;
- La carte d'occupation des sols, produite par le CIRAD à partir d'images satellitaires (classification automatique) ;
- La BD Topo 2019 de l'IGN, pour les zones bâties, les réseaux routiers et le réseau hydrographique ;

- L'étude de diagnostic agricole menée par Hydrétudes et supervisée par le Département de la Réunion pour le détail des modes d'agriculture dans les Hauts du bassin versant ;
- Les orthophotos récentes (Ortho 2017 de l'IGN et prises de vue Google Earth) ;
- Les observations directes de terrain.

La figure 5 ci-dessous montre un zonage clair de l'occupation du sol selon l'altitude :

- De 0 à 400 m d'altitude environ, la surface est principalement dédiée aux espaces urbains. Les secteurs non urbanisés sont constitués de végétation sclérophylle typique des bas de l'ouest (savane, végétation sèche, broussailles, ...). La route des Tamarins recoupe le bassin versant du Nord au Sud à environ 150 m d'altitude. Entre la route des Tamarins et la RD13, la rive droite de la Ravine du Cap est principalement occupée par des zones urbaines (Cap Lelièvre) et des zones de savane et friches, alors que la rive gauche est essentiellement agricole avec des cultures de canne à sucre, des vergers et des cultures maraichères.
- En amont de la RD13, de 400 à 800 m d'altitude, la culture de la canne à sucre occupe l'essentiel de l'espace et les habitations sont rares. Quelques parcelles en maraichage et quelques vergers sont toutefois présents. Les axes de la Ravine du Cap et de ses affluents (Petite Ravine et Fond Papaye) sont majoritairement bien végétalisés (ripisylve).
- La Route Hubert de Lisle (RD3), située à environ 800 m d'altitude constitue un axe d'urbanisation relativement important avec une succession de lieux-dits : Bac en Fer, Pente Maingard, Cap Camélia...
- Au-delà de cet axe routier, et jusqu'à environ 1695 m d'altitude (sommet du bassin versant de la ravine du Cap), les espaces sont principalement à vocation agricole, avec de grandes surfaces de prairies et pâturages (« kikuyu ») ou dédiées aux cultures en maraichage et vivrières. Les cultures maraichères sont majoritairement observées entre Bac en fer et le Piton Mare à Boue au Sud du bassin versant (chemin du Plate) mais également le long du chemin de la Source. Ces exploitations sont installées soit dans des zones défrichées spécifiquement pour ce mode de culture, soit dans des secteurs aux pentes trop importantes pour la pâture des troupeaux.

D'après ces données, le bassin versant de la Ravine du Cap est occupé par :

- **55% d'espaces agricoles**, dont :
 - 24% de canne à sucre,
 - 24% de prairies,
 - 5.8% de cultures maraichères,
 - 0.9% de vergers.
- **36% d'espaces naturels**, dont :
 - 24% de forêt,
 - 12% de savane/friche/végétation sèche des bas de l'Ouest.
- **6% d'espaces urbanisés**, comprenant les bâtis, les espaces artificialisés et les routes (enrobés et béton) :
- **2% de chemins en terre**, principalement des chemins caniers et chemins de desserte agricole ;
- **1% d'espaces autres** (espaces verts non agricoles et bassins de rétention d'eau).

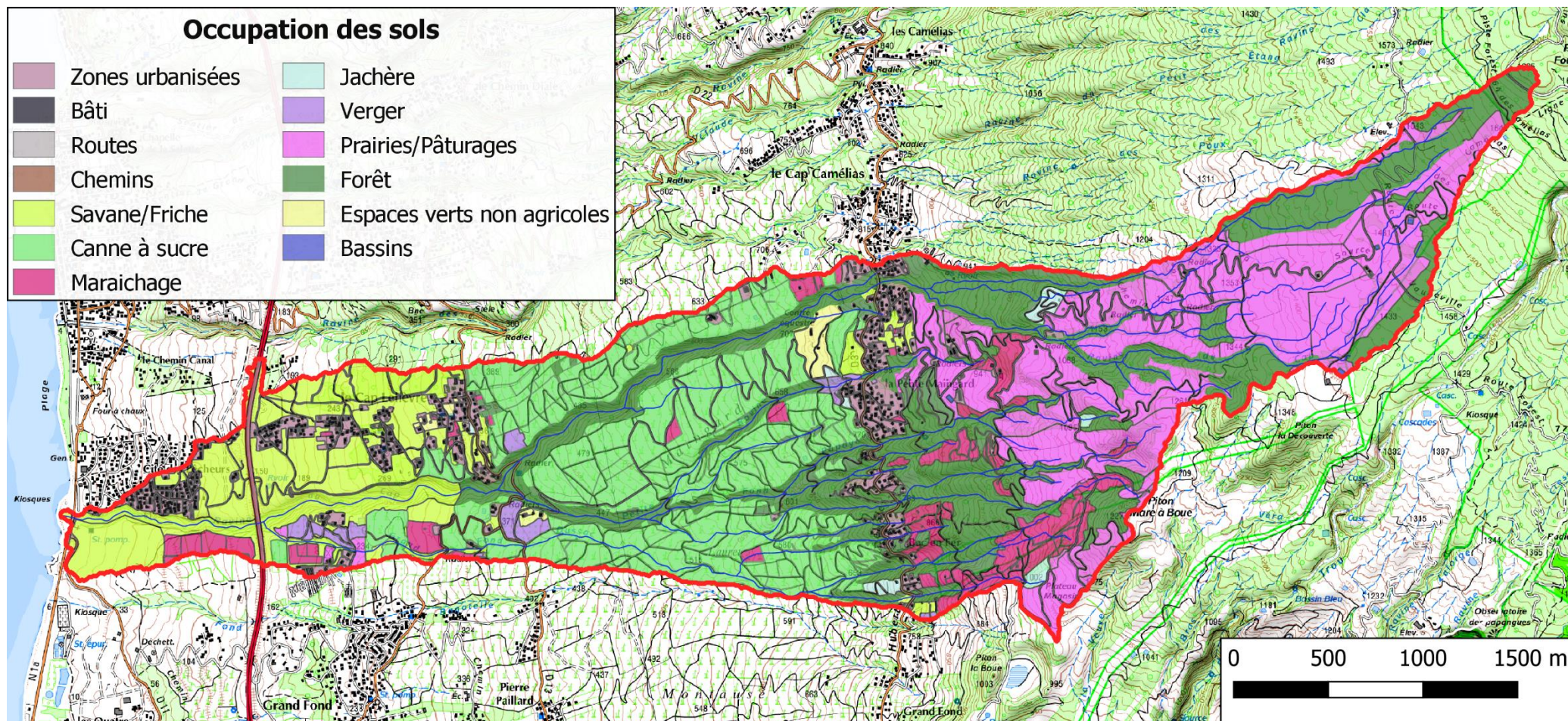


Figure 5 – Cartographie de l'occupation des sols sur le bassin versant de la ravine du Cap (fond topo 1/25 000 IGN 2015).

2.6. L'ÉROSION DES ANDOSOLS EN CONTEXTE AGRICOLE

Au début des années 1990, Michel Raunet dans son ouvrage « Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion » mettait déjà en avant la problématique de l'**érosion des andosols** dans les Hauts de La Réunion. Pour pallier à l'érosion grandissante de ces secteurs sensibles, il émettait alors un certain nombre de recommandations.

Nous reprenons ici ses principales observations à travers des extraits de son étude :

Problématiques de l'érosion agricole des andosols :

Les andosols non perhydratés des « hauts » de La Réunion sont exposés à l'érosion pour plusieurs raisons combinées : topographiques, climatiques, pédologiques, agro-socio-économiques :

- *Topographiques : [...] 67% des andosols non perhydratés ont des pentes générales comprises entre 20 et 30%. 10% ont des pentes comprises entre 30 et 40%.*
- *Climatiques : [...] Les pluies d'orages, de début et fin de saison des pluies sont également dangereuses, d'autant plus que ce sont des périodes critiques de mise en place de campagnes agricoles.*
- ***Pédologiques : Les andosols lorsqu'ils sont perturbés (découverts, desséchés, travaillés) peuvent perdre leurs propriétés originelles favorables (grande perméabilité, bonne stabilité structurelle). Une fois déstructurés et desséchés irréversiblement, leur faible densité apparente et leur hydrophobie acquise les prédisposent à un entraînement rapide par « décollement » de leur horizon de surface et flottation des micro-agrégats hydrophobes.***
- *Agro-socio-économiques : La majeure partie du domaine cultivé des « hauts » de La Réunion intéresse les andosols non perhydratés, spécialement l'ouest. **Les cultures, à base de géranium, de cultures vivrières et maraichères n'assurent pas une bonne protection du sol.** Les plantes sarclées surtout géranium et pomme de terre sont particulièrement dangereuses [...].*

*La perception et la prévention de l'érosion sont difficiles à La Réunion. Elles se posent en termes différents suivants le milieu physique (sols, pentes, climats), les systèmes de culture en vigueur ou envisagés, la taille du territoire considéré (région, bassin versant, exploitation, parcelle), les intervenants concernés (administration, associations, développeurs, encadreurs, chercheurs, agriculteurs). Une difficulté est de croiser ces approches de façon interdisciplinaire, afin de faire les bons diagnostics, de moduler et optimiser les propositions. [...]. Il n'y a pas de recette toutes faites, **il faut toujours se baser sur les spécificités et contraintes locales** (humaines et physiques).*

Rappels sur les processus d'érosion

Lorsqu'elle se produit, lors d'une grosse averse, pour un sol dans un état donnée, l'érosion hydrique se traduit globalement par une perte de terre, qui est le résultat de deux processus, agissant sur la préparation puis l'évacuation du matériau, qui s'enchainent ou s'imbriquent :

- *L'action directe de l'énergie cinétique verticale de la pluie, qui délie, éclate et disperse les agrégats (effet « splash »). Ce sont les facteurs « taille des gouttes », « intensité et durée » de l'averse, « couverture du sol » qui sont alors déterminants.*

- *L'action entrainante de l'énergie cinétique latérale des eaux d'écoulement (non infiltrées) [...]. Interviennent ici, en plus, des facteurs précédents, les facteurs « pente » (gradient et longueur) et « rugosité » de surface. Ces écoulements latéraux peuvent être décomposés en :*
 - *Ruissellements superficiels, très rapides, dus à 3 causes possibles diminuant la vitesse d'infiltration : la battance, la saturation en eau du sol, l'hydrophobie superficielle.*
 - *Ecoulements hypodermiques, moins rapides, dans la macroporosité de l'horizon de surface (0-25 cm). Ils sont dus à l'infiltration insuffisante en profondeur, elle-même la conséquence, soit d'une perméabilité inférieure, soit de la présence d'une discontinuité ou rupture de capillarité.*

L'action mécanique latérale des eaux sur le sol peut s'exercer à ces deux niveaux, avec des modalités différentes :

- *En surface = incisions (rigoles, ravineaux, ravins) ou décapage en nappe. C'est l'érosion la plus manifeste.*
- *Dans la couche de surface = reptation pelliculaire, fluage, et dans le cas particulier des andosols réunionnais, « décollement – flottation ».*

Lutte contre l'érosion et maintien de la fertilité

*[...] face à la chute de production (du géranium), en 1984, un plan de relance de la production de géranium incite à l'intensification et la diversification des cultures dans les Hauts de l'Ouest [...]. Le pari actuel, qui est de miser sur l'intensification de la filière géranium et la diversification pour faire vivre des gens (souvent pluriactifs) dans les « hauts » et éviter l'exode rural exige donc une politique anti-érosive très sévère. [...] **A terme, il y a le spectre du décapage généralisé de ces grands versants, accéléré par l'action catastrophique des pluies cycloniques. Ces dernières, ne pouvant plus être absorbées par le manteau cendré, seront alors canalisées dans les multiples ravines et dévaleront en de gigantesques chasses d'eau, avec ce que cela laisse supposer comme dégâts sur les zones littorales et le lagon.** Si on ne veut pas en arriver là, la culture productive et soutenue du géranium et des cultures légumières de rente implique et impose un certain nombre de conditions.*

- *Prise en compte des pentes*
[...] Par la même occasion, il faut identifier et localiser les axes d'écoulement naturels des eaux (gouttières, mini talwegs).
 - *Les pentes supérieures à 30% : **ces pentes fortes ne devraient pas être cultivées**, ni même pâturées. Elles doivent être couvertes de forêts, bois ou taillis. Les reboisements de production ou d'espèces fourragères (Leucaena) pourraient être des moyens de valorisation.*
 - *Les pentes comprises entre 20 et 30% : **ces pentes ne devraient être cultivées** ni en géranium (en tout cas, pas en culture pure, ou sans plantes de couverture et travail minimum du sol), **ni en plantes sarclées annuelles (pomme de terre), ni en cultures maraichères dont les semis exigent un affinage soigné du sol.** Leur véritable vocation est la prairie rustique (kikuyu), l'arboriculture (pêcher, légumineuses fourragères arbustives) ou la canne à sucre non mécanisée (en dessous de 1000 m d'altitude). [...]*
 - *Les pentes inférieures à 20% : dans cette classe de pentes, le géranium et cultures annuelles **sont possibles moyennant un certain nombre de précautions** pour*

maintenir ou restaurer la fertilité (choix adéquat de systèmes de culture, nature et époque du travail du sol, amendements organiques, cordons végétalisés...

- **Le travail du sol**

Trois principes essentiels devront être respectés :

- *Exposer le moins possible le sol nu à l'action érosive de la pluie, spécialement aux époques orageuses de fin de saison des pluies (récoltes de la 2^{ème} campagne et mise en place de la 1^{ère} campagne) et de début (mise en place de la 2^{ème} campagne)*
- *Brasser le sol le moins possible afin d'éviter de détruire complètement la macrostructure construite et l'évolution vers une structure particulière qui prépare l'entraînement des micro-agrégats par flottation.*
- *Eviter de créer une discontinuité sous l'horizon travaillé.*

Dans la mesure du possible, il faudrait s'inspirer des principes suivants :

- *Effectuer tous les travaux **perpendiculairement à la pente***
- *Lorsque le **labour est indispensable, le faire en avril et l'associer ensuite à un mulsh (couverture morte)** pour éviter le dessèchement excessif.*
- *Développer les techniques de semis direct sans travail du sol (sillonnage puis semis) **associé à l'installation de plantes de couverture** ou de couverture « mortes »...*
- *[...]*

- **Les apports de matière organique**

Il faut tendre vers une matière organique « active » relativement à des processus microbiens équilibrés de minéralisation et d'humidification, renforcés par la présence d'un méso-micro-faune (vers de terre) [...]

- **Les aménagements dans l'exploitation**

*Chaque exploitation devrait avoir sa carte de pentes **avec les emplacements des talwegs et chemins d'eau**. Les ressauts escarpés de plus de 30% où affleurent les « reins » seront couverts de taillis ou boisements. Les pentes de 20-30% pourraient être en prairies permanentes (kikuyu, canne fourragère). Concernant les replats cultivés de pentes inférieures à 20%, il faudra y réduire le ruissellement au profit de l'infiltration en « coupant » le versant, en jouant sur l'état de surface pour le rendre plus absorbant possible. Nous ne sommes pas favorables à la réalisation de terrasses et banquettes qui nécessitent des travaux importants ou coûteux remaniant les sols donc très peu indiqués pour nos andosols. Les méthodes douces d'adaptation au terrain sont à rechercher à La Réunion.*

Plusieurs moyens peuvent être envisagés, alternatifs ou combinés :

- ***Cordons isohypse végétalisés [...]***
- ***Cultures en bandes alternantes isohypses [...]***
- ***Enherbement des « sites sensibles »** : ce sont les abords de toutes les petites voies d'eau (gouttières et mini-talwegs naturels). Lorsque ces axes d'écoulement traversent une parcelle, il faudra les couvrir d'herbe (chiendent, kikuyu) sur une largeur suffisante [...]*
- ***Couverture permanente du sol cultivé [...]***
- ***Régénération des sols érodés [...]***

2.7. HYDROGRAPHIE ET FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE

Peu de données existent sur le fonctionnement hydraulique de la Ravine du Cap. Le STPC (Schéma Technique de Protection contre les Crues) de 1990 indique les débits de crues suivants :

- Débit décennal $Q_{10} = 65 \text{ m}^3/\text{s}$
- Débit trentennal $Q_{30} = 95 \text{ m}^3/\text{s}$
- Débit centennal $Q_{100} = 131 \text{ m}^3/\text{s}$

L'étude de SOGREAH (2011) réalisée dans le cadre du Plan de Prévention des Risques (PPR) de Saint-Leu indique un débit de crue centennal de $130 \text{ m}^3/\text{s}$, cohérent avec les résultats du STPC.

La ravine du Cap draine de nombreuses ravines, notamment dans la partie sud du bassin versant dans le secteur de Bac en Fer où la pente forte favorise le creusement des terrains. Parmi les affluents principaux de la Ravine du Cap, on peut citer la Ravine Grand Fond Dussac, la Ravine Fond Papaye et la Petite Ravine.

Dans le cadre de notre étude, un levé précis des axes de ruissellement sur le bassin versant a été réalisé. Ce travail a eu pour objectif d'établir un réseau continu d'axes de ruissellement, décrivant le chemin de l'eau depuis le sommet du bassin versant, jusqu'à l'exutoire. Ce réseau alimente ensuite le modèle d'érosion et de ruissellement.

Une pré-cartographie a été réalisée dans un premier temps à partir du MNT 5m de l'IGN de 2011 et de la BD Topo 2019 (cours d'eau). Cette cartographie brute correspond au réseau issu uniquement de la topographie et du réseau hydrographique principal, sans prise en compte des éléments anthropiques impactants, tels que les fossés, les routes, les pistes, les réseaux urbains...

Afin de tenir compte de ces éléments, les axes de ruissellement ont été vérifiés et complétés sur le terrain (Figure 6). L'ensemble des axes a finalement été digitalisé sous SIG, et complété par photo-interprétation sur les secteurs non-investigués. Le réseau de circulation du ruissellement du bassin versant de la ravine du Cap est présenté sur la Figure 7.

Initialement, le bassin versant « naturel » disposait d'une surface de 7.9 km^2 . La vérification des axes de ruissellement sur le terrain a engendré une augmentation de la surface du bassin versant, dont la superficie recalculée est de **8.8 km^2** .



Figure 6 – Levé des axes de ruissellement sur le bassin versant

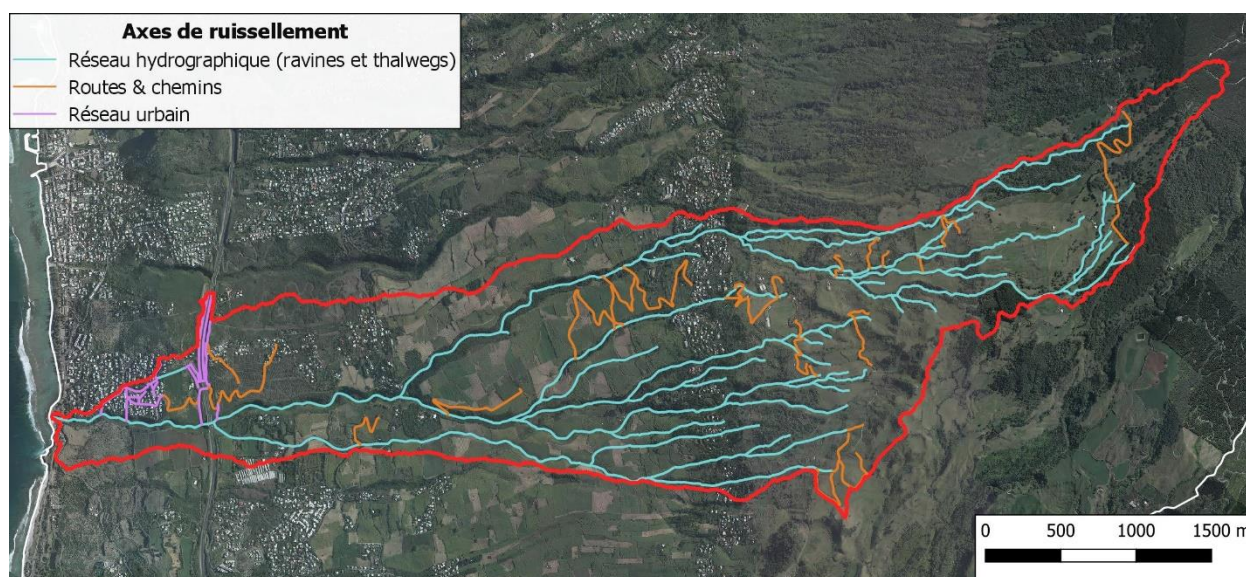


Figure 7 – Axes de ruissellements identifiés sur le bassin versant (fond orthophoto IGN2017). Certains chemins, routes (en orange) ainsi qu'une partie du réseau urbain des bas (en rose) constituent des axes de ruissellement préférentiels en dehors du réseau hydrographique naturel.

2.8. CLIMAT

La région de Saint-Leu est caractérisée par un climat semi-aride typique de l'Ouest de La Réunion, avec une période très sèche de mai à novembre et des précipitations essentiellement conditionnées par les événements cycloniques au cours de la saison de pluies.

La carte des précipitations moyennes annuelles montre une augmentation des cumuls avec l'altitude. La zone littorale du bassin versant est concernée par une pluviométrie annuelle moyenne de 700 mm/an alors que les hauts du bassin versant enregistrent une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 1500 et 2000 mm.

Une seule station météorologique est présente dans le bassin versant de la Ravine du Cap. Elle se situe à l'extrémité sud du bassin, à 220 m d'altitude (Station Saint-Leu Cirad).

Toutefois, plusieurs stations sont présentes aux abords du bassin versant, à diverses altitudes (Tableau 1). Parmi les plus proches (cf. Figure 9), on recense notamment :

- Station Météo France Saint-Leu (altitude 55m), dans le lotissement de la Cité des Pêcheurs ;
- Station CIRAD Saint-Leu (altitude 222 m), au sud du bassin versant, en rive gauche de la ravine Grand Fond Dussac ;
- Station CIRAD Etang Saint Leu (altitude 429 m), en rive gauche de la ravine des Poux ;
- Station CIRAD Cap Camélia (altitude 830 m), située sur la RD3 au lieu-dit les Camélias. Cette station est fermée depuis 2011 et ne dispose que d'une chronique de mesure de 5 ans.

Nom Station	Altitude (m NGR)	Date d'ouverture	Maximum absolu quotidien	
			Valeur (mm)	Date
Saint-Leu	55	01/10/1950	380	22/01/2002
Saint-Leu (CIRAD)	222	01/01/1997	387.5	22/01/2002
Etang-Saint-Leu (CIRAD)	429	01/02/2002	303.5	05/02/2012
Cap Camélia¹	830	01/04/2002	168	26/02/2007 (Gamède)

¹ Station fermée en 2011

Tableau 1 – Précipitations journalières maximales (Bulletin Climatologique 2017, Météo France).

Des pics de pluviométrie sont observés chaque année sur la zone d'étude, avec parfois des cumuls exceptionnels sur une très courte durée. A titre d'exemple, le 5 février 2012, il est tombé plus de 261 mm de pluie en 3h sur la station Etang Saint-Leu (Cirad). Les précipitations journalières maximales représentent entre 7 et 29% du cumul annuel, ce qui montre l'impact significatif des événements climatiques extrêmes dans ce secteur.

3. Modélisation de l'érosion des sols

3.1. PRESENTATION DU MODELE WATERSED

L'emploi d'un outil de modélisation a pour objectif de simuler en tout point des bassins versants étudiés les processus de ruissellement et d'érosion des sols en se basant sur l'ensemble des connaissances acquises durant les phases de collectes de données et de mesures sur le terrain. La figure suivante montre l'articulation des différentes étapes menant à la modélisation (Figure 8).

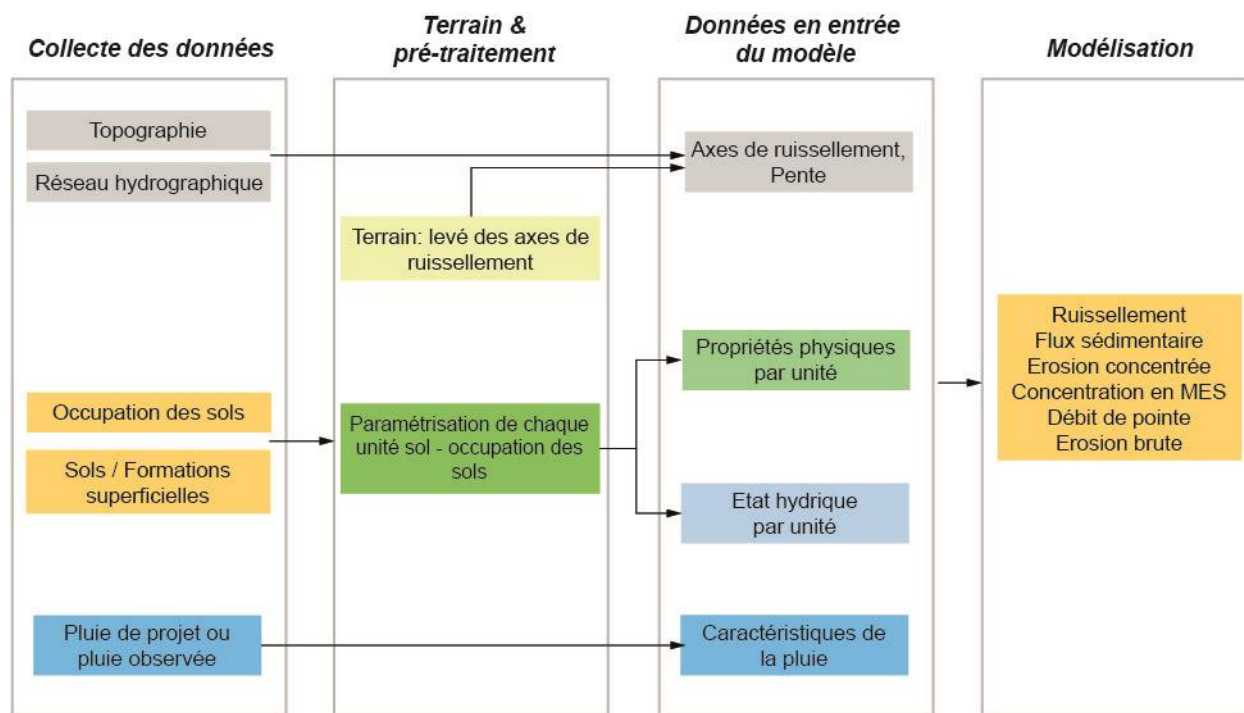


Figure 8 : Articulation des différentes tâches autour de la modélisation.

Le modèle WaterSed est un modèle **non-dynamique** distribué simulant le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant pour un évènement de pluie donné. Calibré et/ou validé dans de nombreux contextes (Haute-Normandie, Mayotte, Champagne, Corse, Alsace, Japon, etc.), cet outil permet d'évaluer l'impact de mesures préventives et curatives (aménagements d'hydraulique douce/dure, mares, etc.) ou encore de prévoir les conséquences de scénarii futurs d'occupation des sols et de changements climatiques.

La mise en place de la modélisation s'est effectuée en plusieurs étapes :

- Définition d'évènements pluviométriques de référence ;
- Paramétrisation du modèle ;
- Modélisation et synthèse des résultats.

3.2. DEFINITION DE L'ALEA PLUVIOMETRIQUE

L'aléa climatique sur la région de Saint-Leu revêt plusieurs formes. Les événements passés ont montré l'occurrence fréquente de phénomènes orageux localisés, caractérisés par des intensités de pluie très fortes (cumul important sur des temps courts, généralement 3-4h). C'est par exemple le cas de l'évènement du 5 février 2012 où des cumuls très forts ont été enregistrés sur 3 h seulement (261 mm/3h à Etang St Leu).

Les phénomènes cycloniques affectent également la région, avec des cumuls importants sur des temps plus longs (24-48h en général). C'est par exemple le cas du cyclone Dina, en janvier 2002, qui a engendré des cumuls sur 24h proches voire supérieurs à la pluie centennale journalière dans le secteur de Saint-Leu (env. 600 m/24h aux Colimaçons).

Un événement de type « Fakir » (24 avril 2018), qui a produit des fortes pluies, sur 4 à 6h et **sur des sols déjà saturés** par les phénomènes cycloniques des mois précédents (Ava, Dumazile et Berguitta), est également intéressant à analyser.

Les pluies de projet ont donc été définies de sorte qu'elles soient représentatives de ces différents types d'évènements et de sorte à balayer différentes gammes de périodes de retour. Les événements choisis correspondent à différentes périodes de retour (PR annuelle à PR centennale), sur différentes durées (2h à 24h) et permettent de comparer (1) l'effet du cumul de pluie et (2) l'effet de la durée de la pluie sur les processus d'érosion.

Les cumuls de pluie pour les différentes pluies de projet choisies ont été extraits à partir des données Météo France disponibles sur les différentes stations les plus proches. Ces données ont permis de reconstituer un gradient de pluie réaliste, basé sur des événements réels. Seule la pluie de projet décennale journalière (P_{10} 24h) a été déterminée à partir de données théoriques issues de la littérature (données GEDC, 1992).

Les pluies de projet suivantes ont été choisies :

- Evènement du 07 avril 2017, soit une pluie de 50 mm en 2h, équivalent à une période de retour de 1 à 5 ans ($P_{1-5 \text{ ans}}$ 2h) ;
- Pluie décennale journalière ($P_{10 \text{ ans}}$ 24h) ;
- Evènement du 24 avril 2018 (Tempête Fakir), cumuls pris sur 4h, équivalent à une période de retour comprise entre 10 et 25 ans ($P_{10-25 \text{ ans}}$ 4h) ;
- Evènement du 05 février 2012, cumuls pris sur 3h, équivalent à une période de retour de 25-30 ans ($P_{25-30 \text{ ans}}$ 3h) ;
- Evènement du 22 janvier 2002 (Cyclone Dina), cumuls sur 24h, équivalent à une pluie centennale ($P_{100 \text{ ans}}$ 24h).

Le tableau suivant recense les stations météorologiques utilisées et les cumuls (mm) associés aux différents évènements :

Station	X (UTM WGS84)	Y (UTM WGS84)	Altitude (m)	P ₁₋₅ 2h (07/04/2017)	P ₁₀ 24h (GEDC, 1992)	P ₁₀₋₂₅ 4h (Fakir, 2018)	P ₂₅₋₃₀ 3h (05/02/2012)	P ₁₀₀ 24h (Dina, 01/2002)
Ferme Corail	321444	7659974	5					330
Saint-Leu	322593	7656852	55		201	74	224	380
St-Leu Cirad	323581	7653186	222			106	120.5	387.5
Stella Portail	324084	7654932	300		218			
Etang St Leu	324429.5	7657733	429			149	261.5	
Mascarin	323147	7661656	520				146.6	484.8
Piton St Leu	326209	7653138	530		230	150	69	440.5
Le Plate	326999	7654397	740		232			
Colimaçons	323917	7662495	798	50	246	93	172	592.5
La Chaloupe	325174	7660787	877		317			
Carreau Alfred	328322	7663282	1530		660			700
Le Tévelave	329722	7653698	908		262	185		600
Les Makes	334871	7654950	980		370	236		907.3
Maïdo	332505	7669190	2200		372			800
Cumul pluviométrique moyen sur le bassin versant de la ravine du Cap (mm)				50	281	154	190	510
Intensité correspondante (mm/h)				25	11.7	38.5	63.3	21.3

Tableau 2 – Données climatiques utilisées pour les pluies de projet (données Météo France et GEDC).
Le cumul pluviométrique moyen sur le bassin versant a été calculé à partir des cartographies de pluie issues de ces données.

Le cumul pluviométrique moyen a été calculé sur le bassin versant à partir des cartographies de pluies issues des données climatiques ci-dessus. Le tableau indique également l'intensité de la pluie pour chaque évènement. On remarque que la pluie décennale journalière engendre un cumul supérieur aux pluies de période de retour P10-25 et 25-30 ans (établies pour des durées de 4h et 3h respectivement), mais une intensité plus faible. Les évènements de période de retour P10-25 et 35-30 ans sont quant à eux plus courts mais d'intensité bien plus importante. Ainsi, les évènements journaliers, décennal et centennal, sont caractérisés par leur cumul de pluie alors que les évènements P10-25 et P25-30 se démarquent par leur intensité.

La figure ci-dessous donne un exemple de cartographies de pluie obtenues par interpolation des données du Tableau 2, pour la pluie décennale journalière (à gauche) et la pluie de période de retour 25-30 ans (à droite).

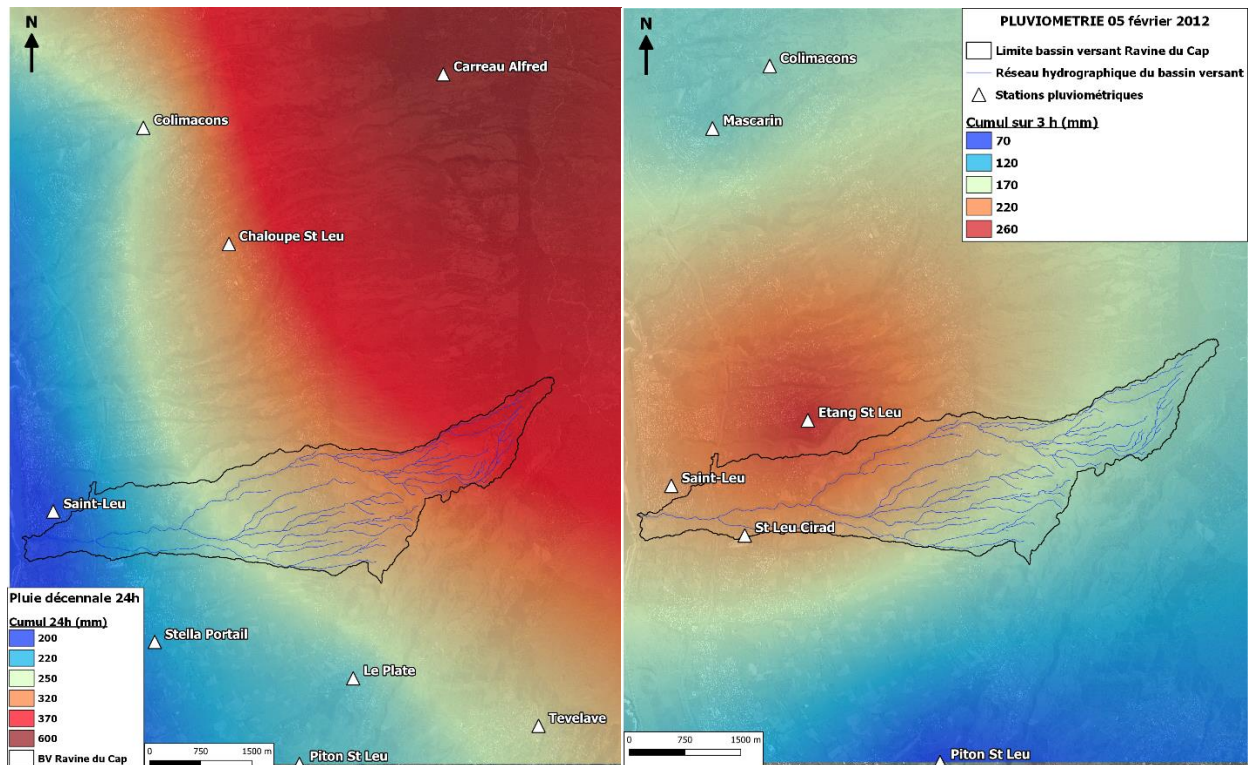


Figure 9 – Exemple de cartographies de pluie obtenues pour la pluie décennale journalière (à gauche) ou la pluie de période de retour 25-30 ans sur 3h (à droite) et intégrées à la modélisation.

3.3. PARAMETRES DU MODELE

La paramétrisation du modèle WaterSed consiste à affecter à chaque couple sol/occupation des sols, un état de surface des sols. Les propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque état de surface du sol est déduit à partir d'un système de reclassification expert (Figure 10).

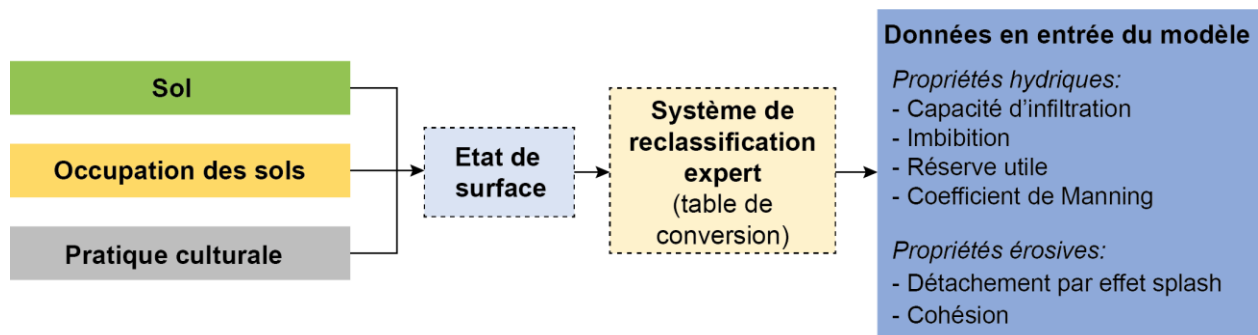


Figure 10 – Principe général de la paramétrisation du modèle

Les propriétés hydrodynamiques (capacité d'infiltration, imbibition, coefficient de Manning) et érosives (détachement par la pluie, cohésion) des différents types de sols en fonction du mode d'occupation des sols sont déterminées à partir de données issues de la littérature scientifique (travaux du CIRAD sur les sols réunionnais : Raunet, 1991, Perret, 1992 ; travaux LESELAM sur Mayotte ; Etudes sur Hawaii : Sartori et al. 2011...). L'ensemble des données est synthétisé dans une table de conversion formant le système de reclassification expert.

L'état hydrique initial est un paramètre important dans le partage ruissellement/infiltration d'une pluie donnée. Dans le modèle, cet état est pris en compte selon l'imbibition, fonction de la capacité d'infiltration et de l'antécédent pluvieux.

3.4. DONNEES D'ENTREE DU MODELE

3.4.1. Occupation du sol

La carte d'occupation du sol est rappelée à la Figure 11. Sur la base de l'orthophoto de 2017, une proportion d'environ 20% de la surface des cannes à sucre a été considérée comme coupée. La couverture du sol étant moindre (voire inexistante si le sol est complètement à nu), les propriétés hydrodynamiques sont plus défavorables que pour la canne sur pieds et l'érosion exacerbée dans ces secteurs. L'orthophoto de 2017 a été prise en août, soit au début de la saison de coupe de la canne (juillet-décembre). La proportion de 20% de cannes coupées apparaît donc cohérente pour la période et est confirmée par l'analyse des photos aériennes Google Earth sur les cinq dernières années. Cette analyse suggère une couverture de seulement 15% des sols en fin de saison de coupe (décembre). Cette période, située en saison cyclonique, est donc la plus critique en terme d'érosion sur le secteur cultivé en canne à sucre. A l'inverse, la période d'avril/juin montre un taux de couverture proche des 100% dans cette zone.

Par ailleurs, deux chantiers de valorisation foncière identifiés lors de nos investigations de terrain ont été ajoutés à la carte d'occupation des sols. Ces chantiers sont caractérisés par des sols nus formés de remblais meubles et non consolidés aux propriétés hydrodynamiques et érosives très défavorables.

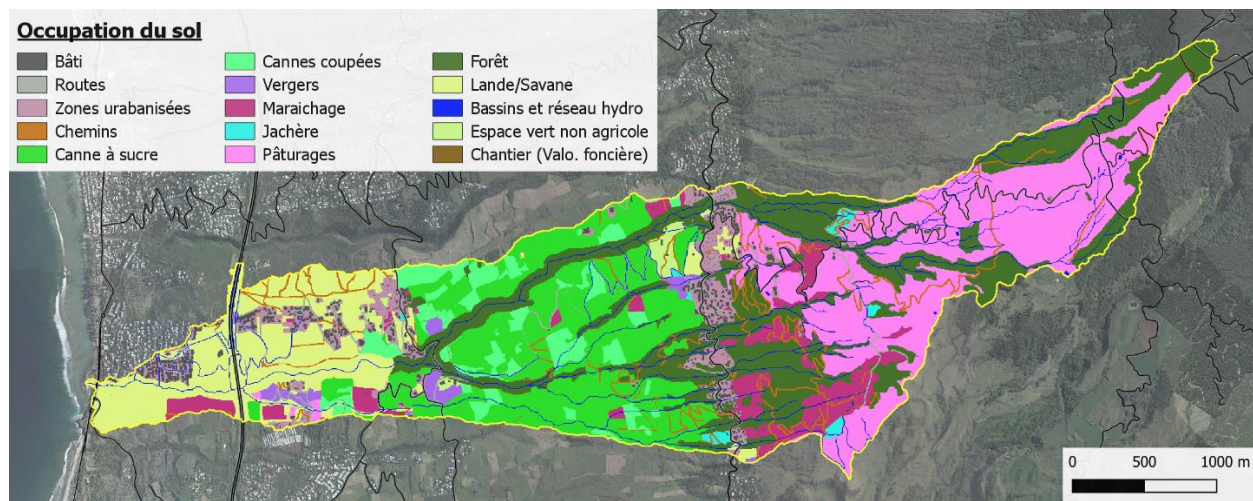


Figure 11 – Carte d'occupation du sol utilisée pour la modélisation hydrologique et sédimentaire sur le bassin versant de la Ravine du Cap.

3.4.2. Propriétés hydrodynamiques, érosives et topographie

Les propriétés hydrodynamiques des terrains sont caractérisées selon 4 couches :

- **Imbibition (mm)** : perte initiale correspondant à l'humectation du sol et à l'interception de la pluie par la végétation. Elle est dépendante de l'antécédent pluvieux ;
- **Capacité d'infiltration (mm/h)** : perte continue par infiltration de l'eau au sein de la porosité du sol ;
- **Capacité de stockage (mm)** : hauteur d'eau maximum équivalente à un remplissage total de la porosité du sol; Cette valeur est abaissée si les sols ont subi un antécédent pluvieux important. C'est le cas pour la simulation de l'évènement type « Fakir ».
- **Coefficient de Manning** : rugosité à la surface du sol, conditionnant avec la pente, la vitesse de l'eau.

Les caractéristiques érosives sont quant à elles définies suivant deux couches:

- **Concentration potentielle en matières en suspension (MES) dans les eaux de ruissellement (g/l)** : érosion en nappe provoquée par l'impact des gouttes de pluie à la surface du sol ;
- **Cohésion**: coefficient adimensionnel décrivant la sensibilité du sol à l'arrachement en cas de ruissellement concentré (érodibilité).

Deux couches supplémentaires sont nécessaires pour caractériser l'évènement pluviométrique :

- **Hauteur de pluie (mm)** : lame d'eau précipitée (cf. §3.2.);
- **Durée effective (min)** : durée avec une intensité de pluie supérieure à 0 mm/h.

Enfin, le modèle WaterSed propage le ruissellement à la surface du sol selon les lignes de plus grandes pentes et selon les axes de ruissellement inventoriés par la BD Topo et décrits sur le terrain. Trois couches additionnelles sont ainsi renseignées dans le modèle :

- **Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)** : altimétrie discrétisée en mailles de 5 m et corrigé hydrologiquement à partir du réseau de ruissellement vérifié sur le terrain ;
- **La largeur et la pente des axes de ruissellement.**

Au final, 11 cartes sont donc nécessaires pour effectuer une simulation : 6 pour caractériser les propriétés physiques de l'occupation des sols, 2 pour caractériser l'évènement de pluie et 3 pour décrire la topographie.

3.5. RESULTATS

Les simulations ont été réalisées sous l'environnement SAGA GIS et les sorties de modélisation ont été traitées sous le logiciel R. Les deux logiciels sont en open-access et en open-source.

L'objectif de ces simulations, pour les différentes pluies de projet et à l'échelle du bassin versant, est :

- D'identifier les classes d'occupation des sols produisant le ruissellement et d'estimer les volumes de ruissellement et les débits pointes à l'exutoire ;
- D'identifier les classes d'occupation des sols sensibles à l'érosion diffuse et les zones d'érosion concentrée (ravinement) ;

- D'estimer les quantités de sédiments transportées jusqu'au lagon (flux sédimentaire et concentration en MES à l'exutoire de la ravine) ;

Six variables principales vont être exploitées et analysées en sortie du modèle. Il s'agit du :

- **Flux sédimentaire** : quantité totale de terre transportée en un point donné pour un évènement de pluie donné (*tonnes*) ;
- **Volume de ruissellement** : quantité totale d'eau ruisselée qui transite en un point donné (*m³*) ;
- **Erosion concentrée**: quantité de terre érodée sous l'action du ruissellement (*kg*), phénomène de ravinement ;
- **Concentration en Matière en Suspension (MES)** à l'exutoire de la ravine (*g/l*) ;
- **Débit de pointe** à l'exutoire de la ravine (*m³/s*) ;
- **Erosion brute** : somme de l'érosion concentrée et de l'érosion diffuse (érosion engendrée par effet « splash ») (cf. §2.6, p21-22).

3.5.1. Pluie courante de courte durée (PR< 5 ans, durée 2h)

Les pluies courantes, de période de retour inférieure à 5 ans, génèrent une érosion concentrée (ravinement) principalement localisée au droit **des chemins d'exploitation agricole**. Ces chemins en terre sont donc les principales sources du flux sédimentaire qui transite en direction de l'exutoire (33% de la contribution à l'érosion totale). Le ruissellement est quant à lui essentiellement concentré dans les ravines principales.

Ce type d'évènement génère une crue limitée de la Ravine du Cap (débit de crue de l'ordre du *m³/s*). La concentration maximale en MES modélisée à l'exutoire de la ravine est de **0.3 g/l**. Cette valeur apparait cohérente avec la teneur en MES mesurée dans les eaux de la ravine suite à la crue du 7 avril 2017 (0.85 g/l⁴).

La quantité totale de sédiments transitée au niveau de l'exutoire (= flux sédimentaire) et qui atteint donc potentiellement le lagon, est de **6.4 tonnes**.

La figure ci-dessous illustre les résultats de cette simulation en présentant les zones où se produisent l'érosion concentrée, le flux sédimentaire et le ruissellement (Figure 12).

⁴ MAREX (2017) – Analyse de l'impact potentiel sur le milieu récifal de l'écoulement de la ravine du cap (Saint Leu) du 07 et 09 avril 2017, Note technique, 41p.

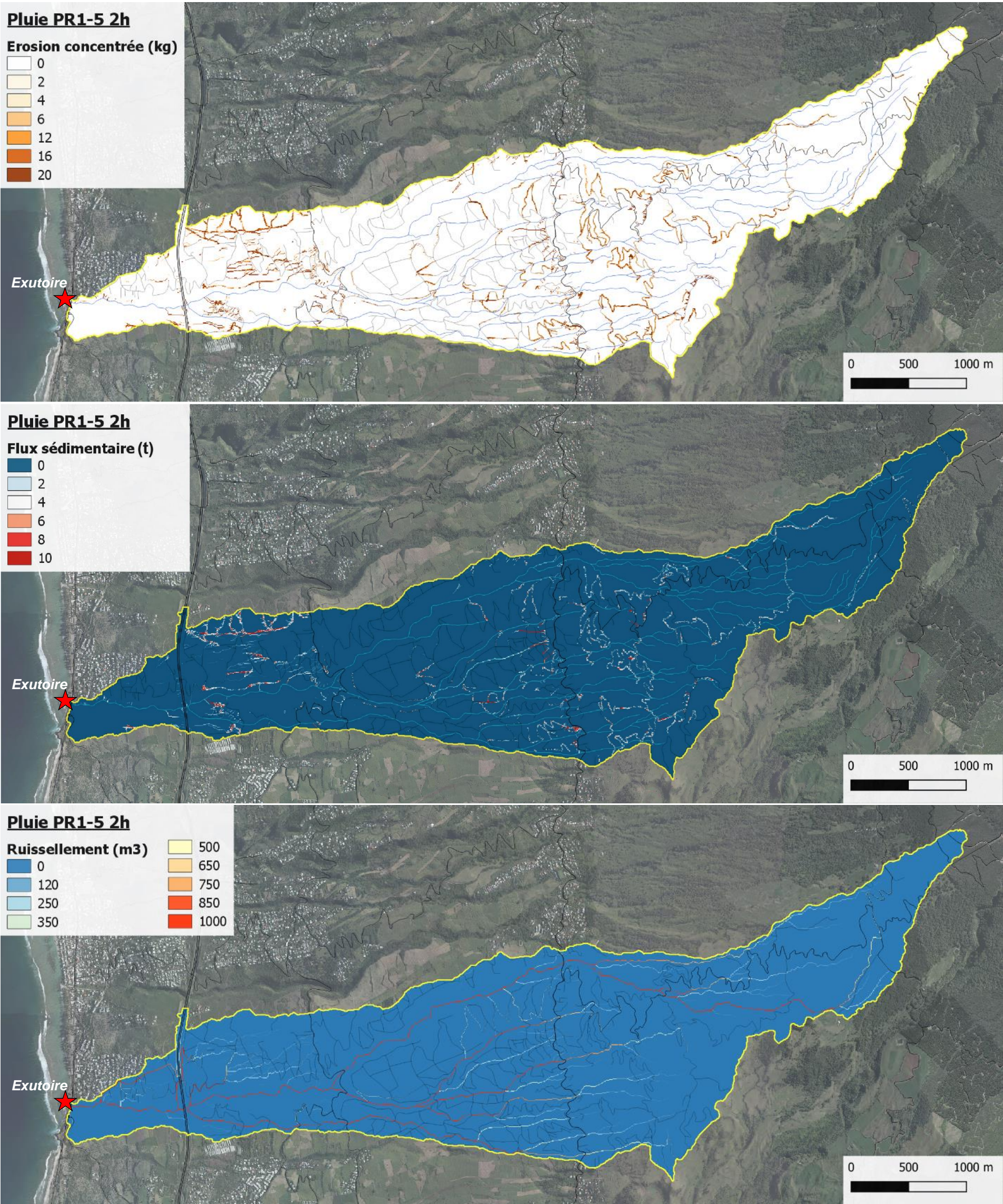


Figure 12 – Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie courante de période de retour <5 ans et d'une durée de 2h.

3.5.2. Pluie décennale sur 24h

Lors d'une pluie décennale, les zones cultivées les plus sensibles à l'érosion sont le siège d'une forte érosion concentrée avec d'important départs de matériaux terrigènes (Figure 13). Les secteurs les plus critiques sont les cultures maraichères des hauts (36% de l'érosion brute totale), où se conjuguent fortes pentes, faible couverture végétale et sol sensible à l'érosion lorsque celui-ci est travaillé. Les champs de cannes, en particulier les secteurs coupés, génèrent également un important flux sédimentaire. Les chemins en terre subissent également des phénomènes de ravinement importants.

Le ruissellement de l'eau, majoritairement concentré dans les ravines principales pour des pluies inférieures, se produit ici à l'échelle de tous les thalwegs présents sur le bassin versant (Figure 12).

Ce type d'évènement génère une crue de la Ravine du Cap d'environ **40 m³/s** (même ordre de grandeur que le débit de crue théorique estimé dans la littérature). La concentration maximale en MES modélisée à l'exutoire de la ravine est de **54 g/l**. La quantité totale de sédiments transitée au niveau de l'exutoire est de **82.10³ tonnes**.

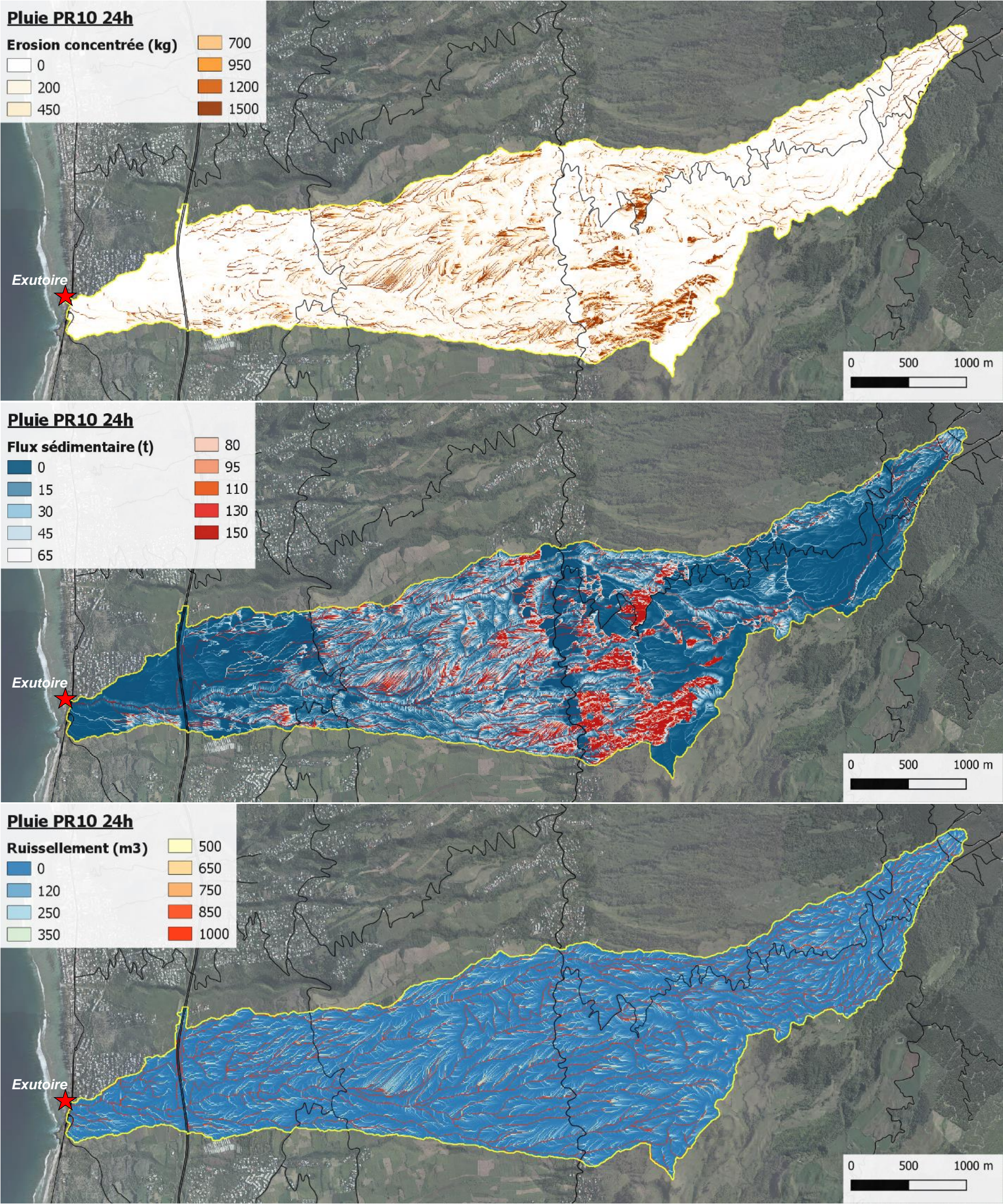


Figure 13 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie décennale de 24h.

3.5.3. Pluie intense de courte durée, avec antécédent pluvieux – Evènement de type Fakir (PR 10-25 ans, durée 4h)

Lors de ce type d'évènement, l'état de saturation des sols joue un rôle important sur le ruissellement et les phénomènes érosifs. En effet, les secteurs les plus sensibles en terme d'érosion sont identiques que pour les autres pluies de PR > 5 ans (Figure 14), notamment la pluie décennale, mais la capacité d'infiltration amoindrie des sols engendre :

- Une crue supérieure malgré une durée de pluie plus faible (débit de crue **60 m³/s**) ;
- Une concentration maximale en MES à l'exutoire identique à la pluie décennale sur 24h (**31 g/l**) ;
- Une quantité totale de sédiments transitée au niveau de l'exutoire de **26.10³ tonnes**, supérieure à un évènement de PR 25-30 ans de durée similaire (cf. § suivant).

Malgré une période de retour de 10-25 ans, le flux sédimentaire modélisé pour ce type d'évènement est inférieur à celui de la pluie décennale sur 24h (cf. paragraphe précédent). Cela s'explique par des cumuls de pluie totaux plus importants sur l'évènement décennal. En effet, un épisode de type Fakir engendre de forts cumuls mais sur une courte durée (4h), à l'origine de phénomènes de type « crue éclair » alors qu'un évènement décennal sur 24h engendre des cumuls très importants sur une durée plus longue et donc des crues de plus longue durée.

La quantité de sédiment transitée est donc à rapporter à la fois au cumul de pluie et à la durée de l'évènement pluvieux.

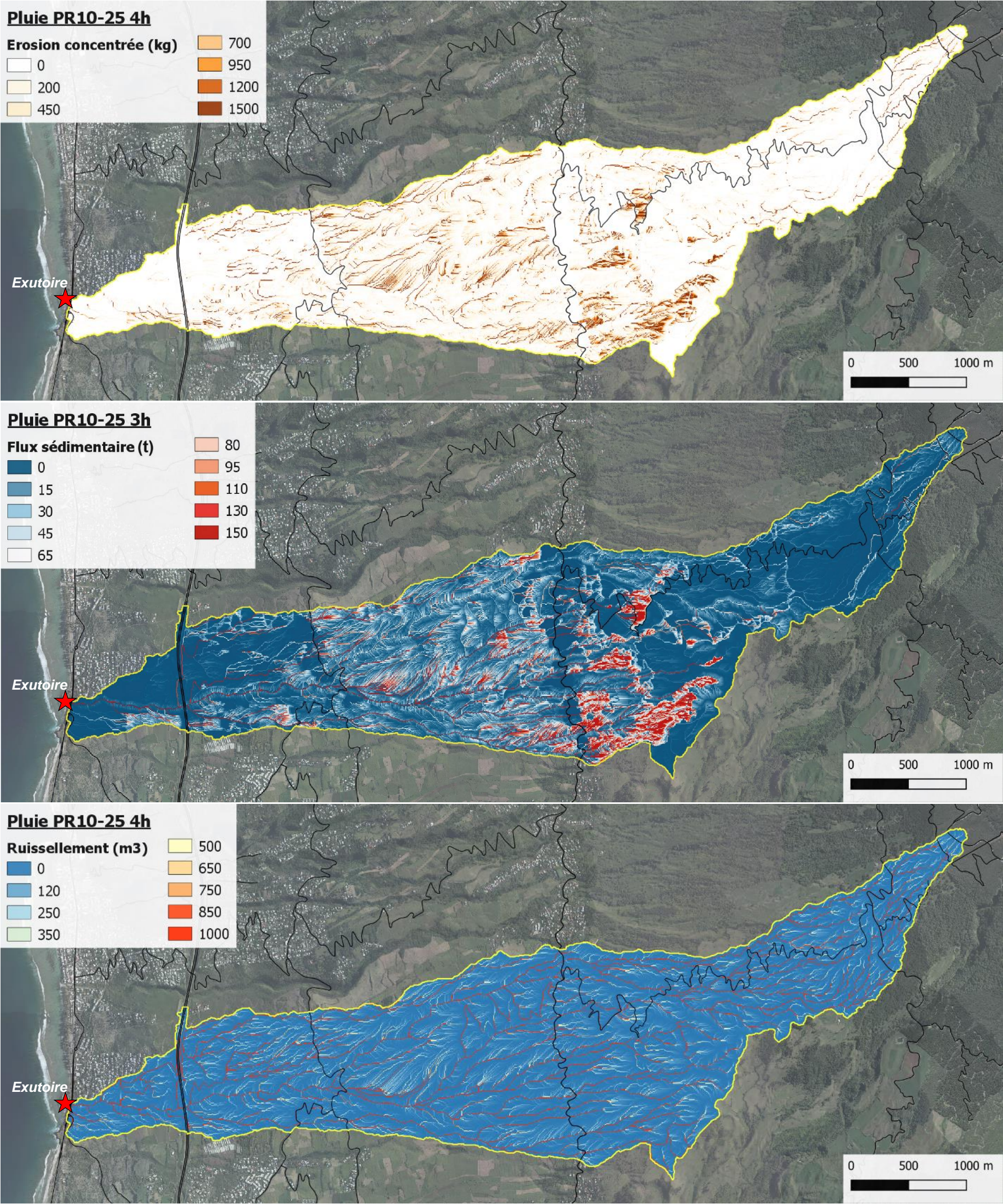


Figure 14 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour un évènement de type Fakir (PR10-25 ans, durée 4h, avec antécédent pluvieux).

3.5.4. Pluie très intense de courte durée (PR 25-30 ans, durée 3h)

Les secteurs concernés par une forte érosion concentrée sont principalement les zones cultivées en maraichage et en canne à sucre dans des proportions similaires (20 à 25 % de la contribution à l'érosion totale). Le ruissellement se produit également à l'échelle de tous les thalwegs présents sur le bassin versant (Figure 15).

Ce type d'évènement génère une crue de la Ravine du Cap d'environ **75 m³/s** (même ordre de grandeur que le débit de crue trentennal théorique estimé dans la littérature). La concentration maximale en Matières en Suspension (MES) modélisée à l'exutoire de la ravine est de **29 g/l**. La quantité totale de sédiments transitée au niveau de l'exutoire est de **23.10³ tonnes**.

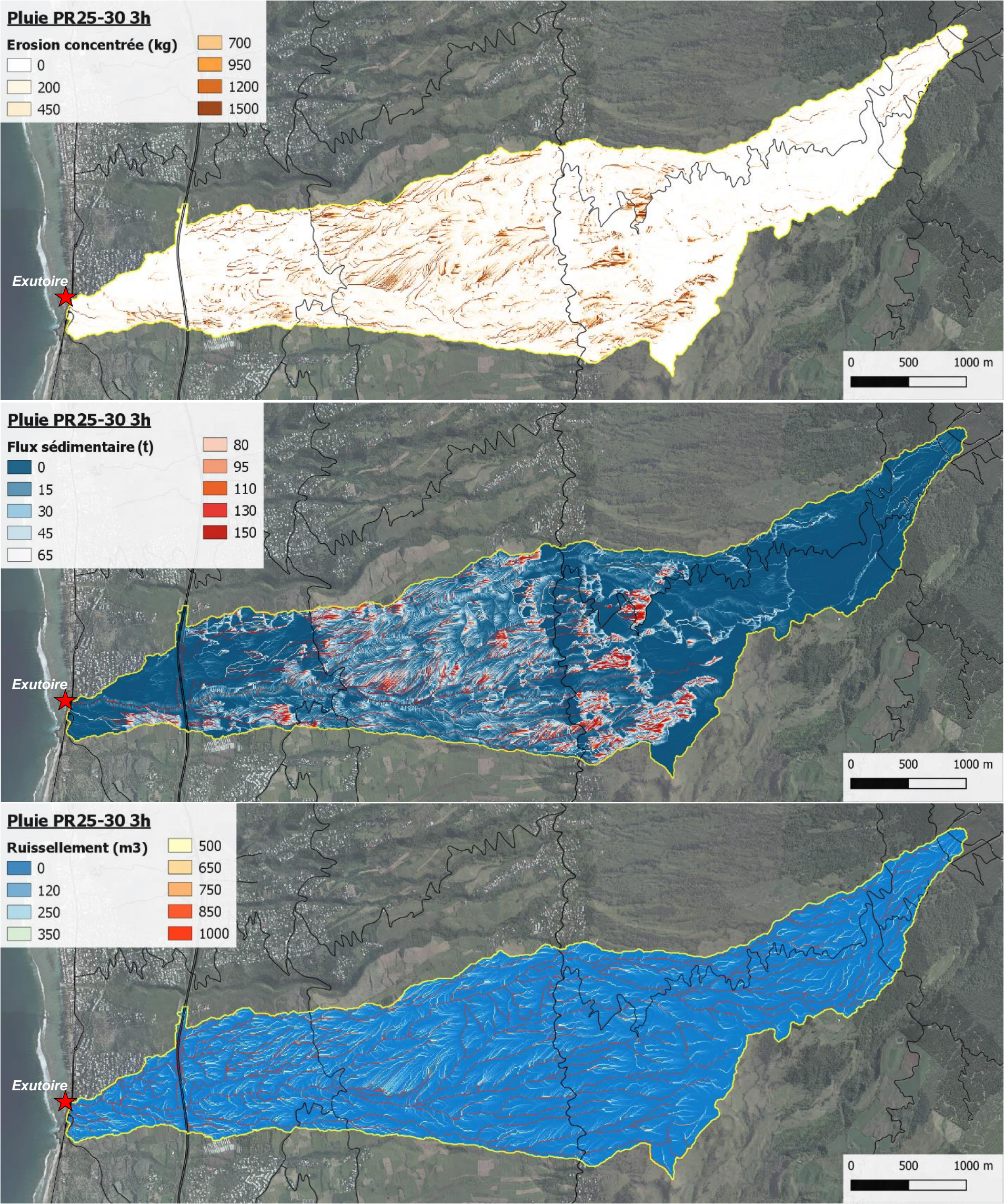


Figure 15 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie de PR25-30 ans et de durée 3h.

3.5.5. Pluie centennale sur 24h

Le modélisation d'un événement extrême de type pluie centennale journalière génère des taux d'érosion gigantesques. La grande majorité des secteurs agricoles (maraichage, canne, verger, jachère) et naturels (forêts) sont concernés par le ravinement et le départ de terrigènes (Figure 16). Ce type d'évènement est à l'origine d'une crue importante de la ravine, de l'ordre de **105 m³/s**. La concentration maximale en MES modélisée à l'exutoire est de **118 g/l**. La quantité totale de sédiments transitée au niveau de l'exutoire sur la durée de l'évènement est atteint près de **419.10³ tonnes**.

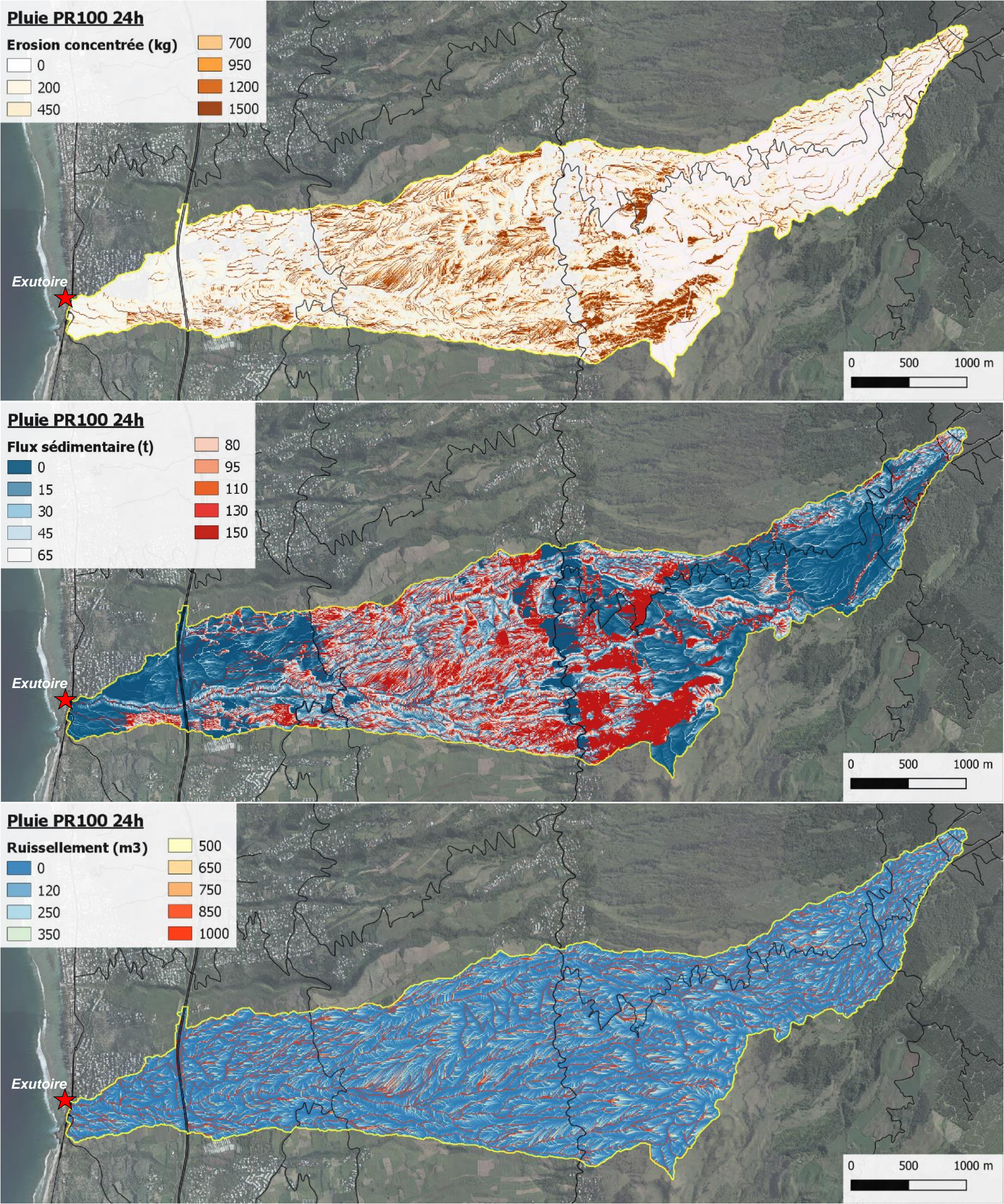


Figure 16 - Cartographie de l'érosion concentrée, du flux sédimentaire et du ruissellement modélisé pour une pluie centennale de 24h.

3.5.6. Synthèse et contribution à l'érosion selon le type d'occupation des sols

Le tableau ci-dessous résume les débits de crue et les quantités de terrigènes susceptibles d'atteindre le lagon à l'exutoire de la ravine du Cap pour les différents scénarii de pluie modélisés.

Les débits de crue et la concentration en Matières en Suspension (MES) modélisés sont cohérents avec les quelques valeurs mesurées ou théoriques disponibles et confirment donc la validité du modèle. Toutefois, en l'absence d'un suivi hydro-sédimentaire *in situ* pérenne de la ravine et du bassin versant permettant (1) de quantifier les transports liquides et solides réels et (2) de caler avec précision le modèle, ces données sont à considérer comme des ordres de grandeur (cf. §3.6).

	<i>Cumul de pluie moyen sur le BV (mm)</i>	Exutoire Ravine du Cap		
		Débit de crue max (m³/s)	MES (g/)	Flux sédimentaire (tonnes)
Pluie PR < 5 ans - 2h	50	1.1	0.28	6.4
Pluie PR 10 ans - 24h	281	41	54	82 000
Pluie PR 10-25 ans - 4h – avec antécédent pluvieux	154	62	31	26 000
Pluie PR 25-30 ans - 3h	190	74	29	23 000
Pluie PR 100 ans - 24h	510	105	118	419 000

Tableau 3 – Synthèse des résultats des modélisations à l'exutoire de la Ravine du Cap pour les différentes pluies de projet.

Les apports en terrigènes modélisés sont conséquents pour tous les événements. Ils témoignent des quantités de sédiment susceptibles d'atteindre le lagon et d'affecter les récifs coralliens.

Le flux sédimentaire pour une pluie de période de retour 10 ans sur 24h est très supérieur à celui d'événements de période de retour supérieure mais de durée plus courte. En effet, des événements de type Fakir (PR10-25 ans) ou de type Février 2012 (PR25-30 ans) sont des événements très courts et très intenses. Ils engendrent des crues éclairs de la ravine (montée en charge très rapide, décrue rapide) et des transports de sédiments importants au regard de la durée de la pluie. Toutefois, sur un événement décennal sur 24h, l'intensité de la pluie (mm/h) est certes moindre mais celle-ci s'étale sur des durées plus longues avec, au final, des cumuls totaux très importants et des crues de plus longue durée. La quantité de sédiment transitée est donc plus importante car le processus d'érosion se produit sur des durées et des cumuls bien plus conséquents.

La contribution à l'érosion des différents modes d'occupation des sols sur le bassin versant a été analysée pour les différentes pluies de projet (Tableau 4).

Occupation du sol	Surface (ha)	Contribution à l'érosion brute totale (%)				
		PR < 5ans 2h	PR 10 ans 24h	PR 10-25 ans 4h	PR 25-30 ans 3h	PR 100 ans 24h
Maraichage	46.1	12%	36%	35%	25%	36%
Canne coupée	45.4	8%	17%	18%	24%	16%
Canne à sucre	161.4	13%	16%	17%	20%	16%
Chemin	28.6	33%	12%	12%	14%	12%
Forêt	191.3	17%	12%	10%	8%	11%
Verger	8.9	6%	1%	1%	2%	1%
Prairie	182.2	0%	2%	1%	1%	1%
Jachère	4.6	2%	1%	1%	1%	1%
Lande/Savane	101	8%	4%	4%	7%	4%
Chantiers (valorisation foncière)	0.2	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Bâti	18.1	0%	0%	0%	0%	0%
Route	30.8	0%	0%	0%	0%	0%
Espace artificialisé	36.4	0%	0%	0%	0%	0%
Espaces verts non agricoles	5.6	0%	0%	0%	0%	0%
Réseau hydro	26.9	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 4 – Contribution (en %) à l'érosion de chaque type d'occupation du sol.

Ce tableau montre que pour toutes les pluies simulées de périodes de retour supérieures à 5 ans, les cultures maraîchères sont les plus grosses productrices de terrigènes. La contribution à l'érosion de ce type de culture est **de 25% pour un évènement comme celui du 5 février 2012 (PR 25-30 ans) et atteint 35-36% pour des épisodes de type Fakir (sols imbibés), et les scenarii décennal et centennal.**

Parallèlement, la culture de la canne à sucre, compte tenu de sa grande superficie à l'échelle du bassin versant (206.8 ha au total), contribue également de manière significative à l'érosion. Cette contribution est comprise entre **16 et 24% pour la canne coupée** et entre **16 et 20 % pour la canne en pied** selon les scenarii de pluie de PR > 5 ans. Cette contribution à l'érosion est attestée par des évidences de terrains, avec des ravinements importants observés au droit de certaines parcelles agricoles (Figure 17).

Les **chemins en terre** sont également des zones d'érosion privilégiées et **contribuent à 12-14% de l'érosion pour des pluies de période de retour supérieures à 5 ans. Pour des pluies inférieures à 5 ans, en revanche, il s'agit des plus gros producteurs de terrigènes, avec 1/3 des apports totaux.**

Les chantiers de valorisation foncière sont à l'origine de taux d'érosion spécifiques (t/ha) importants. Toutefois, leur faible superficie à l'échelle du bassin versant leur confère une faible contribution à l'érosion totale. A l'inverse, les forêts génèrent relativement peu de sédiments à l'hectare mais la grande surface couverte en forêt sur le bassin versant (191 ha, soit près de 22% de la surface totale), implique une contribution non négligeable à l'apport en terrigènes.

Enfin, les zones de pâturages (prairies) des hauts du bassin versant, compte tenu de leur très bonne couverture végétale (kikuyu essentiellement) produisent très peu de sédiments. Ce type de couverture favorise en revanche le ruissellement, comme cela a été observé sur le terrain, les herbes de kikuyu se couchant au passage de l'eau (Figure 18).

Les secteurs bâtis, les routes et les espaces artificialisés, sont majoritairement couverts de surfaces bétonnées ou bitumées. Ils ne génèrent donc pas de terrigènes et leur contribution à l'érosion brute est donc nulle. Ces secteurs favorisent toutefois le ruissellement, compte tenu de la capacité d'infiltration très faible.



Figure 17 – Importants ravinements observés sur une parcelle de canne à sucre.



Figure 18 – Ruissellement sur une prairie de kikuyu (en haut – ACLES 2006) et herbes couchées sur le passage de l'eau visibles suite à une forte pluie (en bas - photo 05/03/2020).

3.6. LIMITES DU MODELE

Le modèle WaterSed est un modèle à base physique qui permet l'intégration de nombreuses caractéristiques physiques et paramètres des terrains analysés (type de sol, capacité d'infiltration, érodibilité...). Ce type de modèle permet ainsi de reproduire les phénomènes naturels de manière la plus réaliste possible. Toutefois, l'intégration de valeurs et de paramètres réalistes nécessite que le modèle soit contraint et calé par des mesures de terrain. Ce travail de mesure *in situ* permet de quantifier le ruissellement, les taux d'érosion, la quantité de matière en suspension en lien avec la quantité de pluie et le type de sol sur des événements réels observés. Ce travail, réalisé par exemple dans le cadre du programme LESELAM à Mayotte à l'échelle de la parcelle, a permis ensuite de modéliser le ruissellement et l'érosion à l'échelle de bassins versants.

Ce travail n'a pas été mené dans le cadre de cette étude et les données de terrain existantes sur le bassin versant de la ravine du Cap sont très limitées. Parmi les informations existantes, on peut citer le débit théorique de crue à l'exutoire (Q_{10} , Q_{30} , Q_{100}), les données du CIRAD sur les taux d'érosion en fonction du type de sol et de culture, obtenues dans les années 90 à partir d'expérimentations à la parcelle ou sur placettes en laboratoire, et les mesures physico-chimique (dont teneur en MES) réalisées lors de la crue du 7 avril 2017. Les modèles réalisés dans le cadre de cette étude ont été calés afin de s'approcher au mieux de ces données. Ces dernières étant toutefois très parcellaires, les résultats des modèles doivent donc être pris comme des ordres de grandeur et non comme des valeurs fermes.

4. Propositions de solutions de rémédiation

Afin de limiter les phénomènes érosifs sur le bassin versant et les impacts délétères sur le lagon à l'aval, des mesures compensatoires peuvent être mises en œuvre. Ces solutions, à développer de manière pérenne en concertation avec les différents acteurs impliqués dans la problématique doivent permettre de limiter les apports terrigènes à l'exutoire de la ravine.

Les différents travaux menés sur le bassin versant (état des lieux, diagnostic agricole, modélisation) montrent :

- L'impact important de la culture maraîchère/vivrière des Hauts sur l'érosion et les flux de sédiments ;
- L'impact significatif des champs de canne, en particulier en fin de saison ou lors des périodes de replantation (sol à nu ou peu couvert) ;
- Le rôle important des chemins en terre qui concentrent le ravinement ;
- Un réseau d'évacuation des eaux pluviales inexistant ou inefficace, notamment dans les Hauts (ruissellement hors ravines et apport d'eau supplémentaire vers les terrains à l'aval) ;
- Une augmentation de la surface du bassin versant liée aux rejets issus des zones urbanisées en direction de la ravine. Le ruissellement sur les surfaces imperméabilisées favorise l'apport de polluants anthropiques additionnels (hydrocarbures...).

Pour réduire les impacts issus de l'érosion des sols sur le lagon au droit du bassin versant de la ravine du Cap, plusieurs solutions de remédiation sont envisageables. Parmi ces solutions, trois paraissent cohérentes et réalistes à mettre en œuvre :

- La revégétalisation des zones maraîchères des Hauts, en particulier dans les secteurs les plus sensibles (axes de ravines) ;
- La plantation de haies fourragères aux limites de parcelles dans la zone cultivée en canne à sucre à mi-hauteur du bassin versant ;
- La réalisation ou la remise en état d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales dans les secteurs agricoles, en particulier le long des chemins agricoles en terre.

La réalisation de bassins de rétention tampons n'a pas été retenue comme une solution adaptée dans ce contexte, compte tenu du coût très important de réalisation, des difficultés d'accès notamment dans les Hauts et de l'entretien conséquent nécessaire au maintien de leur efficacité dans le temps.

Les différentes solutions proposées sont détaillées ci-dessous. Pour chacune d'entre elle, des modélisations ont été réalisées afin de comparer leur impact sur l'érosion et le ruissellement par rapport à l'état actuel. Ces scénarii ne sont toutefois pas exhaustifs et d'autres solutions pourront

également être modélisées lors des phases futures du projet (phases de concertation et de mise en œuvre en fonction des choix effectifs qui seront réalisés.

4.1. REVEGETALISATION DES ZONES MARAICHÈRES DES HAUTS

4.1.1. Principe

Pour pallier à l'érosion importante dans les zones maraichères, la mesure première à envisager consisterait à revégétaliser les secteurs les plus critiques. Une revégétalisation progressive, voire complète de ces secteurs des Hauts pourrait être envisagée. L'objectif étant d'aboutir à une couverture végétale optimale dans la zone aux plus fortes pentes en amont de la RD3. Selon les scénarii envisagés, cette revégétalisation pourrait consister soit :

- En un reboisement partiel ou total des parcelles, notamment en bordure des axes des ravines (reconstitution d'une ripisylve). Cette solution implique une diminution voire un arrêt des cultures maraichères dans les secteurs reboisés. Cette solution est particulièrement contraignante pour les exploitants agricoles (qui ne bénéficieront plus des ressources liées à leur exploitation) si elle est mise en œuvre sans mesure compensatoire. En revanche, elle serait probablement la mesure la plus efficace de lutte contre l'érosion.
- En la mise en œuvre d'une couverture végétale permanente sur les parcelles tout en conservant la culture maraichère. Cette solution consiste à planter des espèces végétales au sein des cultures existantes afin d'obtenir une couverture végétale quasi-permanente, limitant le départ des sols. Cette méthode présente l'avantage de conserver l'activité maraichère dans le secteur, sans impact majeur pour les agriculteurs. Elle nécessite toutefois une formation des agriculteurs qui doivent adhérer à la pratique sur le long terme pour que celle-ci porte ces fruits.

Pour notre étude, nous avons simulé la revégétalisation des parcelles selon plusieurs étapes successives, par ordre de priorité. Pour le modèle, cette revégétalisation consiste à modifier la carte d'occupation des sols (occupation type « forêt » à la place du maraichage) et à attribuer de nouvelles propriétés hydrodynamiques aux secteurs modifiés (coefficient d'infiltration, érodibilité...). Nous avons modifié l'occupation des sols en 4 étapes successives, selon les priorités ci-dessous, établies à partir des observations de terrain et des résultats du diagnostic agricole mené par le Département de La Réunion (Figure 19):

- Priorité 1 = Reboisement des axes et berges des ravines sur les parcelles maraichères à l'activité non déclarée (i.e. secteurs extrêmement critiques observés sur le terrain) ;
- Priorité 2 = Priorité 1 + revégétalisation au droit des axes des thalwegs et des zones d'érosion principales identifiées par le diagnostic agricole sur les parcelles au sud du bassin versant (données issues du diagnostic agricole⁵);
- Priorité 3 = Priorité 1 et 2 + reboisement de la parcelle exploitée propriété de l'ONF et des secteurs où sont identifiées des zones d'érosion sur toute la zone en amont de la RD3 (données issues du diagnostic agricole) ;

⁵ Hydrétudes (2021) – Gestion des écoulements pluviaux de la zone agricole et naturelle autour de la ravine du Cap et au-delà des 800 mètres d'altitude – Etude diagnostic, RE20-017.

- Priorité 4 = reboisement de l'ensemble des parcelles en maraichage ou en jachère en amont de la RD3.

Concrètement, la réduction de la surface totale en maraichage/jachère sur le bassin versant serait de :

- 9.5 % pour l'action de priorité 1;
- 13% pour la priorité 2 ;
- 26% pour la priorité 3 ;
- 68% pour la priorité 4 (les 32% restants sont situés en aval de la RD3).

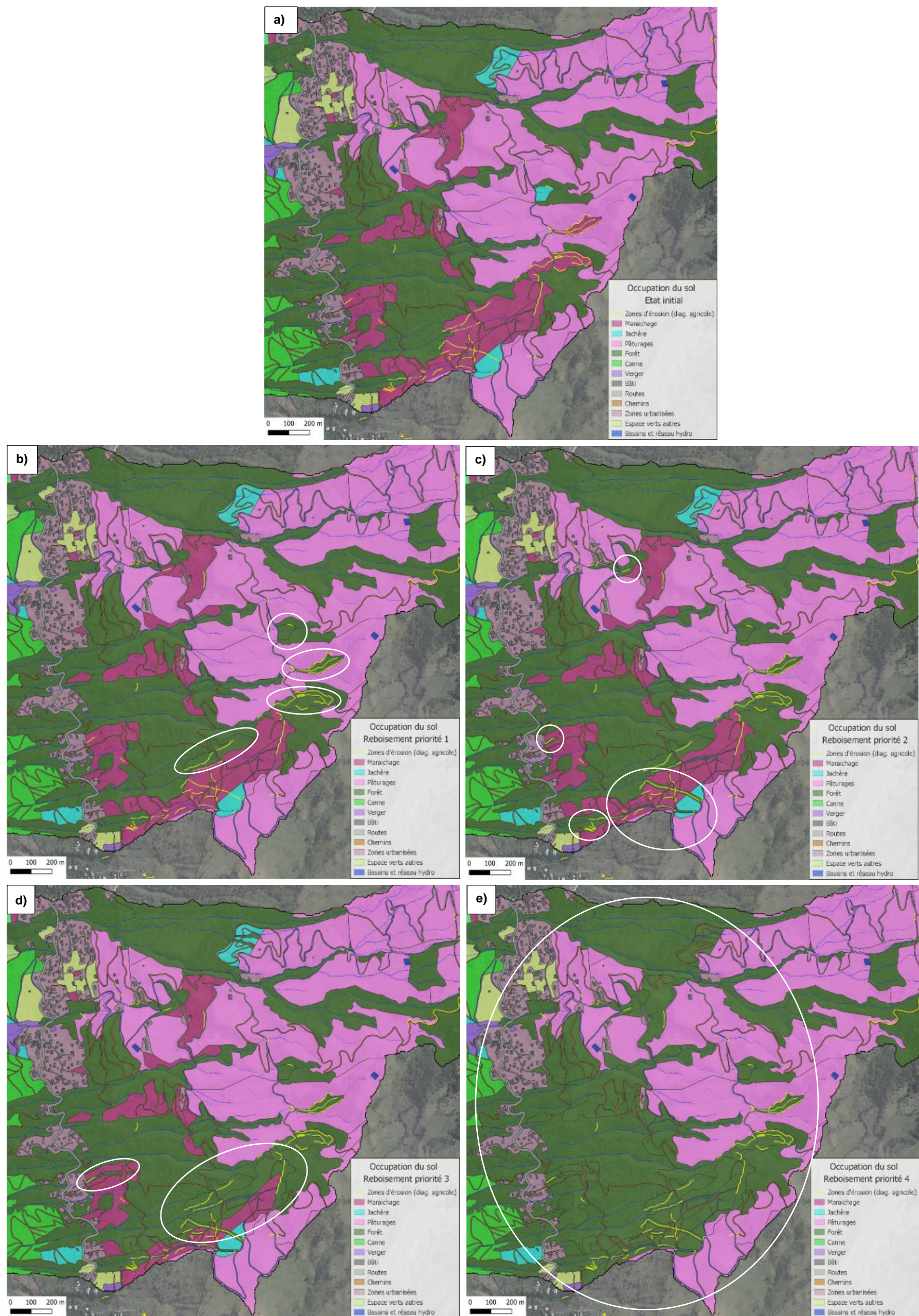


Figure 19 – Priorités de reboisement des parcelles maraîchères dans les hauts du bassin versant. a) Occupation du sol à l'état initial (actuel), b) à e) Occupation du sol après reboisement de priorité 1 à 4 respectivement. Les linéaments jaunes représentent les zones d'érosion identifiées par le diagnostic agricole. Les cercles blancs localisent les secteurs reboisés selon les priorités.

4.1.2. Modélisation des abattements

Les quatre priorités de reboisement ont été modélisées pour les différents scénarii de pluie. Pour cela, la carte d'occupation du sol a été modifiée afin de remplacer les parcelles en maraichage/jachère concernées par des zones forestières (Figure 19). Cette nouvelle cartographie a ensuite été implémentée dans le modèle WaterSed.

Ce travail a permis de comparer l'érosion brute, les concentrations en matières en suspension et les flux sédimentaires à l'exutoire obtenus à ceux de l'état initial (i.e. état actuel) et de quantifier les abattements attendus pour ces mesures.

Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

PR < 5 ans 2h	Δ Surface vs. état initial (%)	Abattement érosion brute (%)	Abattement MES (%)	Abattement flux séd. (%)
Reboisement priorité 1	-9.5%	-2%	-1%	-1%
Reboisement priorité 2	-13%	-4%	-2%	-2%
Reboisement priorité 3	-26%	-4%	-2%	-2%
Reboisement priorité 4	-68%	-7%	-4%	-4%

PR 10 ans 24h	Δ Surface vs. état initial (%)	Abattement érosion brute (%)	Abattement MES (%)	Abattement flux séd. (%)
Reboisement priorité 1	-9.5%	-13%	-13%	-13%
Reboisement priorité 2	-13%	-16%	-17%	-15%
Reboisement priorité 3	-26%	-21%	-20%	-20%
Reboisement priorité 4	-68%	-31%	-31%	-31%

PR 25-30 ans 3h	Δ Surface vs. état initial (%)	Abattement érosion brute (%)	Abattement MES (%)	Abattement flux séd. (%)
Reboisement priorité 1	-9.5%	-6%	-5%	-5%
Reboisement priorité 2	-13%	-8%	-7%	-7%
Reboisement priorité 3	-26%	-11%	-10%	-10%
Reboisement priorité 4	-68%	-19%	-17%	-17%

PR 100 ans 24h	Δ Surface vs. état initial (%)	Abattement érosion brute (%)	Abattement MES (%)	Abattement flux séd. (%)
Reboisement priorité 1	-9.5%	-13%	-17%	-17%
Reboisement priorité 2	-13%	-16%	-20%	-20%
Reboisement priorité 3	-26%	-21%	-28%	-27%
Reboisement priorité 4	-68%	-32%	-40%	-40%

Tableau 5 – Abattements observés sur l'érosion brute, la concentration en MES et le flux sédimentaire à l'exutoire selon l'importance du reboisement des secteurs maraichers des hauts, pour différents scénarii de pluie.

Ces résultats montrent l'efficacité du reboisement contre l'érosion et la production de terrigènes. Pour des pluies de période de retour 10 ans et 100 ans, **la réduction de la surface maraichère de 9.5 à 13% (priorités 1 & 2) engendre un abattement de l'apport sédimentaire à l'exutoire très significatif, de 13 à 20%**. L'érosion est réduite de 13 à 16% et la concentration en MES de 13 à 20%.

Pour des pluies plus courtes mais intenses (PR25-30 ans), la réduction de l'apport sédimentaire à l'exutoire est moindre mais tout de même compris entre **5 et 7%** pour un reboisement de priorité 1 ou 2.

En revanche, pour des pluies courantes de période de retour inférieures à 5 ans, les abattements sont peu significatifs pour un reboisement des parcelles maraichères. En effet, pour ces pluies, nous avons vu que la contribution à l'érosion du maraichage est relativement faible et que ce sont les chemins agricoles qui sont à l'origine des départs de terrigènes les plus importants.

Enfin, plus la surface reboisée est grande, plus les abattements sont tamponnés. Ainsi, un reboisement de 26% de la surface maraichère (priorité 3) engendre une réduction de l'apport sédimentaire à l'exutoire de 10 à 27%, tandis qu'un reboisement de 68% de la surface maraichère n'engendre une réduction de l'apport sédimentaire « que » de 17 à 40%.

4.2. IMPLANTATION DE HAIES AUX LIMITES DE PARCELLES CULTIVEES EN CANNE A SUCRE

Cette mesure a pour objectif de limiter le ravinement dans la zone cultivée en canne à sucre. L'objectif est de casser les grandes longueurs de pente où se produisent l'érosion concentrée. A l'heure actuelle, les parcelles sont pour la plupart plantées en continu. La mise en place de haies (haies arbustives ou haies fourragères) aux limites de parcelles a pour conséquence :

- De casser la vitesse d'écoulement des eaux et donc de réduire la formation de ravines ;
- De favoriser l'infiltration et le dépôt sédimentaire.

Dans le modèle, les haies ont été implantées en limite de parcelles cadastrales, principalement dans la zone cultivée en canne à sucre (entre la RD13 et le RD3) mais également plus à l'aval dans certaines zones de savane ou de culture maraichère et de vergers. La carte ci-dessous montre la localisation des haies modélisées (Figure 20). Les propriétés physiques et hydrodynamiques de ces haies sont les suivantes :

- Largeur = 2 m
- Capacité d'infiltration = 200 mm/h
- Coefficient de Manning = 0.3

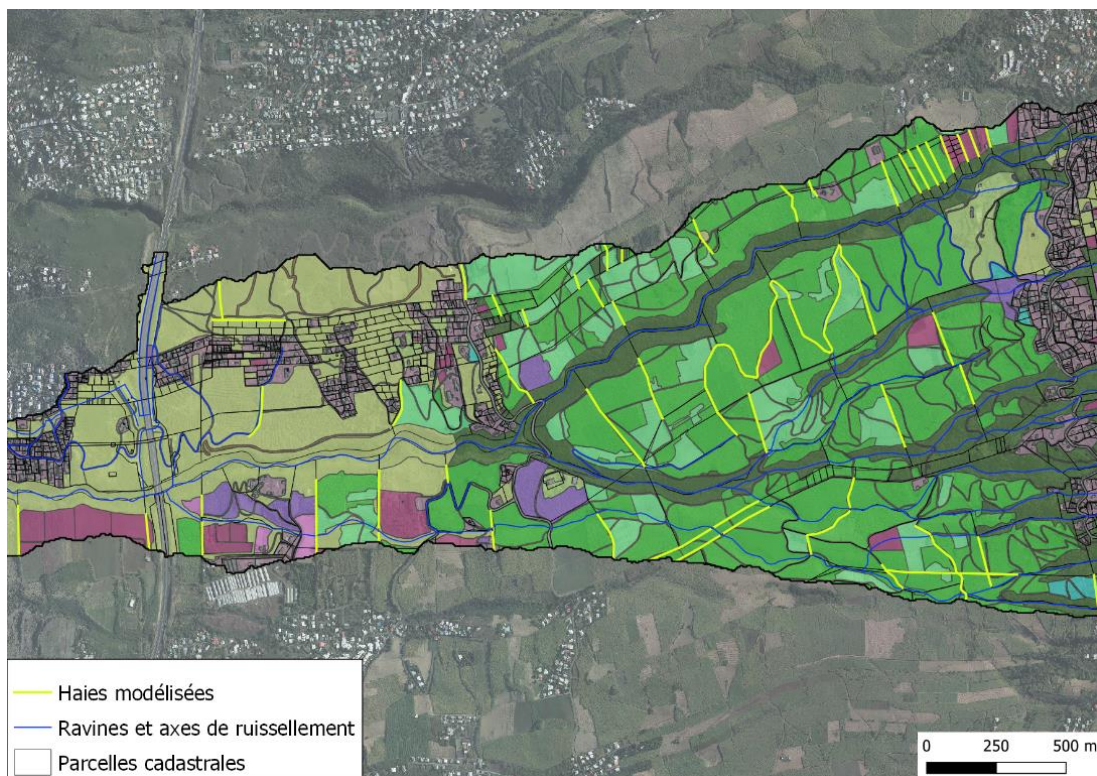


Figure 20 – Localisation des haies modélisées.

L'influence de ces haies sur l'érosion et sur les apports terrigènes au niveau de l'exutoire a été déterminée pour les quatre pluies de projet précédemment définies ($P_{<5}$ 2h, P_{10} 24h, P_{25-30} 3h et P_{100} 24h).

Les abattements obtenus (1) sur les apports terrigènes à l'exutoire et (2) sur l'érosion brute au niveau des différents types d'occupation du sol sont résumés ci-dessous :

Exutoire Ravine du Cap <i>Abattements liés à la présence de haies</i>	Débit de crue maximum (m ³ /s)	Matières en Suspension (MES) (g/l)	Flux sédimentaire (tonnes)
Pluie PR < 5 ans - 2h	-0.2%	-1.4%	-1.7%
Pluie PR 10 ans - 24h	-0.2%	-0.4%	-0.3%
Pluie PR 25-30 ans - 3h	-1.2%	-1%	-1.1%
Pluie PR 100 ans - 24h	-0.4%	-13%	-13%

Tableau 6 – Abattements modélisés à l'exutoire avec implantation de haies aux limites de parcelles agricoles.

Les résultats suggèrent une influence limitée des haies sur les apports terrigènes à l'exutoire, excepté pour une pluie centennale où l'abattement peut atteindre 13%. Ceci est cohérent avec les résultats précédents indiquant que la principale contribution à l'apport sédimentaire était les zones maraîchères. Les ravines sont donc déjà bien chargées en terrigènes lorsqu'elles

traversent la zone intermédiaire du bassin versant. D'autre part, malgré leur capacité d'infiltration importantes, ces haies représentent une surface très limitée à l'échelle du bassin versant. Leur action, lorsqu'on observe les phénomènes à l'échelle du bassin versant, est donc relativement faible.

Toutefois, **à l'échelle de la parcelle** et du type d'occupation du sol, on observe une contribution non négligeable sur la limitation de l'érosion. En effet, le tableau 7 montre que pour une pluie PR 25-30 ans, la présence de haies « empêche » le départ de près de 170 tonnes de matériaux dans les champs de canne. Cette réduction est de 70 tonnes pour des pluies décennales ou centennales. L'influence de la présence de haies sur l'érosion se fait principalement ressentir pour des pluies intenses, de courte durée.

	Différence sur l'érosion brute Sans Haies/Avec Haies (en tonnes)			
	P<5 ans 2 h	P ₁₀ ans 24h	P ₂₅₋₃₀ ans 3h	P ₁₀₀ ans 24h
Chemins	-2.1	-2.7	-17.6	-2.7
Canne à sucre	-0.9	-45.2	-97.5	-45.2
Canne coupée	-0.5	-26.3	-72.9	-26.3
Verger	0.0	0.0	-1.5	0.0
Maraichage	-0.7	-0.5	-11.4	-0.5
Prairie	0.0	0.0	0.0	0.0
Jachère	-0.1	0.0	-0.1	0.0
Forêt	0.0	-4.9	-10.1	-4.9
Lande/Savane	-0.6	-0.6	-7.0	-0.6
Chantiers (valo foncière)	0.0	0.0	-0.6	0.0
TOTAL	-4.8	-80.2	-218.8	-80.2

Tableau 7 – Différence sur l'érosion brute (érosion concentrée + érosion diffuse) liée à l'implantation de haies selon la classe d'occupation des sols et pour les différentes pluies de projet.

Ces résultats suggèrent toutefois que cette solution, mise en œuvre seule, aura des impacts relativement faibles sur les problèmes d'érosion des sols à l'échelle du bassin versant. Elle doit donc être mise en œuvre en complément d'autres mesures compensatoires.

4.3. RESEAU D'EVACUATION D'EAU PLUVIALE

Une problématique mise en avant par le diagnostic agricole concerne l'absence d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales (réseau EP) efficient, notamment dans la partie haute du bassin versant. Lorsqu'il existe, le réseau apparaît mal entretenu avec des ouvrages le plus souvent bouchés (terre/embâcles) et qui ne jouent plus leur rôle. Les eaux de ruissellement s'écoulent alors soit le long des chemins (bétonnés ou en terre), soit sur les terrains agricoles. L'absence de réseau d'évacuation des eaux pluviales tend à favoriser les problèmes de ravinement, notamment au droit des chemins agricoles en terre implantés droits dans la pente.

La mise en place d'un réseau correctement dimensionné et entretenu permettrait de canaliser les écoulements, en renvoyant régulièrement les eaux en direction des ravines avant qu'elles ne se chargent en terrigènes.

Sur la base des désordres constatés par le bureau d'étude lors du diagnostic agricole, nous avons modélisé les bénéfices associés à l'implantation d'un réseau EP efficient, dans les Hauts du

bassin versant (> 800m) mais également dans le secteur à mi-pente cultivé en canne à sucre (Figure 21). Pour ce faire, nous avons :

- (1) « Forcé » les axes de ruissellement sur le bassin versant afin que ceux-ci empruntent les ouvrages EP existants mais actuellement inopérants (notamment grilles) ;
- (2) Simulé la présence d'un réseau EP théorique (simples fossés/caniveaux en bordure de chemin) rejetant régulièrement les eaux de ruissellement dans les ravines, dans les secteurs où ce réseau est inexistant aujourd'hui. Cela concerne notamment les bordures de chemins agricoles (bétonnés ou en terre). Le réseau théorique a été établi sur la base des résultats des simulations de l'état actuel. La carte de ruissellement a été analysée et le réseau construit a eu pour vocation :
 - a. De réduire au maximum les grandes longueurs d'écoulement sur les pentes avec un rejet régulier des eaux collectées vers la ravine la plus proche ;
 - b. À limiter le ruissellement de l'eau au travers des parcelles agricoles cultivées en forçant l'eau à emprunter un fossé simulé en bordure de chemin.

Les résultats des simulations sont éloquentes et montrent les bénéfices apportés par la présence d'un réseau correctement dimensionné pour l'écoulement des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant.

A titre d'exemple, les figures 22 et 23 illustrent les résultats obtenus au droit d'une parcelle de canne située à l'aval de la RD3 (Pente Maingard) dans une zone de pente moyenne de 20-25° (pluie simulée = pluie décennale sur 24h). Cette parcelle est située en rive gauche de la Petite ravine, affluente de la Ravine du Cap. Les simulations montrent la présence d'un axe de ruissellement important qui traverse la parcelle, droit dans la pente (Figure 21). Cet axe, dont la présence est attestée par les photos aériennes, se jette dans la ravine en aval de la parcelle. Plusieurs chemins agricoles (référencés dans la BD Topo), non bétonnés, sillonnent la parcelle. La simulation d'un réseau EP théorique établi en bordure de ces chemins et rejetant régulièrement les eaux collectées en direction de la ravine montre une réduction drastique de la quantité d'eau qui s'écoule sur la parcelle (Figure 22). La diminution du ruissellement sur la parcelle cultivée réduit également l'érosion des terrains à ce niveau. La figure 23 montre qu'en l'état actuel, l'érosion concentrée le long de l'axe de ruissellement est extrêmement forte. En revanche, la présence d'un réseau EP théorique contribue à réduire significativement l'érosion au droit de la parcelle

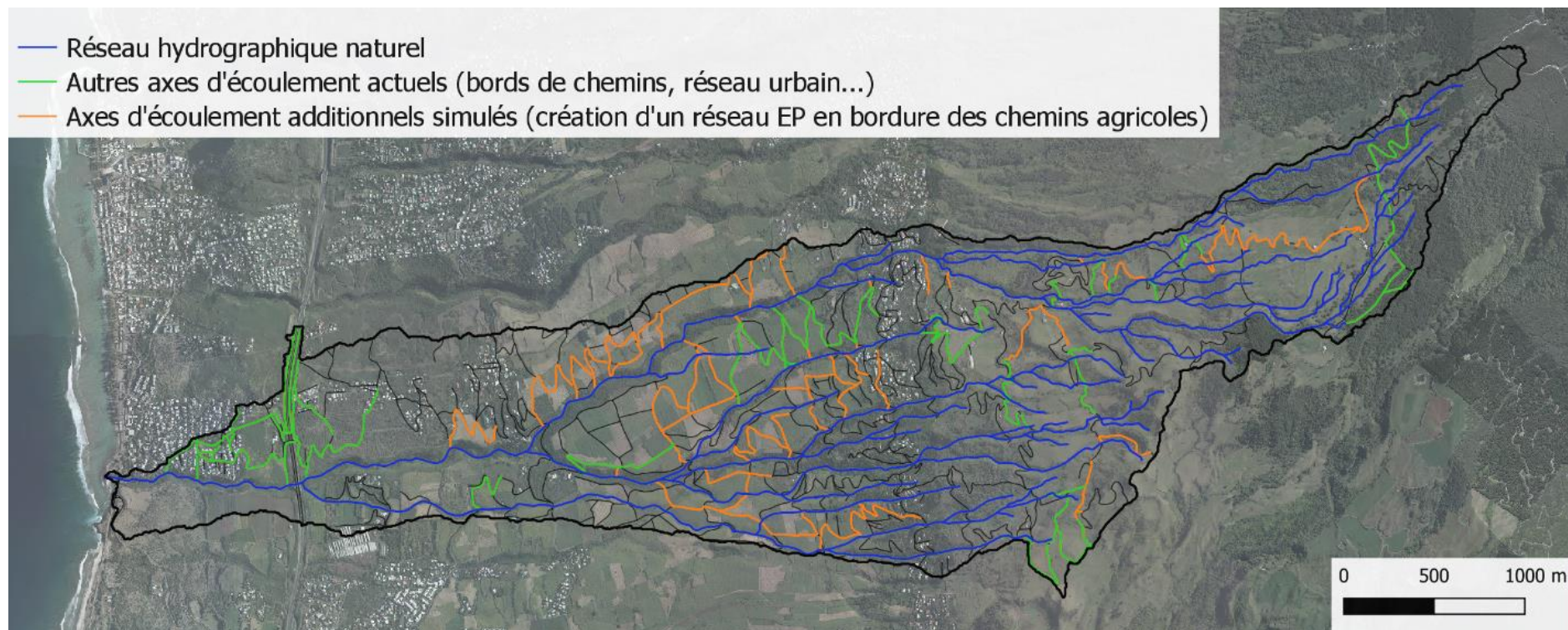


Figure 21 – Cartographie des axes d'écoulement actuels et simulés. Dans les secteurs agricoles, la très grande majorité des écoulements actuels (en vert) se fait au droit des chemins, sans réseau de collecte et d'évacuation efficient. Dans les bas, dans les secteurs urbanisés, les écoulements se font dans un réseau urbain complexe dense (fossés, grilles avaloir, dalots couverts...).

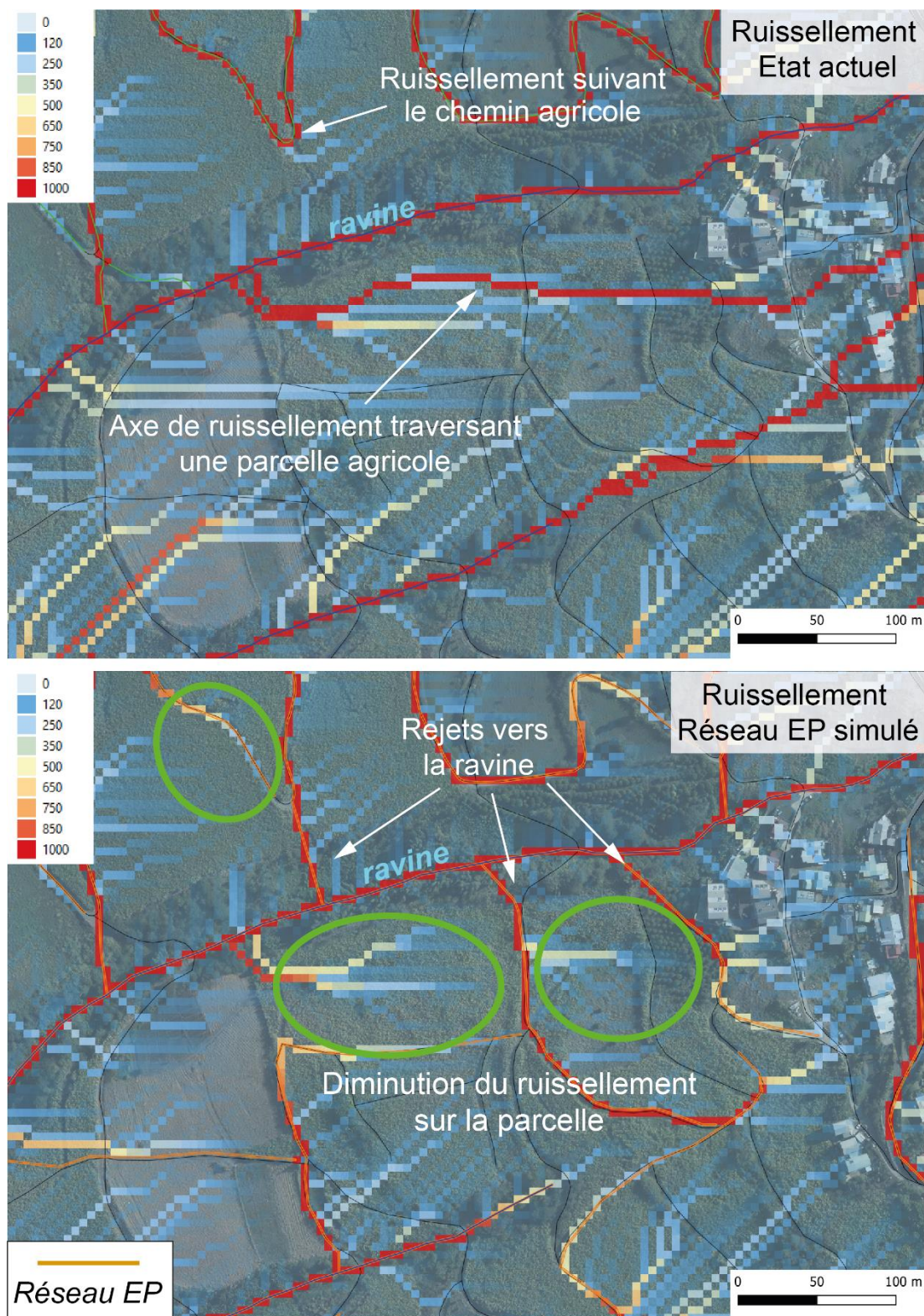


Figure 22 – Comparaison du ruissellement (m^3) au droit d'une parcelle agricole (canne) en aval de la RD3 à l'état initial (actuel) et en présence d'un réseau EP théorique bordant les chemins agricoles. La présence du réseau (fossé) diminue drastiquement l'écoulement des eaux au travers de la parcelle et le rejet régulier des eaux collectées dans la ravine adjacente limite les vitesses d'écoulement et les risques de débordement.

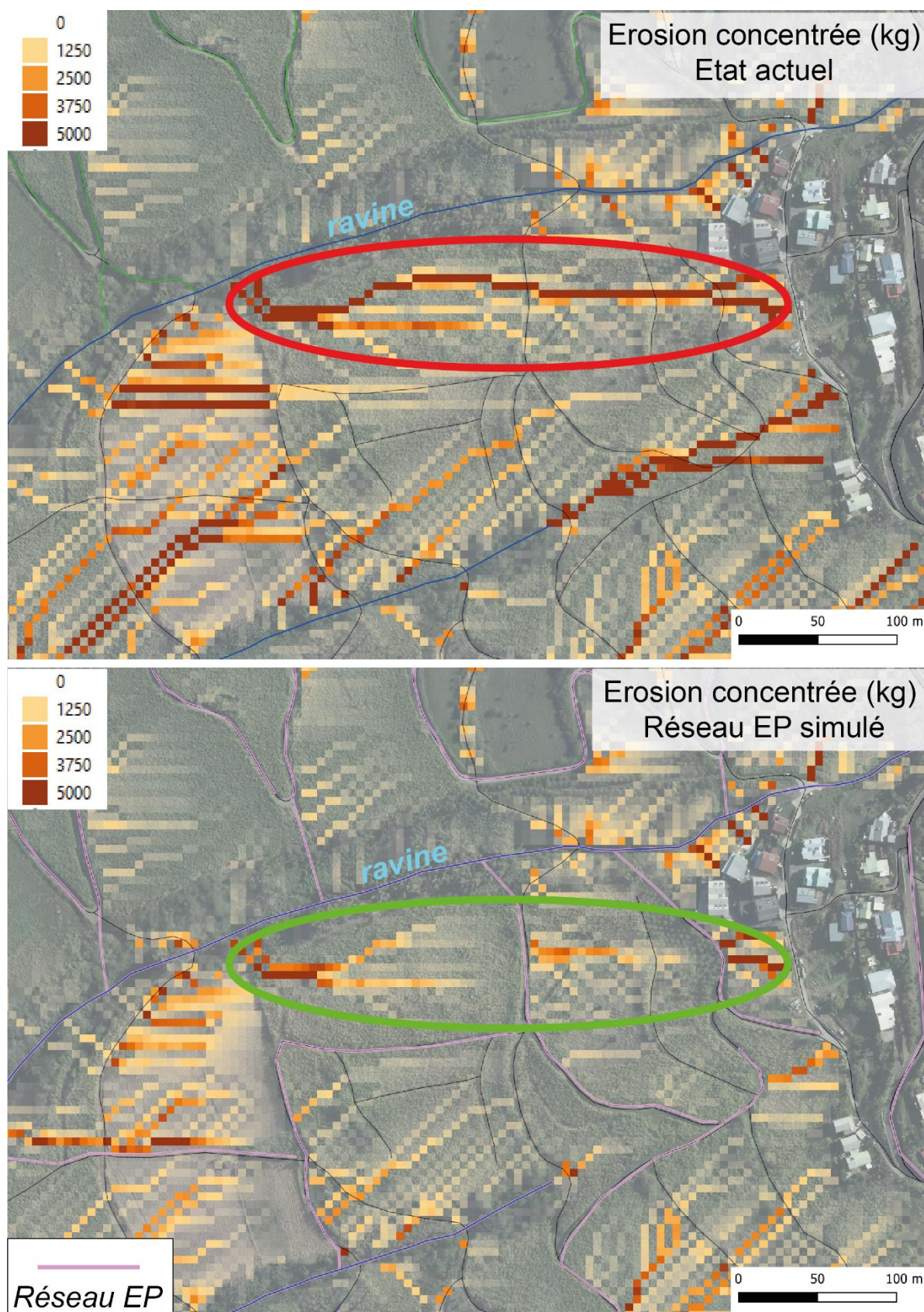


Figure 23 – Comparaison de l'érosion concentrée au droit de la même parcelle entre l'état initial (actuel) et en présence d'un réseau EP théorique en bordure de chemin agricole. L'érosion sur les terrains agricoles cultivés est fortement réduite.

Des simulations ont été réalisées à l'échelle du bassin versant pour l'ensemble des pluies de projets modélisées à l'état initial. La carte suivante (Figure 24) illustre les abattements observés sur l'érosion concentrée (ravinement) en présence d'un réseau EP. Elle montre l'importance du réseau installé au droit des chemins d'exploitation dans la réduction du ravinement au droit des parcelles agricoles, en particulier dans la zone d'altitude intermédiaire cultivée en canne à sucre.

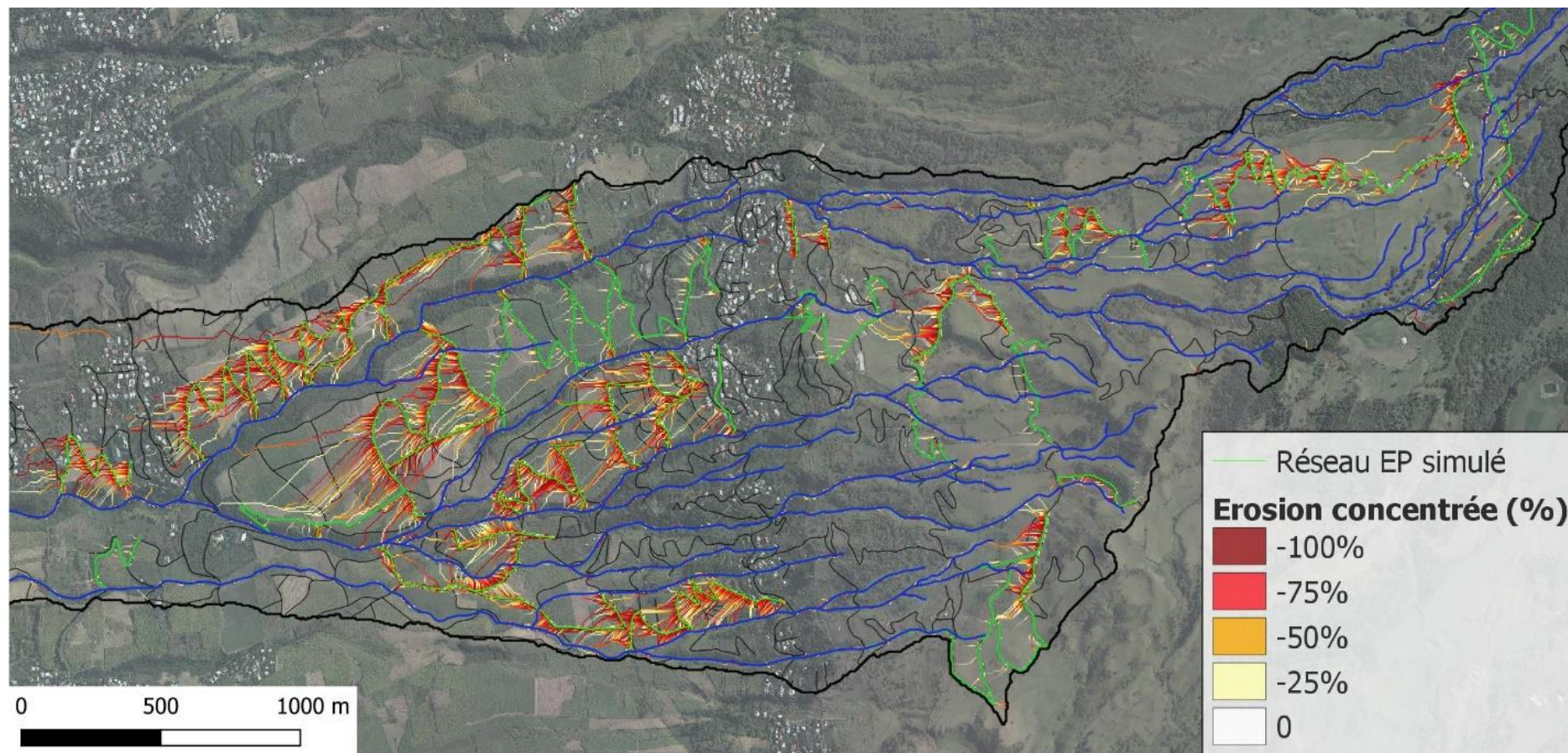


Figure 24 – Abattement modélisés sur l'érosion concentrée (i.e. le ravinement) en présence d'un réseau EP au niveau des chemin d'exploitation agricole (pluie modélisée = pluie décennale 24h).

Les tableaux ci-dessous synthétisent les résultats obtenus (Tableau 8) et les abattements atteints à l'exutoire (Tableau 9) pour :

- Le débit de crue maximum (m^3/s) ;
- La quantité de matière en suspension (MES) ;
- La quantité de sédiments transités (tonnes).

Exutoire Ravine du Cap <i>Résultats des simulations</i> <i>Réseau EP théorique</i>	Débit crue maximum (m^3/s)	MES (g/)	Flux sédimentaire (tonnes)
Pluie PR < 5 ans - 2h	1.86	0.1	2.79
Pluie PR 10 ans - 24h	44	30.3	44 667
Pluie PR 10-25 ans - 4h - Sols "saturés"	73.3	17.1	13 653
Pluie PR 25-30 ans - 3h	89.1	15	11 221
Pluie PR 100 ans - 24h	110.8	71	240 571

Tableau 8 – Résultats des simulations à l'exutoire pour les différentes pluies de projet en présence d'un réseau EP théorique sur les secteurs agricoles du bassin versant de la Ravine du Cap.

Exutoire Ravine du Cap <i>Abattements liés à la</i> <i>présence d'un réseau EP</i>	Débit crue maximum (m^3/s)	MES (g/)	Flux sédimentaire (tonnes)
Pluie PR < 5 ans - 2h	+ 65%	-64.4%	-56.5%
Pluie PR 10 ans - 24h	+ 7.9%	-43.6%	-45.7%
Pluie PR 10-25 ans - 4h - sols "saturés"	+ 18.2%	-44.8%	-47.5%
Pluie PR 25-30 ans - 3h	+ 20.4%	-48.8%	-51.5%
Pluie PR 100 ans - 24h	+ 5.4%	-39.8%	-42.6%

Tableau 9 – Abattements observés (%) à l'exutoire entre l'état initial (état actuel) et en présence d'un réseau EP théorique.

La présence d'un réseau de collecte et d'évacuation des eaux pluviales tend à augmenter le débit de crue maximal à l'exutoire de la Ravine. Ce résultat est cohérent puisque le réseau rejette régulièrement les eaux collectées vers la ravine et ses affluents et que la rugosité est diminuée par la présence d'un réseau EP bétonné. L'infiltration est donc légèrement moindre à l'échelle du bassin versant, ce qui se traduit par une augmentation du débit final en sortie de ravine. L'augmentation atteint près de 65% pour des petites pluies mais le débit étant inférieur à $2\text{m}^3/\text{s}$, les conséquences d'une telle augmentation sont très limitées. Pour des pluies courtes mais intenses (P25-30 ans – 3h ou pluie type Fakir), l'augmentation peut atteindre 18-20%, correspondant à une hausse significative compte tenu des débits initiaux pour ces événements.

Néanmoins, on observe que la quantité de matières en suspension et de sédiments transités à l'exutoire est réduite de manière extrêmement importante, quel que soit le scénario de pluie.

Pour des pluies de période de retour supérieure à 5 ans, la diminution en MES dans les eaux rejetées au lagon est estimée entre 40 et 65%. L'apport sédimentaire est réduit des mêmes ordres de grandeur.

Ainsi, les simulations suggèrent que l'existence d'un réseau de collecte et d'évacuation des eaux pluviales adapté dans les secteurs agricoles du bassin versant, tend à limiter très fortement les apports terrigènes dans le lagon. Il s'agirait même de la mesure la plus efficace pour réduire l'érosion des terrains agricoles parmi les trois solutions envisagées par notre étude. Les volumes d'eau douce apportés à l'exutoire sont plus importants mais cette eau est plus claire, moins turbide du fait de la réduction des apports sédimentaires.

L'analyse des abattements en fonction du type d'occupation des sols, résumée dans le Tableau 10 ci-dessous, montre que le réseau théorique simulé dans les modèles a une influence très forte sur l'érosion dans les secteurs cultivés en canne à sucre. **La diminution de l'érosion brute atteint près de 60% dans ces secteurs.** Les zones cannières sont sillonnées de très nombreux chemins agricoles (terre ou béton), le long desquels il est possible de mettre en place un linéaire de réseau conséquent, ce qui explique de tels abattements.

Tous types d'occupation des sols confondus, l'abattement modélisé sur l'érosion brute totale atteint 40% environ pour les différents scénarii de pluie.

	Variation de l'érosion brute (%) avec optimisation du réseau EP				
Occupation du sol	P1-5 50mm 2h	P10 24h	P10-25 4h	P25-30 3h	P100 24h
Bâti	0%	0%	0%	0%	0%
Route	-14.0%	-16.4%	-15.0%	-13.0%	-15.8%
Chemin	-12.8%	-26.9%	-27.4%	-28.5%	-26.6%
Espace artificialisé	0%	-0.2%	-0.2%	-0.2%	-0.2%
Canne	-81.7%	-59.4%	-58.0%	-58.0%	-58.1%
Canne coupée	-60.8%	-68.0%	-66.4%	-64.5%	-66.7%
Vergers	-44.6%	-43.7%	-41.4%	-38.6%	-41.7%
Maraichage	-38.6%	-25.9%	-25.1%	-23.2%	-25.4%
Prairie	-45.2%	-15.3%	-15.5%	-17.9%	-15.0%
Jachère	-36.5%	-14.1%	-14.4%	-20.8%	-13.8%
Forêt	-84.5%	-42.8%	-41.8%	-40.3%	-41.6%
Lande Savane	-28.6%	-43.1%	-40.9%	-37.6%	-40.8%
Surf en eau	0%	0%	0%	0%	0%
Espace vert non agri	0%	-0.4%	-0.4%	-0.4%	-0.4%
Réseau hydro	0%	0%	0%	0%	0%
Chantier	-34.0%	-5.2%	-5.9%	-6.7%	-5.2%
TOTAL	-44.7%	-40.8%	-40.4%	-43.3%	-39.8%

Tableau 10 – Abattements modélisés sur l'érosion brute (érosion concentrée + érosion diffuse) en présence d'un réseau EP optimisé, en fonction du type d'occupation des sols.

Il est important de noter que le réseau modélisé correspond à un réseau théorique et idéalisé sur l'ensemble du bassin versant. La création effective d'un tel linéaire de réseau est probablement illusoire au vu des coûts de travaux et d'entretien nécessaires. Néanmoins, les modèles réalisés montrent que ce type de solution est extrêmement efficace pour limiter les processus d'érosion en domaine agricole. Il semble donc intéressant de mener dès à présent une réflexion sur les possibilités de création d'un réseau de collecte et d'évacuation, bien dimensionné et correctement entretenu, en priorisant dans un premier temps sur les secteurs les plus sensibles identifiés par les modèles (axes de ruissellement principaux et zones d'érosion concentrée).

4.4. PRIORISATION DE MISE EN OEUVRE

Il semble évident que la mise en œuvre couplée des différentes solutions proposées ci-dessous contribuera à une meilleure efficacité en cumulant leurs effets bénéfiques.

Nous avons vu que la mise en place de haies aux limites de parcelles semble avoir un effet relativement limité sur l'érosion à l'échelle du bassin versant. Il s'agit néanmoins d'une mesure aisée à mettre en œuvre et qui s'inscrit en complément des autres solutions, notamment de l'installation d'un réseau EP afin de limiter les transferts de sédiment de la parcelle vers le réseau (réduction de l'entretien nécessaire).

L'entretien du réseau de collecte des eaux pluviales existant (curage des grilles/buses bouchées notamment) et la création d'un réseau dans les secteurs agricoles les plus touchés par le ravinement semblent des mesures indispensables à réaliser dans l'avenir proche. La revégétalisation des axes de ravines actuellement occupés par les cultures maraîchères et vivrières est également une mesure essentielle pour éviter les départs de matériaux terrigènes qui contribuent (1) à appauvrir le sol sur place et (2) dégrader le récif corallien à l'aval.

La réalisation du réseau de collecte devra faire l'objet d'études hydrauliques et de dimensionnement spécifiques afin que celui-ci soit le plus efficace et pérenne possible. Les résultats de la modélisation présentés dans cette étude pourront être utilisés pour identifier les secteurs les plus sensibles et ainsi prioriser les travaux.

Le reboisement, le ré-enherbement et/ou la couverture permanente des parcelles maraîchères dans les Hauts du bassin versant est recommandée par tous les travaux relatifs à la lutte contre l'érosion depuis le début des années 90 (Raunet, 1991, Perret 1992, Chabanne, 2003, Hebert, 2006...). Cette stratégie de revégétalisation devra être réalisée de manière concertée avec le monde agricole (implication des GIEE notamment et des exploitants agricoles éventuellement non affiliés aux groupements). L'arrêt complet du maraîchage dans les axes des ravines semble toutefois indispensable (priorité de reboisement 1 voire 2). Une solution de couverture permanente dans les cultures situées hors des axes d'écoulement mais concernées par des fortes pentes (tel que proposé par le diagnostic agricole et les études antérieures du Cirad) pourra également être mise en œuvre, afin de limiter l'impact économique et social sur les exploitants agricoles que pourrait engendrer un arrêt total de l'activité. Une telle mesure devra cependant faire l'objet d'une formation spécifique des exploitants concernés et d'un suivi dans le temps afin de vérifier sa bonne réalisation.

5. Conclusion

Le bassin versant de la Ravine du Cap sur la commune de Saint-Leu est régulièrement affecté par des phénomènes de coulées de boue qui viennent se déverser dans le lagon lors des épisodes cycloniques ou de fortes pluies. Les arrivées terrigènes massives dans le lagon sont à l'origine d'une dégradation très importante du récif, associé à une forte mortalité des populations de coraux. L'étude de diagnostic menée en 2019-2020 sur ce bassin versant a montré une forte problématique d'érosion au niveau des cultures maraichères des Hauts (> 800 m), implantées dans un secteur aux pentes fortes. L'impact des sols nus en général (rotation des cultures, travaux de valorisation foncière, chemins agricoles en terre) et de l'urbanisation grandissante sur le bassin versant a également été mis en avant. Afin d'évaluer avec plus de précision les phénomènes d'érosion et de ruissellement sur le bassin versant, ainsi que la contribution des différents modes d'occupation du sol à ces processus, une approche par modélisation numérique a été réalisée. Utilisant le modèle expert WaterSed développé par le BRGM, l'étude a également eu pour objectif de quantifier les abattements attendus sur l'érosion par la mise en œuvre de solutions de remédiation.

Les résultats confirment l'importante contribution des zones maraichères des Hauts dans la production de terrigènes, en particulier lors de phénomènes pluvieux d'intensité importante. Les zones cannières, notamment en période de récolte ou de rotation des cultures sont génératrices de terre dans une moindre mesure mais leur grande superficie à l'échelle du bassin versant en fait des producteurs notables de terres. Pour les pluies de moindre intensité, il a été remarqué le rôle dominant des chemins d'exploitation agricoles en terre, généralement implantés droits dans la pente et dépourvus de réseau de collecte des eaux de ruissellement.

La problématique de l'érosion dans les Hauts de l'Ouest de La Réunion est connue depuis longtemps. Depuis plus de 30 ans, plusieurs études, menées notamment par le CIRAD, ont fait le constat d'une agriculture inadaptée aux conditions topographiques et pédologiques dans ces secteurs. Des solutions de lutte contre l'érosion ont été fréquemment proposées. Aujourd'hui, en l'absence de réelle mise en œuvre pérenne, les problèmes relatifs à l'érosion des sols se font de plus en plus prégnants et visibles (coulées de boues, inondations, submersion de radiers, dégâts sur les infrastructures, pollution du lagon ...).

Une nouvelle dynamique est toutefois en train d'émerger afin d'apporter des réponses concrètes et durables. Le diagnostic agricole mené par le Département de la Réunion dans les Hauts du bassin versant de la Ravine du Cap, l'implication des différents acteurs du monde agricole (GIEE, Chambre d'Agriculture, DAAF...) et la présente étude témoignent de cette volonté concertée entre les services de l'Etat, les collectivités et les agriculteurs de remédier à la situation.

Dans cette étude, nous avons analysé trois solutions de remédiation principales : la revégétalisation partielle à complète des parcelles maraichères des Hauts, l'implantation de haies à la limite des parcelles de champs de canne et la réalisation d'un réseau de collecte et d'évacuation d'eau pluvial optimisé. Les solutions « revégétalisation » et « réseau EP » semblent particulièrement efficaces pour réduire les phénomènes de ravinement et d'érosion et les apports sédimentaires au lagon. Les abattements sur l'érosion peuvent atteindre jusqu'à 40%. L'implantation de haies a un impact limité à l'exutoire dans la mesure où ces aménagements n'ont pas été déployés sur l'ensemble du bassin versant. En revanche, sur les secteurs aménagés, une importante réduction de l'érosion à la parcelle est constatée.

L'intérêt de la modélisation distribuée utilisée dans cette étude est de pouvoir établir un bilan des exports sédimentaires au lagon, identifier et hiérarchiser les sources de l'érosion des sols et enfin tester l'efficacité des mesures recommandées. La mise en œuvre de ces mesures nécessitera

des réflexions et concertations préparatoires ainsi que des précisions à l'échelle de la parcelle mais reste parfaitement envisageable dans un futur proche si les moyens humains et financiers adaptés sont mis en œuvre pour poursuivre la dynamique engagée. De nouvelles modélisations pourront alors être menées afin d'accompagner les acteurs impliqués dans les choix de solutions à mettre concrètement en œuvre et hiérarchiser voire dimensionner les mesures retenues. De scénarii complémentaires pourront également être proposés en fonction des besoins.

Le bassin versant de la Ravine du Cap pourra alors être considéré comme le territoire test à La Réunion pour la mise en œuvre de stratégies de lutte contre l'érosion, lesquelles pourront ensuite être déclinées et adaptées à l'échelle d'autres territoires sensibles sur l'île.

6. Bibliographie

- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., Le Bissonnais, Y. (2002). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena*, 46, 189–205.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Saby, N. (2002). Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes*, 16, 3215-3226.
- Chabanne, A. (2003) – Les systèmes de culture avec couverture végétale pour les Hauts de La Réunion. Synthèse et bilan de l'opération AD101 du PADEF - CIRAD, 103p.
- Chaput M. (2020) – Caractérisation des ruissellements à l'origine des inondations et des arrivées terrigènes dans le lagon de Saint-Leu – Diagnostic. Rapport BRGM/RP-69428-FR, 63p., 37 fig., 12 tabl.
- CIRAD (1988) - Les andosols de La Réunion. Préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires, 231p.
- Desprats J.F, et al. (2017) – Projet LESELAM (Lutte contre l'Erosion des Sols et l'Envasement du Lagon à Mayotte). Rapport d'avancement n°3 – Décembre 2017 BRGM/RP-67392-FR, 91 pages, 67 illustrations.
- Desprats J.F. et al. (2019) – Projet LESELAM 2 (Lutte contre l'Erosion des Sols et l'Envasement du Lagon de Mayotte). Rapport d'avancement n°2 – Décembre 2019 BRGM/RP-69441-FR
- HEBERT, A. (2006) – Rénovation du Plan d'Aménagement des Hauts - Action Concertée de Lutte contre l'Erosion des Sols (ACLES). Pour une gestion durable de l'eau et des sols dans les bassins versants, 179 p.
- Hydretudes (2021) – Gestion des écoulements pluviaux de la zone agricole et naturelle autour de la ravine du Cap et au-delà des 800 mètres d'altitude. Etude Diagnostic. Phase 3 – Détermination des mesures à mettre en œuvre pour limiter le phénomène d'érosion sur le secteur de la ravine du Cap. RE20-017, version 1.0. Département de La Réunion, 61p.
- Jager, C. (2004) – Approche technique des ruissellements urbains en amont des récifs coralliens de La Réunion. Mémoire de DESS Sciences et Gestion de l'Environnement Tropical, 108p.
- Landemaine, V. (2016) - Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de doctorat. Université de Rouen-Normandie.
- Nicet, J.B. (2017) - Analyse de l'impact potentiel sur le milieu récifal de l'écoulement de la ravine du cap (Saint-Leu) du 07 au 09 avril 2017, Note technique MAREX, 41p.
- Perret, S. (1992) – Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques. Thèse de Doctorat – Génie agronomique et Mécanisation CIRAD, 306 p.
- Raunet, M. (1991) - Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion, CIRAD et Région Réunion, 438p.
- Sartori, A., Hawkins, R.H., and Genovez, A.M. (2011) – Reference Curve Numbers and Behavior for Sugarcane on Highly Weathered Tropical Soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 705, doi : 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000354.



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

Direction régionale de La Réunion
5 Rue Sainte Anne
CS 51016
974040 – Saint-Denis Cedex
Tél. : 02 62 21 76 68